

*Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco*

*Facultad de Ingeniería*



## **EMPLEO DE UN LIGNOSULFONATO DE CALCIO COMO ESTABILIZANTE EN UN SUELO EXPANSIVO LOCAL**

Tesis doctoral de

**SANDRA GRACIELA ORLANDI**

Aprobada por la  
Facultad de Ingeniería de la  
Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco  
para el otorgamiento del grado académico de

**DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

*Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco*

*Facultad de Ingeniería*



## **EMPLEO DE UN LIGNOSULFONATO DE CALCIO COMO ESTABILIZANTE EN UN SUELO EXPANSIVO LOCAL**

Tesis doctoral de

**SANDRA GRACIELA ORLANDI**

Aprobada por la  
Facultad de Ingeniería de la  
Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco  
para el otorgamiento del grado académico de

**DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

Dirección de tesis: Prof. Diego Guillermo Manzanal  
Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco

Jurado de tesis: Prof. Adriana Pajares  
Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco  
Prof. Jean-Michel Pereira  
CNRS - École des Ponts ParisTech – Univ. Gustave Eiffel  
Prof. Juan José Clariá  
Universidad Nacional de Córdoba

Fecha de defensa: 21 de diciembre de 2021



## **RESUMEN**

### **EMPLEO DE UN LIGNOSULFONATO DE CALCIO COMO ESTABILIZANTE EN UN SUELO EXPANSIVO LOCAL**

En la ciudad patagónica Comodoro Rivadavia, Argentina, tres estratos cercanos entre sí pertenecientes a las formaciones Sarmiento y Chenque, han sido clasificados como de potencial de expansión alto a muy alto. En diferentes sectores y dependiendo de la topografía, estos estratos forman parte del suelo de cimentación de diferentes obras civiles. Estas obras civiles cimentadas o cercanas a estos estratos presentan patologías de difícil y costosa remediación.

Para evitar que se produzcan estas patologías es necesario identificar la presencia de estos suelos en la etapa de exploración geotécnica, para luego diseñar un sistema de cimentación adecuado, reemplazar el suelo de cimentación o tratarlo. El tratamiento de un suelo de características expansivas implica la intervención con un agente que modifique sus propiedades expansivas, relacionadas directamente con el potencial de expansión y la presión de hinchamiento. Estos dos parámetros ofrecen un recurso rápido para evaluar la peligrosidad de los suelos y definir el posible grupo de soluciones función del tipo de obra civil.

Los agentes estabilizantes más empleados y de los cuales se cuenta con más información son la cal y el cemento. Ambos aditivos generan un importante impacto sobre el medioambiente tanto por su huella de carbono como por su efecto sobre la vegetación y los seres vivos. Esto ha dirigido a los investigadores en la búsqueda de bioaditivos residuos de industrias y con menor impacto sobre el medioambiente. Dentro de la búsqueda, las ligninas y los lignosulfonatos, ambos residuos orgánicos productos de la industria de la pasta de papel, papeleras y derivados de ellas, surgieron como posibles reemplazos.

Para validar el empleo de un lignosulfonato de calcio mezclado con un suelo expansivo seleccionado local es necesario caracterizar el suelo y el bioaditivo, así como evaluar los cambios en el comportamiento mecánico, hidráulico y microestructural de mezclas suelo-aditivo. Dentro del estudio fueron incorporadas dos variables, el porcentaje de aditivo y la edad de las muestras, junto con el análisis toxicológico de los lixiviados.

La caracterización del suelo y el bioaditivo acompañada de los estudios microestructurales permitirán entender la mecánica desarrollada en la estabilización de las mezclas. En este grupo se encuentran ensayos que permiten determinar el pH, contenido de

sales, granulometría, composición mineralógica, capacidad de intercambio catiónico, potencial zeta, difracción por rayos X, superficie específica, contenido de materia orgánica.

El comportamiento mecánico será evaluado por medio de ensayos de expansión libre, compresión simple, determinación de la presión de hinchamiento por diferentes métodos directos e indirectos (edómetro, edómetro siguiendo procedimiento ASTM, hinchamiento restringido, volumen constante con registro de presiones empleando celda de carga y aro dinamométrico), ensayo triaxial consolidado no drenado. Los ensayos de compresión simple son realizados para seis edades diferentes de las mezclas, logrando de este modo un análisis completo de la evolución de la resistencia tanto en función del porcentaje de aditivo como del tiempo.

El comportamiento hidráulico de las mezclas evaluado por medio de ensayos de permeabilidad, curvas de retención (técnica de papel de filtro y WP4), porosimetrías (BET y MIP) muestran los cambios producidos en el tamaño de poros, superficie específica, volumen de poros, distribución bimodal de la porosidad.

Finalmente en cuanto la microestructura estudiada mediante la realización de ensayos de difracción por rayos X y microscopía de barrido electrónico, se valida la información obtenida por medio de la evaluación del comportamiento mecánico e hidráulico.

La evaluación del impacto medioambiental permite considerar un factor sumamente importante no considerado por otros investigadores. Con este fin, dos tipos de muestras fueron evaluadas: aditivo disuelto en agua destilada preparado en diferentes proporciones y muestras de lixiviados obtenidos de los ensayos triaxiales preparadas en diferentes proporciones diluidas en agua destilada.

Con toda esta información compilada se demostrará la eficacia de la adición de 10% de lignosulfonato de calcio, su eficiencia en función del porcentaje de aditivo empleado, la perdurabilidad de las propiedades en el período de un año, los mecanismos de estabilización movilizados y su impacto sobre el medioambiente.

## **ABSTRACT**

### **USING A CALCIUM LIGNOSULFONATE AS A STABILIZER IN LOCAL EXPANSIVE SOIL**

In the Patagonian city of Comodoro Rivadavia, Argentina, three strata close to each other belonging to the Sarmiento and Chenque formations have been classified as having high to very high expansion potential. In different sectors of the city and depending on the topography, these strata are part of the foundation soil of different civil works. These civil works founded on or near these strata present pathologies that are difficult and costly to remediate.

The identification of these expansive soils during geotechnical exploration stage, design an adequate foundation system, replace the foundation soil, or treat it could prevent the occurrence of these pathologies. The treatment of expansive soils implies the intervention with an agent that modifies its behavior, directly related to the expansion potential and swelling pressure. These two parameters offer a quick resource to evaluate the dangerousness of soils and to define the possible group of solutions according to the type of civil works.

The most commonly used stabilizing agents for which more information is available are lime and cement. Both additives have a significant impact on the environment in terms of their carbon footprint and their effect on vegetation and living beings. This has led researchers to search for bioadditives that are industrial waste and have less impact on the environment. Within the search, lignins and lignosulfonates, both organic waste products of the pulp and paper industry and derivatives thereof, emerged as possible replacements.

The study of a calcium lignosulfonate as agent to treat an expansive soil includes the characterization of the soil and the bioadditive and evaluation of the changes in the mechanical, hydraulic, and microstructural behavior of soil-additive mixtures. Two variables were incorporated into the study: the percentage of additive and the age of the samples and the toxicological analysis of the leachates.

The characterization of the soil and the bioadditive, together with the microstructural studies, will allow understanding the mechanics developed in the stabilization of the mixtures. This group includes tests to determine the pH, salt content, granulometry, mineralogical composition, cation exchange capacity, zeta potential, X-ray diffraction, specific surface area, organic matter content, and the mechanical behavior of the soil.

The mechanical behavior will be evaluated through free expansion tests, simple compression, determination of the swelling pressure by different direct and indirect methods (oedometer, oedometer following ASTM procedure, restricted swelling, constant volume test),

undrained consolidated triaxial test. Simple compression tests are performed for six different ages of the mixes, thus achieving a complete analysis of the evolution of strength as a function of both additive percentage and time.

The hydraulic behavior of the mixtures evaluated using permeability tests, retention curves (filter paper technique and WP4), porosimetry (BET and MIP) show the changes produced in pore size, specific surface area, pore volume, bimodal porosity distribution.

Finally, the microstructure studied by X-ray diffraction, and scanning electron microscopy tests validate the previously obtained information.

The environmental impact evaluation allows us to consider a significant factor not considered by other researchers. To this end, two types of samples were evaluated: additive dissolved in distilled water prepared in different proportions and leachate samples obtained from the triaxial tests prepared in different proportions diluted in distilled water.

With all this information compiled, it will be possible to demonstrate the effectiveness of calcium lignosulfonate, its efficiency as a function of the percentage of additive used, the durability of the properties over time, the stabilization mechanisms mobilized and its impact on the environment.

## **AGRADECIMIENTOS**

Dr. Diego Manzanal, por el acompañamiento, la paciencia y la cuota extra de confianza que necesité muchas veces.

Dra. Adriana Pajares, directora del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, por el acompañamiento desde el inicio del proceso.

Ing. Alejandra Espelet, directora del DICOC, por el apoyo desde la gestión y desde lo personal.

Ing. Oscar Miura, por el soporte técnico y el espacio físico para realizar los ensayos, LISHA (Laboratorio de Investigación de Suelos, Hormigones y Asfaltos) UNPSJB.

Dr. Luciano Oldecop y Dr. Lucas Garino por la posibilidad de realizar los ensayos en el IDIA (Instituto de Investigaciones Antisísmicas) y su acompañamiento durante la estancia, Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

Dr. Jean-Michel Pereira e Ing. Juan Cruz Barría por la posibilidad de realizar ensayos en la École Nationale Paris (ENPC), Francia.

Mag. Adriana Mangani por la coordinación de los ensayos de toxicidad en el Laboratorio de Bioquímica de la Facultad de Ciencias Naturales de la UNPSJB.

Dra. Diana Estenoz, Dra. Teresa Piqué, Dra. Eugenia Taberna, Dra. Yuleni Villada, Dra. Verónica Nicolau, grupo de investigación de polímeros del INTEC y la Universidad Tecnológica Nacional de Córdoba.

Mag. Ing. Marisa Garriga y Dra. Jessica Wainstein, ex y actual secretarias de Investigación y Posgrado por el soporte técnico para llegar a buen término con la tesis, cumpliendo en tiempo y forma con todos los requisitos.

Belén L., Belén R., Darío R., Emiliano C., Ezequiel M., Franco S., Juan Cruz B., Luis C., Manuel A., Marcela A., Marco R., Ricardo V., Rodolfo F., Silvana S., Verena G., mis pasantes - alumnos - compañeros - incipientes investigadores de los últimos diez años.

A Osvaldo, mi esposo, y mis cuatro hijos, Belén, Sofía, David y Lucas, por acompañarme en esta y cada nueva locura, por estar, por los abrazos infinitos, por acompañarme siempre, por levantarme cada vez que el cansancio me lo impidió. Los quiero más de lo que las palabras pueden expresar y más de lo que cabe en mi corazón. Son mi faro en la oscuridad, mi propia Cruz del Sur.

A mis padres que lucharon por darme educación, y quienes me enseñaron que nada se consigue sin esfuerzo.

A Ese Ser Superior por su presencia en las noches y días más difíciles.

**A la vida por darme tanto...**

# EMPLEO DE UN LIGNOSULFONATO DE CALCIO COMO ESTABILIZANTE EN UN SUELO EXPANSIVO LOCAL

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>3</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b>	<b>24</b>
<b>TABLA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS</b>	<b>28</b>
<b>LISTA DE PUBLICACIONES</b>	<b>30</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	
<hr/>	
1.1. Antecedentes del proyecto de investigación: motivación.	32
1.2. Importancia y alcance del problema.	36
1.3. Alcance de la tesis.	43
1.4. Objetivos del estudio.	44
1.5. Plan de investigación: metodología.	45
1.6. Organización de la tesis.	45
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b>	
<hr/>	
2.1. Introducción.	47
2.2. Mineralogía de las arcillas.	48
2.2.1. Comportamiento de los suelos expansivos	48
2.2.2. Minerales del grupo de los silicatos: esmectitas.	48
2.3. Suelos expansivos: identificación y clasificación empleando ensayos básicos.	53
2.3.1. Límites de consistencia.	54
2.3.2. Índice de expansión libre y relación de expansión libre.	58
2.3.3. Evaluación del potencial de hinchamiento por medio del hinchamiento libre.	58
2.3.4. Actividad.	59
2.3.5. Superficie específica.	61
2.4. Suelos expansivos: determinación de la presión de hinchamiento.	63
2.4.1. Método del edómetro.	63
2.4.2. Método del edómetro simple.	64
2.4.3. Método de volumen constante.	65
2.4.4. Método de hinchamiento restringido.	66
2.4.5. Método de deformación cero.	67
2.4.6. Método del doble edómetro.	67
2.4.7. Método directo.	68
2.5. Interacción entre el agua y la arcilla: mecanismos, espesor activo, curva de saturación.	69
2.6. Cimentaciones sobre suelos expansivos.	72
2.6.1. Problemas asociados a las cimentaciones sobre suelos expansivos.	72
2.6.2. Opciones de cimentación sobre suelos expansivos.	72
2.6.3. Técnicas de mejoramiento del suelo.	75

2.7. Empleo de aditivos en el mejoramiento de las propiedades expansivas de un suelo.	76
2.7.1. Cal empleada como estabilizante en suelos expansivos.	77
2.7.2. Cemento empleado como estabilizante en suelos expansivos.	80
2.7.3. Cemento, cal y mezclas empleadas como estabilizantes.	81
2.7.4. Bioaditivos empleados como estabilizantes en suelos expansivos.	82
2.7.5. Empleo de lignina como estabilizante de un suelo expansivo.	85
a) Origen de la lignina	85
b) Lignina empleada como aditivo.	87
2.8. Conclusiones.	88

### **3. MATERIALES EMPLEADOS, PROGRAMA EXPERIMENTAL Y MÉTODOS**

---

3.1. Introducción.	94
3.2. Materiales.	94
3.2.1. Suelos expansivos.	94
3.2.2. Bioaditivos.	95
3.3. Procedimientos y programa experimental.	95
3.3.1. Caracterización de los suelos	95
– Preparación de las muestras.	95
– Ensayo de compactación Harvard miniatura.	96
– Propiedades físicas e índice: granulometría, límites de consistencia, superficie específica.	97
– Composición química: capacidad de intercambio catiónico, pH, contenido de materia orgánica, carbono y nitrógeno.	97
– Identificación mineralógica mediante el empleo de DRX.	98
– Contracción lineal.	98
– Relación de expansión libre e índice de expansión libre.	99
3.3.2. Caracterización de los bioaditivos.	100
3.3.3. Análisis de las interacciones mediante potencial Z y FTIR.	101
3.3.4. Programa experimental sobre mezcla seleccionada.	101
– Introducción.	101
– Preparación de las mezclas	102
– Comportamiento mecánico de las mezclas	104
A. Hinchamiento libre.	104
B. Determinación de la presión de hinchamiento.	106
Método del edómetro.	107
Método de hinchamiento restringido.	108
Método ASTM.	109
Método de volumen constante.	110
C. Ensayo de compresión simple (UCS).	112
D. Ensayo triaxial CU con medición de la presión de poros.	114
– Comportamiento hidráulico de las mezclas.	117
A. Permeabilidad: permeámetro de carga variable.	117
B. Curvas de presión de succión	119
Medición de la succión matricial y total empleando la técnica del papel de filtro.	119
Medición de la succión total con el método de punto de rocío (WP4)	122
Ajuste de la curva de retención empleando Van Genuchten.	123
– Mineralogía y Microestructura de las mezclas.	124
A. Difracción por rayos X (DRX).	125

B.	Microscopía por barrido electrónico (SEM).	125
C.	Porosimetría.	126
	Porosimetría por adsorción de nitrógeno (BET).	127
	Porosimetría por intrusión de mercurio (MIP).	127
–	Impacto ambiental de los lixiviados de las mezclas y el CLS	128
	A. Composición química de los lixiviados, pH.	128
	B. Ensayos de toxicidad con semillas de Lactuca Sativa.	129
3.4.	Conclusiones.	131

#### **4. RESULTADOS**

4.1.	Introducción.	132
4.2.	Caracterización de suelos.	132
4.3.	Evaluación de los bioaditivos y caracterización.	139
4.4.	Comportamiento Mecánico.	146
4.4.1.	Compactación empleando Harvard miniatura.	146
4.4.2.	Hinchamiento libre.	147
4.4.3.	Presión de hinchamiento.	149
a.	Método del edómetro.	150
b.	Método de hinchamiento restringido.	155
c.	Método ASTM.	156
d.	Método de volumen constante.	157
e.	Comparación de presiones obtenidas empleando diferentes técnicas.	158
4.4.4.	Ensayo de compresión simple (UCS).	165
4.4.5.	Ensayo triaxial CU con medición de presión de poros.	172
4.5.	Comportamiento hidráulico.	174
4.5.1.	Permeabilidad: ensayo de carga variable.	174
4.5.2.	Curvas de retención.	176
a.	Método de papel de filtro.	177
b.	WP4 (psicrómetro).	179
4.6.	Mineralogía y microestructura de las mezclas	184
a.	Difracción por rayos X(DRX).	184
b.	Porosimetría por intrusión de mercurio (MIP).	188
c.	Porosimetría por adsorción de nitrógeno (BET).	195
d.	Microscopía de barrido electrónico (SEM).	200
4.7.	Impacto ambiental.	216
a.	Composición química de los lixiviados, pH y sales del suelo.	216
b.	Ensayos de toxicidad empleando semillas de Lactuca Sativa.	220
4.8.	Conclusiones.	222

#### **5. DISCUSIÓN: COMPORTAMIENTO DEL SUELO EXPANSIVO TRATADO CON UN LIGNOSULFONATO DE CALCIO**

5.1.	Introducción	223
5.2.	Selección del porcentaje óptimo de CLS con base en las propiedades mecánicas	223
5.3.	Evaluación de los cambios con base en el comportamiento hidráulico	234
5.4.	Influencia del porcentaje de CLS sobre la microestructura de CRclay	243
5.5.	Influencia de la adición de CLS a CRclay desde el punto de vista toxicológico	251
5.6.	Conclusiones	252

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

6.1. Introducción.	253
6.2. Conclusión.	254
6.3. Recomendaciones.	259
6.4. Recomendaciones para trabajos de investigación futuros	259

<b>REFERENCIAS</b>	<b>262</b>
--------------------	------------

## LISTA DE FIGURAS

### CAPITULO 1

Figura 1.1-	Expansión de una muestra de suelo expansivo al ser sumergida en agua por 24 horas (CRclay).	32
Figura 1.2-	Terrón en condición natural (izq.), terrón totalmente expandido luego de cinco días de inmersión en agua desmineralizada (centro), terrón fisurado luego de dos meses expuesto al aire (FRclay)	33
Figura 1.3-	Bloques inestables consecuencia del avance progresivo en profundidad de grietas de tracción (talud costero Comodoro Rivadavia, -45.850495,-67.474414,17).	33
Figura 1.4-	Formación Sarmiento y Chenque: estratos de CRclay, GAclay y FRclay.	36
Figura 1.5-	Formación Sarmiento y Chenque tomadas desde otro ángulo. En la parte superior pueden observarse grietas de tracción y los depósitos de pie de talud desprendidos del estrato CRclay.	37
Figura 1.6-	Columna estratigráfica e historia geológica (Tomado de Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina, Hoja Geológica 4569-IV Escalante).	38
Figura 1.7-	Perfil estratigráfico esquemático de la Cuenca del Golfo San Jorge (tomado de Paredes, 2002)	39
Figura 1.8-	Sulfato y carbonato de calcio encontrados en formación Chenque.	40
Figura 1.9-	Patologías presentadas en una Iglesia Evangélica construida en 1932 fundada sobre suelos expansivos empleando un sistema de cimentación superficial de época constituido por muros de mampostería ensanchados.	40
Figura 1.10-	Edificio declarado Monumento Histórico Nacional construido en el año 1919 fundado sobre suelos expansivos empleando un sistema de cimentación superficial de época constituido por muros ensanchados de mampostería.	41
Figura 1.11-	Patologías desarrollada en Club Deportivo construido por etapas entre las décadas del 30 y 60, fundado sobre sistemas mixtos de cimentación.	41
Figura 1.12-	Deformaciones diferenciales en subsuelo de Club Deportivo construido entre la década del 30 y el 60, coordenadas -45.841034,-67.476938,19) con contrapisos apoyados directamente sobre un suelo con potencial de expansión muy alto (FRclay) y sistema de cimentación sobre	42
Figura 1.13-	Viga portamuros afectada por el hinchamiento de un suelo (GAclay) de muy alto potencial de expansión (construcción unifamiliar de dos plantas fundada sobre pilotes cortos construida en 2010, -45.871889,-67.521590,19).	42
Figura 1.14-	Sistema empleado para ensanchar la excavación en la punta de la perforación de un pilote.	43
Figura 1.15-	Sistema de cimentación sobre pilotes que incluye vigas portamuros separadas del terreno permitiendo de este modo la expansión, sin afectar las estructuras.	43

## CAPITULO 2

Figura 2.1-	Filosilicato formado por sílice tetraédrica que otorga hábito laminar a los minerales (Mitchell, 1976).	48
Figura 2.2-	Partículas de arcilla montmorillonita (CRclay) tomadas mediante SEM.	49
Figura 2.3-	Partícula de arcilla cargada negativamente, desarrollo de la doble capa difusa (Forbes & Chryss, 2017).	50
Figura 2.4-	Desarrollo de DDL consecuencia de la atracción de moléculas polares de agua hacia la partícula de arcilla cargada negativamente (Diefenderfer, 2002).	51
Figura 2.5-	Estructura de la montmorillonita, mineral del grupo esmectita.	52
Figura 2.6-	Fracción de roca esmectita inmediatamente después de extraída, color amarillo verdoso en estado natural, cota -3.0m.	53
Figura 2.7-	La misma fracción de roca esmectita fuertemente fisurada unos minutos después de expuesta al aire y extraída de la calicata.	53
Figura 2.8-	Representación del “stress path” del ensayo del edómetro (tomado de Fangsheng, 1996, after Fredlung 1995).	64
Figura 2.9-	Representación del “stress path” del ensayo de volumen constante (tomado de Fangsheng, 1996, after Fredlung 1995).	65
Figura 2.10-	Representación del “stress path” del ensayo de hinchamiento restringido (tomado de Fangsheng, 1996, after Fredlung 1995).	66
Figura 2.11-	Representación del “stress paths” del ensayo del doble edómetro (tomado de Fangsheng, 1996, after Jennings and Knigth, 1957).	68
Figura 2.12-	Representación del “stress paths” del método directo (tomado de Fangsheng, 1996, after Jennings and Knigth, 1957).	68
Figura 2.13-	Deformaciones diferenciales producidas en zona de suelos expansivos (GAclay a 1m de profundidad).	74
Figura 2.14-	Deformaciones diferenciales producidas en zona de suelos expansivos (GAclay).	75
Figura 2.15-	Modelo estructural de la lignina de madera aserrada (Tomada de Chávez-Sifontes & Domine, 2013).	86
Figura 2.16	Derivatizaciones de la lignina para darle valor agregado (Tomado de Centro Tecnológico de Aplicación Multisectorial, <a href="http://www.fundacioncetim.com">www.fundacioncetim.com</a> )	87

### CAPITULO 3

Figura 3.1-	Molde y pisón del ensayo de compactación Harvard Miniatura.	96
Figura 3.2-	Probeta típica obtenida mediante la compactación con el molde Harvard Miniatura.	96
Figura 3.3-	Índice de contracción lineal: dispositivo de ensayo	99
Figura 3.4-	Ensayo FSR y FSI en proceso.	100
Figura 3.5-	Verificación de humedad de CRclay y CLS	104
Figura 3.6-	Probetas con diferentes porcentajes de CLS preparadas para ensayos a diferentes edades.	104
Figura 3.7-	Celda edométrica y bancada en la que se realizaron los ensayos de expansión libre.	106
Figura 3.8-	Probeta malograda por sobrepasar el espesor del anillo dentro del que se encontraba posicionada durante el ensayo de expansión libre.	106
Figura 3.9-	Aparato de Lambe con aro dinamométrico: método directo para determinar la presión de hinchamiento.	111
Figura 3.10-	Probeta empleada en el aparato de Lambe para la determinación de la presión de hinchamiento.	111
Figura 3.11-	Probeta posicionada dentro de la cámara para la realización del ensayo UCS.	113
Figura 3.12-	Escarificado entre cada capa, desmolde empleando gato hidráulico, probeta, registro de las dimensiones de la probeta	114
Figura 3.13-	Equipo triaxial utilizado para realizar los ensayos CU con medición de presión de poros	115
Figura 3.14-	Drenes verticales colocados en las probetas para facilitar el drenaje.	116
Figura 3.15-	Salas depositadas en uno de los sensores de presión de una de las líneas de la cámara triaxial. Depósitos salinos en una imagen magnificada de la misma válvula.	116
Figura 3.16-	Ensayos en permeámetro de carga constante de cuatro probetas con diferentes porcentajes de CLS.	118

Figura 3.17-	Fluidos pertenecientes a las probetas con CLS durante el ensayo de permeabilidad. Contraste entre la coloración de la arena antes y después del ensayo de permeabilidad.	118
Figura 3.18-	Probetas una vez finalizado el ensayo de permeabilidad, antes de y después de secadas al horno para realizar la determinación de humedad.	118
Figura 3.19-	WP4: higrómetro de punto de rocío.	122
Figura 3.20-	Cápsulas empleadas en WP4-T.	123
Figura 3.21-	Determinación de humedad de las muestras empleadas para las curvas de saturación de CRclay (de arriba hacia abajo CRclay, 3%, 5%, 7% y 10%CLS, de izquierda a derecha de menor a mayor porcentaje de humedad).	124
Figura 3.22-	Estructura de poros de un suelo con matriz arcillosa: Intraporosidad e interporosidad (Alonso et al., 1987)	126
Figura 3.23-	Procedimiento empleado en los ensayos de toxicidad empleando semillas de Lactuca Sativa.	130
Figura 3.24-	Evolución de la semilla de Lactuca Sativa durante el proceso de germinación (Imagen tomada de Martín et al., 2018).	131
 <b>CAPITULO 4</b>		
Figura 4.1-	Granulometría obtenida con Mastersizer 2000 (porcentajes parciales).	133
Figura 4.2-	Granulometría obtenida con Mastersizer 2000 (porcentajes acumulados).	133
Figura 4.3-	DRX correspondiente a FRclay.	134
Figura 4.4-	DRX correspondiente a GAclay.	134
Figura 4.5-	DRX correspondiente a CRclay.	135
Figura 4.6-	Deformación en expansión libre obtenida en el edómetro.	135
Figura 4.7-	Índice de contracción lineal (LC): suelos CRclay (1), GAclay (2), FRclay (3)	136
Figura 4.8-	FSR y FSI para FRclay. En cada imagen se observan: a la izquierda muestras sumergidas en agua destilada, a la derecha muestras sumergidas en kerosene y su evolución.	137

Figura 4.9-	Evolución del ensayo para la obtención de FSR y FSI para GAclay.	137
Figura 4.10-	FSR y FSI para CRclay. En cada imagen puede observarse: a la izquierda muestras sumergidas en agua destilada, a la derecha: muestras sumergidas en kerosene.	137
Figura 4.11-	Formación Chenque, secuencia estratigráfica y posición relativa de los estratos	138
Figura 4.12-	FTIR para CRclay.	141
Figura 4.13-	FTIR para los aditivos del grupo ligninas. L1= Kraft, L2=Vixilex, L3=Aglupel, L4=Norlig.	143
Figura 4.14-	FTIR de las diferentes mezclas de CRclay y Kraft (L1), Vixilex (L2), Aglupel (L3) y Norlig (L4).	145
Figura 4.15-	Molde y pisón del aparato Harvard miniatura.	146
Figura 4.16-	Curvas de compactación para CRclay todos los porcentajes de CLS.	146
Figura 4.17-	Humedad óptima y densidad seca máxima en función del porcentaje de CLS.	147
Figura 4.18-	Hinchamiento libre para muestras ensayadas un día después de moldeadas.	148
Figura 4.19-	Hinchamiento libre para muestras ensayadas 9 meses después de moldeadas.	148
Figura 4.20-	Curva de HL para CRclay, etapas desarrolladas durante el proceso de expansión.	149
Figura 4.21-	Hinchamiento libre para dos tiempos transcurridos desde el moldeo de las probetas y todos los porcentajes de CLS.	150
Figura 4.22-	Ensayo edométrico para CRclay: curvas de deformación versus tiempo.	151
Figura 4.23-	Ensayo edométrico para 3%CLS: curvas de deformación versus tiempo.	151
Figura 4.24-	Ensayo edométrico para 5%CLS: curvas de deformación versus tiempo.	152
Figura 4.25-	Ensayo edométrico para 7%CLS: curvas de deformación versus tiempo.	152

Figura 4.26-	Ensayo edométrico para 10%CLS: curvas de deformación versus tiempo.	153
Figura 4.27-	Datos obtenidos mediante el empleo de ensayos edométricos para la obtención de la presión de hinchamiento para diferentes porcentajes de CLS.	153
Figura 4.28-	Coeficiente de consolidación en función de la presión aplicada y el porcentaje de aditivo en un ensayo edométrico.	154
Figura 4.29-	Coeficiente de permeabilidad en función de la presión aplicada y del porcentaje de aditivo en los ensayos edométricos.	155
Figura 4.30-	Datos obtenidos mediante el empleo de ensayos de Hinchamiento Restringido para la obtención de la presión de hinchamiento para diferentes porcentajes de CLS.	156
Figura 4.31-	Curvas obtenidas mediante el método ASTM para todos los porcentajes de CLS.	156
Figura 4.32-	Método del volumen constante: registro de cargas con aro dinamométrico.	157
Figura 4.33-	Método del volumen constante: registro de cargas con celda de carga.	158
Figura 4.34-	Presión de hinchamiento empleando diferentes métodos.	159
Figura 4.35-	Presión de hinchamiento empleando diferentes métodos: cambio de escala en el eje de las ordenadas y eliminación de los resultados obtenidos por el método del edómetro.	159
Figura 4.36-	Hinchamiento libre y presión de hinchamiento en función del tiempo para CRclay.	160
Figura 4.37-	Hinchamiento libre y presión de hinchamiento en función del tiempo para 3%CLS.	161
Figura 4.38-	Hinchamiento libre y presión de hinchamiento en función del tiempo para 5%CLS.	161
Figura 4.39-	Hinchamiento libre y presión de hinchamiento en función del tiempo para 7%CLS.	162
Figura 4.40-	Hinchamiento libre y presión de hinchamiento en función del tiempo para 10%CLS.	162
Figura 4.41-	Pendientes obtenidas por los tres métodos indirectos para 0%CLS.	163
Figura 4.42-	Pendientes obtenidas por los tres métodos indirectos para 3%CLS.	163

Figura 4.43-	Pendientes obtenidas por los tres métodos indirectos para 5%CLS.	164
Figura 4.44-	Pendientes obtenidas por los tres métodos indirectos para 7%CLS.	164
Figura 4.45-	Pendientes obtenidas por los tres métodos indirectos para 10%CLS.	165
Figura 4.46-	Fig.4.46- Resultados ensayos UCS para muestras de 1 día.	166
Figura 4.47-	Resultados ensayos UCS para muestras de 1 mes.	166
Figura 4.48-	Resultados ensayos UCS para muestras de 3 meses.	166
Figura 4.49-	Resultados ensayos UCS para muestras de 6 meses.	167
Figura 4.50-	Resultados ensayos UCS para muestras de 9 meses.	167
Figura 4.51-	Resultados ensayos UCS para muestras de 1 año	167
Figura 4.52-	Máxima resistencia a la compresión simple para diferentes porcentajes de CLS y tiempos transcurridos desde el moldeo de las probetas.	168
Figura 4.53-	Módulos de elasticidad tangentes para diferentes porcentajes de CLS y tiempo transcurrido desde el moldeo de las probetas.	168
Figura 4.54-	Módulos de elasticidad secantes para diferentes porcentajes de CLS y tiempos transcurridos desde el moldeo de las probetas.	169
Figura 4.55-	Rabs acompañado de la desviación estándar para cada uno de los porcentajes de CLS.	169
Figura 4.56-	Rrel acompañado de la desviación estándar para cada uno de los porcentajes de CLS.	170
Figura 4.57-	Dabs acompañado de la desviación estándar para cada uno de los porcentajes de CLS.	170
Figura 4.58-	Drel acompañado de la desviación estándar para cada uno de los porcentajes de CLS.	171
Figura 4.59-	Rotura a la compresión simple de probetas de la misma edad (9 meses) y diferentes porcentajes de CLS.	171

Figura 4.60-	Probetas de la misma edad (9 meses) y diferentes porcentajes de CLS al finalizar el ensayo UCS.	172
Figura 4.61-	Gráfico p-q obtenido con los datos de tres ensayos triaxiales CU con medición de presión de poros.	172
Figura 4.62-	Gráfico $\varepsilon$ vs q obtenido con los datos de tres ensayos triaxiales CU con medición de presión de poros	173
Figura 4.63-	Gráfico $\varepsilon$ vs $\Delta u$ obtenido con los datos de tres ensayos triaxiales CU con medición de presión de poros	174
Figura 4.64-	Coeficientes de permeabilidad para diferentes porcentajes de CLS a lo largo del tiempo.	175
Figura 4.65-	Coeficientes de permeabilidad promedio acompañados de su correspondiente desviación estándar para diferentes porcentajes de CLS.	176
Figura 4.66-	Coeficientes de permeabilidad promedio para diferentes porcentajes de CLS.	176
Figura 4.67-	Relación entre la humedad y la succión total, PFT.	178
Figura 4.68-	Relación entre la saturación y la succión total, PFT.	178
Figura 4.69-	Relación entre la humedad y la succión matricial, PFT.	179
Figura 4.70-	Relación entre la saturación y la succión total, PFT.	179
Figura 4.71-	Relación entre la saturación y la succión matricial, WP4.	181
Figura 4.72-	Relación entre la humedad y la succión matricial, WP4.	181
Figura 4.73-	Resultados obtenidos con WP4 (succión total) y PFT (succión total y matricial) para CRclay.	182
Figura 4.74-	Resultados obtenidos con WP4 (succión total) y PFT (succión total y matricial) para 3%CLS.	182
Figura 4.75-	Resultados obtenidos con WP4 (succión total) y PFT (succión total y matricial) para 5%CLS.	183
Figura 4.76-	Resultados obtenidos empleando WP4 (succión total) y PFT (succión total y matricial) para 7%CLS.	183

Figura 4.77-	Resultados obtenidos empleando WP4 (succión total) y PFT (succión total y matricial) para 10%CLS.	184
Figura 4.78-	DRX sobre dos muestras con 0%CLS y diferente edad.	186
Figura 4.79-	DRX sobre dos muestras con 3%CLS y diferente edad.	186
Figura 4.80-	DRX sobre dos muestras con 10%CLS y diferente edad.	187
Figura 4.81-	DRX sobre dos muestras de 1 día y diferente porcentaje de CLS.	187
Figura 4.82-	DRX sobre dos muestras de 1 año y diferente porcentaje de CLS.	187
Figura 4.83-	DRX sobre dos muestras de 2 años y diferente porcentaje de CLS.	188
Figura 4.84-	Distribución de diámetros de poros para diferentes porcentajes de CLS y 1 día.	190
Figura 4.85-	Acumulado del volumen de mercurio inyectado para diferentes porcentajes de CLS y 1 día.	190
Figura 4.86-	Distribución de diámetros de poros para diferentes porcentajes de CLS y 1 año.	191
Figura 4.87-	Acumulado del volumen de mercurio inyectado para diferentes porcentajes de CLS y 1 año.	191
Figura 4.88-	Comparación entre porosimetrías correspondientes a 1 día y 1 año con 0%CLS.	192
Figura 4.89-	Comparación entre porosimetrías correspondientes a 1 día y 1 año con 3%CLS.	192
Figura 4.90-	Comparación entre porosimetrías correspondientes a 1 día y 1 año con 7%CLS.	193
Figura 4.91-	Comparación entre porosimetrías correspondientes a 1 día y 1 año con 10%CLS.	193
Figura 4.92-	Diámetros de poros de menor tamaño que presentan mayor concentración en la curva de distribución de poros bimodal para diferentes porcentajes de %CLS.	195
Figura 4.93-	Diámetros de poros de mayor tamaño que presentan mayor concentración en la curva de distribución de poros bimodal para diferentes porcentajes de %CLS.	195

Figura 4.94-	Superficie específica de las partículas obtenida mediante BET en función del porcentaje de CLS.	198
Figura 4.95-	Tamaño promedio de partículas obtenida mediante BET en función del porcentaje de CLS.	199
Figura 4.96-	Tamaño promedio de poro obtenido mediante BET para diferentes porcentajes de CLS.	199
Figura 4.97-	Volumen de poro máximo obtenido mediante BET para diferentes porcentajes de CLS.	199
Figura 4.98-	Secuencia de imágenes obtenidas con el SEM en escalas entre 10 $\mu$ m y 1 $\mu$ m para 0%CLS-1día.	201
Figura 4.99-	Secuencia de imágenes obtenidas mediante el SEM en escalas entre 50 $\mu$ m y 1 $\mu$ m. Para 0%-1día.	202
Figura 4.100-	Secuencia de imágenes obtenidas mediante el SEM de la muestra 0%CLS-1día en escalas entre 2 $\mu$ m y 200nm. En esta secuencia es posible observar una concentración de SO <sub>4</sub> Ca de forma esférica.	203
Figura 4.101-	Imagen obtenida del mapeo de elementos mediante SEM para muestra CRclay-1 día.	204
Figura 4.102-	Imágenes obtenidas mediante el SEM en escalas entre 20 $\mu$ m y 1 $\mu$ m, concentración de SO <sub>4</sub> Ca de forma esférica y cristales. Muestra 3%CLS-1día.	204
Figura 4.103-	Imágenes obtenidas mediante el SEM en escalas entre 20 $\mu$ m y 1 $\mu$ m, concentración de SO <sub>4</sub> Ca de forma esférica y cristales. Muestra 3%CLS-1día.	205
Figura 4.104-	Imágenes obtenidas mediante el SEM en escalas entre 20 $\mu$ m y 5 $\mu$ m, observación de inter e intraporosidad. Esporas de S. Thinghirensis S10. Muestra 3%CLS-1día.	206
Figura 4.105-	Imágenes obtenidas mediante el SEM en escalas entre 20 $\mu$ m y 200nm, observación de inter e intraporosidad. Esporas de S. Thinghirensis S10. Muestra 3%CLS-1día.	207
Figura 4.106-	Estructura de la muestra en general, fibras, esporas S10 y 4F. Muestra 5%CLS-1año. Forma longilínea que se degrada al incidir el haz de electrones	207
Figura 4.107-	Estructura de la muestra en general, fibras, esporas S10 y 4F. Muestra 5%CLS-1año.	208
Figura 4.108-	Estructura de la muestra en general 5%CLS-1año.	208
Figura 4.109-	Estructura de la muestra en general 5%CLS-1año.	209
Figura 4.110-	Estructura de la muestra en general, fibras, esporas S10 y 4F. Escala entre 20 $\mu$ m y 1 $\mu$ m Muestra 7%CLS-1año.	209

Figura 4.111-	Estructura de la muestra en general, fibras, esporas S10 y 4F. Escala entre 20µm y 1µ m Muestra 7%CLS-1año.	210
Figura 4.112-	Formas redondeadas. Muestra 7%CLS-1año.	211
Figura 4.113-	Forma longilínea seleccionada para realizar el mapeo de elementos. Muestra 7%CLS-1año	211
Figura 4.114-	Imagen obtenida del mapeo de elementos mediante SEM para una estructura longilínea seleccionada de la muestra 7%CLS-1año.	212
Figura 4.115-	Estructuras y esporas capturadas con diferentes apertura y contraste de la cámara para la muestra 10%CLS-1día. Algunas de las partículas se desintegran al incidir el haz de electrones.	212
Figura 4.116-	Estructuras y esporas capturadas con diferentes apertura y contraste de la cámara para la muestra 10%CLS-1día. Algunas de las partículas se desintegran al incidir el haz de electrones.	213
Figura 4.117-	Partículas se desintegran al incidir el haz de electrones	213
Figura 4.118-	Fibras, estructuras y esporas de la muestra 10%CLS-1día.	214
Figura 4.119-	Formas redondeadas en muestra de 10%CLS-1día.	215
Figura 4.120-	Imagen obtenida del mapeo de elementos mediante SEM para muestra 10%CLS-1día.	215
Figura 4.121-	Ensayo con Lactuca sativa para CLS en estado sólido diluido al 1% en agua.	220
Figura 4.122-	Ensayo con Lactuca sativa para CLS en estado sólido diluido al 10% en agua.	220
 <b>CAPITULO 5</b>		
Figura 5.1-	Comparación en las expansiones libres desarrolladas para 1 día y 9 meses para 3%CLS	224
Figura 5.2-	Comparación en las expansiones libres desarrolladas para 1 día y 9 meses para 5%CLS	224
Figura 5.3-	Comparación en las expansiones libres desarrolladas para 1 día y 9 meses para 7%CLS	225
Figura 5.4-	Comparación en las expansiones libres desarrolladas para 1 día y 9 meses para 10%CLS	225

Figura 5.5-	Reducción en la presión de hinchamiento obtenida empleando diferentes métodos	228
Figura 5.6-	Presión de hinchamiento obtenida empleando diferentes métodos tomando como referencia el valor de PH obtenido con el método de Lambe, empleando celda de carga.	229
Figura 5.7-	Potencial Z de CLS, CRclay, y CRclay con diferentes porcentajes de CLS	230
Figura 5.8-	pH para CRclay y CRclay con diferentes porcentajes de CLS	231
Figura 5.9-	Permeabilidad en función del tiempo de ensayo	234
Figura 5.10-	Permeabilidad para diferentes porcentajes de CLS	235
Figura 5.11-	Humedad final en función del grado de saturación inicial para probetas de CRclay y 10%CLS	237
Figura 5.12-	Succión total y presión de hinchamiento en función del grado de saturación para las probetas CRclay moldeadas con una densidad seca de 13kN/m <sup>3</sup>	237
Figura 5.13-	Succión total y presión de hinchamiento en función del grado de saturación para las probetas 10%CLS moldeadas con una densidad seca de 13kN/m <sup>3</sup> .	238
Figura 5.14-	Compilado de curvas de succión total obtenidas con la técnica de papel de filtro	239
Figura 5.15-	Compilado de curvas de succión matricial obtenidas con la técnica de papel de filtro	239
Figura 5.16-	Compilado de curvas de succión matricial obtenidas con WP4	240
Figura 5.17-	Comparación entre los datos obtenidos para CRclay y 10%CLS.	240
Figura 5.18-	Presión de hinchamiento obtenida por el método de volumen constante para dos tiempos de ensayo: 24 horas y 28 días, CRclay.	241
Figura 5.19-	Presión de hinchamiento obtenida por el método de volumen constante para 10%CLS y 24 horas.	241
Figura 5.20-	Curvas de tendencia obtenidas con los datos de succión total para diferentes porcentajes de CLS	242
Figura 5.21-	Intraporosidad en muestra de CRclay-1día (0,1µm a 1 µm).	244

Figura 5.22-	Intraporosidad en muestra de 10%CLS-1día (0.1µm a 1 µm).	244
Figura 5.23-	Interporosidad en muestra de CRclay-1día (8µm a 70 µm)	245
Figura 5.24-	Interporosidad en muestra de 10%CLS-1día (10µm a 100µm)	245
Figura 5.25-	Estructura de sulfato de calcio de forma esférica (imagen muestra 0%CLS-1día)	246
Figura 5.26-	En la imagen se observa un pequeño grano de limo o arena y una estructura longilínea (imagen muestra 3%CLS-1día)	246
Figura 5.27-	Estructura longilínea (imagen muestra 7%CLS-1año): suavizado en la estructura general, alta cantidad de estructuras longilíneas y esporas	247
Figura 5.28-	Incremento aparente en el número de estructuras longilínea (10%CLS-1día) y esporas.	247
Figura 5.29-	10%CLS-1día: interporosidad y partículas agrupadas	248
Figura 5.30-	7%CLS-1año: formas redondeadas con bordes suavizados.	248
Figura 5.31-	Espora Thinghirensis S10 en muestra con 10%CLS	249
Figura 5.32-	Imágenes obtenidas por medio del ensayo SEM para una muestra de 10%CLS-1día. En primer plano Espora Spora Lienomycini 5C	249
Figura 5.33-	Esporas en muestra de 10%CLS-1día	250
Figura 5.34-	Imágenes obtenidas por medio del ensayo SEM para una muestra de 7%CLS-1año	250
Figura 5.35-	7%CLS-1año. Efecto de envejecimiento en las esporas: muestra envejecida.	251
Figura 5.36-	7%CLS-1año. Efecto de envejecimiento en las esporas: muestra envejecida.	251

## LISTA DE TABLAS

### CAPITULO 2

Tabla 2.1-	Clasificación de suelos expansivos basados en el LL (Chen, 1956; Snethan et al., 1977; IS1948, 1970). Tomado de Sridharan & Prakash (2016).	55
Tabla 2.2-	Clasificación de suelos expansivos basados en el LC (Holtz & Gibbs, 1956) Tomado de Sridharan & Prakash (2016).	55
Tabla 2.3-	Clasificación de suelos expansivos basados en el LC (Altmeyer, 1956) Tomado de Sridharan & Prakash (2016).	55
Tabla 2.4-	Clasificación de suelos expansivos basados en el IC:1498 (Bureau of Indian Standard) Tomado de Sridharan & Prakash (2016).	56
Tabla 2.5-	Clasificación de suelos expansivos basados en el IP. Tomado de Sridharan & Prakash (2016).	57
Tabla 2.6-	Potencial de expansión basado en el FSI. Tomado de Sridharan & Prakash (2016).	57
Tabla 2.7-	Potencial de expansión basado en el FSR. Tomado de Sridharan & Prakash (2016).	57
Tabla 2.8-	Potencial de expansión basado en los resultados del ensayo edométrico (Sed et al., 1962; Holtz & Gibbs, 1956). Tomado de Sridharan & Prakash (2016).	59
Tabla 2.9-	Actividad de diferentes minerales de arcilla. Tomada de Mitchell (1976).	60
Tabla 2.10-	Clasificación de suelos expansivos basados en la actividad (Tomada de Mitchel, 1976).	60
Tabla 2.11-	Superficie específica para diferentes tipos de arcillas (Mitchel, 1976).	61
Tabla 2.12-	Composición química en función de la fuente de origen (Tomado de Kay Teschke y Paul Demers, 2021).	86
Tabla 2.13-	Análisis de los resultados de PH considerando el método empleado y las características de los suelos estudiados.	90
Tabla 2.14-	Publicaciones e información publicada por otros investigadores en referencia a la estabilización de suelos expansivos con lignina y lignosulfonatos (Parte 1).	91
Tabla 2.15-	Publicaciones e información publicada por otros investigadores en referencia a la estabilización de suelos expansivos con lignina y lignosulfonatos (Parte 2).	92

Tabla 2.16-	Publicaciones e información publicada por otros investigadores en referencia a la estabilización de suelos expansivos con lignina y lignosulfonatos (Parte 3).	93
-------------	--	----

### CAPITULO 3

Tabla 3.1-	Dispositivos empleados para medir succión y sus componentes (Tomado de Fredlund et al., 2012 y Cardoso et al., 2006).	120
------------	---	-----

### CAPITULO 4

Tabla 4.1-	Caracterización física, química y mineralógica de los suelos en estudio.	132
Tabla 4.2-	Parámetros indicativos del potencial de expansión de cada suelo: FSI, FSR, As, IC, CL	137
Tabla 4.3-	Identificación del potencial de expansión de acuerdo con parámetros indicativos de cada suelo.	139
Tabla 4.4-	Porcentaje de variación de LL para diferentes porcentajes de aditivo y diferentes tiempos de contacto CRclay-aditivo, incluidos los resultados obtenidos utilizando cal.	140
Tabla 4.5-	Porcentaje de variación del IP para diferentes porcentajes de aditivo y diferentes tiempos de contacto CRclay-aditivo, incluidos los resultados obtenidos utilizando cal.	141
Tabla 4.6-	Propiedades poliméricas de las ligninas empleadas como aditivos.	142
Tabla 4.7-	Valores del potencial Z CRclay y ligninas.	142
Tabla 4.8-	Potencial Z para diferentes mezclas de aditivo y CRclay.	144
Tabla 4.9-	Pendientes de cada etapa de la curva de HL para diferentes porcentajes de CLS.	150
Tabla 4.10-	Parámetros de las curvas de tendencia de los ensayos de hinchamiento libre: $\Delta H = A \cdot CLS + B$ y coeficiente de regresión $R^2$	150
Tabla 4.11-	Parámetros de las curvas de tendencia y $R^2$ de los ensayos edométricos: $\Delta H = A \cdot \ln \sigma + B$	153
Tabla 4.12-	Ensayos edométricos: información obtenida de las curvas en función del porcentaje de aditivo	154
Tabla 4.13-	Parámetros de las curvas de tendencia para los ensayos de hinchamiento restringido, y coeficiente de regresión $R^2$ . $\Delta H = A \cdot \ln \sigma + B$	156

Tabla 4.14-	Presión de hinchamiento para diferentes porcentajes de CLS.	158
Tabla 4.15-	Datos obtenidos de los ensayos triaxiales sobre probetas con presiones de confinamiento de 100, 200 y 400 kPa.	173
Tabla 4.16-	Resultados del PFT para CRclay, 5%CLS; 7%CLS, 10%CLS y 13.3kN/m <sup>3</sup> de densidad seca de diseño.	177
Tabla 4.17-	Resultados del PFT para CRclay, 3%CLS, 5%CLS; 7%CLS, 10%CLS y 13.3kN/m <sup>3</sup> de densidad seca de diseño.	180
Tabla 4.18-	Minerales identificados en función de la edad y contenido de CLS de la muestra analizada	184
Tabla 4.19-	Resultados obtenidos de las porosimetrías para diferentes contenidos de CLS y diferentes edades de las muestras.	194
Tabla 4.20-	Resultados obtenidos de las porosimetrías para diferentes contenidos de CLS y diferentes edades de las muestras.	194
Tabla 4.21-	Datos obtenidos de los ensayos BET para todos los porcentajes de CLS.	197
Tabla 4.22-	Contenido de sales, conductividad y capacidad de intercambio catiónico de CRclay.	217
Tabla 4.23-	Cambio en el pH de la mezcla de CRclay con diferentes contenidos de CLS	217
Tabla 4.24-	Contenido de sales de las muestras de lixiviados correspondientes a los ensayos triaxiales CU10%CLS200kPa y CU10%CLS400kPa de presión de confinamiento.	217
Tabla 4.25-	Clasificación de los suelos salinos según su efecto sobre los cultivos empleando la conductividad eléctrica (Tomada de Carrow & Duncan, 2011).	218
Tabla 4.26-	Clasificación de suelos salinos según U.S.Laboratory (Tomada de Carrow & Duncan, 2011).	219
Tabla 4.27-	Clasificación de los suelos salinos de acuerdo con su PSI (tomado de Massoud, 1971).	219
Tabla 4.28-	Resultados correspondientes a CE50 y CI50 para muestras sólidas y líquidas empleando semillas de Lactuca sativa como organismo de control.	221
 <b>CAPITULO 5</b>		
Tabla 5.1-	Expansión libre para probetas de diferentes edades y porcentajes de CLS.	226

Tabla 5.2-	Variación en la expansión libre [%] para probetas de diferentes edades y porcentajes de CLS, referidas a la expansión libre de CRclay de la misma edad, variación de la expansión libre para las probetas de 9 meses referidas a las probetas de 1 día.	226
Tabla 5.3-	Influencia del porcentaje de CLS sobre la presión de hinchamiento considerando para su comparación un hinchamiento relativo al suelo sin tratar.	227
Tabla 5.4-	Potencial zeta y pH para probetas con diferentes porcentajes de CLS.	228
Tabla 5.5-	Parámetros que definen el ajuste de van Genutchen para WP4 (obtenidos a partir de Fig.5.16).	241
Tabla 5.6-	Parámetros de las curvas de tendencia para CRclay y 10%CLS de la presión de hinchamiento en función de la saturación.	242
Tabla 5.7-	Parámetros de las líneas de tendencia para cada porcentaje de CLS.	242

## TABLA DE ABREVIATURAS

EGME	Adsorción de éter monoetil etilenglicol
TGA	Análisis termogravimétrico
DSC	Calorimetría diferencial de barrido
MOS	Contenido de carbono orgánico en suelos
CSL	Critical state line o línea de estado crítico
SEC	Cromatografía de exclusión por tamaño
DRX	Difracción por rayos X
DCD	Doble capa difusa
CU	Ensayo triaxial consolidado isotrópicamente bajo carga no drenada
FTIR	Espectrómetro de transformada de Fourier infrarroja
FPT	Filter paper technique o método de papel de filtro
HL	Hinchamiento libre
HR	Hinchamiento restringido
CE <sub>50</sub>	Inhibición de la germinación
IS	Initial swelling
L1	Lignina obtenida por medio del proceso Kraft.
L3	Lignina sódica obtenida por medio del proceso sulfito (Argentina) AglupeI®.
L2	Lignina sódica obtenida por medio del proceso sulfito (Brasil) Vixilex®.
CLS	Lignosulfonato de calcio seleccionado
L4	Lignosulfonato de calcio obtenido del proceso sulfito (Sudáfrica) Norlig®, CLS
BET	Método de adsorción de nitrógeno
MBM	Método de azul de metileno
AFM	Microscopía de fuerza atómica
SEM	Microscopía por barrido electrónico
NCL	Normal compression line o línea de compresión isotrópica
BET	Porosimetría por absorción de mercurio
MIP	Porosimetría por intrusión de mercurio
PS	Primary swelling
WP4	Psicrómetro de punto de rocío
SS	Secondary swelling
SSP	Secondary swelling pressure
SUCS	Sistema unificado de clasificación de suelos
SWRC	Soil water retention curve
FRclay	Suelo expansivo local
GAclay	Suelo expansivo local
CRclay	Suelo expansivo local seleccionado
THF	Tetrahidrofurano
UCS	Under compression strength test

## TABLA DE SÍMBOLOS

$(u_a - u_w)$	Succión matricial	[kPa]
$A_s$	Actividad	[ ]
CEC/CIC	Capacidad de intercambio catiónico	[meq/100g]
Cl <sub>50</sub>	Inhibición de la elongación	[ ]
CL	Contracción lineal	[ ]

Cv	Coeficiente de consolidación	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
C <sub>v</sub>	Coeficiente de consolidación	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
D	Índice de ductilidad	[ ]
e	Relación de vacíos	[ ]
e <sub>mo</sub>	Relación de poros de entrada inicial	[ ]
FSI	Free Swell Index: índice de expansión libre	[ ]
FSR	Free Swell Ratio: relación de expansión libre	[ ]
IP	índice plástico	[%]
ISP	Initial swelling pressure	[kPa]
k	Coeficiente de permeabilidad	[m/s]
LC	Límite de contracción	[%]
LL	Límite líquido	[%]
LP	Límite plástico	[%]
MOS	Contenido de materia orgánica de un suelo	[meq/100g]
m <sub>v</sub>	Coeficiente de variación volumétrica	[N.m <sup>2</sup> ]
OLC	Porcentaje óptimo de cal	[ % ]
π	Succión osmótica	[kPa]
pH	Potencial Hidrógeno.	[ ]
PH	Presión de hinchamiento	[KPa]
PH <sub>rel</sub>	Presión de hinchamiento relativa	[ ]
PSI	Porcentaje de sodio de intercambio	[ ]
R	Parámetro de resistencia	[ ]
R <sup>2</sup>	Coeficiente de correlación	[ ]
RAS	Relación de adsorción de sodio	[ ]
Se	Superficie específica	[g.m <sup>-2</sup> ]
S <sub>res</sub>	Succión residual	[kPa]
Tg	Temperatura termogravimétrica	[°C]
ω <sub>0</sub>	Humedad inicial	[%]
ψ	Succión total	[kPa]
λ	Índice de distribución de tamaño de poros	[ ]
$\overline{D_{abs}}$	Índice de ductilidad absoluto	[ ]
$\overline{D_{rel}}$	Índice de ductilidad relativo	[ ]
$\overline{R_{abs}}$	Parámetro de resistencia absoluto	[ ]
$\overline{R_{rel}}$	Parámetro de resistencia relativo	[ ]
Sae	Succión de entrada de aire	[kPa]
S <sub>d</sub>	Grado de saturación normalizado	[ ]
S <sub>e</sub>	Grado de saturación efectivo	[ ]
S <sub>r</sub>	Grado de saturación residual	[ ]
$\overline{M}_w$	Masa molar media en peso	[ ]
$\overline{M}_n$	Masa molar media en número	[ ]

## LISTA DE PUBLICACIONES

### REVISTAS

1. Orlandi, S., Taverna, M. E., Villada, Y. A., Piqué, T., Laskowski, C., Nicolau, V., Estenoz, D., Manzanal, D. (2021). Additives based on vegetable biomass to improve the stabilization of expansive clay soil. *Journal of Environmental Geotechnics*. doi/pdf/10.1680/jenge.20.00066
2. Fernandez, M., Orlandi, S., Codevilla, M., Piqué, T., Manzanal, D. (2020) Performance of Calcium Lignosulfonate as stabilizer of highly expansive clays. *Transportation Geotechnics*. <https://DOI.org/10.1016/j.trgeo.2020.100469>
3. Piqué, T., Manzanal, D., Codevilla, M., Orlandi, S. (2019) Polymer Enhanced Soils Mixture for Potential Use as Covers or Liners in Landfill Systems. *Environmental Geotechnics*. Published Online: August 23, 2019. DOI: 10.1680/jenge.18.00174.

### CONGRESOS INTERNACIONALES

1. Manzanal, D., Orlandi, S., Barria, J. C. (2019) Swell characterization of expansive clays from Comodoro Rivadavia - Argentina. XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges* N. P. López Acosta et al. (Eds.). IOS Press Publisher. 17-20 November 2019. Cancun, México. DOI:10.3233/STAL190107.
2. Orlandi, S.; Manzanal, D.; Miranda, E.; Robinson, M. (2019) Using Lignin as stabilizer of swelling soils. XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 17-20 November 2019. Cancun México. <https://DOI:10.3233/STAL190295.2291-228>
3. Manzanal, D., Orlandi, S., Fernandez, M., Pique, T., Laskowski, C., Barria, J.C., Codevila, M. (2021) Soil-water retention of highly expansive clay stabilized with a bio- polymer. May 2021. Conference: UNSAT2021. At: Brasil. San Pablo. DOI: 10.1051/matecconf/202133701006.
4. Codevilla, M., Casagrande, C., Montoro, M., Orlandi, S., Piqué, T., Manzanal, D. (2021) Evaluation of sand-clay-anionic polyacrylamide blends for alternative compacted clay landfill liner design. PanAm-Unsat 2021: 3rd Pan-American Conference on Unsaturated Soils. MATEC Web Conf. Volume 337, 2021. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202133704002>
5. Orlandi, S., Laskowski, C., Barría, J.C., Fernández, M., Manzanal, D. (2022) Effects of lignin in hydro-mechanical behavior of an expansive clay. *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney 2022* (Approved, in process of publication).

## **CONGRESOS NACIONALES**

1. Orlandi, S., Laskowski, C., Ancalao, M., Da Silva, F., Saez, S., Manzanal, D. (2021) Evaluación de los métodos de determinación de la presión de hinchamiento de un suelo expansivo modificado con un bio-producto. CAMSIG 2021. Misiones. Argentina.
2. Orlandi, S., Manzanal D. (2018) Análisis de límites de Atterberg en distintas mezclas suelo expansivo- aditivo con el objeto de identificar posibles estabilizantes, CAMSIG XXIV. Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Salta
3. Orlandi, S., Laskowski, C., Ancalao, M., da Silva, F., Saez, S., Manzanal, D. (2021) Determinación de la presión de hinchamiento de un suelo expansivo modificado con un bio-producto. CAMSIG XXV. 24, 25, 26 de noviembre 2021. Posadas, Misiones, Argentina.

## **POSTER y ABSTRACTS**

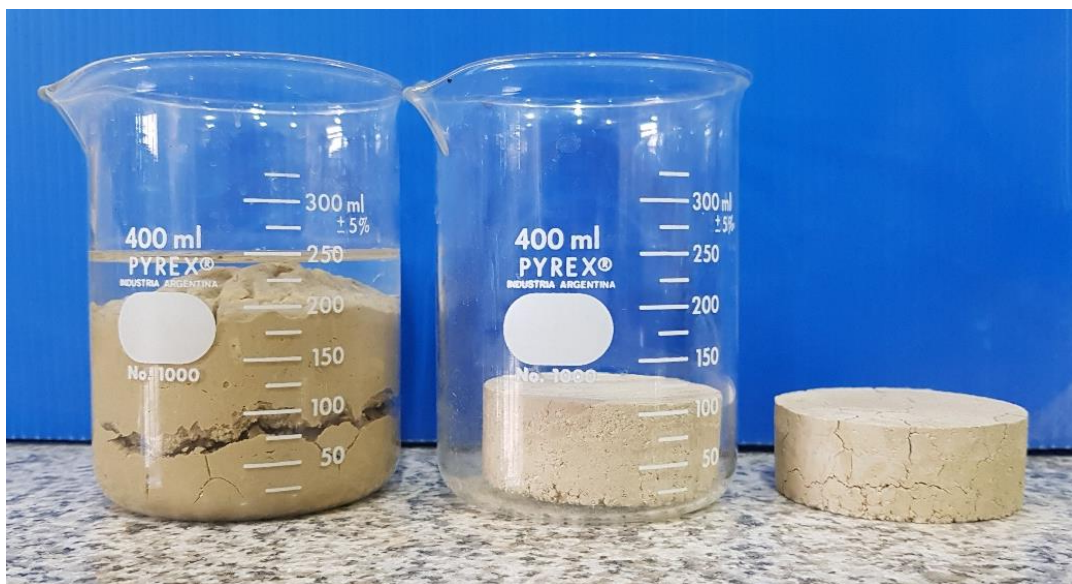
1. Orlandi, S., Manzanal, D. (2019) Using lignin as potential stabilizer of an expansive clayey soils. 30th ALERT Workshop – Poster Session. Aussois 2019. Francia.
2. Orlandi, S., Manzanal, D. (2019) Caracterización mineralógica y geomecánica de tres suelos locales potencialmente activos. En: Resúmenes VII Jornadas de las Ciencias de la Tierra “Dr. Eduardo Musacchio” (Eds. De Sosa Tomas, A. y Casal, G.), 2019. p. 34, Comodoro Rivadavia, Argentina. Publisher: Editorial Universitaria de la Patagonia (EDUPA) ISBN: 978-987-8352-01-5.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: MOTIVACIÓN

El sistema de cimentación de una obra civil debe ser diseñado considerando el contacto íntimo entre el suelo y la superestructura. La durabilidad, el comportamiento y la funcionalidad dependen del buen diseño de las cimentaciones fundamentado en el conocimiento de las características del suelo de cimentación. Las propiedades del suelo, las cargas transmitidas desde la superestructura y el diseño arquitectónico condicionan tanto el diseño del sistema de cimentación como el comportamiento del conjunto. En el caso del suelo de cimentación, puede ocurrir que el mismo posea características que necesiten ser modificadas para lograr el buen comportamiento del conjunto suelo-estructura. Baja capacidad de carga, alta deformabilidad, permeabilidad inadecuada para la obra en cuestión, presencia de sales o gases perjudiciales, son algunos de los problemas que un suelo de cimentación puede presentar.

Entre los suelos que requieren un tratamiento especial se encuentran los suelos potencialmente activos o expansivos. Este grupo de suelos presenta grandes deformaciones volumétricas en condiciones de pérdida o incremento de humedad (Fig.1.1 y Fig.1.2). En condiciones de sequía desarrollan grietas de desecación o grietas de tracción consecuencia del desarrollo de tensiones internas, por otro lado ante el incremento de humedad muestran expansión. Las grietas de tracción dan origen a bloques inestables, favoreciendo el retroceso de las crestas de los taludes (Fig.1.3). Y los incrementos en el volumen son acompañados por presiones de hinchamiento que afectan directamente a las obras civiles que se cimentan sobre estos suelos.



**Fig.1.1-** Expansión de una muestra de suelo expansivo al ser sumergida en agua por 24 horas (CRclay).



**Fig.1.2-** Terrón en condición natural (izq.), terrón totalmente expandido luego de cinco días de inmersión en agua desmineralizada (centro), terrón con grietas de tracción luego de dos meses expuesto al aire (FRclay)



**Fig.1.3-** Bloques inestables consecuencia del avance progresivo en profundidad de grietas de tracción (talud costero Comodoro Rivadavia, coordenadas -45.850495,-67.474414,17).

Innumerables artículos geotécnicos mencionan suelos expansivos presentes en diferentes países, algunos de ellos:

- Argentina : Orlandi et al. (2016, 2019, 2021), Codevilla et al. (2019), Manzanal et al. (2021).
- Australia: Alazigha (2015), Alazigha et al. (2016, 2018a, 2018b), Vinod et al. (2012).
- China: Ijaz et al. (2020), Liu et al. (2020), Zheng et al. (2019), Zhang et al. (2016, 2019).

- EUA: Pedarla et al. (2015), Shi He & Xinbao Yu (2018), Chittoori (2013).
- India: Chavali (2020), Lekha et al. (2015), Landlin et al. (2020).
- Irán: Ta'negonbadi & Noozad (2017, 2018), Hataf et al. (2018).
- Italia: Musso (2014).
- Sudáfrica: Tendjo (2018), Williams & Pidgeon (1985).
- Turquía: Canakci et al. (2014).
- Venezuela: Soledad et al. (1985).

Las primeras publicaciones en las que se hace referencia a este grupo de suelos corresponden a Atterberg (1911), Casagrande (1932), Skempton (1953), Holtz & Gibbs (1956), Seed et al. (1962), Mitchell & Soga (1976), por mencionar algunas de las publicaciones más citadas. Varias describen las características físicas, mecánicas y microestructurales de los suelos en estudio. Otras tratan de establecer criterios para identificarlos, clasificarlos de acuerdo con su potencial de expansión, o determinar la presión de hinchamiento. Es así como aún hoy, más de un siglo después de la primera referencia académica sobre estos suelos, se busca desarrollar un criterio único que permita determinar por medio de parámetros básicos dos características que definen la peligrosidad de un suelo expansivo: la presión de hinchamiento y el potencial de expansión. Los daños que pueden ocasionar estos suelos pueden ser evitados aplicando durante la etapa de diseño una o más de las siguientes soluciones:

- Reemplazo de parte o la totalidad del material expansivo.
- Tratamiento del material expansivo mediante el empleo de aditivos que modifiquen las propiedades expansivas del suelo.
- Diseño arquitectónico que reduzca al mínimo aquellas condiciones que conduzcan a modificar el contenido de humedad en la zona afectada por el bulbo de tensiones.
- Diseño de un sistema de cimentación capaz de resistir el comportamiento de este tipo de suelos ante cambios en el contenido de humedad.
- Empleo de un sistema de cimentación que supere la zona activa.

Se observa que en función del tipo de obra civil, una u otra solución puede o no ser factible. En nuestro caso nos centraremos en la modificación de las propiedades del suelo expansivo mediante el empleo de aditivos.

En la actualidad, dos son los aditivos que se emplean solos o combinados y que han sido ampliamente estudiados: la cal y el cemento. Las primeras publicaciones encontradas donde se analiza el comportamiento de estas mezclas corresponden a Chaston (1952), Fitzmaurice (1958), Mitchel &

Hooper (1961), Lambe (1962). En 1986, Jeyapalan et al. presentaba una publicación sobre el estado del arte de los métodos empleados en ese momento para el tratamiento de suelos expansivos, encontrándose entre los aditivos más destacados la cal y el cemento. Aún hoy ambos aditivos se encuentran ampliamente difundidos y su eficacia demostrada, pero su impacto sobre el medioambiente ha sido cuestionado (Rolling et al., 1999) así como el efecto sobre las estructuras de hormigón armado en contacto con la mezcla (Perry, 1977).

De este modo, una creciente tendencia a emplear aditivos menos agresivos con el medioambiente (Alazigha, 2016) ha sido instalada al igual que el empleo de residuos provenientes de las industrias. Esto ha llevado a evaluar materiales como: cenizas volcánicas (Pooira et al., 2018), aceite sulfonado (Camacho-Tauta et al., 2008), lignina electrolítica y cenizas volantes (Lekha et al., 2015), residuos de fibra de coco (Javasree et al., 2015), fibra sisal (Prabakar & Sridhar, 2002), fibra de yute (Huang & Wang, 2017), fibra de lino (Krishna Rao & Nasr, 2011), fibra de paja de cebada (Bouhicha et al., 2005), almidones de maíz, trigo, arroz, papa, semillas de chía, girasol y lino (Orlandi et al., 2018), residuos de cascara de arroz quemada (Canakci et al., 2015), entre otros.

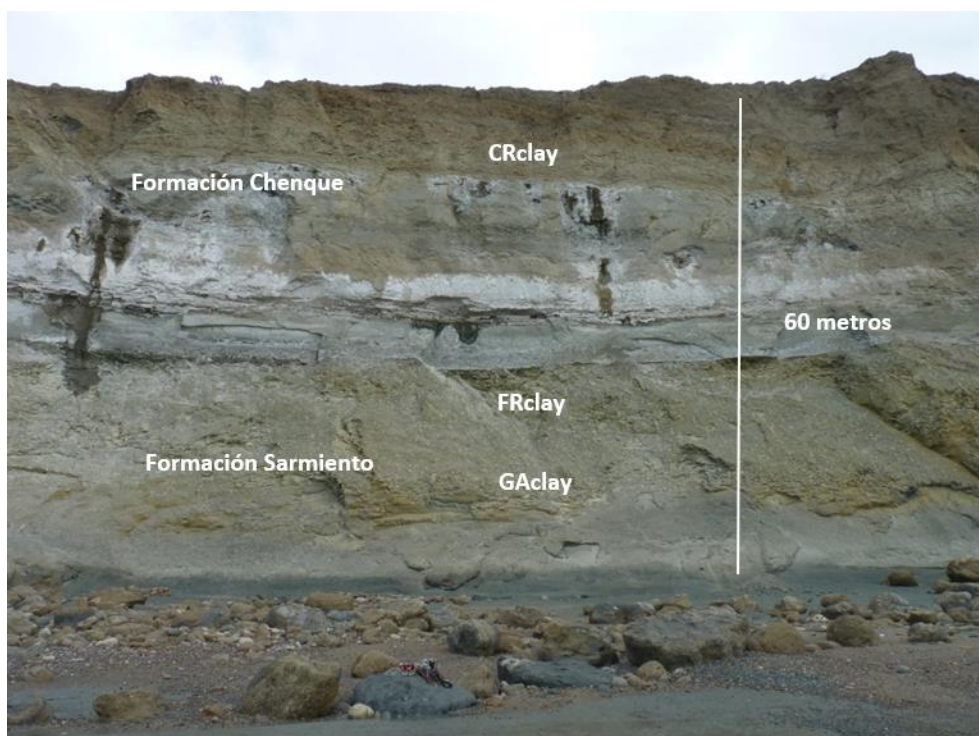
Dentro de esta amplia variedad de posibles aditivos la lignina y el lignosulfonato se encuentran en pleno proceso de estudio. Ambos son residuos de la industria de la pasta de papel y de las biorrefinerías, se producen en grandes cantidades (estimada en más de 70.000 millones de kg al año). La lignina está presente en las paredes celulares de los vegetales junto con la hemicelulosa y la celulosa, aunque la lignina sigue siendo infrutilizada en comparación con los otros dos componentes de los vegetales. La mayor parte es empleada dentro de la misma industria como combustible, se quema para obtener calor a un valor de 80 U\$\$/t= 0,08 U\$\$/kg (Luo & Abu-Omar, 2017), mientras que el sobrante es empleado como aglutinante, modificador del crecimiento de cristales, dispersante, estabilizador de emulsiones, y desarrollo de pinturas y barnices orgánicos. A pesar de ello las cantidades que se emplean son mínimas comparadas con los volúmenes que se producen. Su composición varía en función de proceso del que son producto y de la madera de la que provienen.

No obstante, tanto la lignina como el lignosulfonato son descartados mayormente debido a sus bajas capacidades térmicas aunque representan el 30% del carbono no fósil del planeta (Frost & Sullivan, 2012). En la actualidad, finales del año 2021, la producción global anual de lignina Kraft (cuyo proceso es el más empleado) es cercana a los 121Mt de las cuales 85Mt provienen de la industria de la pasta de papel, de ese total únicamente el 2% fue aislado y el restante 98% fue empleado como combustible (Luo & Abu-Omar, 2017). Estos valores fueron estimados por el autor a partir de proyecciones realizadas en el año 2011 para el año 2021 por National Non Food Crops Centre (UK) [NNFCC].

Validar el empleo de la lignina o el lignosulfonato como estabilizantes de suelos expansivos contribuiría a valorizarlos, permitiendo reemplazar la cal y el cemento por un aditivo menos agresivo.

## 1.2. IMPORTANCIA Y ALCANCE DEL PROBLEMA

Los suelos expansivos constituyen una problemática local con alto impacto en las obras civiles. Como se mencionó, este tipo de suelos han sido reportados en variados artículos y por diversos autores. El primer paso para el diseño adecuado de la obra es identificar estos suelos en la etapa de exploración geotécnica. Dependiendo del tipo y magnitud de la obra serán los estudios que se realizarán en la etapa de exploración geotécnica. Obras civiles que descarguen a nivel de cimentación presiones menores a las desarrolladas por los suelos expansivos podrán sufrir daños si no son diseñadas adecuadamente o si el accionar de los suelos no es modificado.



**Fig.1.4-** Formación Sarmiento y Chenque: estratos de CRclay, GAclay y FRclay.

En la ciudad patagónica costera Comodoro Rivadavia, tres estratos cercanos entre sí (Fig.1.4 y Fig.1.5) pertenecientes a dos formaciones distintas, Sarmiento (Spalletti y Mazoni, 1979) y Chenque (Bellosi, 1990) han sido clasificados como de potencial de expansión alto a muy alto (Manzanal et al., 2019). Los materiales que conforman estos tres estratos fueron denominados CRclay, GAclay y FRclay.

La formación Sarmiento es la más antigua, del Eoceno-Oligoceno, aflora sobre la plataforma de abrasión, conocida comúnmente con el nombre de “Restinga”. Está conformada por estratos tabulares de rocas principalmente piroclásticas (alto contenido de ceniza proveniente del arco volcánico andino). Entre los depósitos se encuentran chonitas, tobas y bentonitas, con un contenido

importante de fósiles. En algunos lugares de la cuenca del Golfo San Jorge dentro de la secuencia de rocas pueden encontrarse coladas de lava y diques de composición basáltica (Bellosi, 1995).



**Fig.1.5-** Formación Sarmiento y Chenque tomadas desde otro ángulo. En la parte superior pueden observarse grietas de tracción y los depósitos de pie de talud desprendidos del estrato CRclay.

Sobre la formación Sarmiento se encuentra la formación Chenque o Patagonia (Fig.1.6 y Fig.1.7), cuyo origen es marino. Son producto de transgresiones por el ascenso en el nivel del mar acompañado del hundimiento de la cuenca del Golfo San Jorge. En su composición se encuentran areniscas medianas a gruesas de color gris verdoso, areniscas tobáceas, lutitas verdes alteradas y coquinas (Sciutto et al. 2008). La columna estratigráfica de esta formación demuestra la presencia frecuente de rocas piroclásticas en la sección inferior (debido a la continuidad de la actividad volcánica del arco andino, como las que ocurren en la Formación Sarmiento) la cual disminuye al acercarse al techo de esta. El ambiente sedimentario varía del mismo modo, desde un sistema deposicional profundo de baja energía (Sección inferior) a uno costero de alta energía (Sección superior) (Fig.1.6 y Fig.1.7).

De acuerdo con la Hoja Geológica 4569-I, en el subsuelo de la cuenca del Golfo San Jorge están presentes los tres grupos principales de arcillas: caolinita, illita y montmorillonita, siendo las más jóvenes y menos enterradas las montmorilloníticas. Al aflorar presentan un color gris verdoso, con grietas rellenas de yeso, siendo su origen diagénico de material volcánico (Angelelli et al., 1976)

depositadas en un medio lacustre y alcalino sódico (Fig.1.8). Se presentan en bancos de 2,5 a 3 m de espesor, fuertemente laminados con venas de yeso cristalino y pH alcalino.

UNIDADES GEOLÓGICAS				UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS		MEDIO	REF.		
CUATERNARIO	HOLOCENO			MODERNO		VARIOS	/ / / / /		
				CORDONES LITORALES		MARINO Y LACUSTRE			
	PLEISTOCENO			PEDIMENTOS		FLUVIAL Y MARINO			
				TERRAZAS		FLUVIO GLACIAL			
TERCIARIO	NEÓGENO	PLIO-CENO	SUPERIOR	PIACENZIANO	NO REPRESENTADO		/ / / / /		
			INFERIOR	ZANCLEANO					
		MIOCENO	SUPERIOR	MESSINIANO					
				TORTONIANO					
			MEDIO	SERRAVALLIANO					
				LANGHIANO					
	PALEÓGENO	OLIGO-CENO	SUPERIOR	CHATTIANO	Fm. SANTA CRUZ	CONTINENTAL			
			INFERIOR	RUPELIANO					
		EOCENO	SUPERIOR	PRIABONIANO	Fm. O GRUPO SARMIENTO	MARINO			
			MEDIO	BARTONIANO					
				LUTECIANO					
			INFERIOR	YPRESIANO					
	PALEO-CENO	SUPERIOR	THANETIANO	Fm. RÍO CHICO	CONTINENTAL				
		INFERIOR	DANIANO	Fm. SALAMANCA	MARINO				
	CRETÁCICO	SUPERIOR	SENO-NIANO	MAASTRICHTIANO	Fm. LAGUNA PALACIOS	Fm. YAC. EL TRÉBOL		GRUPO CHUBUT	/ / / / /
				CAMPANIANO	Fm. BAJO BARREAL	Fm. COMODORO RIVADAVIA			
SANTONIANO									
CONIACIANO			Fm. CASTILLO	Fm. MINA EL CARMEN					
TORONIANO									
CENOMANIANO									
INFERIOR			ALBIANO	Fm. MATASIETE	Fm. POZO D - 129				
			APTIANO						
			BARREMIANO						
		NEOCOMIANO	HAUTERIVIANO	Fm. POZO C° GUADAL - 1		LACUSTRE			
			VALANGINIANO						
			BERRIASIANO						
JURÁSICO	SUPERIOR	TITONIANO	Fm. POZO ANTICLINAL AGUADA BANDERA - 1		LACUSTRE				
		KIMERIDGIANO							
		OXFORDIANO							
	MEDIO	CALOVIANO	COMPLEJO MARIFIL y equivalentes			VOLCÁNICO			
		BATONIANO							
		BAYOCIANO							
		AALENIANO							
	INFERIOR	TOARCIANO	SEDIMENTITAS LIÁSICAS			MARINO Y LACUSTRE			
		PLIENSBACHIANO							
SINEMURIANO									
HETTANGIANO									
PALEOZOICO				BASAMENTO CRISTALINO		GRANITOS GNEISS ANFIBOLITAS	/ / / / /		

 Unidades que afloran en la Hoja Geológica y proximidades

 Unidades de subsuelo

Fig.1.6- Columna estratigráfica e historia geológica (Tomado de Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina, Hoja Geológica 4569-IV Escalante)

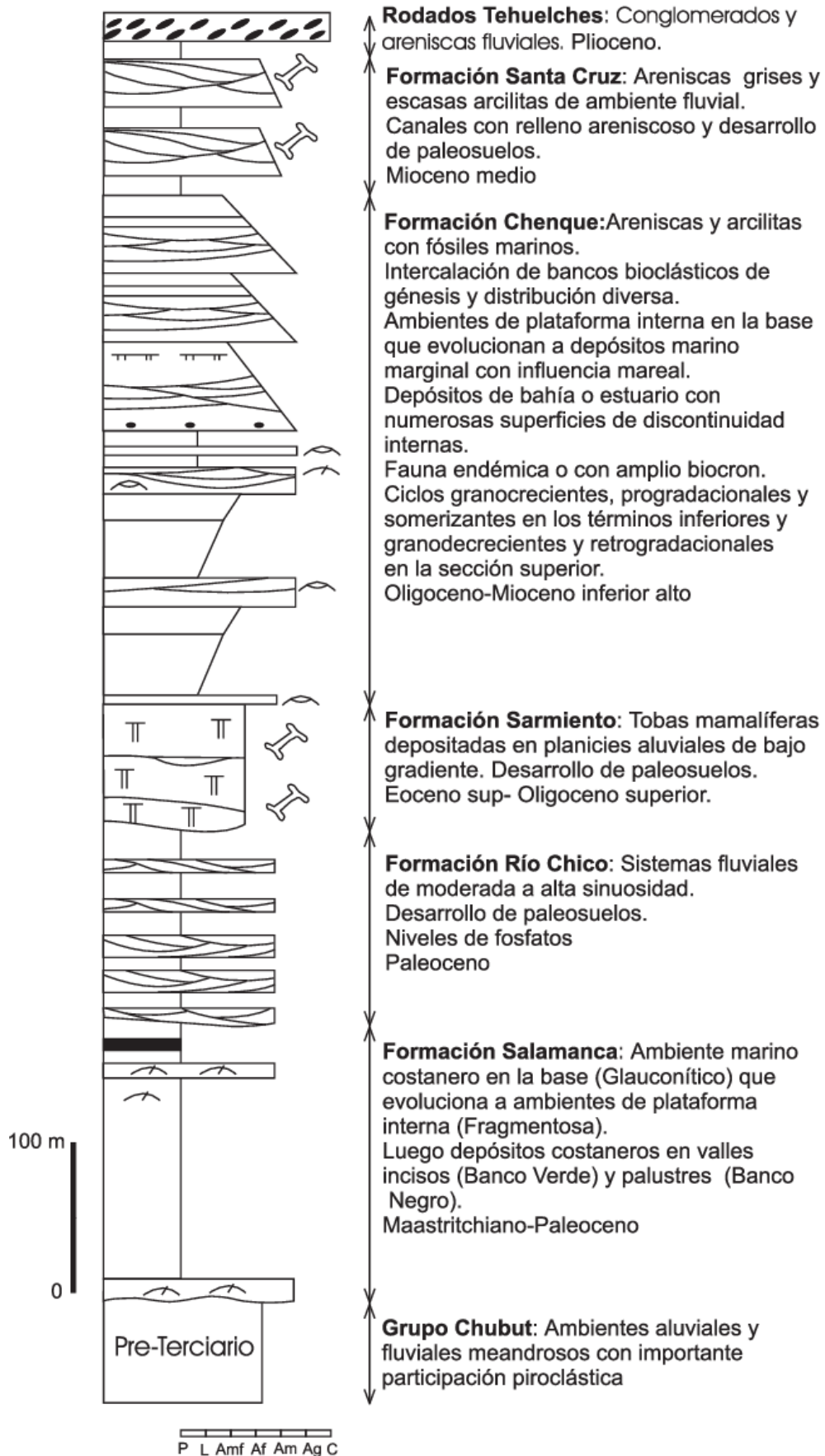


Fig.1.7- Perfil estratigráfico esquemático de la Cuenca del Golfo San Jorge (tomado de Paredes, 2002)



**Fig.1.8-** Sulfato y carbonato de calcio encontrados en (GAclay, -45.871889,-67.521590,19) formación Chenque

Estas formaciones afloran en diferentes sectores de la ciudad lo cual ha producido que un gran número de obras civiles hayan sido afectadas. Estos estratos además de poseer un muy alto potencial de expansión presentan un muy alto grado de fisuración (CRclay y GAclay). El régimen pluviométrico en esta región posee amplia variación intra e interanual, con clima árido (Ministerio de Agroindustria INTA, 2016), lo cual contribuye a potenciar el comportamiento de los suelos expansivos (Jiménez Salas, 1975).



**Fig.1.9-** Patologías presentadas en una Iglesia Evangélica construida en 1932 fundada sobre suelos expansivos empleando un sistema de cimentación superficial de época constituido por muros de mampostería ensanchados (45°44'44.5" S/67°29'06" W).

Es así como la presencia en la cuenca de más de un estrato de características expansivas y dadas las condiciones climáticas favorables para que la activación de estos ocurra, la problemática constituye en sí misma un desafío a resolver. Muchos y muy variados son los daños provocados en construcciones civiles locales (Fig.1.9, Fig.1.10, Fig.1.11, Fig.1.12, Fig.1.13), así como las soluciones constructivas empleadas (Fig.1.14, Fig.1.15) las cuales dependen del tipo de obra civil a emplazar sobre

este grupo de suelos. Los montos empleados en la remediación de las patologías presentadas en obras civiles fundadas sobre este tipo de suelos supera ampliamente el valor de las obras debido a la complejidad de las remediaciones.



**Fig.1.10-** Edificio declarado Monumento Histórico Nacional construido en el año 1919 fundado sobre suelos expansivos empleando un sistema de cimentación superficial de época constituido por muros ensanchados de mampostería (45°50'56" S/67°28'28" W ).



**Fig.1.11-** Patologías desarrolladas en Club Deportivo construido por etapas entre las décadas del '30 y '60, fundado sobre sistemas mixtos de cimentación (44°50'27" S/67°28'36" W).



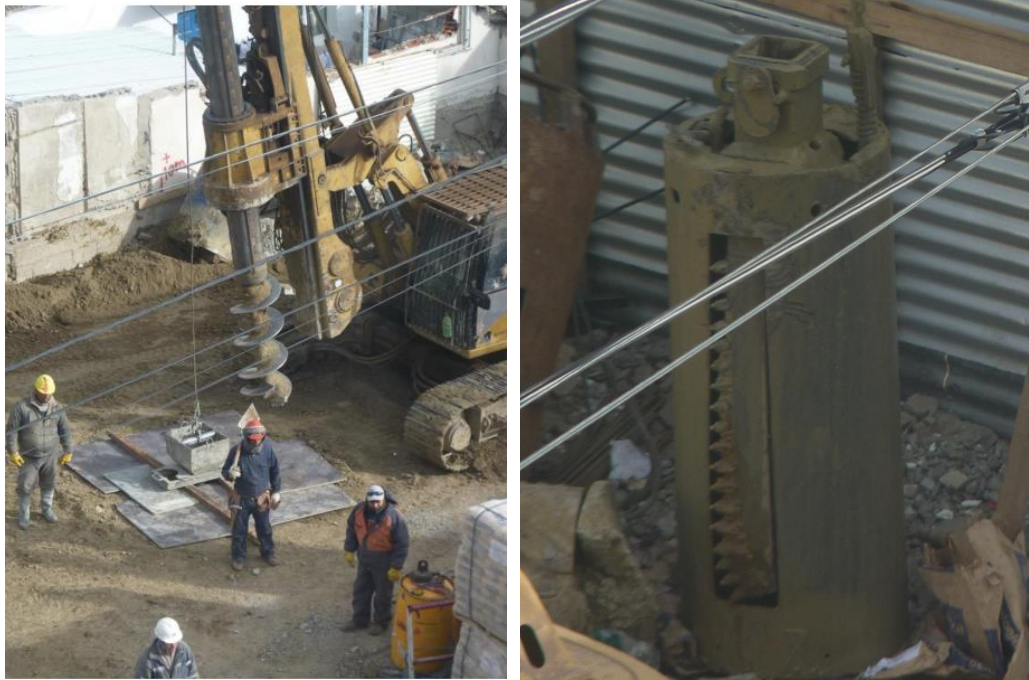
**Fig.1.12-** Deformaciones diferenciales en subsuelo de Club Deportivo construido entre la década del '30 y el '60, coordenadas -45.841034,-67.476938,19) con contrapisos apoyados directamente sobre un suelo con potencial de expansión muy alto (FRclay) y sistema de cimentación sobre pilotes.



**Fig.1.13-** Viga portamuros afectada por el hinchamiento de un suelo (GAclay) de muy alto potencial de expansión (construcción unifamiliar de dos plantas fundada sobre pilotes cortos construida en 2010, -45.871889,-67.521590,19).

Es factible el empleo de aditivos en aquellas obras en las que es posible modificar las propiedades expansivas de un material para ser empleado como material compactado. Estos aditivos deben cumplir con varias condiciones: estabilizar el material volumétricamente, mejorar o al menos mantener sus propiedades mecánicas e hidráulicas, asegurar la estabilidad de las mezclas en el tiempo sin generar un impacto negativo sobre el medio ambiente en el que se encuentran inmersas. Este

procedimiento es el procedimiento que seguir para asegurar la eficiencia de un nuevo aditivo empleado como estabilizante de suelos con características expansivas.



**Fig.1.14-** Sistema empleado para ensanchar la punta durante la perforación de un pilote colado.



**Fig.1.15 –** Sistema de cimentación sobre pilotes que incluye vigas portamuros separadas del terreno permitiendo de este modo la expansión, sin afectar las estructuras. Fundación sobre pilotes.

### **1.3. ALCANCE DE LA TESIS**

Descriptas las motivaciones e impacto regional de la investigación enfocada en el empleo de un lignosulfonato como aditivo en el mejoramiento de un suelo expansivo definiremos los alcances.

De los tres estratos expansivos identificados por medio de las cartas geológicas y patologías asociadas a los mismos uno fue seleccionado para continuar con la investigación. De la misma manera, de un grupo de catorce biopolímeros evaluados como aditivos y clasificados en cuatro subgrupos, un subgrupo fue escogido para continuar con el proceso de selección, y dentro de ese subgrupo un lignosulfonato fue seleccionado para llevar adelante la investigación.

Luego del proceso de selección del aditivo y del suelo expansivo se procedió a evaluar la eficacia y la eficiencia de cada una de las muestras incorporando como variable el tiempo. El efecto del tiempo sobre las propiedades de las mezclas fue estudiado a diferentes edades de las muestras dentro del período de un año. La evolución de la resistencia a la compresión no confinada de muestras de diferentes edades y diferentes contenidos de aditivo permitió evaluar la evolución de las propiedades mecánicas. El análisis de la microestructura y de las propiedades fisicoquímica de cada mezcla suelo-aditivo a diferentes edades facilitó la comprensión de la interacción entre ambos componentes.

Por último el impacto ambiental producido en dos diferentes condiciones: lignina disuelta en agua y lignina combinada con sales pertenecientes al suelo disueltas en agua, fue considerado junto con el análisis de los lixiviados dentro del análisis toxicológico.

No se realizaron ensayos de campo que condujeran a validar los resultados en escala real monitoreada, desarrollándose únicamente el enfoque experimental en el ámbito de un laboratorio.

### **1.4. OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

El objetivo general del estudio es determinar los fundamentos fisicoquímicos de la interacción de suelo-bioestabilizante, y establecer los mecanismos de comportamiento mecánico e hidráulico de bioaditivos adicionados a una arcilla fuertemente expansiva con focalización en el comportamiento microestructural.

Los objetivos específicos del estudio son:

- Demostrar la eficacia de una lignina o lignosulfonato seleccionado para estabilizar mecánicamente un suelo expansivo seleccionado.
- Determinar el porcentaje de aditivo óptimo en función de los cambios en el comportamiento de las mezclas.
- Evaluar la estabilidad de las mezclas en el tiempo.
- Analizar cambios microestructurales y su influencia sobre el comportamiento de las mezclas.
- Evaluar el impacto ambiental del aditivo y de la mezcla suelo-aditivo.

### **1.5. PLAN DE INVESTIGACIÓN: METODOLOGÍA**

Para demostrar la eficacia del aditivo seleccionado como estabilizante se evaluaron los comportamientos mecánico, hidráulico a nivel macro y microestructural sobre muestras con diferentes porcentajes de aditivo, incluyendo el análisis de toxicidad de los lixiviados y del aditivo actuando solo. Estos resultados fueron comparados con los obtenidos para las muestras sin aditivo.

Para determinar el porcentaje de aditivo óptimo, se evaluaron los resultados obtenidos para diferentes porcentajes del aditivo seleccionado a diferentes edades de las probetas sobre la totalidad de los ensayos realizados. La determinación de la mezcla más eficiente, técnicamente hablando, se completó con el análisis microestructural. Con el fin de evaluar la estabilidad de las muestras se incorporó la variable tiempo en el análisis. Para ello se realizaron algunos grupos de ensayos sobre probetas a diferentes edades. Esto permitió detectar posibles cambios en función del tiempo de algunas propiedades específicas representativas.

El estudio de la microestructura y la mineralogía de las mezclas permitió evaluar los mecanismos de estabilización desarrollados entre el suelo y la lignina, comprobar cambios en la macro y microporosidad, en el tamaño de las partículas, en la composición de las mezclas, así como identificar cambios no detectados por otros métodos.

Para la evaluación del impacto medioambiental de los lixiviados de las mezclas se realizaron determinaciones de pH, contenidos de sales, determinaciones de CEC, y ensayos de toxicidad. La evaluación del crecimiento y germinación de un organismo de control en dos condiciones, una dilución del aditivo, y una dilución del aditivo con sales solubles del suelo. Ambos estudios fueron realizados en diferentes concentraciones lo cual permitió completar y analizar los ensayos de toxicidad.

### **1.6. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**

La tesis está organizada en seis capítulos previo al desarrollo de los cuales se incluye la lista de publicaciones del autor (artículos relacionados con la tesis) y una lista de símbolos. Luego de la tesis se incluyen las referencias bibliográficas.

En el Capítulo 1, "Introducción", se introduce la importante presencia que tienen las arcillas expansivas en la zona del Golfo San Jorge y más precisamente en la ciudad de Comodoro Rivadavia. Se incluyen en este capítulo algunas de muchas patologías desarrolladas por el accionar de este grupo de suelos. También se mencionan las soluciones posibles para evitar sus efectos, dentro de las cuales el empleo de aditivos como modificadores de las propiedades expansivas de los suelos constituye la solución sobre la que se trabajó. Se introduce el lignosulfonato de calcio como posible estabilizante y el posicionamiento a nivel mundial en cuanto a la producción de este desecho producto de la industria de la pasta de papel.

En el Capítulo 2, “Estado del Arte”, se describen los avances realizados en los últimos años en referencia a diferentes ligninas y lignosulfonatos empleados como estabilizantes incorporados a diferentes suelos expansivos de diferentes regiones geográficas.

En el Capítulo 3, “Materiales empleados, Programa Experimental y Métodos” se presenta la caracterización de tres suelos expansivos locales, la selección del suelo a estabilizar y el bioaditivo con el cual se continuaría la investigación. Posteriormente se describen los métodos empleados, los procedimientos de ensayo y de moldeo de las probetas para cada uno de ellos. Se justifica la selección de cada ensayo y cada grupo de ensayos en su conjunto. Los métodos son agrupados de acuerdo con el tipo de comportamiento analizado en: mecánicos, hidráulicos, microestructurales y de evaluación del impacto ambiental.

En el Capítulo 4, “Resultados: presentación y breve discusión de los resultados aislados”, se presentan los resultados de cada ensayo junto con una breve discusión aislada de los mismos. En este capítulo no se realiza el análisis integrador.

En el Capítulo 5, “Discusión”, se realiza el análisis integrado de todos los resultados presentados en el Capítulo 4. Se determina el porcentaje de aditivo óptimo en función de los datos obtenidos, se analiza la influencia del tiempo sobre las propiedades evaluadas durante el desarrollo de la tesis y se considera el impacto ambiental.

Finalmente en el Capítulo 6, “Conclusiones y Recomendaciones”, se incluyen el impacto de los resultados obtenidos, la implicancia de estos, una breve comparación con los resultados obtenidos por otros autores y hacia donde deben ser dirigidos los futuros estudios.

## **2- ESTADO DEL ARTE**

### **2.1. INTRODUCCIÓN**

Los suelos expansivos se encuentran distribuidos en amplias regiones del mundo, la región patagónica del Golfo San Jorge es una de ellas. Debido a su accionar ante cambios en el contenido de humedad dan origen a numerosas patologías sobre obras civiles, las cuales una vez desarrolladas son de difícil y costosa remediación.

La principal forma de evitar que se desarrollen patologías asociadas a la presencia de arcillas expansivas es la detección durante la etapa de estudio geotécnico. Detectar la presencia de suelos con estas características permitiría proyectar estructural y arquitectónicamente la obra civil ya sea para soportar el accionar de este, modificando sus propiedades o evitando que se produzcan alteraciones en la humedad en la zona afectada por el bulbo de cargas.

El reconocimiento de las características expansivas de un suelo debe incluir no solo la correcta identificación de este, sino también la determinación del potencial de expansión y de la presión de hinchamiento. El correcto diseño estructural requiere del conocimiento de ambas características tanto en el caso de trabajar con el suelo sin modificar como con el suelo modificado mediante el empleo de aditivos. En el caso de suelos modificados, la presión de hinchamiento y el potencial de expansión son empleados como parámetro de medición de la eficacia y la eficiencia del agregado de un aditivo.

La selección del aditivo no constituía una opción hasta hace cerca de tres décadas, previamente a las cuales la cal y el cemento eran los aditivos empleados por excelencia. Los mecanismos de estabilización desarrollados entre la cal y el suelo han sido ampliamente estudiados y desarrollados desde la primera publicación de Chaston (1952). En forma progresiva se incorporaron algunos aditivos de los cuales la información disponible es escasa. En las últimas dos décadas se han incrementado las publicaciones en las cuales son evaluados aditivos cuyo impacto ambiental es menor. Entre estos aditivos, las ligninas y los lignosulfonatos han comenzado a cobrar importancia. Ambos son biopolímeros residuos de una de las industrias más importantes del mundo, producidos en cantidades excesivas y cuyo valor industrial se encuentra menospreciado (a partir de este párrafo nos referiremos a los lignosulfonatos y las ligninas solamente como lignina).

Las investigaciones publicadas centran su análisis en algunas de las propiedades de las mezclas suelo-lignina, y muy poco en los mecanismos de estabilización, el efecto del tiempo ha sido escasamente estudiado. El impacto medioambiental producido ya sea por el bioproducto o las mezclas suelo-aditivo, y la estabilidad de las mezclas en el tiempo no han sido objeto de estudio.

En resumen, se presentará la revisión de la literatura que permite estudiar y reconocer las propiedades de los suelos expansivos incluyendo la determinación del potencial de expansión y la presión de hinchamiento, los distintos aditivos empleados en la estabilización de suelos, el análisis

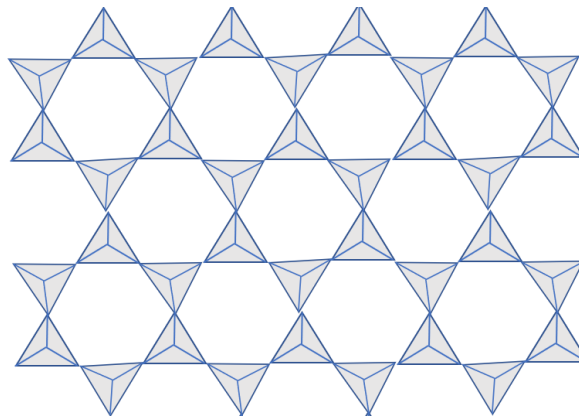
mecánico, hidráulico, mineralógico y microestructural de las mezclas, concluyendo con los criterios que pueden emplearse para evaluar el impacto ambiental.

## **2.2. MINERALOGÍA DE LAS ARCILLAS**

### **2.2.1. COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS EXPANSIVOS**

El término “arcilla”, de acuerdo con lo publicado por Mitchell y Soga (1976), ha sido empleado tanto para referirse a un tamaño determinado de partículas como a un grupo de minerales. El sistema de clasificación unificado de suelos (SUCS) se refiere a las arcillas desde el punto de vista de la granulometría, introduciendo la mineralogía a través de la determinación de los límites de Atterberg o también denominados límites de consistencia. Desde el punto de vista de la granulometría se denomina arcilla a aquellas partículas más pequeñas que  $2\mu\text{m}$ , a pesar de que no todas las partículas más pequeñas que  $2\mu\text{m}$  son arcillas mineralógicamente hablando.

En cuanto a la mineralogía, el grupo de las arcillas está compuesto por silicatos de aluminio hidratados, con hierro o magnesio ocupando algunas o todas las posiciones del aluminio en algunos de los minerales, con algunos elementos más como el sodio, potasio, calcio o magnesio (Mitchell y Soga, 1976). Estos silicatos son conocidos como filosilicatos (Fig. 2.1) debido a que las láminas de sílice tetraédrica otorgan a los minerales un hábito laminar, como puede observarse en la Fig.2.2.

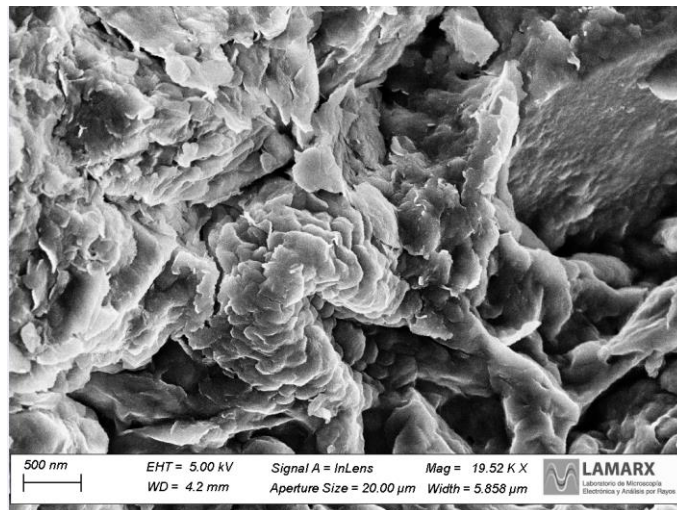


**Fig.2.1-** Filossilicato formado por sílice tetraédrica que otorga hábito laminar a los minerales (Mitchell, 1976)

### **2.2.2. MINERALES DEL GRUPO DE LOS SILICATOS: ESMECTITAS**

Identificar las propiedades expansivas de un suelo durante la etapa de exploración es el primer paso para evitar los daños que el mismo podría ocasionar al sufrir modificaciones en su contenido de humedad. Relacionados directamente con el tipo de obra serán los montos destinados a la exploración y los ensayos empleados para clasificar los suelos. En pequeñas obras civiles la identificación de un suelo expansivo, su potencial de expansión y el rango de presión de

hinchamiento que el mismo podría desarrollar son suficientes para proyectar de forma adecuada las cimentaciones y las estructuras asociadas.



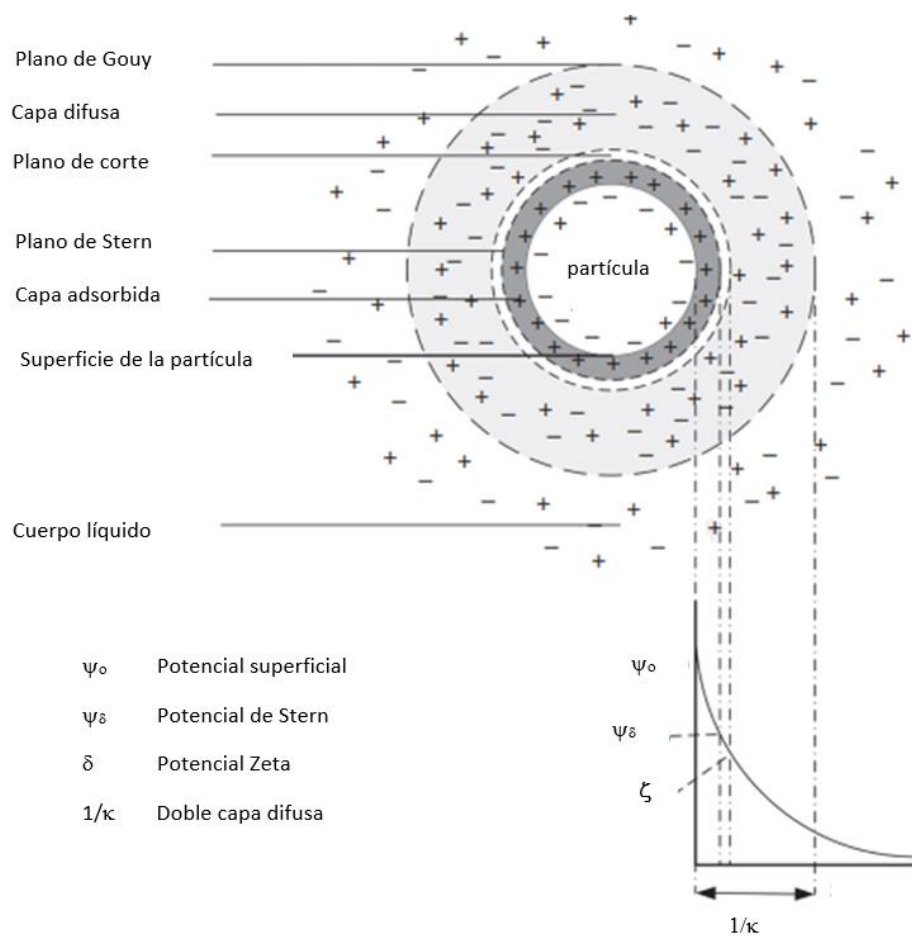
**Fig.2.2-** Partículas de arcilla montmorillonita (CRclay) tomadas mediante SEM

Existe una amplia variedad de filosilicatos cuyas propiedades dependen de la forma en que se combinan las láminas tetraédricas y octaédricas. Cuatro átomos de oxígeno rodeando un átomo de sílice es una unidad tetraédrica. Una unidad octaédrica está compuesta por un átomo de aluminio rodeado de seis hidroxilos. Una lámina de silicio se forma cuando las unidades tetraédricas de silicio se combinan. De acuerdo con las recomendaciones del Comité de Nomenclatura de la Sociedad de Minerales de Arcillas, los términos correctos a emplear en las distribuciones de los átomos, unidades estructurales y láminas en este tipo de minerales son: *plano de átomos* (plane of atoms), *lámina de unidades estructurales básicas* (sheet of basic structural units), y *capa de celdas unitarias compuesta por dos, tres o cuatro láminas* (layer of unit cells composed of two, three or four sheets) (Mitchell, 1976).

Los grupos en los que los filosilicatos pueden dividirse son: grupo de la clorita y el talco, grupo de la mica, grupo de la esmectita y la caolinita, grupo de la serpentina. El grupo de las caolinitas y las esmectitas son los que comúnmente son percibidos como arcillas.

Las caolinitas se emplean en la industria de la cerámica, son subclasificadas como una variedad no expansiva mientras que las esmectitas son subclasificadas como una variedad expansiva. Esta expansividad es causada por los cationes que se encuentran entre las láminas tetraédricas-oxígeno-tetraédricas, los cuales son  $Mg^{2+}$  o  $Ca^{2+}$  (cationes intercalados que corresponden a iones fuertemente hidratados) y poseen la capacidad de atraer moléculas de agua. Estas moléculas atraídas de agua se acumulan entre las capas de minerales separándolas y produciendo la consecuente expansión del conjunto (Forbes & Chryst, 2017). El grado de hidratación depende de la capacidad de

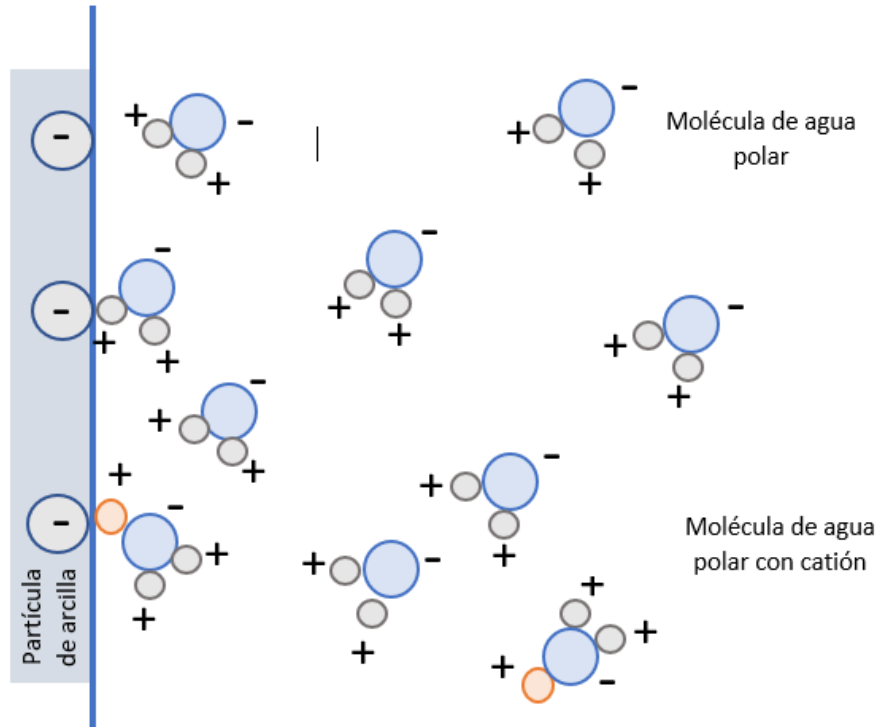
hidratación de los cationes. El balance de cargas eléctricas de las partículas de arcilla suele ser negativo debido a la rotura de la continuidad de las láminas en sus extremos o por sustitución isomórfica. La sustitución isomórfica es la sustitución de un elemento por otro sin cambios en la estructura cristalina, un ejemplo es la sustitución del aluminio por sílice en las láminas tetraédricas. En cuanto al desequilibrio de cargas en la arcilla en estado seco se restablece por medio de cationes intercambiables tales como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ . Cuando la arcilla se humedece esos cationes y algunos aniones forman desde la superficie de la lámina lo que se llama doble capa difusa (DDL) o diffuse double layer, la cual está representada en el esquema de la Fig.2.3.



**Fig.2.3-** Partícula de arcilla cargada negativamente, desarrollo de la doble capa difusa (Forbes & Chryst, 2017)

Las posiciones de los cationes y aniones dentro de la masa del suelo están condicionadas por la acción de las fuerzas electrostáticas de difusión y atracción, desde la masa de agua y desde la partícula de arcilla respectivamente. Las moléculas de agua, como consecuencia de su estructura polar, son atraídas hacia la superficie negativamente cargada de las partículas y hacia los cationes de la DDL. La condición de polaridad de la molécula de agua es consecuencia del arreglo que poseen los átomos de hidrógeno ( $105^\circ$  entre sí) en su unión con el átomo de oxígeno. El fenómeno de atracción

de las moléculas de agua hacia la superficie de las partículas es conocido como enlace de hidrógeno. Algunos cationes hidratados también son atraídos hacia la superficie de la partícula como puede observarse en Fig.2.4.



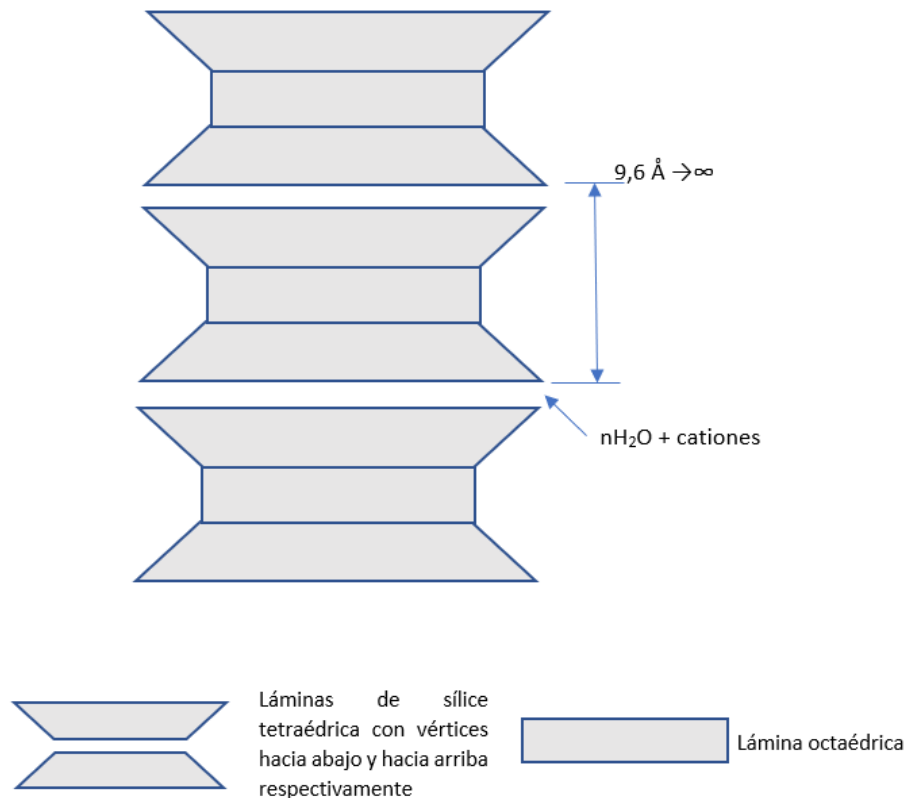
**Fig.2.4-** Desarrollo de DDL consecuencia de la atracción de moléculas polares de agua hacia la partícula de arcilla cargada negativamente (Diefenderfer, 2002)

La capa formada por las moléculas de agua atraídas sobre la superficie de la arcilla es conocida como agua adsorbida, en esta zona el agua posee escasa a nula energía cinética. El porcentaje relativo de agua adsorbida y el agua libre dependen de la constante dieléctrica de la masa líquida. Esa masa líquida tiene en solución iones como:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{N}^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , se encuentra distribuida en los poros de la masa del suelo, ya sea se encuentre saturado o no saturado.

Según Mitchel y Soga (1976), el espesor de la doble capa difusa depende de: la variación de la carga superficial ( $\psi_0$ ), de la concentración de electrolitos ( $n_0$ ), de la valencia de los cationes ( $v$ ), de la constante dieléctrica del medio ( $D$ ), de la temperatura ( $T$ ).

Dentro del grupo de la esmectita se encuentra la especie mineral montmorillonita (Mitchel y Soga, 1976). Consiste en una lámina octaédrica entre dos láminas de sílice tetraédrica (Fig.2.5), todos los vértices de los tetraedros hacia el centro de la estructura. Los oxígenos de los vértices de los tetraedros son comunes a los octaedros. Los aniones restantes de las láminas octaédricas que quedan posicionados en los huecos de las láminas tetraédricas son hidroxilos.

Las láminas se distribuyen unas sobre otras en forma continua, se unen mediante fuerzas de van der Waals y por cationes, estas uniones pueden presentar problemas en los balances eléctricos debido a que son débiles. Por esta razón pueden separarse por adsorción de agua o clivaje (tendencia de los minerales a romperse en ese plano debido a la debilidad de las uniones).



**Fig.2.5-** Estructura de la montmorillonita, mineral del grupo esmectita.

Por esta razón, las partículas de minerales del grupo de las esmectitas presentan facilidad a romperse en una dirección (clivaje), a ser dispersas en agua consecuencia de la separación entre los módulos de dos láminas de sílice tetraédrica y una octaédrica. Las partículas presentan una apariencia laminar con un espesor muy pequeño, lo que se traduce en superficies específicas muy grandes. La superficie específica primaria, aquella superficie debida solamente a la superficie de las partículas y no a la de las zonas interlaminares se encuentra en el orden de 50 a 120  $\text{m}^2/\text{g}$ . Mientras que la superficie específica secundaria que es aquella en la cual puede penetrar cualquier fluido polar puede alcanzar el rango de 700 a 800  $\text{m}^2/\text{g}$  (Mitchel y Soga, 1976).

Este grupo de minerales se encuentran presentes en zonas áridas y semiáridas, en las cuales la evaporación supera a la precipitación. Se forman de la meteorización de rocas ígneas y deposición de cenizas volcánicas ubicadas en zonas donde el drenaje y el escurrimiento superficial son deficientes, principalmente en ambientes marinos con pH alcalino, contenido de electrolitos elevado,

alto contenido de sílice y magnesio, además de calcio, sodio y potasio. En Fig.2.6 y Fig.2.7 se observa el color amarillo verdoso con zonas más oscuras debido a un mayor contenido de humedad, correspondiente a un suelo compuesto 80% de esmectita. También puede identificarse la rotura con planos preferenciales limpios los cuales se encuentran normalmente en arcillas preconsolidadas y originados por ciclos de hinchamiento y contracción en períodos de humedecimiento y secado por lluvias y sequías. Estas juntas permiten la acumulación de agua en períodos de lluvia que a lo largo del tiempo producen la debilitación por ablandamiento de la arcilla.



**Fig.2.6-** Fracción de roca sedimentaria, compuesta por 80% de esmectita inmediatamente después de extraída, color amarillo verdoso en estado natural, cota -3.0m.



**Fig.2.7-** La misma fracción de roca sedimentaria, compuesta por 80% de esmectita, fuertemente fisurada unos minutos después de expuesta al aire y extraída de la calicata

### **2.3. SUELOS EXPANSIVOS: IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN EMPLEANDO ENSAYOS BÁSICOS**

En su publicación, Sridaharan & Prakash (2016) presentan una amplia selección de métodos simples que basándose en parámetros como el límite líquido (LL), límite plástico (LP), límite de contracción (LC), fracción arcillosa y fracción coloidal, índice de expansión libre (de sus siglas en inglés

free swell index, FSI), relación de expansión libre (de sus siglas en inglés free swell ratio, FSR), permiten determinar el potencial de expansión. Por otro lado, Abduljawwad y Al-Sulaimani (1993) presentan criterios en los que empleando la actividad ( $A_s$ ), la humedad natural ( $\omega_n$ ), el límite líquido, porcentaje de la fracción arcillosa e índice plástico (IP) es posible clasificar a los suelos finos de acuerdo con su potencial de expansión. Todos los métodos ofrecen una alternativa simple para estimar el potencial de expansión del suelo, aplicable a pequeñas obras.

### **2.3.1. LÍMITES DE CONSISTENCIA**

Los límites de consistencia han sido empleados inicialmente para clasificar los suelos utilizando para ello diferentes sistemas de clasificación (SUCS, ASSHTO), posteriormente se evaluó su validez para identificar el potencial de expansión de un suelo (Holtz & Gibbs, 1956, Altmeyer, 1956, Chen, 1988) (Tabla 2.1, Tabla 2.2, Tabla 2.3, Tabla 2.4, Tabla 2.5) o más recientemente para el proceso de preselección de aditivos (Orlandi et al., 2021). Poseen la ventaja de que se encuentran ampliamente difundidos, requieren una pequeña cantidad de muestra y son de fácil determinación, su principal desventaja es el factor humano.

En el caso del límite líquido, es importante considerar el método utilizado para la determinación. El primer y más difundido método empleado para obtener el LL es el cascador de Casagrande, seguido por el cono de penetración en todas sus variantes. Diversos autores han publicado resultados en referencia a las discrepancias obtenidas empleando el cono de penetración y el cascador de Casagrande.

Sherwood & Ryley (1970) consideran que para que el resultado obtenido empleando un cono de penetración sea válido, deberían estandarizarse tanto el procedimiento de preparación de la muestra, la penetración, el ángulo del cono, y la definición misma del límite líquido. En la búsqueda de publicaciones en que se emplea el cono de penetración se han encontrado diferentes pesos, ángulos y altura de caída del cono, algunos de ellos presentados en la publicación de Sherwood & Ryley (1970).

En el estudio realizado por De Wayne et al. (1984) también se analiza la validez de la determinación del LL mediante el cono de penetración, se utilizó un único diseño de cono (el empleado en Francia el cual coincide con el empleado en la norma francesa correspondiente a bitúmenes) y se introduce la variable humana como fuente de error.

También Andrade et al. (2011) en su revisión sobre la determinación de los límites de consistencia analiza los resultados obtenidos empleando el cascador pero en sus dos variantes de empleo: el método de un punto y el método multipuntos. Los autores coinciden en que a través del método multipunto la variable humana se reduce, mientras que el empleo del método de un punto se recomienda para operadores experimentados o en el control de materiales. Andrade recomienda

no emplear el método de un punto sobre todo en suelos marinos y suelos orgánicos debido a que de acuerdo con su experiencia el factor de corrección función del número de golpes no coincide con el obtenido para suelos plásticos no marinos ni suelos con contenido importante de materia orgánica.

**Tabla 2.1-** Clasificación de suelos expansivos basados en el LL (Chen, 1956; Snethan et al., 1977; IS1948, 1970). Tomado de Sridharan & Prakash (2016).

Potencial de expansión	LL [%]		
	Chen (1965)	Snethan et al. (1977)	IS:1498 (1970)
Bajo	<30	<50	20-35
Medio/marginal	30-40	50-60	35-50
Alto	40-60	>60	50-70
Muy alto	>60	-	70-90

**Tabla 2.2-** Clasificación de suelos expansivos basados en el LC (Holtz & Gibbs, 1956) Tomado de Sridharan & Prakash (2016).

Potencial de expansión	LC [%]
	Holtz & Gibbs (1956)
bajo	>15
medio	10 - 16
alto	7 -12
muy alto	<11

**Tabla 2.3-** Clasificación de suelos expansivos basados en el LC (Altmeyer, 1956) Tomado de Sridharan & Prakash (2016).

Cambio de volumen	LC[%]
	Altmeyer (1956)
no crítico	>12
marginal	10 -12
critico	<10

En cuanto a la determinación del LP, el método del rolo de 3mm es el procedimiento más difundido. Este método ha sido muy criticado por depender directamente del criterio del operador. Algunos autores han publicado alternativas para su determinación que incluyen modificaciones al método del cono de penetración (Ahmad et al., 2008, Sivakumar et al., 2015) lo cual permitiría reducir el error humano. Ahmad investigó otras tres posibles técnicas existentes cuyos resultados no fueron

los esperados. Sivakumar desarrolló un sistema de medición, introduciendo modificaciones al método del cono, que permitieron reducir el efecto del factor humado. El sistema fue evaluado por medio de grupos de operadores no relacionados entre ellos, pertenecientes a diferentes centros de investigación. Los resultados obtenidos convalidaron el método. La principal desventaja que presenta es la complejidad comparada con la simplicidad del método del rolo.

El último de los límites de consistencia que puede ser utilizado en la evaluación del potencial de expansión de un suelo es el límite de contracción. El LC corresponde a la humedad a la cual el volumen del suelo ya no disminuye al disminuir el contenido de humedad. Es uno de los límites que habitualmente no se incluye entre los ensayos realizados en los laboratorios geotécnicos. Permite evaluar la deformación volumétrica que puede sufrir un suelo durante su proceso de secado. Para su determinación en laboratorio se realiza la medición de los volúmenes por medio del empleo de mercurio (ASTM D 427-04), aunque utilizando las rectas U y A en la carta de plasticidad una vez que el suelo fue clasificado, también puede ser obtenido.

Otra opción menos difundida es obtener el LC mediante la determinación del índice de contracción lineal, el cual resulta menos dependiente del operador de acuerdo con los resultados presentados por Cerato y Lutenecker (2006). Posee la misma limitación que el LC obtenido mediante el empleo de mercurio: en ambos métodos durante el secado al aire al producirse fisuración en las probetas las determinaciones pierden exactitud. En el caso de medición de volúmenes con mercurio, la alta tensión superficial de este le impide ingresar dentro de las fisuras sobreestimándose así el volumen medido. En el caso del límite de contracción lineal debido a que las fisuras suelen no atravesar completamente a las probetas se realiza una estimación de la longitud final promedio, hecho que introduce error en la determinación.

**Tabla 2.4-** Clasificación de suelos expansivos basados en el IC:1498 (Bureau of Indian Standard) Tomado de Sridharan & Prakash (2016)

Grado de expansividad Potencial de hinchamiento	LC [%] IS:1498 (1970)
Bajo	<15
Medio	15-30
Alto	30-60
Muy alto	>60

En cuanto al IP empleado como referencia para obtener el potencial de expansión (Holtz & Gibbs, 1956, Chen, 1988, IS:1498, 1970) Pedarla, Chittoori y Puppala (2011) en su artículo sobre la influencia de la mineralogía y el índice plástico sobre la eficiencia en la estabilización de arcillas

expansivas sugieren considerar el porcentaje de montmorillonita junto con el valor del IP para evaluar el potencial de expansión del suelo. En sus análisis observaron que el tipo de arcilla influía directamente sobre la exactitud de los resultados.

**Tabla 2.5-** Clasificación de suelos expansivos basados en el IP.

Potencial de expansión	IP [%]				
	Holtz & Gibbs (1956)	BRE(*) (1993)	Chen (1988)	IS:1498 (1970)	NHBC(**) (2011)
Bajo	<15	<20	0-15	<12	10 - 20
Medio	15-25	20 - 40	15 – 20	12 – 23	20 - 40
Alto	25-41	40 - 60	20-55	23-32	>40
Muy alto	>35	>60	>55	>32	---

(\*) Building Research Establishment Digest 240

(\*\*)National House-Building Council

**Tabla 2.6-** Potencial de expansión basado en el FSI. Tomado de Sridharan & Prakash (2016)

Potencial de expansión	FSI [%]
	IS:1498 (1970)
bajo	<50
medio	50-100
alto	100-200
muy alto	>200

**Tabla 2.7-** Potencial de expansión basado en el FSR. Tomado de Sridharan & Prakash (2016)

FSR	Tipo de arcilla	Potencial de expansión	Tipo dominante de mineral de arcilla
≤1.0	no expansivo	insignificante	caolinita
1.0-1.5	mezcla de no expansivo y expansivo	bajo	mezcla de caolinita y montmorillonita
1.5-2.0	expansivo	moderado	montmorillonita
2.0-4.0	expansivo	alto	montmorillonita
>4.0	expansivo	muy alto	montmorillonita

### **2.3.2. ÍNDICE DE EXPANSIÓN LIBRE Y RELACIÓN DE EXPANSIÓN LIBRE**

Otros índices que han sido utilizados para clasificar los suelos de acuerdo con su potencial de expansión libre probetas de vidrio graduadas. Se denominan por sus siglas en inglés como FSI (free swell index) y FSR (free swell ratio). Se han encontrado referencias sobre ambos en publicaciones correspondientes a India (IS:1498, Bureau of Indian Standards) región donde los suelos expansivos son ampliamente estudiados. Shridharan & Prakash (2000) y Asuri & Keshavamurthy (2016) los incluyen en sus trabajos. Estos índices analizan el comportamiento de dos muestras de 10g pesadas luego de ser secadas al horno, obtenidas del pasante por el tamiz N°10, una de ellas sumergida en un líquido no polar (kerosene) y la otra en agua destilada colocadas dentro de sendas probetas graduadas de 50ml. De la relación entre las lecturas al cabo de 24 horas se obtienen FSR y FSI (Tabla 2.6 y Tabla 2.7). Estos índices permiten identificar el mineral del que se compone el suelo en estudio dado que se realiza sobre un material triturado y tamizado, no sobre una probeta remoldeada o en estado natural. FSR y FSI son índices que pueden determinarse con poca dificultad y rapidez en los cuales el factor humano no posee mayor influencia.

### **2.3.3. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE HINCHAMIENTO POR MEDIO DEL HINCHAMIENTO LIBRE**

La determinación del hinchamiento libre empleando el método del edómetro (ASTM D4546-14) puede considerarse un método directo para evaluar el potencial de expansión de un suelo (Sivapullaiah, 1987). El procedimiento consiste en un ensayo de expansión libre de una probeta limitada diametralmente a deformarse, con registros de deformación versus tiempo. La probeta se encuentra sumergida, el agua tiene acceso por ambos extremos, se aplica una carga inicial de 1kPa, y el tiempo inicial corresponde al momento en que se inunda la celda. El ensayo finaliza cuando las lecturas de deformación axial se estabilizan.

Este método fue presentado por Holtz & Gibbs (1956), Sivapullaiah (1987) introdujo modificaciones para reducir los errores del método original. Por medio del trazado de la curva de expansión libre es posible analizar las diferentes etapas desarrolladas por un suelo durante el ensayo (Soltani, 2017). Las etapas pueden ser identificadas en un gráfico en escala semilogarítmica de deformación axial vs tiempo, y corresponden a una deformación inicial explosiva (ES), seguida por una etapa en la que se desarrolla la deformación primaria (PS) y por último la deformación secundaria (SS). Cada una de las etapas corresponden a diferentes etapas de ingreso del agua dentro de la probeta.

De acuerdo con lo publicado por Delage (2007), los suelos expansivos presentan una distribución bimodal de la porosidad (Delage, 2007) con un volumen de poros de menor tamaño que conforman la intraporosidad, y un volumen de poros de mayor tamaño que conforman la

interporosidad. Durante la expansión inicial explosiva se saturan los interporos, durante la deformación primaria se saturan los intraporos, y durante la expansión secundaria se desarrolla la doble capa difusa (Alazigha, 2015).

El resultado del ensayo del edómetro de expansión libre se expresa como porcentaje de deformación referido al espesor inicial de la muestra. Este resultado permite clasificar al suelo ensayado en función de su potencial de expansión (Tabla 2.8).

**Tabla 2.8-** Potencial de expansión basado en los resultados del ensayo edométrico (Sed et al., 1962; Holtz & Gibbs, 1956). Tomado de Sridharan & Prakash (2016)

Potencial de expansión	Expansión en el edómetro [%]	
	Holtz & Gibbs 1956	Seed et al. 1962
Bajo	<10	0 - 1.5
Medio	10 - 20	1.5 - 5
Alto	20 - 30	5 - 25
Muy alto	>30	>25

#### 2.3.4. ACTIVIDAD (As)

El concepto de actividad fue introducido por Skempton (1953). Uniendo los valores del IP obtenido para muestras del mismo suelo al que se le adicionan diferentes porcentajes de partículas menores a 2  $\mu\text{m}$  versus el porcentaje en peso de esas partículas se obtiene una recta cuya pendiente es la actividad de ese suelo. Es así como cada suelo posee una actividad que puede obtenerse de la relación entre el IP y el correspondiente porcentaje en peso de partículas menores a 2  $\mu\text{m}$ . De acuerdo con Mitchell (1976) esto se cumple para la mayoría de los suelos inorgánicos y las actividades promedio para varios minerales arcillosos son las que se muestran en Tabla 2.9.

Determinar As permite tener una referencia del potencial de expansión que incorpora, de forma directa, el tipo de mineral de arcilla que el suelo posee en su composición (Tabla 2.10). Para la determinación del porcentaje de partículas con tamaño menor a los 200  $\mu\text{m}$  pueden emplearse tres diferentes métodos: hidrómetro o Bouyoucos, método de la pipeta o de Robinson, Mastersizer 3000.

El método del hidrómetro o de Bouyoucos, parte de hipótesis que limitan la exactitud de los resultados sobre todo en suelos expansivos. La principal hipótesis es la forma esférica de las partículas, necesaria para aplicar luego la ley de Stokes. En la preparación de las muestras se emplea un defloculante cuya función es romper los flóculos de arcilla (ASTM D422-63). La defloculación se realiza tanto químicamente (calgón, hexametáfosfato de Na, HONa,  $\text{Co}_3\text{Na}_2$ , etc.) como mecánicamente (por agitado y batido). No se eliminan ni materia orgánica ni carbonato de calcio de las muestras como parte de la preparación para la realización del ensayo.

**Tabla 2.9-** Actividad de diferentes minerales de arcilla. Tomada de Mitchell (1976).

Mineral	Actividad
Esmectita	1 - 7
Illita	0.5 - 1
Caolinita	0.5
Halloysita ( $2\text{H}_2\text{O}$ )	0.5
Halloysita ( $4\text{H}_2\text{O}$ )	1
Atapulgita	0.5 - 1.2
Alofano	0.5 - 1.2

El método de la pipeta o de Robinson, permite realizar el análisis de las fracciones al igual que en el método del hidrómetro pero incorpora procesos de eliminación exhaustivos de materia orgánica, sales, carbonato de calcio, además de emplear procesos de defloculación química y mecánica (Pellegrini, 2019). Este método suele emplearse en investigación antes que en estudios geotécnicos.

**Tabla 2.10-** Clasificación de suelos expansivos basados en la actividad (Tomada de Mitchel, 1976)

Actividad (Ac)	Naturaleza del suelo	Potencial de expansión
$<0.75$	Inactivo	Bajo
$0.75 < A < 1.25$	Normal	Medio
$1.25 < A < 2.00$	Activo	Alto
$2.00 < A$	Muy activo	Muy alto

Un aparato que puede emplearse y ha cobrado importancia en la última década es el Mastersizer3000, un analizador de tamaño de partículas que emplea una suspensión de suelo previamente lavado para eliminar las sales. Mediante la técnica de difracción láser se obtiene una curva de distribución en el rango de tamaño de partícula de  $0.02$  a  $2000\mu\text{m}$  (CAS Instrumental, 2021).

El principal inconveniente que presenta el empleo de este aparato es el proceso de lavado previo de las sales, al igual que en el método de la pipeta o de Robinson, las cuales suelen estar presentes en grandes cantidades en suelos expansivos de origen marino. La curva que se obtiene empleando el Mastersizer3000 es continua.

### 2.3.5. SUPERFICIE ESPECÍFICA

La determinación de la superficie específica permite clasificar las partículas de acuerdo con su mineralogía. Diferentes arcillas presentan formas de partículas diferentes, desde esféricas (caolinita) a laminares (montmorillonita) y dependiendo de la forma de la partícula será la correspondiente superficie específica (Tabla 2.9). Los métodos empleados para obtener  $S_e$  son varios y se fundamentan en diferentes conceptos: método de adsorción de nitrógeno (BET por las iniciales de sus autores Brunauer-Emmett-Teller), microscopía de fuerza atómica (AFM por las siglas en inglés atomic force microscopy), adsorción de eter monoetil etilenglicol (EGME de las siglas en inglés de ethylene glycol monoethyl ether) y método del punto final empleando azul de metileno (MBM: metilene blue method).

**Tabla 2.11-** Superficie específica para diferentes tipos de arcillas (Mitchel, 1976)

Tipo de arcilla	Se
caolinita de elevada cristalinidad	15 m <sup>2</sup> /g
caolinita de baja cristalinidad	50 m <sup>2</sup> /g
halloisita	60 m <sup>2</sup> /g
illita	50 m <sup>2</sup> /g
montmorillonita	80-300 m <sup>2</sup> /g
sepiolita	100-240 m <sup>2</sup> /g
paligorskita	100-200 m <sup>2</sup> /g

Uno de los métodos más simples, económicos y rápidos es el que emplea azul de metileno con la técnica de punto final descrito por Santamarina et al. (2002). La superficie específica es obtenida computando la cantidad de cationes de azul de metileno absorbidos por las cargas negativas distribuidas en la superficie de las partículas de arcilla. Como cada catión ocupa una superficie determinada contabilizando la cantidad de cationes absorbidos puede obtenerse  $S_e$ . La forma de identificar el momento en el cual dejan de ser adsorbidos los iones de metileno sobre la superficie es por la formación de un halo disperso alrededor de una gota colocada sobre un papel de filtro. La gota está compuesta por una solución de azul de metileno incorporada n veces a una solución de agua

destilada-partículas de suelo. El  $n$  permite calcular la concentración de azul de metileno en la solución.

El empleo de la técnica BET para determinar la porosidad por medio de la adsorción física de moléculas de nitrógeno sobre una superficie sólida permite estimar la superficie específica de las partículas de suelo. Esta técnica permite obtener también otras propiedades como: diámetro de poros, volumen parcial y acumulado de poros en etapas de adsorción y desorción. EGME emplea la técnica de adsorción de partículas pero empleando un líquido no polar en lugar de nitrógeno.

La técnica AFM permite determinar la superficie específica de partículas aisladas requiriéndose pequeñas cantidades de muestra. Es empleada principalmente en cristalografía, y en aquellos casos en los que la técnica BET no puede ser empleada. Además de la superficie específica permite determinar el área basal específica y la superficie específica de los bordes.

Match et al. (2011) realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos mediante BET, AFM y por EGME. En su estudio concluye que los resultados obtenidos por medio de BET se encontraban muy por debajo de los valores esperados, mientras que los valores obtenidos empleando AFM muy por encima. El método EMGE consiste en saturar una muestra con este gas, eliminar el exceso de fluido mediante un desecador de vacío hasta que se forme una capa monomolecular en la superficie del suelo. Esta técnica, de acuerdo con las experiencias publicadas por Cerato and Lutenegger (2002) puede ser empleada en un amplio rango de  $S_e$ , 15 a 800  $m^2/g$ . El principal inconveniente que presentan los métodos que se basan en la adsorción de líquido, en el caso de EMGE el nitrógeno, se presenta en materiales con alto contenido de montmorillonitas y se debe al tamaño muy pequeño de los poros, extremadamente baja permeabilidad, granos muy pequeños, y la fuerte relación entre las partículas y el agua dentro de la estructura misma del suelo. Este mismo autor menciona los ensayos MIP y compara los resultados obtenidos por ambas técnicas. El alcance teórico de los ensayos MIP es 2nm aunque para alcanzar tamaños de poros tan reducidos mediante la inyección de mercurio el autor estima deban aplicarse presiones muy altas. Estas presiones producirían como efecto secundario la apertura de poros cerrados lo cual afectaría las mediciones reales. En cuanto al ensayo AFM considera que el tratamiento de la muestra previamente a la realización del ensayo produce la separación de las láminas de arcilla o lamelas produciendo de este modo un incremento en las lecturas de porosidad.

Resumiendo, el conocimiento de la superficie específica de un suelo con el fin de determinar su potencial de expansión puede realizarse empleando técnicas tan simples como el último punto con azul de metileno o tan complejas como el método AFM. Para la geotecnia básica el empleo del método de azul de metileno ofrece resultados de forma rápida. A los fines de la investigación, y de acuerdo con las publicaciones publicadas, cada método posee limitaciones directamente relacionadas con la microestructura de la arcilla: su tamaño de poros, la distribución de esos tamaños

de poros, la forma cristalográfica de sus minerales, la forma de la partícula. Cada técnica debe ser evaluada considerando sus ventajas y limitaciones y sus resultados comparados en consecuencia.

## **2.4. SUELOS EXPANSIVOS: DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE HINCHAMIENTO**

Según Shuai (1996) *“la presión de hinchamiento es la presión requerida para mantener o restaurar el suelo a su relación de vacíos inicial antes de que el agua pudiese acceder a la masa de este...”*. Determinar la presión de hinchamiento (PH) de un suelo clasificado con un potencial de expansión alto a muy alto en el caso de proyectos nuevos permite diseñar las fundaciones y las estructuras, o verificar su funcionamiento en el caso de construcciones que presentan patologías asociadas a este tipo de suelos.

Un gran número de investigadores ha intentado obtener relaciones empíricas en las que parámetros como los límites de Atterberg, la humedad inicial, el porcentaje de la fracción arcillosa, gravedad específica, la densidad seca, son empleadas para obtener PH. En general todos los investigadores concuerdan con el criterio de que PH se incrementa con el incremento de la densidad seca inicial, con el incremento del contenido de arcilla y con el decremento de la humedad inicial.

En cuanto a los métodos de laboratorio utilizados para su determinación pueden clasificarse en métodos directos o métodos indirectos de acuerdo con la forma en que se obtiene la presión de hinchamiento. También pueden ser clasificados en función de la forma de aplicación de la carga: si la carga se mantiene constante o si es modificada a lo largo del ensayo.

Los métodos directos son aquellos en los cuales la medición de la presión de hinchamiento se realiza impidiendo la deformación de la probeta. El método de volumen constante y cero hinchamiento pertenecen a este grupo. En los métodos denominados indirectos se registran las deformaciones versus el tiempo a diferentes condiciones de carga para luego obtener la presión de hinchamiento. Algunos de los métodos empleados son el de expansión libre, hinchamiento nulo, volumen constante, edómetro, doble edómetro, e hinchamiento restringido. Todos los métodos son modificaciones del método del edómetro. Holtz y Gibbs (1956), Jennings and Knight (1957), Lambe y Whitman (1959) fueron los primeros en emplear el ensayo edométrico para obtener la presión de hinchamiento.

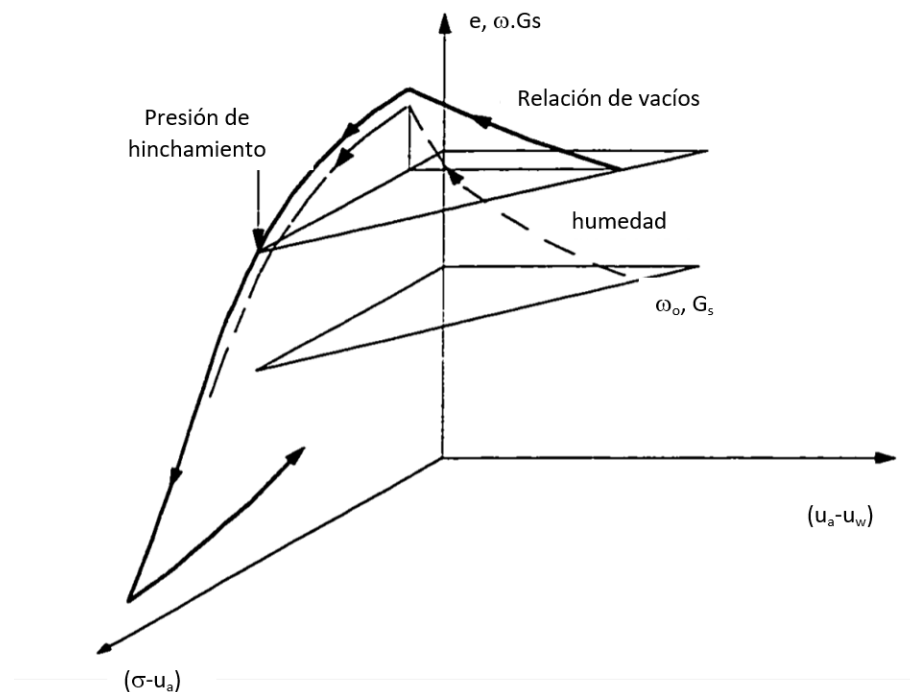
### **2.4.1. MÉTODO DEL EDÓMETRO**

Este ensayo se realiza en una celda edométrica (Free Swell Oedometer Test ASTM 4546D-95). En la primer etapa se permite la expansión libre con la aplicación de una pequeña carga inicial (1psi=6.9kPa) hasta estabilizar. Luego se aplican sucesivos escalones de carga (escalones de consolidación que comienzan con 25 kPa y finalizan con 1600 kPa) que progresivamente acercan el espesor de la probeta al espesor inicial, en términos de la relación de vacíos se regresa a la relación

de vacíos inicial (Fig.2.8). Diversos autores analizados presentan discrepancias en la realización del método. Algunos permiten expandir libremente la probeta hasta que las lecturas se estabilizan. Otros limitan la etapa de expansión libre al momento en que finaliza la expansión primaria. Otros limitan cada escalón a 24 horas de duración cada uno.

### 2.4.2. MÉTODO DEL EDÓMETRO SIMPLE

Es similar al método del edómetro con la diferencia de que la etapa de expansión libre inicial comienza con una carga igual a la sobrecarga a la que se encontrará sometido el material ensayado en el terreno. La segunda etapa consiste en inundar la celda al mismo tiempo que se inician el cronómetro y las lecturas de las deformaciones. El procedimiento a partir de este momento es el mismo que el del método del edómetro.



**Fig.2.8-** Representación del "stress path" del ensayo del edómetro (tomado de Fangsheng, 1996, after Fredlung 1995)

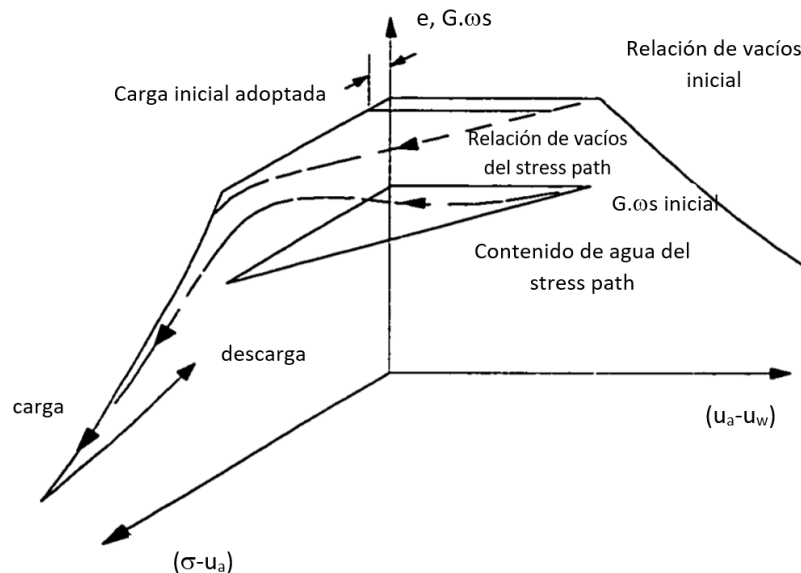
Una segunda variante del método del edómetro es el denominado Método B en ASTM 4546, consiste en aplicar inicialmente una sobrecarga equivalente a la carga que transmitirá la futura obra civil, y luego inundar la celda. Una vez finalizada esta etapa de expansión libre se continúa con la etapa de sobrecarga gradual hasta obtener la relación de vacíos inicial de la probeta ensayada.

Una tercera variante consiste en aplicar una carga inicial con una magnitud de entre 25kPa y 100kPa, valor que depende de las condiciones in situ de la probeta. Luego de 24h se inunda la celda

y se permite la expansión libre bajo la carga aplicada. El ensayo continúa como en el ensayo edométrico.

### 2.4.3. MÉTODO DE VOLUMEN CONSTANTE.

Este método considerado dentro del grupo de métodos directos se encuentra también entre los métodos de carga variable. Consiste en aplicar una pequeña carga en el momento de inundar. Cuando la probeta comienza a expandirse se aplican cargas pequeñas para restringir la deformación. Se continúa aplicando cargas hasta que las deformaciones se estabilizan. Alcanzado este estadio, el ensayo continúa con un proceso de carga y descarga como el realizado en el edómetro (Fig.2.9).



**Fig.2.9-** Representación del "stress path" del ensayo de volumen constante (tomado de Fangsheng, 1996, after Fredlung 1995)

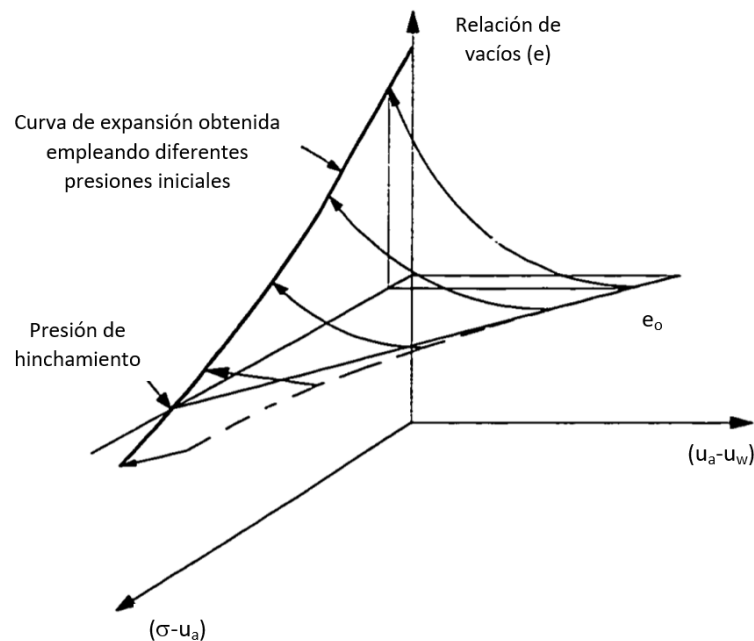
Una variante de este método consiste en impedir la deformación vertical mientras se realiza el registro de la carga necesaria para contener la deformación axial. La deformación diametral es restringida por medio de un anillo robusto que impide estas deformaciones. El registro de la carga desarrollada por la probeta en su intento por expandirse (la carga dividida por el área de la probeta se traduce en la presión de hinchamiento) es registrada ya sea por medio de un aro dinamométrico o una celda de carga. Tanto el aro como la celda traducen una deformación en una lectura de carga proceso que implica una reducción en la presión de hinchamiento (Tang et al., 2011).

La presión desarrollada 24 horas después de inundada la celda corresponde a la presión de hinchamiento de acuerdo con la ASTM D4546-03. Tang et al. (2011) estima que una variación tan pequeña como el 0,5% del espesor original de la probeta podría conducir a una subestimación de la

presión de hinchamiento del orden del 45 al 60% y que la rigidez del conjunto en el que se realiza el ensayo es quien define la exactitud de los resultados obtenidos. En su publicación propone un nuevo ensayo en el que el registro de las presiones se realiza por medio de sensores de presión permitiendo ajustar las deformaciones por medio de pequeños escalones de carga. La celda puede ser montada dentro de un porta celda rígido o también en una prensa de carga en la que se realizan ensayos triaxiales.

#### 2.4.4. MÉTODO DE HINCHAMIENTO RESTRINGIDO

Este método consiste en determinar la presión de hinchamiento empleando tres o más probetas a las que se aplican diferentes cargas iniciales. Al inundar la celda, lo cual ocurre simultáneamente con la aplicación de la carga, se comienzan a registrar las deformaciones en función del tiempo hasta el momento en que las lecturas se estabilizan. Cada deformación final y su correspondiente carga aplicada son introducidas en un gráfico semilogarítmico de presión versus deformación (Fig.2.10). Trazada una recta de tendencia de los puntos obtenidos, la presión de hinchamiento es la que corresponde a la deformación cero o relación de vacíos inicial. La desventaja de este ensayo radica en la necesidad de contar con más de una probeta de iguales características. Puede encontrarse en la bibliografía bajo dos diferentes nombres: loaded swell oedometer test o determined swelling pressure test.



**Fig.2.10-** Representación del "stress path" del ensayo de hinchamiento restringido (tomado de Fangsheng, 1996, after Fredlung 1995)

#### **2.4.5. MÉTODO DE DEFORMACIÓN CERO**

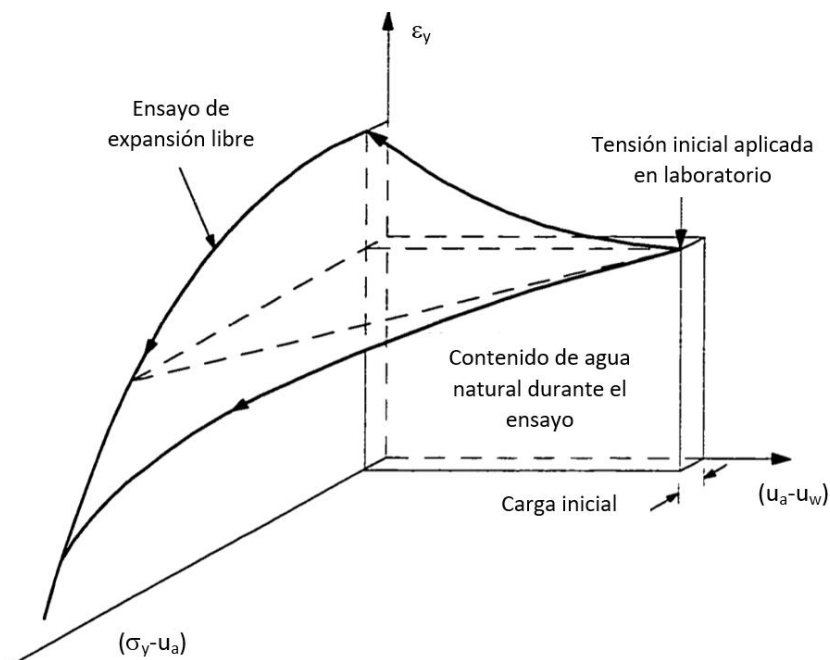
En este ensayo, en el cual también se emplea una celda edométrica, se posiciona la probeta en la celda, se aplica una presión de 0,1MPa mientras se inunda la celda, momento en que se considera inicia el ensayo. El método consiste en contrarrestar cualquier deformación vertical con la aplicación de una carga pequeña. No se deben permitir deformaciones axiales mayores a 0.1%. El ensayo finaliza una vez que las deformaciones dejan de producirse. Es un método que requiere observación permanente en caso de realizarlo de forma manual. La PH es la carga requerida para prevenir el hinchamiento dividida por el área de la probeta ensayada.

De acuerdo con el análisis realizado por Soundara y Robinson (2009) las presiones de hinchamiento obtenidas por medio de este método son mayores a las reales. También considera que la correlación entre la PH determinada por medio del método directo y free swell siguiendo ASTM D4546-03 es considerablemente alta. Por otro lado Basma et al. (1996) encontró resultados contrarios a los encontrados por Kayabali y Demir (2011). La discrepancia observada en los resultados obtenidos por ambos autores probablemente se debe a las propiedades de los suelos ensayados por cada uno de ellos. Soundara y Robinson (2009) emplearon dos suelos con características muy diferentes cuyas presiones de hinchamiento fueron obtenidas mediante tres métodos distintos y de valores de PH bajos (60kPa a 325kPa) en comparación a los obtenidos por Basma et al. (1996). Basma et al. (1996) trabajaron con diez diferentes muestras y combinaciones de porcentajes de arcilla para cada una de ellas las cuales desarrollaron presiones de confinamiento dentro de un amplio rango (20kPa a 8MPa) por medio de cuatro métodos diferentes. Kayabali y Demir (2011) trabajaron con 12 muestras distintas que desarrollaron un amplio rango de presiones de hinchamiento y fueron ensayadas empleando cinco métodos diferentes. La robustez de los resultados y del análisis presentados por Basma et al. (1996) y Kayabali y Demir (2011) superan ampliamente a los resultados presentados por Soundara y Robinson (2009).

#### **2.4.6. MÉTODO DEL DOBLE EDÓMETRO**

Se requieren dos especímenes iguales. El primero de ellos se ensaya siguiendo el procedimiento descrito en el método del edómetro con una carga inicial de 1kPa (free swell test). El segundo se realiza sobre una probeta con su humedad natural, sin inundar. Ambas curvas se dibujan en un gráfico semilogarítmico relación de vacíos versus presión aplicada. La diferencia entre ambas curvas corresponde al hinchamiento total esperado una vez que inundado el suelo.

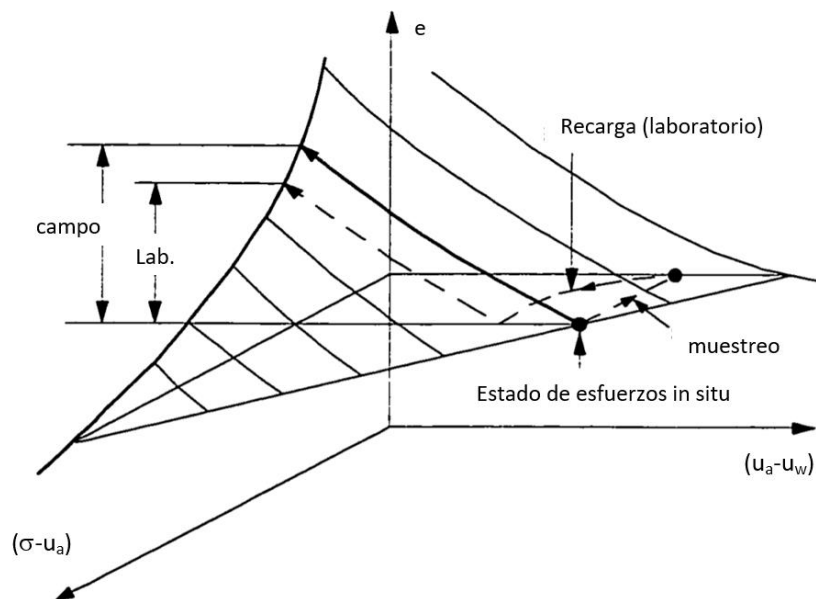
La opinión de diversos investigadores difiere en cuanto a la importancia de la sobreestimación de PH que se obtendría empleando este método. Representados los stress paths del ensayo en la Fig.2.11 es posible entender el recorrido de cada probeta ensayada.



**Fig.2.11-** Representación del "stress paths" del ensayo del doble edómetro (tomado de Fangsheng, 1996, after Jennings and Knigh, 1957)

#### 2.4.7. MÉTODO "DIRECTO"

Similar al método de hinchamiento restringido, la modificación consiste en cargar la probeta al inicio del ensayo con una carga igual a la carga total que soportará una vez finalizada la obra. Una vez colocada la carga se inunda la celda. Una vez desarrollada la expansión libre se procede a consolidar por escalones hasta alcanzar la deformación cero o la relación de vacíos inicial (Fig.2.12)



**Fig.2.12-** Representación del "stress paths" del método directo (tomado de Fangsheng, 1996, after Jennings and Knigh, 1957)

## 2.5. INTERACCIÓN ENTRE EL AGUA Y ARCILLA: MECANISMOS, ESPESOR ACTIVO, CURVA DE SATURACIÓN

De acuerdo con Snethen (1979) para que se produzca la expansión de un suelo son necesarias tres condiciones:

- Una fuente disponible de agua;
- Una fuerza que movilice el agua;
- Un mecanismo o grupo de mecanismos que cause el cambio de volumen.

Comprender los diferentes procesos que se desarrollan entre el agua y el suelo permite entender la mecánica que produce la expansión de este grupo de suelos, a pesar de ello existe aún un grado de incertidumbre. Los mecanismos enumerados por Low (1961) son seis y pueden operar en forma separada o en conjunto:

- Repulsión osmótica: gradiente de presión debido al gradiente de concentración de iones por al desarrollo de la doble capa difusa. Las moléculas de agua siguen incrementándose en la zona de la doble capa difusa tratando de reducir el desbalance. Al incrementarse el espesor de estas dobles capas se produce la interacción entre ellas lo cual produce la repulsión que conduce a un incremento en el volumen del conjunto.

- Atracción generada por las partículas de arcilla: Esta atracción es consecuencia de la distribución de cargas negativas en las superficies y positivas en los bordes, las cuales presentan un desbalance neto negativo. Estas cargas negativas generan la atracción de moléculas dipolares de agua y cationes.

- Hidratación de cationes: hidratación de cationes sustituidos o unidos a las partículas de arcilla. La hidratación produce un incremento del radio iónico del conjunto catión-molécula dipolar de agua, lo cual resulta en un cambio en el volumen neto de la masa del suelo.

- Fuerzas de van der Waals-London, y enlace de hidrógeno: estas fuerzas consideradas secundarias surgen como consecuencia del movimiento de los electrones en la última órbita, cuando la última capa de electrones no se encuentra completa. Los enlaces de hidrógeno se producen tanto por enlace de los hidrógenos con oxígenos (en los bordes positivos) o con hidroxilos (en las superficies negativas).

- Capilaridad: movimiento del agua producido para restablecer el desequilibrio de presiones que sufre el agua dentro de los capilares del suelo. Este desequilibrio se produce por las tensiones superficiales generadas en el contacto agua-aire y agua-suelo. En el caso de que el capilar no posea una fuente de agua que permita el ingreso para reestablecer el equilibrio, las partículas se

ven sometidas a tensiones que intentan cerrar el capilar (acercar las partículas laminares de arcilla). En el caso de que exista una fuente de agua los capilares “succionan” el agua dentro de ellos.

- Relajación elástica: acomodamiento de las partículas debido a diagénesis (recristalización, reacomodamiento natural, cementación).

Estos mecanismos fueron enumerados por Low (1961), luego incluidos en su libro por Mitchell (1976) y Snethen (1979). Snethen menciona que de estos seis mecanismos, aquellos que afectan a microescala el comportamiento de los suelos expansivos son: atracción entre partículas de arcilla, hidratación de cationes y repulsión osmótica. Todos ellos actuando solos o combinados favorecen el ingreso de agua, el incremento de volumen y la separación de las partículas.

En cuanto al agua adsorbida, tanto el comportamiento como los cambios en sus propiedades han sido estudiados empleando las más diversas técnicas. Algunas de las diferencias observadas en el agua adsorbida son:

- De acuerdo con Fripiat et al. (1965) la monocapa de moléculas de agua adsorbida por los oxígenos de las partículas de arcilla es móvil, mientras que la monocapa de moléculas adsorbidas por hidroxilos permanece inmóvil. La ocurrencia de oxígenos o hidroxilos depende del pH del agua (Chang et al., 1993).

- El agua adsorbida se comporta como un fluido newtoniano cumpliendo con la ley de Darcy cuando el espesor es grande (Mitchell, 1976). Cuando el gradiente hidráulico es bajo presenta comportamiento no newtoniano en las proximidades con las partículas de arcilla (Low, 1961).

- Dependiendo del contenido de agua del suelo, las propiedades dieléctricas y magnéticas del agua adsorbida son diferentes. Para altos contenidos de agua, la estructura molecular y el comportamiento del agua se conserva. Para contenidos de agua bajos en los que la estructura se limita a unas pocas capas de moléculas de agua, el comportamiento del agua es muy diferente al del agua en condiciones normales de presión y temperatura (Low, 1961). En algunas condiciones, la estructura del agua adsorbida es diferente a la estructura del hielo y del agua normal.

- El agua adsorbida a las partículas de arcilla muestra una depresión del punto de congelamiento y en el súper enfriamiento (Low, 1961).

- Se libera energía al adsorberse agua sobre las partículas (Swartzen-Allen, S. L., & Matijevic, E., 1974).

- Los enlaces de hidrógeno en el agua adsorbida son más débiles que en el agua normal, y su cantidad es menor en las cercanías a la partícula (Low, 1961).

- Se desarrolla una transición desde una estructura en la superficie de la partícula a otra estructura en la masa de agua (Low, 1961).

- El hecho de que las resistencias de las uniones y las propiedades termodinámicas difieren implica diferencias en el flujo del agua y de calor, en las presiones de poro, y las propiedades físicas (Mitchell, 1976).
- El volumen de agua en el suelo puede ser igual o mayor que el volumen de sólidos.
- A bajas temperaturas las estructuras adsorbidas de agua se extienden en un espesor mayor que a temperaturas más altas (Low, 1961). Por lo tanto también con la distancia desde la partícula se modifican las propiedades del agua: viscosidad, temperatura de congelamiento y súper enfriamiento, propiedades termodinámicas, entre otras.

Lo anteriormente expuesto demuestra que la interacción agua-suelo es compleja en el caso de los suelos expansivos. La incorporación de un aditivo que modifique las propiedades expansivas del suelo introduce una complejidad mayor en cuanto a los mecanismos de estabilización se refiere.

Los suelos arcillosos parcialmente saturados pueden ser caracterizados por la relación existente entre el grado de saturación y la succión. En la literatura esta relación se la denomina curva característica del agua y el suelo (SWRC -soil water retention curve) o curva de retención de agua (Water Retention Curve – WRC) (Fredlund et al., 1995). La succión es la medida en la que un suelo trata de retener el agua u obtenerla del medioambiente para restablecer el equilibrio de todas las fuerzas que coexisten en el interior de la masa de un suelo. A partir de la SWRC se han desarrollado modelos predictivos para suelos parcialmente saturados que permitirían estimar propiedades como la permeabilidad y la resistencia al esfuerzo cortante (Fredlund et al, 1995). Ambos modelos parten del conocimiento de parámetros del suelo en estado saturado.

La vulnerabilidad de un suelo a expandirse no es suficiente para que se expanda, se requiere que el contenido de agua de ese suelo se modifique. Identificarlo es el primer paso, determinar la presión de hinchamiento el segundo, evaluar el espesor afectado por las variaciones estacionales para poder estimar los hinchamientos constituiría en tercer paso. Para ello es necesario llevar adelante estudios durante un período prolongado a diferentes profundidades y sobre una superficie amplia.

La evaluación de las SWRC in situ durante un período prolongado es necesario pero costoso. Este tipo de estudios suelen realizarse dentro del marco de un proyecto de investigación pero no en el marco de una obra civil. Conocer la zona activa, que es la profundidad hasta la cual las modificaciones en las condiciones de humedad ambiente modifican las condiciones en el subsuelo, contribuye a este conocimiento. La determinación del espesor en el cual se produce la variación en la humedad permite determinar el espesor en el cual deberían estimarse las variaciones de volumen.

La obtención de las SWRC in situ dentro de esa profundidad es necesaria (Jones, 2012). De acuerdo con los resultados obtenidos por Houston (2011) la principal fuente de error en la

determinación de estas curvas in situ son las condiciones de drenaje consideradas para el suelo (por sobre las otras fuentes de error). Esto es consecuencia de considerar dentro de las hipótesis de diseño al suelo como un medio isótropo, homogéneo e infinito cuando en la práctica esto difícilmente ocurre (los factores no considerados entre otros la microestratigrafía, microfisuración y/o discontinuidades, direcciones preferenciales de flujo, anisotropía).

## **2.6. CIMENTACIONES SOBRE SUELOS EXPANSIVOS**

### **2.6.1. PROBLEMAS ASOCIADOS A LAS CIMENTACIONES SOBRE SUELOS EXPANSIVOS**

Dos son los principales efectos adversos que pueden originar los suelos expansivos al modificarse su humedad: levantamiento de las estructuras apoyadas sobre ellos y deformaciones diferenciales. Ambos pueden darse simultáneamente dependiendo del sistema de cimentación y de la distribución de cargas desde la superestructura. En consecuencia, las técnicas desarrolladas para resolver esta problemática intentan evitar estos efectos.

Detectar la presencia de este tipo de suelos en la etapa de anteproyecto mediante la realización de estudios geotécnicos, posterior diseño resistente o modificación de las propiedades expansivas del suelo reduce fuertemente los gastos en remediación o los evita completamente.

### **2.6.2. OPCIONES DE CIMENTACIÓN SOBRE SUELOS EXPANSIVOS.**

Las opciones de cimentación pueden reducirse básicamente a dos grupos de soluciones dentro de las cuales dependiendo de las características de las obras civiles a cimentar surgirán muchas y muy variadas combinaciones. Las soluciones pueden agruparse en:

- Diseño de sistemas de cimentación y estructurales adecuados.
- Intervención del suelo expansivo mediante técnicas adecuadas (empleo de estabilizantes, columnas de aditivos, reemplazo total o parcial del suelo, control de cambios en el contenido de humedad).
- Combinación de las dos opciones anteriores.

El diseño adecuado de sistemas estructurales incluido el sistema de cimentación requiere del entendimiento de todos los conceptos previamente desarrollados, desde el momento en que el suelo es identificado hasta la ejecución en obra. Tanto el potencial de expansión, la presión de hinchamiento, el espesor activo, el efecto del agua sobre el suelo, el contenido de sales, son requeridos para:

- Determinar o estimar la presión de hinchamiento las cuales serán comparadas con las descargas producidas desde la super estructura, considerando que el sistema de cimentación esté formado por fundaciones aisladas o continuas, superficiales o profundas.
- Determinar o estimar el espesor activo lo cual permitirá conocer la profundidad de cimentación mínima en caso de construcciones livianas. Criterio también aplicable en el caso de construcciones que no superan la presión de hinchamiento o cuya carga a nivel cimentación es muy variable.
- Evaluar los escurrimientos superficiales evitando las zonas anegadas, el cambio en las condiciones de humedad durante el destape, limpieza, o apertura del terreno que pudiesen modificar las condiciones del suelo expansivo, con ello se evita tanto el hinchamiento como la contracción.
- En el caso de construcciones civiles muy livianas (plateas de viviendas, carreteras, playones de estacionamiento) evaluar el espesor de terraplén que permita una distribución de tensiones uniforme sobre el terreno y las deformaciones uniformes de la superficie que permitan asegurar la vida útil de la obra.
- Diseñar las estructuras para resistir el accionar de los suelos durante su expansión en caso de producirse.
- Cubrir superficies mayores a aquellas afectadas por las obras civiles y de este modo lograr un bulbo de mayor tamaño con humedades constantes.
- Alejar del bulbo de tensiones generado por la construcción tanto las especies arbóreas, la vegetación que requiera de riego abundante, o especies caducas para asegurar que dentro de la zona afectada por la construcción el bulbo de humedades permanece constante evitando de esta forma asientos diferenciales.
- Evitar la modificación de las condiciones originales del suelo expansivo, entiéndase densidad natural y/o humedad natural durante la etapa de construcción. En caso de que una o ambas condiciones se modifique será necesario reemplazarlo o compactarlo para componerlo a sus condiciones originales.

Por otro lado, la intervención del suelo con técnicas adecuadas se reduce a:

- Empleo de aditivos estabilizantes y/o modificadores de las propiedades expansivas.
- Reemplazo de parte o la totalidad de la masa de suelo expansivo.
- Control en la modificación del contenido de humedad del suelo.

Las técnicas por emplear en el caso de producirse patologías consecuencia del accionar de suelos expansivos consisten en:

- Verificar, reparar, reemplazar y/o reforzar el sistema estructural incluyendo las cimentaciones. Puede incluir la reevaluación de la cota de cimentación.
- Verificar y si es necesario rediseñar el drenaje superficial y subsuperficial, evitando zonas de estancamiento. Puede incluir la incorporación de veredas perimetrales, la construcción de pantallas en el borde exterior de las veredas que generen barreras para el cambio de humedad en la zona afectada por el bulbo de tensiones, y la extracción de vegetación (la cual deberá ser evaluada cuidadosamente sopesando pros y contras).
- Estabilizar el cambio de humedad del agua del suelo afectado por las cimentaciones reconociendo el origen de las modificaciones. De ser necesario, instalar barreras o pantallas que impidan el acceso de agua y permitan la estabilización del bulbo de humedad.
- Modificar el diseño arquitectónico adecuando los sistemas de drenaje pluvial, los sistemas de riego y la vegetación. La vegetación puede introducir problemas estacionales relacionados directamente con el movimiento de las raíces. El aumento del riego en verano acompaña el movimiento producido por la vegetación (Fig.2.13). La retracción de las raíces en invierno favorece el ingreso del agua por los espacios generados entre las raíces y el suelo.



**Fig.2.13-** Deformaciones diferenciales producidas en zona de suelos expansivos (GAclay a 1m de profundidad)

- Verificar la estanqueidad de las instalaciones de agua potable y aguas grises (Fig.2.14). Las patologías presentadas en la vivienda de la fotografía fueron producidas por la presencia de un suelo de potencial de expansión alto a muy alto en la zona de cimentación, y la rotura de una tubería de agua potable enterrada e incorrectamente canalizada (Orlandi et al., 2015).

### 2.6.3. TÉCNICAS DE MEJORAMIENTO DEL SUELO.

De acuerdo con ASTM D653-11 la estabilización se define como *“tratamiento químico o mecánico diseñado para incrementar o mantener la estabilidad de una masa de suelo para mejorar sus propiedades ingenieriles”*. Las técnicas de mejoramiento dependerán de las características de la obra civil y de las propiedades del suelo de cimentación. Tres son las características básicas que deben verificarse en todo tipo de obras: adecuada capacidad de carga del suelo de cimentación, deformabilidad acorde a la funcionalidad de la obra, permeabilidad adecuada al tipo de obra (Bowles, 1988, Das, 2012, Jiménez Salas, 1975). Un cuarto factor ha adquirido mayor relevancia en las últimas décadas y es el factor medioambiental, el cual debe ser considerado en el momento de modificar o mejorar las propiedades del suelo de cimentación. Esto implica que en el proceso de mejorar cualquiera de las tres características anteriores no se produzca un impacto medioambiental negativo o se empleen elementos con una elevada huella de carbono, como es el caso del cemento (Cortés et al., 2019).



**Fig.2.14-** Deformaciones diferenciales producidas en zona de suelos expansivos (GAclay)

Las técnicas más comunes aplicadas en el mejoramiento o modificación de un suelo de cimentación son (Das, 2012, Bowles, 1988):

- Compactación mediante medios mecánicos, estáticos, dinámicos, explosivos,
- Columnas de grava.
- Jet grouting.
- Densificación por sobrecarga.
- Densificación por vibroflotación o por vibroreemplazo;

- Consolidación por precarga, por drenaje forzado, por abatimiento del nivel freático, por generación de vacío, mediante drenes de arena.
- Tratamiento térmico: congelamiento, aplicación de calor.
- Reemplazo total, parcial, mezcla con otros suelos.
- Inyecciones químicas.
- Fracturamiento hidráulico.
- Empleo de aditivos.
- Empleo de geosintéticos:
  - Drenajes verticales para acelerar la consolidación,
  - refuerzo para mejorar propiedades resistentes y reducir deformaciones,
  - geomembranas para generar pantallas impermeables,
  - geodrenes para generar direcciones preferenciales de flujo,

Cada una de las técnicas mencionadas tiene su campo de aplicación y busca modificar una o más propiedades del suelo de cimentación intervenido.

## **2.7. EMPLEO DE ADITIVOS EN EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES EXPANSIVAS DE UN SUELO**

Algunas de las primeras publicaciones técnicas encontradas sobre el empleo de aditivos como modificadores de las propiedades de un suelo son de Mc Kenson (1943), empleo de bitúmenes, (Chaston (1952), empleo de cal como aditivo, Maclean y Robinson (1953), evaluación de aditivos empleados en aeropuertos. Las técnicas de estabilización de suelos comenzaron juntamente con el desarrollo y modificación de los métodos de compactación ya en vigencia debido a la creciente construcción de aeropistas durante la segunda guerra mundial. El peso de los aviones superaba ampliamente al de los vehículos terrestres, las aeropistas habían sido construidas empleando los mismos criterios y rápidamente presentaban fallas por baja resistencia y deformación excesiva. Surgió entonces la demanda de desarrollar estabilizadores o mejoradores en respuesta a esta necesidad.

Respecto al empleo de aditivos como modificadores de las propiedades de un suelo, Maclean y Robinson (1953) mencionaban poco tiempo después “...*hay suficiente evidencia para emplear suelos estabilizados para la construcción de aeropistas si el material utilizado puede demostrarse ser lo suficientemente resistente y duradero para el propósito*”. La durabilidad y la resistencia eran los pilares de los suelos estabilizados en ese momento aunque la durabilidad se encontraba limitada por la vida útil prevista para la obra, lo cual es considerado como parámetro de diseño en la publicación mencionada.

Estas primeras publicaciones hablaban de la estabilización mediante aditivos en bases y subbases de carreteras y aeropistas, en las que los aditivos empleados eran (Maclean, 1953): bitúmenes, emulsiones asfálticas, asfalto caliente, bitumen mezclado con arena, cemento y cal hidratada, “special cut black” (no hay referencias sobre las características de este material). Los suelos tratados eran: arenas de duna, gravas, arenas arcillosas, material grueso a granel, roca triturada. Y las locaciones de las obras evaluadas se encontraban en Asia, Europa, Norte de África, Norte América, principalmente EUA.

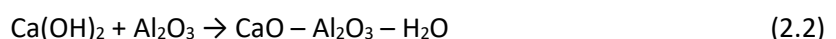
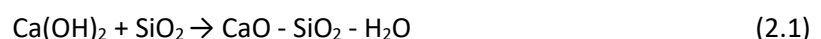
Estos aditivos, sus mecanismos de interacción suelo-aditivo, las propiedades mecánicas, hidráulicas y físicas en general, comenzaron a estudiarse después de la segunda guerra mundial. A ellos se sumaron algunas sales, aceites, surfactantes, ácidos y polímeros que se emplearon como aditivos sobre los que luego haremos referencia.

### **2.7.1. CAL EMPLEADA COMO ESTABILIZANTE EN SUELOS EXPANSIVOS**

Dentro del grupo de los suelos expansivos, la cal ha demostrado ser un estabilizante efectivo, el cual colocado en pequeños porcentajes logra reducir el potencial de expansión de un suelo. Mediante la adición de cal se logra reducir el límite líquido, mejorar la resistencia a la compresión simple del suelo compactado, otorgar trabajabilidad, y modificar la curva de compactación (Bhattacharja et al., 2003).

Dentro de los mecanismos de estabilización de los suelos mezclados con cal se desarrollan dos tipos de procesos: los inmediatos y aquellos que se desarrollan lentamente generando un efecto a largo plazo. Los procesos que se desarrollan en las primeras horas de contacto suelo-cal involucran intercambio de cationes, rotura de partículas de arcilla por la reducción de la doble capa y floculación-aglomeración (Zhao et al., 2014, Taha et al., 2014, Diamond & Kinter, 1965). Le siguen efectos a largo plazo, como las reacciones puzolánicas, hidratación, carbonatación, formación de nuevos materiales. Los efectos a largo plazo se desarrollan en algunos casos hasta varios años después de iniciado el proceso (Taha et al., 2014).

En los mecanismos de estabilización a largo plazo, el aumento en el pH por encima de 12,4 genera que la sílice y la alúmina presentes en el suelo se vuelvan solubles, se combinan con los iones de calcio hidratados formando silicatos hidratados de calcio y aluminatos cálcicos hidratados. Es así que al inicio del proceso de estabilización, los procesos de reacción puzolánica (ecuaciones 2.1 y 2.2) comienzan a desarrollarse y a largo plazo pueden representarse como (Taha et al., 2014, Farzi & Pakbaz, 2019):



Mitchell menciona por primera vez en 1976 que en los suelos ricos en sulfatos (entre los que se encuentran los suelos expansivos de origen marino) tanto el cemento como la cal reaccionan generando etringita como producto de la hidratación ( $\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2 \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ), un material altamente expansivo (Holtz, 1969). El sulfato bien podría provenir de minerales del suelo, como del agua de mezclado o del agua de formación. En zonas de bajas temperaturas puede además desarrollarse taumasita ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ), un sulfato complejo hidratado de calcio (Puppala et al., 2004), de características expansivas similares a las de la etringita.

Dentro de los mecanismos desarrollados en de las primeras horas luego de preparadas las mezclas de suelo-cal, el contenido de agua tiene un papel preponderante en la correcta acción del aditivo. Un suelo seco no permite que los iones sean adsorbidos sobre la superficie de las partículas de arcilla, los iones necesitan del agua para hidratarse y adsorberse en las superficies minerales polarizadas negativamente. De este modo se forma la doble capa difusa cuyo espesor se reduce debido a que el calcio es un catión divalente con mayor radio molecular que el que tendría un anión monovalente hidratado. Para que la estabilización sea óptima, la cantidad de iones de  $\text{Ca}^{+2}$  debe ser suficiente para reemplazar a todos los iones monovalentes en especial los de  $\text{Na}^{+1}$  (Herzog and Mitchell, 1963).

Un factor adicional no menor que interviene en la estabilización es el tipo de cal. Dependiendo del tipo de cal empleada será el contenido de  $\text{Ca}^{+2}$  disponible, siendo  $\text{Ca}^{+2}$  el ion intercambiable adsorbido sobre la superficie de la partícula de suelo cargada negativamente. Debido a las características propias de cada suelo y las variantes de cal disponibles en el mercado, la cantidad de aditivo óptima será única para cada suelo y deberá ser determinada mediante dosificaciones en laboratorio junto con la realización de curvas de compactación y verificación de parámetros resistentes. Existen métodos que permiten estimar un porcentaje de aditivo óptimo con el cual comenzar las dosificaciones, el más difundido es el método de Eades y Grim (1960) que parte del pH del suelo, la humedad y la cal a emplear.

El procedimiento desarrollado por Eades y Grim (1960) parten del suelo secado al horno, agua y cal. Siguiendo su procedimiento, 20 gramos de suelo secado al horno son mezclados con 150ml de agua, la mezcla se divide en cinco muestras iguales a las cuales se le agregan diferentes porcentajes de cal desde 2% hasta 6% (porcentaje en peso referido al peso seco de muestra), con incrementos del 1%. Aquel porcentaje de cal que luego de una hora de realizadas las mezclas presenta un pH de 12,4 se considera adecuado para la estabilización. El ASTM D6276 - 19 se basa en este método para obtener una primer estimación del porcentaje óptimo de cal. Bhattacharja et al. (2003) menciona otros métodos empleados, algunos de ellos son modificaciones del método de Eades y Grim, otros utilizan parámetros diferentes, como el UCS, CBR, IP, densidad seca máxima.

En su artículo Al-Taie et al. (2017), mediante el empleo del método de Eades y Grim determinaron el porcentaje óptimo de cal (OLC) en un suelo de origen volcánico con contenido de materia orgánica. Al-Taie et al. (2017) comprobó la reducción del pH con el paso del tiempo. También verificó que a diferentes tiempos de curado los límites de Atterberg, el potencial de hinchamiento del suelo, los valores de UCS, y el índice de contracción lineal se modificaban. Mediante la corrección del OLC se lograron los resultados finales esperados. En su publicación, Al-Taie et al. (2017) sugieren realizar ajustes al método de Eades y Grim para que pueda ser empleado en suelos de origen volcánico y con contenido de materia orgánica. Las discrepancias en los resultados son consecuencia de que en el caso de suelos con alto contenido de materia orgánica la adición de cal acelera la descomposición de dicha materia reduciendo consecuentemente el pH del suelo (Hampton & Edil, 1998). La reducción del pH, como ya fue mencionado, impide la liberación de la sílice y la alúmina necesarias para desarrollar los procesos de reacción puzolánica que ocurren a largo plazo. Estos procesos han demostrado incrementar la resistencia del suelo.

De la amplia variedad de artículos presentados en los que se analiza el comportamiento del suelo a lo largo del tiempo, la modificación de sus propiedades, y la estabilidad de las mezclas, Stoltz et al. (2012) se enfocó en la contracción y expansión analizando la microestructura. Stoltz et al. (2012) demostraron en muestras ensayadas a tres tiempos de curado diferentes que la contracción volumétrica de las muestras no había sido modificada, a pesar de que las características expansivas sí lo habían sido.

En referencia a la preparación de las mezclas en obra, el procedimiento requiere inicialmente del mezclado del suelo y la cal. Una vez homogeneizada la mezcla se procede al agregado de agua de amasado. Esta mezcla requiere de un período de “maduración” en el que se permite la reacción a corto plazo. Superado este tiempo la mezcla puede ser distribuida y compactada.

Finalizando el siglo XX, algunos autores comenzaron a evaluar los efectos adversos provocados por el empleo de cal mezclada con suelos de características expansivas, entre otros Taha et al. (2014), Perry (1977), y Rollings et al. (1999). De acuerdo con Taha et al. (2014) se producen dos reacciones perjudiciales al emplear cal como aditivo de suelos expansivos: carbonatación y reacción con los sulfatos. La carbonatación se produce como consecuencia de la reacción entre el CO<sub>2</sub> del aire y la cal, mientras que la reacción con sulfatos produce etringita y taumasita (ec. 2.3), como fue mencionado previamente:



Otro efecto negativo de los suelos estabilizados con cal son los lixiviados. En un estudio realizado sobre muestras sometidas a filtración de agua de forma permanente, por períodos de 45 y

90 días, se produjeron a largo plazo modificaciones en las propiedades del suelo estabilizado (McCallister and Petry, 1991). Propiedades como la permeabilidad y el pH presentaron modificaciones mientras se incrementaba el tiempo en el que las probetas eran sometidas a procesos de filtración. Se observó también que en la medida que se incrementaba el pH del suelo, mayor era el pH de los lixiviados recogidos. De igual modo en la medida que se incrementaba el contenido de cal, aumentaba la concentración de calcio en los lixiviados.

Los efectos no deseados mencionados por Perry (1977) son aquellos relacionados con la corrosión, consecuencia del alto valor del pH que es necesario alcanzar para lograr una estabilización adecuada. Rollings et al. (1999) por otro lado hace referencia también al pH pero analizando su impacto sobre los seres vivos, sean estos vegetales o animales.

### **2.7.2. CEMENTO EMPLEADO COMO ESTABILIZANTE EN SUELOS EXPANSIVOS**

La adición de cemento para modificar las propiedades de un suelo actúa mejorando la durabilidad, disminuyendo la expansividad, disminuyendo la plasticidad, mejorando el comportamiento mecánico del suelo (Gharib et al., 2012a, 2012b). Dependiendo del porcentaje que se utiliza serán los valores de las propiedades antes mencionadas y los ensayos a los que deberán ser sometidas. Los métodos empleados para realizar la dosificación evalúan parámetros como la resistencia a la compresión simple de la mezcla, la durabilidad, la modificación de las propiedades elásticas del suelo, y la trabajabilidad. La modificación en el pH no suele ser evaluada aunque contribuye en el desarrollo de los mecanismos de estabilización de la mezcla suelo-cemento.

Algunos de los principales inconvenientes que presentan los suelos aditivados es la reproducibilidad del comportamiento en campo de la mezcla preparada en el entorno de condiciones controladas del laboratorio. Felt (1955) y Afrin (2017) mencionan que algunas de las variables que afectan al comportamiento del suelo estabilizado en el campo son:

- Dosificación del estabilizador.
- Condiciones de mezcla.
- Método y esfuerzo de compactación.
- Gradación y pulverización.
- Periodo y condiciones de curado.
- Superficie específica del suelo a modificar.
- Impurezas.
- Compactación retardada.
- Condiciones climáticas.

A estas variables deberían sumarse la heterogeneidad propia del suelo y el factor humano.

El procedimiento de preparación de las mezclas de suelo cemento en el campo es diferente al del suelo cal (Bhattacharja et al., 2003). El suelo se mezcla con el cemento, ambos con sus condiciones iniciales de humedad. Una vez lograda la uniformidad de la mezcla se agrega el agua necesaria para alcanzar la humedad de diseño determinada mediante ensayo Proctor. Se realiza el mezclado e inmediatamente se procede a compactar. Si la compactación no se realiza de forma inmediata, la resistencia no alcanzará los valores máximos obtenidos en los ensayos de laboratorio.

### **2.7.3. CEMENTO, CAL Y MEZCLAS EMPLEADAS COMO ESTABILIZANTES**

Comprobada la eficacia de la cal y el cemento empleados como aditivos, el siguiente paso consistió en mezclarlas para combinar sus propiedades. Las muestras preparadas con cemento y cal muestran mejores características resistentes que las muestras preparadas solamente con cal de acuerdo con lo informado por Firosi et al. (2017), Makusa (2013), Bhattacharja et al. (2003), Khemissa y Mahamedi (2014), entre otros. Todos los autores coinciden en destacar la función de la cal y del cemento actuando por separado a la vez que realzan la necesidad de monitorear la evolución de las mezclas.

Los mecanismos que se desarrollan en las mezclas de suelo-cal-cemento son de dos tipos. El primero, los silicatos de calcio hidratados generan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  que aporta el  $\text{Ca}^{+2}$  necesario para el intercambio de iones. Este mismo proceso es el que se produce al emplear cal como aditivo de un suelo arcilloso. El segundo es la hidratación del cemento que introduce un fortalecimiento en la estructura del suelo mejorando su comportamiento resistente.

Los resultados obtenidos empleando cal y cemento, son ampliamente conocidos y estudiados, por lo cual los investigadores han avanzado en el estudio de mezclas en las cuales se incorpora un aditivo secundario. Ghadir y Ranjbar (2018) emplearon cemento portland mezclado con un geopolímero (ceniza volcánica). Los resultados obtenidos de durabilidad, ductilidad y parámetros resistentes fueron mejores a los correspondientes a la mezcla sin geopolímero. No se realizaron ensayos de reacción álcali-sílice ni determinación de sulfatos, por lo que hubiese sido recomendable emplear un cemento resistente a los sulfatos en reemplazo del cemento portland. De acuerdo con Ghadir y Ranjbar los factores que más influyeron en las condiciones finales de las mezclas compactadas fueron la humedad de compactación y las condiciones de curado de la mezcla compactada.

Ijaz et al. (2020) empleó un pequeño porcentaje de cal (2,6%) con un lignosulfonato (0,9%) para reducir las propiedades de una arcilla expansiva (LL=62%, 21% arcilla, HL=85%). Los resultados fueron positivos reduciendo la expansividad, y mejorando el comportamiento mecánico. La cal agregada modificó la proporción de montmorillonita total consecuencia de que la cal actúa sobre la

estructura misma del mineral. En el artículo no se hace referencia a la modificación del pH ni estudios asociados a la estabilidad de las mezclas en el tiempo.

#### **2.7.4. BIOADITIVOS EMPLEADOS COMO ESTABILIZANTES**

Debido a una tendencia creciente del cuidado del medioambiente muchos biopolímeros han comenzado a ser estudiados como posibles estabilizantes. Dentro de esta búsqueda, los residuos industriales también se encuentran incluidos siempre que estos materiales estén acompañados de un bajo impacto ambiental.

Pourakbar et al. (2015) empleó ceniza combustible de aceite de palma ultrafino, un residuo de la agricultura local eco amigable de bajo costo, mezclada con cemento para estabilizar una arcilla blanda (Malasia). La arcilla empleada poseía características que la clasificarían como de potencial de expansión medio, bajo contenido de sales y sin sulfatos detectados. La mezcla mostró reducción en su límite plástico, modificaciones en la microestructura (analizada mediante SEM y DRX), resultados no convergentes en cuanto a la curva de compactación, pequeño aumento en los valores obtenidos por medio del UCS. No se realizaron estudios sobre la estabilidad de la mezcla y sus propiedades en el tiempo. Tampoco se evaluó el impacto ambiental por medio del estudio de los lixiviados.

James et al. (2016) empleó en su investigación cemento portland mezclado con ceniza de bagazo de caña de azúcar, subproducto de la industria de la caña de azúcar (India), para estabilizar un suelo local de plasticidad media. El objetivo era la utilización del suelo estabilizado en la fabricación de bloques para la construcción de viviendas. La construcción con tierra cruda está limitada por la disponibilidad de suelos adecuados a ese fin y el empleo de pequeñas cantidades de aditivos de forma controlada permitiría emplear suelos no aptos. Las propiedades analizadas para evaluar el comportamiento de las mezclas fueron la resistencia a compresión simple de los bloques, la absorción de agua de los bloques, la eflorescencia (sales que se depositan en las superficies externas de las construcciones o elementos estructurales). Los resultados mostraron un aumento en la resistencia a la compresión simple. El aumento del contenido del aditivo orgánico incrementó la absorción de agua en un pequeño porcentaje aunque cumplía con los estándares de la reglamentación india. No se realizaron ensayos de durabilidad ni de estabilidad de las propiedades en el tiempo.

Canakci et al. (2014) utilizó lignina, cenizas y polvo de cáscara de arroz empleados como estabilizantes de un suelo preparado con 70% de red clay (suelo comúnmente mencionado en las publicaciones de Turquía) mezclado con 30% de bentonita. Emplearon ensayos de expansión libre, UCS, límites de Atterberg y consideraron tiempos de curado de 3 y 7 días. Los resultados mostraron que las mezclas tenían un mejor comportamiento resistente a los 7 días de curado, el módulo tangente y el módulo secante se incrementaron con el incremento en el porcentaje de aditivo

(alcanzaron el 20% de aditivo incorporado en diferentes proporciones) mostrando un comportamiento más frágil. No analizaron el impacto medioambiental de los lixiviados ni la estabilidad de las propiedades analizadas.

Blanck et al. (2014) presenta tres aditivos no tradicionales derivados de la industria de los vegetales: una solución ácida (derivado de la industria de los cítricos), una solución enzimática y una lignina soluble en agua. Los ensayos realizados para evaluar los comportamientos de las mezclas fueron: capacidad de carga, UCS, compactación, microestructura, hinchamiento libre y permeabilidad. El suelo empleado fue un suelo poco plástico (LL=35, pH=9,2, 19% de arcilla) de la ciudad de París. Nuevamente no fue evaluada la estabilidad de las mezclas al paso del tiempo, tampoco el impacto medioambiental provocado por los lixiviados aunque si hace referencia a que al ser un aditivo soluble en agua es esperable que parte o su totalidad se pierda con los lixiviados.

Attom y Al-Sharif (1997) trabajaron con diferentes suelos con potencial de expansión medio a alto, y el aditivo seleccionado fue el residuo de aceitunas quemadas, procedente de la industria local jordana. El aditivo resultó efectivo en reducir las propiedades expansivas del suelo. Se evaluó el desarrollo de varias propiedades mecánicas con diferentes porcentajes de aditivo para estudiar la influencia del aditivo sobre la mezcla.

Bolander (1999) evaluó cuatro grupos de aditivos no tradicionales, incorporó en sus ensayos el efecto del tiempo además de ciclos de congelamiento y deshielo. Los ensayos fueron diseñados para evaluar el desempeño de los diferentes aditivos empleados en diferentes proporciones, en carreteras y vías ferroviarias. Incluyó ligninas, cloruros, enzimas, emulsiones poliméricas sintéticas.

Di Mársico et al. (2018) empleó mucílago como estabilizante partiendo de la alta adherencia que esta sustancia posee naturalmente. Es una sustancia natural presente en algunos vegetales, es un biopolímero que contiene 93,39% de carbohidratos y 22,02% de ácido hialurónico, fue obtenida para la investigación de las semillas de chíá. Di Mársico evaluó el comportamiento de las mezclas en función del tiempo y el desarrollo de mecanismos de estabilización. Su investigación se centraba en la protección contra la erosión de los suelos empleados para agricultura. No se evaluó el comportamiento mecánico de las mezclas puesto que el estudio se centró en la durabilidad de las propiedades del mucílago.

El residuo del carburo de calcio es un residuo de la producción del gas acetileno. Du et al. (2016) realizó estudios encaminados a validar el aditivo para su empleo en subbases de pavimentos. A diferencia de todos los trabajos previos presentados en esta tesis donde se probaron aditivos no tradicionales, en este estudio se evaluó el impacto del aditivo sobre el medioambiente, demostrando que el efecto era casi imperceptible. Se realizaron ensayos in situ del comportamiento de las mezclas con terraplenes de prueba y los resultados fueron comparados con aquellos obtenidos en un

terraplén de similares características estabilizado con cal. Los resultados demostraron que las muestras mejoraron en resistencia y durabilidad. Por último se realizó el estudio económico comparando costos empleando cal como estabilizante o carburo de calcio. La reducción en los costos resultó cercana al 90%.

Los resultados obtenidos al emplear quitosano, un biopolímero empleado como absorbente en suelos contaminados con metales pesados fueron estudiados por Hataf (2017). El aditivo fue empleado en control de erosión y como modificador de la permeabilidad. Los resultados obtenidos a corto plazo fueron positivos pero a largo plazo el deterioro de las uniones químicas provocó la pérdida gradual de las propiedades evaluadas. Algo similar sucedió con la humedad: a humedades bajas el comportamiento fue ineficiente contrariamente a lo ocurrido a humedades altas (las humedades fueron comparadas respecto a la humedad óptima obtenida por medio de ensayos de compactación).

Chijioke (2019) en su artículo realiza un muy pormenorizado análisis de las técnicas de estabilización, los agentes estabilizadores y mecanismos desarrollados durante la estabilización, técnicas empleadas en el estudio de estos mecanismos, para diferentes aditivos no tradicionales. Las recomendaciones realizadas por los autores enfatizan la necesidad de verificar las características de los lixiviados, el contenido de metales pesados en dichos lixiviados, la estabilidad de las mezclas, y la modificación del pH.

Finalmente, Tingle et al. (2007) realiza un estudio de los mecanismos de estabilización de los aditivos tradicionales presentes en el mercado, dividiéndolos en siete categorías:

1. Iónicos.
2. Enzimas.
3. Lignosulfonatos.
4. Sales.
5. Resinas del petróleo.
6. Polímeros.
7. Resinas de árboles.

Debido a que la composición química de los aditivos comerciales no es revelada a los usuarios, Tingle (2007) identifica el mecanismo primario pero menciona que otros mecanismos secundarios también pueden desarrollarse. También sugiere que los inhibidores de luz ultravioleta suelen colocarse para proteger al aditivo de la degradación originada por los rayos UV.

## **2.7.5. EMPLEO DE LIGNINA COMO ESTABILIZANTE DE UN SUELO EXPANSIVO**

### **a) ORIGEN DE LA LIGNINA**

Un biopolímero residuo de la industria de la pasta de papel, papel y derivados que ha ganado interés como posible estabilizante de suelos de características expansivas es la lignina. La lignina es uno de tres componentes de la madera, la cual está formada por: celulosa (porcentaje cercano al 50%), lignina (entre 15% y 40% menor porcentaje en maderas blandas y mayor porcentaje en maderas duras) y hemicelulosa. En adelante mencionaremos bajo el nombre de lignina tanto a las ligninas como a los lignosulfonatos, debido a que la diferencia radica principalmente en el proceso de obtención empleado en la industria de origen.

La fabricación de papel, pasta de papel y derivados se encuentra entre las industrias más importantes del mundo, por lo que la lignina se encuentra entre los residuos más abundantes. El consumo mundial de papel y cartón se ha incrementado en forma sostenida en las últimas décadas, a pesar de la creciente digitalización ocurrida en los países desarrollados esto ocurre como consecuencia del consumo creciente en países subdesarrollados.

El consumo mundial de papel asciende a 1.000.000 de toneladas/día, mientras que en 2018, la producción mundial de papel y cartón era de 419.720 toneladas/día (Area, 2021). Como consecuencia de este incremento la producción de lignina se ha incrementado en forma proporcional.

Los países productores de papel, quienes concentran más del 50% de la producción total son: Estados Unidos, China, Japón, Canadá. Sus industrias proveen a países no productores de África, América Latina y Asia. La tendencia actual es al empleo de maderas blandas de árboles controlados como materia prima, siendo Finlandia el país que ha desarrollado su industria papelera con menor huella de carbono.

Dependiendo de la fuente empleada para la producción del papel, serán los componentes químicos de la lignina producida (Tabla 2.12). La lignina posee una estructura muy variable con alto número de grupos hidroxilo lo que le otorga gran reactividad, es un material polifenólico, amorfo, y dependiendo del proceso de producción puede o no contener azufre en su composición (Fig.2.15)

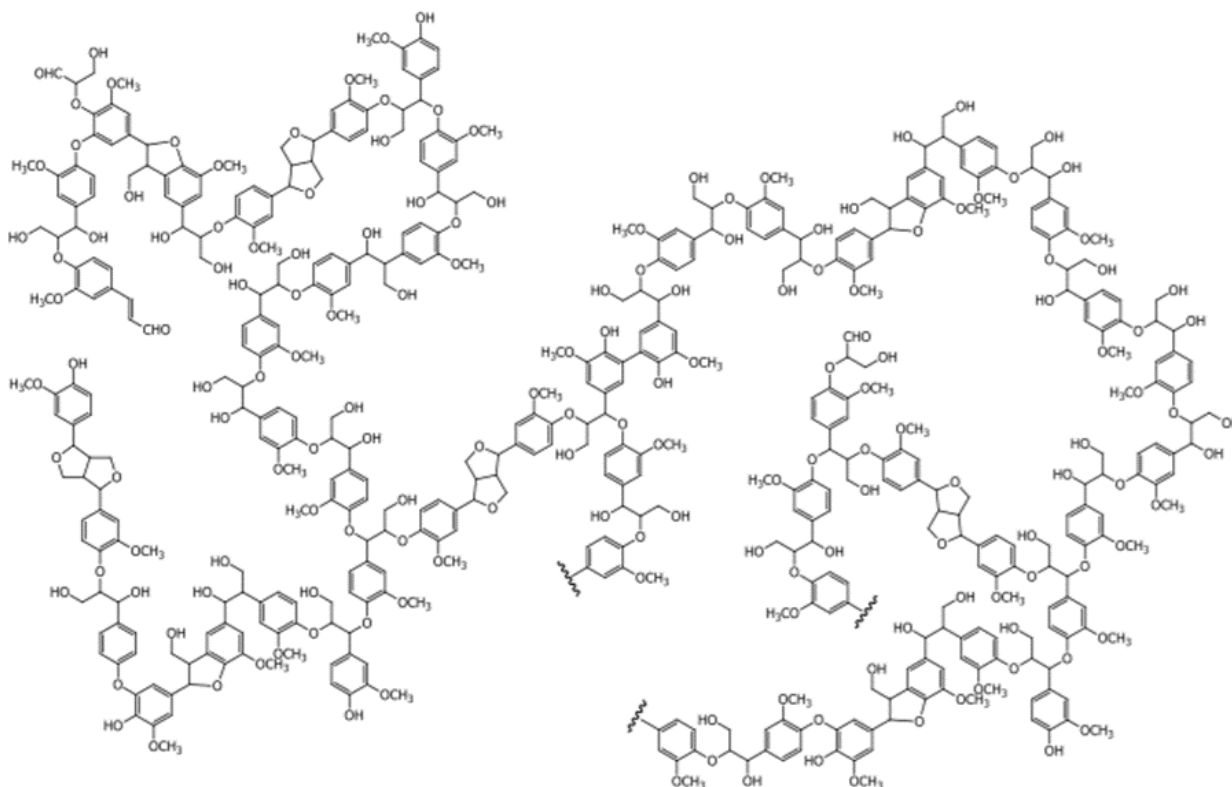
A pesar de las grandes cantidades de lignina que se producen anualmente solamente entre 1 al 2% es destinada a productos de valor agregado. El restante porcentaje es subutilizado o utilizado en la generación de energía de poco valor dentro de la misma industria. Mediante diferentes reacciones de derivatización pequeños porcentajes de lignina son empleados en otras industrias. Aun así los volúmenes empleados son muy pequeños en comparación con los grandes volúmenes producidos (Fig.2.15). Actualmente se avanza en el desarrollo de biocombustibles a partir de la biomasa, dentro de la cual se encuentra la lignina. Esto permitiría contar con una nueva fuente de energía con la cual disminuir la actual dependencia de los combustibles de fuentes no renovables.

Debido a su naturaleza orgánica, hasta la década del '60 la lignina no había sido estudiada en profundidad debido a la casi inexistente tecnología desarrollada. Dado el rápido desarrollo de nuevas herramientas que permitieron realizar análisis bioquímicos y relacionados con la química orgánica se comenzaron a estudiar las propiedades de la lignina y adquirir conocimiento para entender su comportamiento (Chávez-Sifontes y Domine, 2013).

**Tabla 2.12-** Composición química en función de la fuente de origen (Tomado de Kay Teschke y Paul Demers, 2021).

Componentes químicos de las fuentes de pasta y papel [%]					
	Maderas blandas	Maderas duras	Paja	Bambú	Algodón
Carbohidratos					
$\alpha$ - $\chi$ ελλουσα	38 - 46	38 - 49	28 - 42	26 - 43	80 - 85
hemicelulosa	23 - 31	20 - 40	23 - 38	15 - 26	n.d.
Lignina	22 - 34	16 - 30	12 - 21	20 - 32	n.d.
Extraíbles	1 - 5	2 - 8	1 - 2	0,2 - 5	n.d.
Minerales y otros compuestos inorgánicos	0,1 - 7	0,1 - 11	3 - 20	1 - 10	0,8 - 2

n.d. = sin datos disponibles



**Fig.2.15-** Modelo estructural de la lignina de madera aserrada (Tomada de Chávez-Sifontes & Domine, 2013)

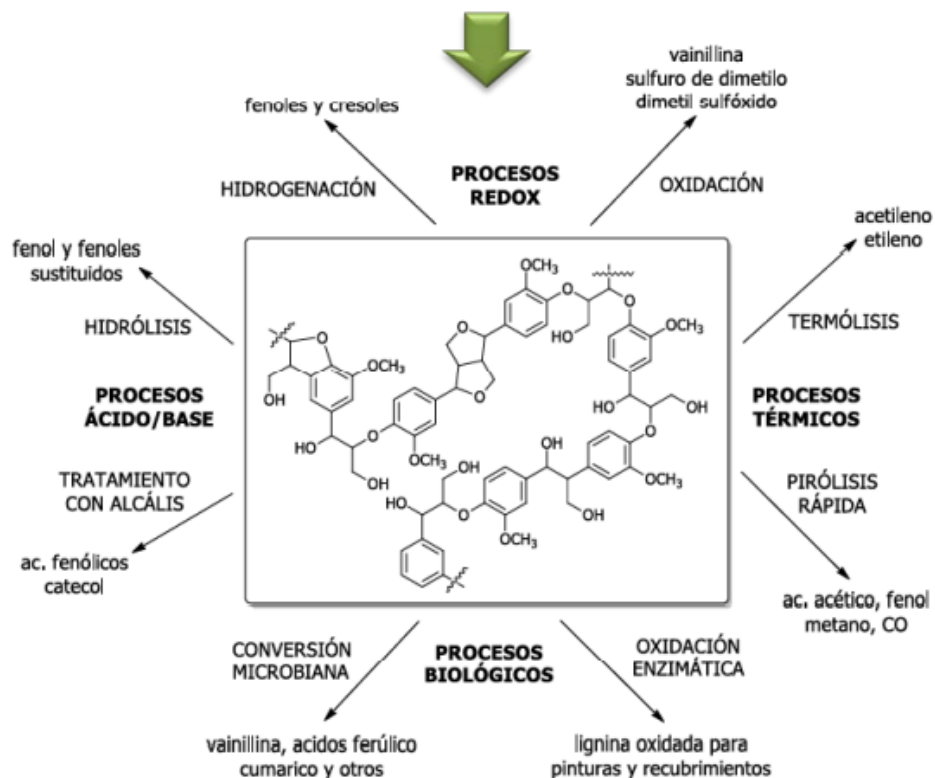


Fig.2.16- Derivatizaciones de la lignina para darle valor agregado (Tomado de Chávez-Sifontes & Domine, 2013)

Muchos de los procesos presentados en la Fig. 2.16 no pueden realizarse actualmente debido a que el equipamiento necesario para llevarlos a cabo aún no ha sido desarrollado o se encuentra en vías de desarrollo.

### b) LIGNINA EMPLEADA COMO ADITIVO

El empleo de la lignina como aditivo en suelos expansivos ha comenzado a tener relevancia en forma reciente, diversos investigadores hacen referencia a su empleo desde hace mucho tiempo pero no han podido encontrarse publicaciones que respalden esta afirmación. Las publicaciones encontradas muestran que Investigadores de diferentes regiones han llevado adelante experiencias con suelos expansivos con diferentes características mecánicas, hidráulicas y mineralógicas. Las publicaciones encontradas se muestran en las Tablas 2.14, 2.15, y 2.16. en ellas se incluyen características de los suelos empleados, porcentajes de lignina incorporados, propiedades estudiadas, ensayos realizados, aspectos no analizados, año de publicación.

Las ligninas presentan el inconveniente de que su caracterización es compleja debido a que dependen de la variabilidad del material con el que son producidas, así como también del proceso de obtención. Las publicaciones incluidas solamente evalúan a la lignina o los lignosulfonatos como

aditivos, la gran mayoría de ellas no hacen referencia al tipo de lignina empleada ni al proceso de obtención. No se incluyeron combinaciones con otros aditivos, tales como cal, cenizas, o cemento debido a que la proporción de lignina o lignosulfonato empleado posicionaba a estos aditivos como aditivos secundarios.

Del resumen de las publicaciones recopiladas y analizadas, se observa que solamente algunos suelos poseían alto potencial de expansión, con un porcentaje de arcilla no mayoritario. Inclusive en algunos casos se incorporó montmorillonita para incrementar el potencial de expansión del suelo. No trabajaron con suelos naturales con alto potencial de expansión en la gran mayoría de ellos.

En general las investigaciones publicadas estuvieron orientadas a estudiar el impacto de la adición de lignina o CLS sobre el comportamiento mecánico, la microestructura, y la evaluación del tiempo de curado. Las publicaciones no incluyen análisis de impacto ambiental o toxicidad de los lixiviados, tampoco evaluación de las propiedades en función de la edad (la cual denominaremos evaluación de la estabilidad de las muestras). En cuanto al comportamiento hidromecánico la información es escasa. La influencia del tiempo solamente se considera en el estudio de la influencia del curado de las probetas, no se realizan ensayos a diferentes edades.

La información sobre el tipo de ligninas o lignosulfonatos demuestra que se emplearon diferentes aditivos en cada investigación, y los porcentajes empleados son muy variables entre una experiencia y otra. Algunos investigadores trabajaron con porcentajes muy bajos, del orden de 0,4% mientras que otros realizaron experiencias hasta con 15% de lignina.

## **2.8. CONCLUSIONES**

Cuando un suelo expansivo forma parte total o parcial del suelo de cimentación pueden ocurrir varias situaciones. La primera de ellas y más favorable, que el suelo expansivo sea detectado en la etapa de exploración geotécnica y el diseño se realice teniendo en cuenta su comportamiento. La segunda, que no sea tenido en cuenta en el diseño de la nueva obra civil ya sea por la no realización del estudio geotécnico o por la no identificación de sus propiedades.

Detectar la presencia del suelo expansivo, identificar sus características, entender los problemas que puede generar, y con base en ello modificar las propiedades del suelo en caso de ser posible, o diseñar y dimensionar la obra considerando el comportamiento del suelo es la secuencia correcta que debería seguirse. No cumplir con alguno de los pasos conduce indefectiblemente, a patologías de diversas magnitudes, involucrando todas ellas gastos de remediación en función de las características de los suelos expansivos y la intervención de profesionales de todas las áreas afectadas.

Entre las propiedades cuya evaluación es necesaria, se encuentra la presión de hinchamiento. El valor de la PH en un suelo expansivo puede obtenerse empleando alguno de los métodos presentados en la sección 2.4. Cada método posee sus ventajas y desventajas, dependiendo del procedimiento, de la forma en que se aplican las cargas, del grado de alteración que se produce en la microestructura del suelo durante el proceso. Los resultados deben ser analizados teniendo en cuenta las limitaciones del ensayo, y deben ser seleccionados en función de las condiciones se busca representar.

Diversos autores han publicado los resultados obtenidos por uno u otro método, analizando si los mismos subvalúan, sobrevalúan o se aproximan al valor real. En algunos métodos las publicaciones presentan discrepancias las cuales deben ser interpretadas en función de los parámetros del suelo estudiado, de la población empleada, del rango de presiones medidas. Las conclusiones obtenidas de cuatro publicaciones seleccionadas y analizadas, incluida una tesis de doctorado, Soundara et al. (2009), Kayabali et al. (2011), Basma et al. (1994), Elfatih (1984), Fangsheng (1996), son presentadas en la Tabla 2.13. Los resultados son acompañados del tipo de probetas empleadas (naturales o remoldeadas), y de aquellos parámetros que influyen (a criterio del autor de esta tesis) sobre los resultados obtenidos para la presión de hinchamiento.

El agregado de diversos aditivos, incorporados en proporciones adecuadas han resultado eficientes modificando las propiedades expansivas que presentan algunos grupos de suelos. Las actuales prácticas han buscado incorporar aditivos de origen orgánico que produzcan un menor impacto sobre el medioambiente. Como se ha mencionado anteriormente el estudio de la lignina como material de origen orgánico recién fue posible luego de la década del 60 como consecuencia del desarrollo de nuevas tecnologías en el campo de la Química Orgánica. Dentro de la Geotecnia la conciencia del impacto ambiental que un aditivo puede causar sobre los suelos ha comenzado a tener relevancia en la década del 90. La industria del papel, pasta de papel y sus derivados crece año a año de acuerdo con las estadísticas mostradas. Y la aplicación de residuos industriales con el agregado de valor es una tendencia que ha crecido en las últimas dos décadas.

Esto muestra que el empleo de ligninas o lignosulfonatos como estabilizantes es un área en campo en pleno desarrollo, lo cual queda demostrado por los años en los que las publicaciones fueron presentadas, y los vacíos en la información estudiada y analizada.

**Tabla 2.13-** Análisis de los resultados de PH considerando el método empleado y las características de los suelos estudiados

	Soundara et al. (2009)	Kayabali y Demir(2011)	Basma et al.(1994)	Elfatih (1984)	Fangsheng Shuaim (1996)
Número de suelos ensayados	2	12	10	10	3
Tipo de muestras empleadas	compactadas	compactadas	compactadas	compactadas y naturales	compactadas
Rango de PH obtenidas	60 - 325 kPa	70 - 1040 kPa	20 - 8000 Kpa	50 - 370 kPa	10 - 1000 kPa
Rango LL	69 % - 105 %	52 % - 93 %	53 % - 89 %	62 % - 78 %	69.90%
Rango de humedades iniciales		24.3 % - 26.2 %	10 %- 30 %	14.5 % - 31.0 %	27%
Rango de densidades secas [KN/m3]	13.8 - 14	16	13.0 - 16.5	Sin datos	14.01
Ensayos adicionales realizados	---	DRX	---	---	Permeabilidad, SWRC, triaxiales CD, consolidación, corte directo
expansión libre-consolidación (swell consolidation)	PH sobrevaluada	PH sobrevaluada	PH sobrevaluada	Resultados con mayor dispersión y superiores a los obtenidos con método de volumen constante	Los valores de PH obtenidos son los mayores. Un incremento en la sobrecarga muestra una expansión menor sin modificar el valor de la presión de hinchamiento obtenida. La velocidad de hinchamiento es independiente del espesor de la probeta en el ensayo de expansión libre-consolidación.
hinchamiento restringido (different pressure)	PH levemente subvaluada	PH levemente subvaluada	PH es el ensayo que mejor refleja el comportamiento en el campo	---	Las curvas de recarga para diferentes cargas iniciales aplicadas, lo que demuestra que parte de la deformación es plástica. La magnitud de la deformación plástica se incrementa con el incremento de la carga inicial aplicada.
volumen constante (constant volume) o método directo	valores intermedios entre exp.libre-consolidación y volumen constante	Empleado como parámetro	PH levemente subvaluada	Resultados con menor dispersión y menores a los obtenidos con exp.libre-cons.	La presión de hinchamiento es independiente de la sobrecarga, pero decrece la velocidad de desarrollo de la PH, y crece rápidamente la duración del ensayo con el aumento en el espesor de la probeta. Para ensayos extensos la parte inferior de la probeta se hincha y la superior se compacta. El volumen que se expande en la parte baja de la probeta es igual al volumen que se compacta en la parte alta de la probeta.
deformación cero (zero swell)	---	PH levemente sobrevaluada	PH subvaluado	---	
doble edómetro (double oedometer)	---		Valores intermedios entre doble edómetro exp.libre-consolidación	---	
Comentarios adicionales	Analizó la microestructura de las muestras al finalizar los ensayos de PH y los cambios en las grietas de desecación en las probetas al secarlas al horno luego del ensayo	Es necesario obtener la correlación entre PHexp.libre-consolidación y PHvolumen constante. También para Phexp.libre-consolidación y HL. Presenta una modificación al método directo.	Desarrolla un modelo predictivo. Fueron ensayadas 100 probetas empleando el método de deformación cero y 146 muestras por el método de hinchamiento restringido. Destaca la importancia de la humedad inicial sobre la PH desarrollada: mayor $\omega_0$ menor PH desarrollada. La PH se incrementa con el incremento en la densidad seca.	La densidad seca y el porcentaje de hinchamiento libre poseen una mejor correlación con la PH que el IP	El comportamiento de la succión matricial durante la realización de los ensayos puede dividirse en tres: zona saturada, zona de transición, zona de alta succión. La zona de transición es en la que se desarrollan los grandes cambios en la succión matricial. Los cambios rápidos en la succión matricial se deben a la caída brusca de la permeabilidad cuando el suelo no está saturado. La mayoría del hinchamiento ocurre en la zona saturada o cerca de esta zona (a bajos valores de succión). La velocidad de la deformación es muy sensible ante pequeños cambios en la permeabilidad y la distancia de drenaje (frontera en la cual $u=0$ )

**Tabla 2.14-** Publicaciones e información publicada por otros investigadores en referencia a la estabilización de suelos expansivos con lignina y lignosulfonatos (Parte 1)

Autor	Año Publ.	Aditivo tipo	%	LL	% C	Suelo pH	Ensayos	Estabilidad/ curado [días]	Impacto. amb.	Conclusiones / Recomendaciones
Liu et al.	2020	Lignina libre de azufre	3-7-10-12-15	34, 8	29, 1	8,7	R, Att, UCS, SFC, MIP, SEM	1-7-28-60 (curado)	pH y SFC	pH con peq. incr./ Red.HL/Incr. en ductilidad y UCS / Aumento en Att/ Sin cambios en DRX/ MIP: poros.cambia de bimodal a monomodal/estabilización mecánica
Fernandez et al.	2020	Norlig®	3 - 5	74,5	76		Att, CEC,Se,HL,MIP,SEM	NO	NO	Reducción en la porosidad/ reduce HL/ Sin modif.en grado de saturación residual/ reducción en potencial de expansión/reducc. LL/peq.modif.SWRC.
Ijaz et al.	2019	lignosulfonato (CLS) + cal	0,4- 0.875 -2 / 2.625 - 3.82 - 5 - 6,5 - 9	61,9	15	---	DRX, UCS, SEM, Att, CoPe, Mec.Est.	NO	NO	Combinación cal-CLS mejor comport.que lignina sola/ Incr.UCS/ incr. En c y $\Phi$ / redondeo en pico de montmorillonita en DRX=amorficidad.
Orlandi et al.	2019	Norlig®	3 - 5 - 7 - 10	74,5	76,4	8,7	Att, CEC,Se,HL, UCS, DRX, BMM, MIP,SEM, PH	1 día-9 months (curado, estabilidad)	NO	Reducción HL y estabilidad en el tiempo/ UCS se modifica con el tiempo pero al año alcanza los valores iniciales/LL se reduce con el tiempo y con el incremento en porcentaje de lignina.
Puppala	2016	lignosulfonato	0 - 0,5 - 1 - 2 - 3	91	35,6	7,43	Att, CEC, Se. HL, UCS, DRX, MIP	1 día - 28 días	NO	Reducción HL / incremento en UCS/LL se reduce el incremento en porcentaje de lignina.
Zhang et al.	2019	recycled lignin	2 - 5 - 8 - 12 - 15	32,4	9,7	8,14	Humedecimiento y secado, UCS, pH,	NO	NO	Por el efecto de los agentes medioambientales deterioran los mecanismos de estabilización. Sugiere buscar mecanismos que eviten la migración de lignina. Por encima de 12% las propiedades que habian mejorado, decrecen.

CoPe= penetrometro de cono  
 DRX= difracción por rayos X  
 Re= resistencia  
 Att= límites de Atterberg

Mec.Est=mecanismo estabilización  
 Se= superficie específica

UCS= ensayo de compresión simple  
 SFC= contenido de azufre libre  
 MIP= porosimetría de mercurio  
 SEM= microscopia de barrido electrónico

**Tabla 2.15-** Publicaciones e información publicada por otros investigadores en referencia a la estabilización de suelos expansivos con lignina y lignosulfonatos (Parte 2)

Autor	Año Publ.	Aditivo tipo	%	LL	% C	pH	Suelo	Ensayos	Estabilidad/ curado [días]	Impacto. amb.	Conclusiones / Recomendaciones
Landlin et al.	2021	lignosulfo nato	1 - 1,5 - 3	76	70	---	UCS / HL / Compactación / Att/DRX/ SEM	3 - 28 días (estabilidad)	NO		Incremento en la plasticidad/ Formación de flóculos/ Incremento en UCS/ no obtiene conclusiones sobre la microestructura: sugiere más estudios que incorporen el tiempo como variable
Zheng et al.	2019	lignina alcalina y lignina polimerizada	8 - 10 - 12	--	15	---	UCS/ curado por: al aire, calor, circulación de aire caliente	4 - 7 - 14 - 21 días (curado)	NO		Sugiere estudiar mecanismos de estabilización/ reacción agua-lignina/ considerar la polimerización de la lignina por sus resultados UCS positivos
Zhang et al.	2018	lignina	2 - 5 - 8 - 12	32,2	9,7	8,74	Att/ SEM/fall cone test (Su)	NO	NO		Incremento en UCS/ decremento pequeño de Att/ Incremento en Su/ Su decrece con el aumento de humedad
Noorzad & Ta'negonbadi	2018	lignosulfo nato	0 - 0,75 - 1 - 2 - 3 - 4	55	---	---	Proctor/ UCS/ HL/ Att/ UU/ SEM/ MIP/ humedecimiento y secado	1 día- 28 días	NO		tiempo de curado más efectivo=28días/ con el incremento en el %CLS: decrece el LL, decrece el HL, decrece PH, crece UCS/ cambian las formas de las curvas obtenidas con MIP/mejora la estabilidad de las muestras al humedecimiento y secado
Alazigha et al.	2017	lignosulfo nato	0 - 1 - 2 - 3	91	36	7,43	CEC/ Se/ FTIR/ SEM/ DRX	NO	NO		3%CLS mostró hinchamiento a las 20000hs (833días) de ensayo/identificación de los mecanismos de estabilización/los cambios son principalmente mecánicos, no químicos
Chavali & Resl	2020	lignosulfo nato	0,5 - 1 - 2 - 4	75 - 46	96 - 87	---	UCS/ CEC/ SEM	7 - 28 días (curado)	NO		Empleó dos suelos/AI incrementarse el %CLS se incrementa el UCS/ en el analisis de las imágenes SEM sugiere la aparición de cadenas poliméricas

**Tabla 2.16-** Publicaciones e información publicada por otros investigadores en referencia a la estabilización de suelos expansivos con lignina y lignosulfonatos (Parte 3)

Autor	Año Publ.	Aditivo tipo	%	LL	%C	pH	Suelo	Ensayos	Estabilidad/ curado [días]	Impacto. amb.	Conclusiones / Recomendaciones
Orlandi et al.	2021	Norlig® Aglupel® Vixilex® Norlig®	3 - 5 - 7 - 10	74, 5	76	8,7		Att/ HL/ DRX/ FTIR/ CEC/ Se	1 día- 1 mes- 3 meses (curado)	NO	Al incrementarse el % lignina: disminuye LL, disminuye HL, disminuye el espesor de la DDL, disminuye el potencial Z
Manzanal et al.	2021	Norlig®	3 - 5	74,5	76	8,7		PFT (SWRC), WP4(SWRC)	NO	NO	Evalúa las modificaciones que se producen en las SWRC en función de %lignina. El empleo de lignina reduce el HL. Reduce la porosidad total y la relación de vacíos. Existen cambios en props. físicas y mecánicas
Zhang et al.	2018	lignin	2 - 5 - 8 - 12 - 15	32,4	9,7	8,74		MIP/ FTIR/ SEM/ CBR/ DRX/ Att/ UCS/ módulo resiliente	1 - 7 - 28- 60 días	NO	Compara los resultados con los obtenidos empleando cal. Al incrementarse el % lignina : disminuye el LL, incrementa el tamaño de partícula, se reduce el pH, se reduce el volumen de poros. Recomienda emplear 12% de lignina con curado a 28 días. Por encima de 12% las propiedades comienzan a empeorar. No se detectaron cambios mineralógicos.

### **3- MATERIALES EMPLEADOS, PROGRAMA EXPERIMENTAL DE ENSAYOS Y MÉTODOS**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

La caracterización de los suelos y los aditivos empleados permite entender el comportamiento de las mezclas y evaluar las propiedades a modificar. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, la investigación se dividió en dos etapas:

1) La caracterización de tres suelos expansivos de la ciudad de Comodoro Rivadavia y la evaluación de catorce bioaditivos empleados como estabilizantes.

2) Selección del suelo expansivo y el bioaditivo para la posterior evaluación de la interacción y el comportamiento de diferentes mezclas. Dentro de la evaluación de las mezclas del suelo y el aditivo seleccionados se estudiaron las propiedades mecánicas, hidráulicas, mineralógicas, microestructurales y toxicológicas como parte del programa experimental.

En los suelos se estudiaron propiedades índice, gravimétricas, fisicoquímicas y mecánicas para analizar su potencial de expansión. Los aditivos fueron analizados para verificar y entender la interacción desarrollada al mezclarse con el suelo seleccionado (Orlandi et al., 2021).

A continuación se presenta la descripción de los materiales, el programa experimental de ensayos y la metodología empleada en cada uno de ellos.

#### **3.2. MATERIALES**

##### **3.2.1. SUELOS EXPANSIVOS**

En la ciudad patagónica costera Comodoro Rivadavia, tres estratos cercanos entre sí pertenecientes a dos formaciones distintas, Sarmiento (Spalletti y Mazoni, 1979) y Chenque (Bellosi, 1990) han sido clasificados como de potencial de expansión alto a muy alto (Manzanal et al., 2019). Los materiales que conforman estos tres estratos fueron denominados CRclay, GAclay y FRclay y son los materiales con que comenzó la investigación:

- CRclay o 113/13. Muestras correspondientes a la formación Sarmiento, recolectadas de pozos abiertos en las coordenadas 45°49'32.0" S 67°27'55.6" W en la ciudad de Comodoro Rivadavia.
- GAclay o 226/13. Muestras correspondientes a la formación Patagoniense, recolectadas en pozos abiertos, coordenadas 45°52'19.2" S 67°31'17.4" W en la ciudad de Comodoro Rivadavia.
- FRclay o 084/12. Muestras correspondientes a la formación Patagoniense, recolectadas de pozos abiertos, coordenadas 45.84°S 67.47°W en la ciudad de Comodoro Rivadavia.

El contexto geológico de estos materiales fue descrito en la introducción de este documento.

### **3.2.2. BIOADITIVOS**

La primera etapa de la investigación consistió en la selección de un grupo de aditivos para evaluar la interacción con el suelo selección. Se realizó mediante la determinación de los límites de consistencia y la comparación con los resultados obtenidos con la adición de cal. Estos aditivos fueron divididos en tres subgrupos: almidones (polisacáridos), semillas trituradas (con alto contenido oleico), ligninas y lignosulfonatos.

Dentro del grupo de los almidones se encontraban: almidón de maíz, almidón de mandioca, almidón de papa, harina de arroz, aglutinado y gluten. Todos ellos producidos por Herboeste (Córdoba, Argentina).

Dentro del grupo de los oleicos se encontraban: aceite de lino, semilla de lino, quinoa y girasol molidas, producidos por Tecnobotánica (Argentina).

Dentro del grupo de las ligninas se emplearon cuatro ligninas técnicas en forma de polvo marrón. La lignina procedente del proceso Kraft (denominada L1) fue suministrada por Suzano (Brasil), dos ligninas procedentes del aislamiento por sulfito sódico fueron proporcionadas por Vixilex (Brasil, L2) y Aglupel (Argentina, L3) y la lignina procedente del proceso de sulfito sódico y cálcico (L4) fue proporcionada por Norlig® (Argentina). L1 y L2 son ligninas procedentes de Eucalyptus Grandis y Viminalis. Se desconoce la fuente vegetal de las demás ligninas.

Por último se empleó como parámetro cal apagada comercial (suministrada por Riscos Bayos-Argentina). La cal apagada es un polvo blanco, compuesto principalmente por hidróxido de calcio.

La segunda etapa de la investigación consistió en evaluar el lignosulfonato de calcio Norlig® o L4. Este aditivo fue seleccionado para continuar con el proceso de estudio y análisis de factibilidad para ser empleado como estabilizante de CRclay.

### **3.3. PROCEDIMIENTOS Y PROGRAMA EXPERIMENTAL**

#### **3.3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS**

##### **– PREPARACIÓN DE MUESTRAS**

El proceso de preparación de las muestras consistió en el secado al aire, molienda y tamizado por el tamiz #10. Todo el material fue preparado y almacenado en recipientes herméticos al comienzo de la investigación, con el objeto de asegurar la homogeneidad a lo largo de todo el proceso. En el caso de que un ensayo requiriese que el material tuviese una granulometría menor este era triturado en mortero, y tamizado por el tamiz correspondiente.

Los probetas remoldeadas fueron preparadas por compactación estática bajo las condiciones de densidad y humedad determinadas a partir del ensayo Harvard Miniatura. En el caso de aquellas

probetas que requerían varias edades de ensayo, estas eran protegidas con film de polietileno, almacenadas en bolsas selladas y almacenadas en cámaras de humedad y temperatura controlada.

– **ENSAYO DE COMPACTACIÓN HARVARD MINIATURA**

La curva de compactación para cada una de las mezclas preparadas con los porcentajes de aditivo-suelo de diseño fue obtenida mediante el ensayo Harvard Miniatura (Fig.3.1). Mediante el empleo de este ensayo en reemplazo del Proctor III se buscaba reducir la cantidad de muestra a emplear.



**Fig.3.1-** Molde y pisón del ensayo de compactación Harvard Miniatura

Podemos ver que la relación entre las energías de compactación y el volumen de los moldes correspondientes al Proctor III y el Harvard miniatura es:

$$\text{relación de volúmenes} = \frac{\text{Vol.Proctor III}}{\text{Vol.Harvard Miniatura}} \cdot 100 = 507\% \quad (3.1)$$

$$\text{relación de energías} = \frac{\text{Energía Proctor III}}{\text{Energía Harvard Miniatura}} \cdot 100 = 102\% \quad (3.2)$$



**Fig.3.2-** Probeta típica obtenida mediante la compactación con el molde Harvard Miniatura.

El ensayo Harvard miniatura consistía en la compactación sucesiva en 5 capas, mediante la aplicación de 16 golpes por capa, el diámetro del molde era de 5 cm y su altura de 9.5 cm, con una altura de caída del pisón de 19.9 cm. El peso del pisón era de 0.099 N. En la Fig.3.2 se muestra una probeta obtenida por medio de este ensayo.

– **PROPIEDADES FÍSICAS E ÍNDICE: GRANULOMETRÍA, LÍMITES DE CONSISTENCIA, SUPERFICIE ESPECÍFICA**

Las granulometrías de los suelos fueron obtenidas empleando tres métodos: granulometría por vía seca (IRAM 10512), hidrometría (IRAM 29012-1) y por la técnica de difracción láser con el equipo Mastersizer3000 (Malvern Instruments). Este equipo permitió obtener la curva granulométrica de las partículas y nanopartículas cuya fracción se encontraba entre 0.1 y 3500 micrones utilizando la técnica de difracción láser. La muestra libre de sales se dispersó en un medio acuoso por el cual atraviesa un haz de rayos láser. El análisis del patrón de dispersión del haz recogido permite calcular el tamaño de las partículas y de este modo obtener la distribución granulométrica parcial y acumulada. El margen de error de las mediciones resulta inferior al 0,5%. La reproductibilidad es mayor al 99%. Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Suelos, CEAI, Facultad de Ingeniería, sede Esquel, UNPSJB.

Los límites de Atterberg o de consistencia fueron obtenidos siguiendo la Norma IRAM 10501:2007. El LC fue obtenido utilizando el método indirecto que emplea la recta U dentro de la carta de plasticidad, y el método de determinación de volúmenes por inmersión en mercurio.

La determinación de la superficie específica de las partículas se realizó por medio del método de azul de metileno descrito en Santamarina y Narsilio (2002). La superficie específica determinada por medio de este método corresponde a la superficie específica secundaria (Mitchell, 1976).

– **COMPOSICIÓN QUÍMICA: CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO; pH; CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA, CARBONO Y NITRÓGENO.**

El análisis del contenido de sales, la capacidad de intercambio catiónico y el pH fueron realizados en el Laboratorio de Suelos, sede Esquel, CIEFAP – UNPSJB. La capacidad de intercambio catiónico (CEC, de sus siglas en inglés, o CIC, de sus siglas en español) es la capacidad que tiene un suelo para retener y liberar iones positivos. Se expresa en miliequivalentes por cada 100 grs de suelo seco y se escribe meq/100 grs. Se realiza siguiendo la Norma IRAM-SAGyP 29577-1 la cual también contiene los capítulos de extracción de cationes, determinación de contenido de calcio, magnesio, sodio y potasio.

Para la extracción de cationes se emplea como solución saturante, acetato de amonio con pH 7 (los cationes presentes en el suelo son reemplazados  $\text{NH}_4^+$ ). Posteriormente se reemplazan los  $\text{NH}_4^+$  por  $\text{Na}^+$  en un proceso denominado de saturación. En un tercer paso se procede a eliminar el sodio no

adsorbido por medio del lavado con etanol. En la última etapa se extrae el sodio adsorbido por saturación. Por medio de la valoración del sodio de la solución extraída es posible determinar el total de cargas disponibles para que se desarrolle el proceso de intercambio catiónico (CEC).

La determinación del contenido de materia orgánica (MOS) puede ser realizada por calcinación de la muestra, por oxidación con peróxido de hidrógeno o dicromato de potasio. En nuestro caso fue realizada por medio del método de calcinación, obteniendo el MOS por medio de la diferencia de pesaje de la muestra antes y después de ser sometida a 360°C durante 120 minutos.

La determinación del pH permite evaluar la acidez o alcalinidad de un suelo. Afecta directamente la disponibilidad de nutrientes y por lo tanto el crecimiento y desarrollo de plantas. En nuestro caso la determinación se realizó por medio de la preparación de una solución 1: 25 de suelo en agua desionizada agitada durante diez minutos.

La determinación de carbono y nitrógeno posee tanto importancia agronómica como medioambiental. El método empleado es el denominado de oxidación húmeda, el cual proporciona resultados de C y N total. Para la determinación tanto de nitrógeno como de carbono orgánico, el método más difundido es el de Kjeldahl (Sikora and Stott, 1997) en el cual la reacción ocurre en un medio ácido (sulfúrico concentrado) a temperaturas elevadas (400°C). El proceso consiste en los siguientes pasos: digestión (etapa en la cual se emplea ácido sulfúrico), destilación (empleando hidróxido de sodio), titulación (empleando como absorbente ácido bórico).

#### – IDENTIFICACIÓN MINERALÓGICA MEDIANTE EL EMPLEO DE DRX.

Los ensayos DRX con Identificación de fases e Identificación y cuantificación de las fases minerales en la fracción arcilla fueron realizados en el CETMIC (Centro de Tecnología de Recursos Minerales y Cerámica, UNLP), noviembre de 2020. El aparato empleado fue el difractómetro Philips 3020 utilizando radiación  $\text{CuK}\alpha$  filtro de Ni (a 35 kV, 40 mA), el barrido se realizó entre 3° y 70° 2 $\theta$ , con un paso de 0,04 ° y un tiempo conteo de 2 seg/paso. Las aberturas de las ranuras de divergencia, recepción y dispersión fueron de 1, 0,2 y 1° respectivamente, no se utilizó monocromador. En la identificación de las rocas y de las fases minerales en roca total se utilizó el programa X'Pert High Score como apoyo. Para la Identificación y cuantificación de los minerales de arcilla se siguieron los procedimientos sintetizados por Moore y Reynolds, 1997. La cuantificación de los minerales se basó en el trabajo de Biscayne (1965).

#### – CONTRACCIÓN LINEAL

El índice de contracción lineal (CL) es un parámetro utilizado por la normativa australiana (AS 1289.C4.1-1977 Standards Association of Australia) y el IS: 1498 (1970) (reafirmado 1987, Bureau of Indian Standards). Este parámetro permite clasificar un suelo partiendo de su humedad en el límite líquido y posterior secado al aire. Para su determinación se utiliza una media caña (Fig.3.3) la cual se

lubrica con una pequeña capa de vaselina. Se llena hasta enrasar con el suelo a ensayar cuyo contenido de humedad es igual a la del límite líquido. Se deja secar al aire hasta que el proceso de contracción al aire se detiene, luego se seca en horno por 24h a 105°C.



**Fig.3.3-** Índice de contracción lineal: dispositivo de ensayo

El índice de contracción lineal (3.3) se obtiene con la siguiente expresión:

$$CL = \left(1 - \frac{\text{longitud final}}{\text{longitud inicial}}\right) * 100 \quad (3.3)$$

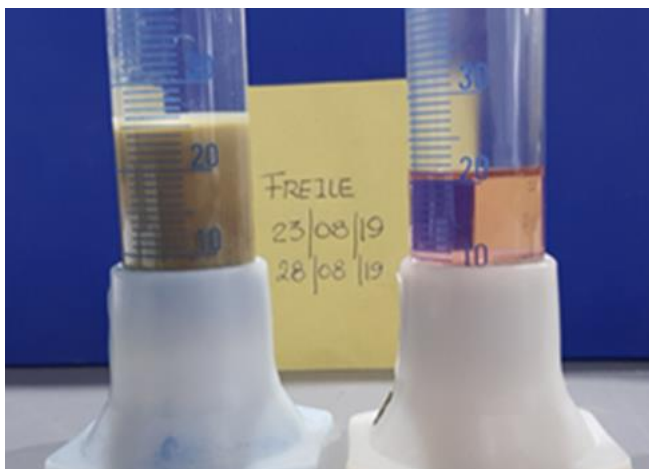
– **RELACIÓN DE EXPANSIÓN LIBRE E ÍNDICE DE EXPANSIÓN LIBRE**

La relación de expansión libre FSR (free swell ratio) y el índice de expansión libre FSI (free swell index) se obtienen ensayando dos muestras de 10 gramos de material pulverizado seco al horno pasante tamiz 200. Se llenan dos probetas de 500ml una con agua destilada otra con un líquido no polar (kerosene en nuestro caso). Se vuelcan 10 gramos de suelo en la probeta con agua destilada y 10 gramos en la probeta con kerosene. El suelo dentro del fluido no iónico se utiliza como parámetro de comparación mientras que el suelo sumergido en agua permite determinar los índices FSR y FSI de acuerdo con las ecuaciones (3.4) y (3.5).

$$FSR = \frac{\text{Lectura en agua destilada}}{\text{Lectura en kerosene}} \quad (3.4)$$

$$FSI = \frac{\text{Volumen en agua destilada} - \text{Volumen en kerosene}}{\text{Volumen en kerosene}} * 100 \quad (3.5)$$

En la Fig.3.4 se muestra el ensayo en proceso de una muestra de arcilla expansiva para la determinación de FSR y FSI.



**Fig.3.4-** Ensayo FSR y FSI en proceso

### 3.3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS BIOADITIVOS

Las propiedades fisicoquímicas evaluadas para los cuatro aditivos pertenecientes al grupo de las ligninas y lignosulfonatos fueron aquellas asociadas a la práctica común de los polímeros: humedad, porcentaje de ceniza, temperatura de degradación, solubilidad en kerosene y agua, temperatura de fusión cristalina y temperatura de transición vítrea.

La caracterización física fue realizada mediante la determinación de los contenidos de humedad y cenizas por análisis gravimétrico. La temperatura de degradación por análisis termogravimétrico (TGA) empleando una balanza termogravimétrica 812e de Mettler Toledo, y la solubilidad en queroseno y agua (Taverna et al, 2019).

La temperatura de transición vítrea (Tg) de las ligninas fue determinada mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) con un equipo Mettler Toledo DSC 822. Todas las ligninas se analizaron mediante un ciclo convencional de calor/enfriamiento/calentamiento con velocidades de calentamiento y enfriamiento de  $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ . Los valores Tg de los aditivos a base de lignina se determinaron entre 40 y 200  $^{\circ}\text{C}$  referidos al segundo barrido DSC de calor.

La caracterización molecular se llevó a cabo mediante cromatografía de exclusión por tamaño (SEC) y FTIR. La masa molar media en peso y en número ( $\bar{M}_w, \bar{M}_n$ ) se determinó mediante un cromatógrafo Waters® Modelo 1525. La lignina Kraft se disolvió en tetrahidrofurano (THF) y se inyectó en un sistema que emplea columnas HR 4 E  $7,6 \times 300\text{ mm}$  y un detector refractométrico diferencial (Waters 2414). Se utilizaron estándares de poliestireno para la calibración. Para las ligninas hidrosolubles, Aglupel, Vixilex, Norlig® (CLS), el cromatógrafo se equipó con 5 columnas Waters Ultrahydrogel y un

detector de índice de refracción Waters 2414. Se utilizaron polietilenglicoles como estándares. Los grupos funcionales se determinaron por FTIR.

### **3.3.3. ANÁLISIS DE LAS INTERACCIONES MEDIANTE POTENCIAL Z Y FTIR**

Las interacciones superficiales entre la arcilla CR y los aditivos de lignina se estudiaron mediante el potencial Z y el análisis FTIR, o transformación Infrarroja de Fourier. Las mediciones del potencial Z se realizaron con un Zetasizer Nano-series Malvern (ZS90). Se prepararon suspensiones de CR-Clay, ligninas y CR-Clay/lignina ( $1 \text{ g.L}^{-1}$ ) en agua desionizada y se sonicaron durante 10 minutos. Para el análisis FTIR, las asignaciones de bandas se realizaron según Alazigha et al. (2018b). Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

### **3.3.4. PROGRAMA EXPERIMENTAL SOBRE MEZCLA SELECCIONADA**

#### **– INTRODUCCIÓN**

Seleccionado CRclay como suelo a estabilizar y el lignosulfonato de calcio Norlig®, que denominaremos CLS, como aditivo a utilizar, el programa experimental de ensayos fue diseñado para evaluar la eficiencia y la eficacia de las mezclas. Las variables consideradas en el análisis son dos: contenido de aditivo a incorporar y tiempo. La caracterización fisicoquímica y mineralógica de las muestras fue realizada en la etapa previa de selección del aditivo y del suelo.

El tiempo fue incorporado como variable de estudio mediante el moldeo y empleo de probetas de diferentes edades. No todos los ensayos pudieron analizarse en todos los tiempos programados, inclusive algunos ensayos no fueron analizados a edades diferentes por la disponibilidad de equipamiento y la propia duración de los ensayos. Muchas probetas no pudieron ser ensayadas a la edad proyectada debido a que el equipamiento se encontraba ocupado por un ensayo de iguales características cuya duración había excedido de sobremanera los tiempos estimados. Las edades estudiadas se encontraron dentro del rango de 1 día a un año. Todas las probetas fueron ensayadas al menos un día después de moldeadas.

El contenido de aditivo óptimo fue analizado mediante el empleo de cuatro porcentajes diferentes del aditivo: 3%, 5%, 7%, 10% y CRclay. Este rango de selección se fundamentó en experiencias de otros autores y la experiencia propia llevada adelante con suelos locales y cal.

El programa experimental sobre la mezcla seleccionada consideró los siguientes ensayos incluyendo el número de cada uno de ellos sin considerar la repetición necesaria para realizar análisis estadísticos:

- Comportamiento mecánico

- Compactación mediante Harvard Miniatura (obtención de cinco curvas con entre 5 y 8 puntos);
- Hinchamiento libre (10 ensayos, incluye dos edades: 1 día y 9 meses);
- Determinación de la presión de hinchamiento;
  - Método del edómetro (5 curvas completas cada una con entre 4 y 8 escalones consecutivos de hinchamiento libre y carga);
  - Método del hinchamiento restringido (5 series de ensayos, dentro de cada serie se ensayaron al menos cinco probetas para diferentes presiones iniciales aplicadas);
  - Método ASTM (5 ensayos con 15 escalones de carga, descarga y recarga);
  - Método de Volumen Constante con aparato Lambe
    - Medición con aro dinamométrico (5 ensayos);
    - Medición con celda de carga (5 ensayos, 2 ensayos fallidos).
- Compresión simple (UCS) (30 ensayos, incluyendo 6 edades diferentes: 1 día, 1 mes, 3 meses, 6 meses, 9 meses, 1 año);
- Ensayo triaxial CU con medición de presión de poros (5 ensayos);
- Comportamiento hidráulico
  - Permeabilidad en permeámetro de carga variable (7 ensayos);
  - Porosimetría MIP (8 ensayos, incluyendo 2 edades diferentes 1 día y 1 año);
  - Porosimetría BET (5 ensayos, incluyendo 2 edades diferentes 1 día y 1 año).
- Comportamiento hidromecánico
  - Curva de retención
    - Técnica de papel de filtro (5 curvas de saturación con al menos 8 determinaciones de humedad).
    - Ensayo en WP4 (5 curvas de saturación con al menos 8 humedades).
- Análisis microestructural
  - Ensayos SEM (5 probetas, incluyendo dos edades diferentes: 1 día y 1 año).
  - Ensayos DRX (5 probetas, incluyendo dos edades diferentes: 1 día y 1 año).
- Impacto ambiental de los lixiviados de los suelos
  - Estudio empleando semillas de Lactuca Sativa (2 series de determinaciones cuya secuencia incluye despistaje estadístico de porcentajes de inhibición de germinación y crecimiento de radícula).
  - Análisis químico, determinación de pH de suelo y mezclas suelo aditivo (5 muestras).

El proceso de preparación de las muestras resultó fundamental para lograr resultados reproducibles y confiables y de este proceso dependió la calidad de los ensayos. Constituye el primer apartado a describir en forma previa al desarrollo del plan de trabajo.

#### – **PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS**

Como ya fue mencionado, las dos variables consideradas en la investigación fueron el tiempo y el porcentaje de aditivo. Todos los ensayos también fueron realizados para CRclay (sin CLS) para emplear los resultados como parámetro de comparación. Las edades de las muestras ensayadas variaron entre 1 día y 1 año. La duración de cada ensayo influyó en la edad de las muestras ensayadas. Por ello ensayos como el de compresión simple permitieron una programación importante de las edades de las muestras al momento del ensayo, mientras que los ensayos de hinchamiento libre se encontraron muy limitados. Del análisis de los apartados Métodos y Resultados podrá observarse la complejidad en la programación de estos ensayos que dependió totalmente de la cantidad de equipos disponibles y de la duración de cada ensayo.

Todas las muestras ensayadas fueron remoldeadas compactadas. La densidad seca y la humedad de moldeo de las probetas fueron determinadas por medio del ensayo de compactación Harvard Miniatura.

Cada ensayo requirió el moldeo de probetas de diferentes dimensiones las cuales serán detalladas en la descripción del método de ensayo correspondiente. Dependiendo de las dimensiones, cada probeta fue compactada en una capa o varias, en cada caso se registraron los valores de la presión transmitida por medio de un aro dinamométrico.

Para realizar ensayos a diferentes edades, todas las probetas fueron moldeadas el mismo día y ensayadas al cumplir la edad de ensayo programada. La mezcla de los materiales en los diferentes porcentajes y moldeo de las probetas se realizó siguiendo el siguiente procedimiento:

- Tamizado del material por tamices o cribas de numeración relacionada con el tamaño de las probetas a moldear. Esto se debe a que el material natural tamizado por vía húmeda muestra un pasante #200 superior al 95%. Mientras que en estado natural los terrones se presentaban en tamaños superiores incluso a los 10 cm. Con el fin de lograr probetas con distribución de densidades uniformes en toda la masa se optó por modificar el tamiz pasante del material a emplear en función de la dimensión menor de la probeta a moldear.
- Determinación de la humedad natural de CRclay y CLS (Fig.3.5).
- Conocida la humedad de los materiales ambos eran mezclados considerando los porcentajes de diseño en peso del material seco. Era destinada una fracción extra suficiente para la verificación de la humedad en el momento del moldeo.

- Adición del agua destilada necesaria para llevar la muestra a la humedad de diseño. Mezclado hasta homogeneizar y almacenamiento por 24 horas en bolsa hermética colocada luego en cámara de humedad y temperatura controlada hasta el momento del moldeo.
- Moldeo de las probetas. Registro de las dimensiones y peso de cada probeta. Determinación de la humedad con el material destinado a este fin luego de realizar el moldeo (Fig.3.6).
- En caso de que las muestras fuesen ensayadas a edades diferentes estas eran almacenadas en bolsas herméticas protegidas con un film de polietileno de 250 micrones con barrera de vapor y dispuestas posteriormente en una cámara de humedad y temperatura controladas (45% de humedad y 20°C).
- En forma previa a la realización de cada ensayo eran registrados el peso y las dimensiones de cada probeta.



**Fig.3.5-** Verificación de humedad de CRclay y CLS



**Fig.3.6-** Probetas con diferentes porcentajes de CLS preparadas para ensayos a diferentes edades.

## – COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS MEZCLAS

### A. HINCHAMIENTO LIBRE

El valor del hinchamiento libre es uno de varios parámetros que permite determinar y evaluar el potencial de hinchamiento de un suelo expansivo. Su determinación es simple (ASTM D4546 – 21) y no requiere de equipamiento sofisticado, pero en nuestro caso se requirieron ajustes en cuanto a las dimensiones de las probetas debido al elevado hinchamiento libre desarrollado por las probetas sin aditivo.

Para llevar adelante el ensayo se requiere de una celda edométrica (Fig.3.7), en la que se posiciona una probeta entre piedras porosas y papeles de filtro dentro de un anillo. Las dimensiones de la probeta deben ser tales que la relación diámetro-espesor sea superior a 2,5. Al inicio del ensayo se aplica una carga de 1 kPa (20 lbf/ft<sup>2</sup>) a la vez que se inunda la celda. En el mismo instante se comienzan a registrar las lecturas de deformación versus el tiempo. El ensayo continúa hasta que las lecturas se estabilizan en el tiempo.

Las lecturas registradas son representadas en un gráfico de tiempo versus deformación, donde el eje del tiempo puede graficarse en escala aritmética o logarítmica. En nuestro caso ambos tipos de gráficos fueron empleados para analizar cambios de pendientes, identificación de zonas características relacionadas con el comportamiento de suelos expansivos (Alazigha, 2016), evolución en el tiempo de la presión de hinchamiento, entre otros.

La relación diámetro-espesor adoptada en nuestro caso fue superior a 6. Esto logró reducir al mínimo el efecto de frontera que se desarrollaba entre el anillo y el suelo en el perímetro de la probeta. Las probetas poseían un espesor de 9mm dado que con espesores mayores algunas de ellas excedían el espesor del anillo durante su expansión, anillo cuya altura era de 200mm (Fig.3.7 y Fig.3.8). Estos ensayos fueron realizados sobre probetas de 1 día y 9 meses de edad.



**Fig.3.7-** Celda edométrica y bancada en la que se realizaron los ensayos de expansión libre



**Fig.3.8-** Probeta malograda por sobrepasar el espesor del anillo dentro del que se encontraba posicionada durante el ensayo de expansión libre.

La densidad seca inicial de las probetas fue obtenida del análisis de las densidades secas máximas obtenidas de los ensayos Harvard miniatura para todos los porcentajes de CLS ensayados. La humedad inicial seleccionada para el moldeo de las probetas fue la humedad natural del suelo in situ a la profundidad de extracción.

## **B. DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE HINCHAMIENTO**

La presión de hinchamiento es uno de los parámetros que es necesario determinar para realizar un correcto diseño del sistema de cimentación y la superestructura. Su valor puede ser obtenido empleando métodos directos o indirectos. La validez de los resultados obtenidos empleando ambos grupos de métodos ha sido objeto de numerosas discusiones (Kayabali & Demir, 2011, Soundara & Robinson, 2009, Sridharan et al., 1986).

Dentro de los métodos indirectos se encuentran los métodos del edómetro, hinchamiento restringido y ASTM en todas sus versiones. Dentro de este grupo, todos los ensayos se realizan en el edómetro, la relación diámetro espesor de las probetas empleadas fue 6:1.

Dentro de los métodos directos se encuentra el método de volumen constante. En nuestro caso los ensayos fueron realizados empleando la celda de Lambe, la cual permite registrar directamente la presión desarrollada por la probeta mientras se impide la deformación. El registro de las presiones desarrolladas puede realizarse empleando una celda de carga o un aro dinamométrico. Ambos sistemas fueron empleados y las respectivas comparaciones son incorporadas en esta tesis. La relación diámetro espesor en estas probetas era de 2,5:1, dimensiones restringidas por las dimensiones de la celda correspondiente al aparato.

Una vez determinadas las presiones de hinchamiento empleando diferentes métodos directos e indirectos se realizaron comparaciones, análisis de las ventajas y desventajas, evaluación de los resultados obtenidos de cada uno de ellos y correlaciones.

## **MÉTODO DEL EDÓMETRO**

Para la obtención de la presión de hinchamiento por medio del método del edómetro se requiere de una celda edométrica y una bancada a través de la cual aplicar presiones en forma escalonada en el tiempo (Trevisán, 1983). El proceso comienza con el montaje de una probeta de características similares a las del ensayo de hinchamiento libre: aplicación de una pequeña carga inicial e inmediata inundación. La expansión se extiende hasta alcanzar la estabilización de las lecturas.

Finalizada la primera etapa de expansión libre se aplica una primera carga. Cada escalón concluye al finalizar la etapa de consolidación primaria o comienzo de la consolidación secundaria, y la carga aplicada en cada escalón debe duplicar en magnitud a la carga anterior. La etapa de carga se detiene al alcanzar el espesor inicial de la probeta, o la relación de vacíos inicial. La duración total de este ensayo puede extenderse por varios meses, sobre todo en suelos preconsolidados expansivos.

En cada etapa del ensayo los datos son representados en gráficos de tiempo versus deformación porcentual o relación de vacíos. De cada uno de estos gráficos se obtienen la carga aplicada y la deformación final, que se representan en un nuevo gráfico de presión versus deformación o relación de vacíos (en nuestro caso se trabajó con deformaciones porcentuales). De este nuevo gráfico se obtiene la presión de hinchamiento que corresponde a la abscisa de la curva en la cual la deformación (ordenada) es igual a cero. Con un único ensayo es posible obtener la presión de hinchamiento de un suelo. Mayor cantidad de ensayos pueden requerirse para validar los resultados u obtener un promedio. La relación diámetro espesor en las probetas empleadas fue superior a 6 al igual que en el ensayo de expansión

libre. El ensayo se realizó para todos los porcentajes de CLS y CRclay sobre muestras ensayadas 1 día después de moldeadas.

Indirectamente, empleando los datos obtenidos puede obtenerse la permeabilidad  $k$ , el coeficiente de compresibilidad  $a_v$ , el coeficiente de consolidación  $C_v$ , y el coeficiente de variación volumétrica  $m_v$ . Para ello se emplean las siguientes ecuaciones:

$$k[\text{cm. s}^{-1}] = \frac{a_v \cdot H^2 \cdot \gamma_w}{T_{50} \cdot (1+e) \cdot t_{50}} \quad (3.6)$$

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p} \quad (3.7)$$

$$m_v = \frac{a_v}{1+e} \quad (3.8)$$

$$C_v = \frac{k \cdot (1+e)}{a_v \cdot \gamma_w} \quad (3.9)$$

$$\Delta H = m_v \cdot \overline{\Delta p} \cdot H \quad (3.10)$$

Todos estos coeficientes pertenecientes a la curva de consolidación permiten obtener deformaciones en función de la carga aplicada, variaciones en las pendientes de la curva de consolidación, y comparar las curvas obtenidas para diferentes porcentajes de aditivo.

Este método que se encuentra dentro del grupo de los métodos indirectos da como resultado presiones de hinchamiento mayores. La respuesta se encuentra en que durante la etapa inicial de hinchamiento libre se destruye completamente la microestructura del suelo (Kayabali & Demir, 2011). Esto implica que las etapas posteriores correspondientes a las consolidaciones asociadas a escalones de carga requerirán de cargas que puedan superar las de adsorción desarrolladas sobre las partículas de arcilla. El desarrollo completo de la doble capa difusa ocurre en la etapa de expansión secundaria SS.

## MÉTODO DE HINCHAMIENTO RESTRINGIDO

El método del hinchamiento restringido se considera un método indirecto para la determinación de la presión de hinchamiento de un suelo expansivo. Para su realización se necesita de una bancada de edómetros y celdas edométricas. Mayor es la cantidad de edómetros con que se cuenta más rápido resultará el proceso de obtención de la presión de hinchamiento.

Las dimensiones de las probetas y gráficos obtenidos son similares a los del ensayo edométrico. Las modificaciones en el procedimiento se introducen en la primera etapa del ensayo: a diferencia del método edométrico en este método se aplica una carga inicial sobre la probeta al momento de ser sumergida. Del mismo modo se procede con varias probetas a las que se aplican diferentes cargas iniciales: aplicada la carga e inundada la celda se permite expandir o consolidar la probeta hasta alcanzar la estabilización en las lecturas de deformación. Cada nuevo ensayo posee una

carga inicial determinada y una deformación final, ya sea de expansión o de consolidación. Los pares de valores presión inicial aplicada y deformación final obtenida (o relación de vacíos según se prefiera) permiten obtener un gráfico de presión (ordenadas) versus deformación (abscisas) en el cual el valor de la ordenada para la abscisa cero es el valor correspondiente a la presión de hinchamiento.

Para la realización de este ensayo se requieren varias probetas, una por cada presión aplicada. En nuestro caso las probetas son moldeadas por lo que el número de probetas y su reproductibilidad no representan un inconveniente. En el caso de las muestras inalteradas en que las propiedades varían en profundidad entre una y otra probeta, la curva de tendencia obtenida podría presentar una dispersión elevada.

Dentro del marco de la tesis se ensayaron probetas para todos los porcentajes de CLS empleados, incluida CRclay, todas de 1 día de edad, y para cada porcentaje se emplearon al menos tres probetas con diferentes cargas iniciales aplicadas. La duración de los ensayos se limita a la duración de un único escalón que resulta en la expansión o consolidación de la probeta bajo la carga aplicada.

## **MÉTODO ASTM**

El método denominado ASTM para determinar la presión de hinchamiento se realiza siguiendo similares lineamientos a los del ensayo del edómetro (Nagaraj et al. 2009) pero aplicando restricciones en el tiempo de desarrollo de cada etapa del ensayo. Las probetas moldeadas poseen las mismas características que las empleadas tanto en el método de hinchamiento restringido como en el método del edómetro.

El ensayo comienza con una etapa inicial de expansión libre (con una pequeña carga inicial aplicada) seguida de escalones de carga. Cada escalón, incluido el escalón de expansión libre, se mantiene por un período de 24h. La restricción del tiempo durante el cual se desarrolla cada escalón conduce a valores de presión hinchamiento por debajo (en el caso de suelos muy impermeables) o por encima (en el caso de suelos más permeables) del valor obtenido mediante los otros dos métodos indirectos empleados en este trabajo.

El método del edómetro permite finalizar la etapa de consolidación primaria mientras que el método ASTM restringe la duración de cada escalón sin tener en cuenta en qué etapa de la deformación se encuentra la muestra. Para la realización del ensayo solamente se necesita una probeta y la duración del ensayo está restringida a un día por cada escalón del proceso total. Las probetas poseen las mismas características que las probetas empleadas en el método del edómetro y de hinchamiento restringido.

La presión de hinchamiento se determina de igual forma que en el método del edómetro, empleando un gráfico cuyos ejes x e y corresponden a la presión aplicada y la deformación final registrada. Una vez trazada la curva correspondiente al ensayo, el valor de la abscisa cuya ordenada es cero es la correspondiente presión de hinchamiento. Varios autores informan que los valores de la

presión de hinchamiento obtenidos empleando este método son levemente inferiores a los reales (Kayabali & Demir, 2011, Soundara & Robinson, 2009, Sridharan et al., 1986). En materiales menos permeables los cuales requieren más de 24 h en desarrollar la consolidación primaria la presión de hinchamiento estimada resultará mayor a la real. Esto se debe al hecho de que detener el escalón a las 24 horas equivale a suponer que la consolidación primaria se produce en un tiempo menor, relacionado con una permeabilidad mayor a la real y a una deformación entre escalones menor. Las pendientes de las curvas ASTM resultarían más suaves que las pendientes obtenidas mediante método del edómetro y método de hinchamiento restringido para el caso de un suelo de muy baja permeabilidad.

### **MÉTODO DE VOLUMEN CONSTANTE**

El concepto del método de volumen constante (Kayabali & Demir, 2011) consiste en impedir la deformación de la probeta mientras se registra la presión necesaria para lograrlo. Algunos métodos permiten pequeñas deformaciones luego de las cuales se aplican de forma inmediata pequeñas cargas que revierten la deformación desarrollada. El objetivo es mantener el espesor de la probeta en su valor inicial ya sea por restricción de la deformación o por aplicación de cargas en la medida que se requiera.

En nuestro caso para la realización del ensayo se empleó un aparato conocido como Lambe (Fig.3.9). Permite la colocación de una celda de carga o un aro dinamométrico para registrar las presiones desarrolladas. Debido al hecho de que para registrar las cargas se deben desarrollar deformaciones ya sea en la celda o en el aro dinamométrico, las presiones medidas resultarán menores a las presiones de hinchamiento reales. Dependiendo de las características propias del aro o de la celda serán las deformaciones asociadas al rango de cargas de trabajo. Debe recordarse que cada aro y cada celda poseen un rango de trabajo con comportamiento elástico fuera del cual el error en las lecturas es importante y la relación esfuerzo-deformación deja de ser lineal. Cargas superiores a las de trabajo producen deformaciones plásticas (irreversibles). Cargas inferiores a las de trabajo poseen una relación esfuerzo-deformación diferente a la de trabajo. Una respuesta similar se muestra en celdas de carga, con deformaciones menores a las que es necesario desarrollar en los aros dinamométricos.

Las probetas poseen dimensiones diferentes a las utilizadas en el resto de los ensayos y se encuentran limitadas por las dimensiones de la celda del aparato (Fig.3.10). El diámetro nominal es de 64mm, altura 16,5mm. Se coloca entre papeles de filtro y piedras porosas. La densidad seca de moldeo fue 13,3kN/m<sup>3</sup>, y la humedad 18%.

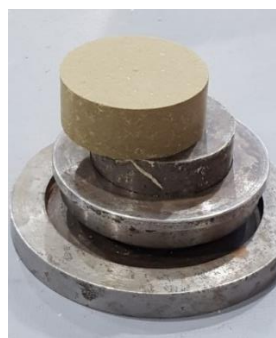
El ensayo comienza por el posicionamiento de la probeta dentro del anillo metálico colocado dentro de una celda similar a la edométrica, con entrada de agua tanto por la cara superior como la inferior. Esto permite la saturación por ambas caras. Se aplica una carga inicial para asegurar el contacto íntimo entre todos elementos que conforman el paquete en el que se encuentra posicionada la probeta.

Se da inicio al ensayo al inundar la celda, a partir de ese momento se registran las presiones ya sea en el comparador colocado en el aro dinamométrico o en la celda de carga.



**Fig.3.9-** Aparato de Lambe con aro dinamométrico: método directo para determinar la presión de hinchamiento.

La norma de ensayo considera que la presión de hinchamiento es aquella desarrollada 24h después de iniciado el ensayo. En los ensayos realizados en el marco de esta tesis se extendió el registro de las lecturas hasta alcanzar la estabilización. Las curvas obtenidas fueron incorporadas en gráficos de doble entrada en el eje de las ordenadas, uno correspondiente a la presión de hinchamiento y el otro a la deformación durante un ensayo de hinchamiento libre. El tiempo estaba representado en el eje de las abscisas. Se realizaron ensayos en probetas con edades de un día para todos los porcentajes de CLS con aro dinamométrico y con celda de carga.



**Fig.3.10-** Probeta empleada en el aparato de Lambe para la determinación de la presión de hinchamiento

Con el objetivo de analizar la relación entre la presión de hinchamiento, el grado de saturación y las curvas de succión siguiendo este mismo procedimiento se realizaron dos series de ensayos adicionales, una serie para CRclay y otra para 10%CLS con seis diferentes porcentajes de humedad: 15%, 19%, 23%, 27%, 31% y 35%. La humedad inferior estaba definida por la mínima humedad a la cual podían moldearse probetas sin desmoronarse durante su manipulación. La humedad superior fue la más cercana al LP que permitiera el moldeo sin presentar problemas de extrusión del material por los bordes del molde durante la compactación.

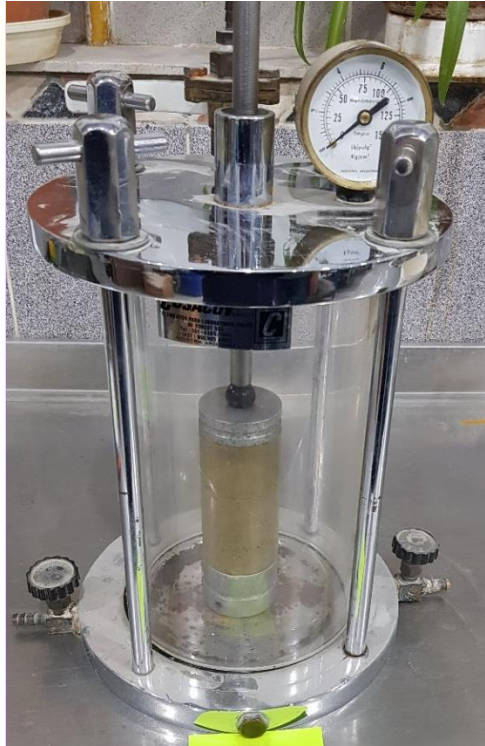
### **C. ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE (UCS)**

El ensayo de compresión simple no confinado o UCS (ASTM D2166-00, Standard Test Method For Unconfined Compressive Strength Of Cohesive Soil) fue el ensayo seleccionado para evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas con diferentes contenidos de CLS y diferentes edades. Este ensayo permite obtener el módulo elástico tangente, módulo elástico secante, resistencia a la compresión simple, realizar el análisis de deformabilidad durante el ensayo, evaluar el comportamiento de la probeta en la falla.

El equipo empleado para la realización de estos ensayos es una prensa hidráulica con capacidad de 20kN, instalada en el LISHA (Laboratorio de Investigación de Suelos Hormigones y Asfaltos de la UNPSJB, sede Comodoro Rivadavia). La celda es la correspondiente a Fig.3.11.

Las muestras fueron moldeadas bajo carga estática en cinco capas de igual espesor, escarificadas entre capa y capa para asegurar la continuidad y la adherencia entre capas consecutivas. La altura y el diámetro de diseño de las probetas fueron 99.4mm y 48.6mm, cumpliendo la condición altura-diámetro 2:1. La humedad de diseño y la densidad de moldeo surgieron del ensayo Harvard Miniatura. El material necesario para el moldeo de las probetas fue preparado y homogeneizado en una sola jornada. Todas las probetas fueron moldeadas el mismo día y almacenadas en grupos de acuerdo con la edad de ensayo.

En la Fig.3.12 se observa el proceso de moldeo de la probeta. Una vez aplicada la carga de compactación la misma se mantenía hasta que las lecturas en el aro dinamométrico se estabilizaban. Debido a la naturaleza del suelo se requerían varios minutos hasta lograr la estabilización. Una vez conformada la probeta la extrusión se realizaba mediante el empleo de un gato hidráulico manual. Se registraban las dimensiones y peso de la probeta en forma previa a la preparación para su almacenaje.



**Fig.3.11-** Probeta posicionada dentro de la cámara triaxial para la realización del ensayo UCS, debido a que se empleó este tipo de dispositivo para llevar adelante el ensayo.

Se realizaron series de ensayos sobre probetas de 1 día, 1 mes, 3 meses, 6 meses, 9 meses y 1 año. Los porcentajes de CLS empleados fueron: 3%, 5%, 7%, 10% y CRclay. Una vez ensayadas todas las probetas, el análisis de los resultados se realizó empleando dos parámetros denominados ductibilidad (D) e índice de ductilidad (R) (Bekhiti et al., 2019).

La ductilidad D se define como el cociente entre el módulo secante y el módulo tangente para una misma muestra.

El índice de ductilidad R es la relación entre la resistencia máxima para una muestra con un porcentaje de aditivo y la resistencia máxima para la muestra sin aditivo, ecuaciones (3.4) y (3.5).

$$D = \frac{E_{sec}}{E_{tan}} \quad (3.11)$$

$$R = \frac{UCS_{x\%CLS}}{UCS_{CRclay}} \quad (3.12)$$

Estos dos parámetros fueron obtenidos, analizados y presentados gráficamente como valores medios de los valores relativos y absolutos. Los valores relativos surgieron de realizar el análisis comparativo de uno de los parámetros para una probeta de edad y porcentaje de aditivo dados, dividido por el valor para la probeta de CRclay de la misma edad. Los valores absolutos se obtuvieron de forma similar empleando como valor de referencia el valor obtenido para CRclay de un día.



**Fig.3.12-** Escarificado entre cada capa, desmolde empleando gato hidráulico, probeta, registro de las dimensiones de la probeta

#### **D. ENSAYOS TRIAXIALES CU CON MEDICIÓN DE LA PRESIÓN DE POROS**

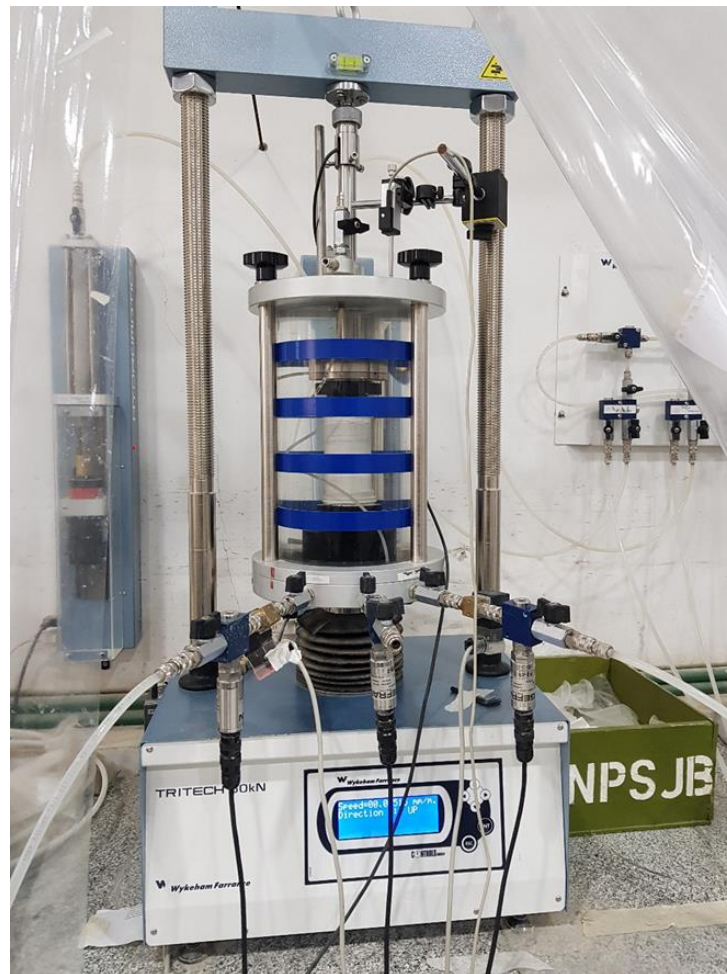
Los ensayos triaxiales se realizaron empleando el equipo TRITECH Controls, con capacidad hasta 50kN de carga aplicada instalado en el LISHA (Laboratorio de Investigación de Suelos Hormigones y Asfaltos de la UNPSJB, sede Comodoro Rivadavia) (Fig.3.13).

Para evaluar la resistencia al corte triaxial de las mezclas CRclay-lignina se realizaron ensayos triaxiales consolidados isotrópicamente bajo carga no drenada (TCU). Dos grupos de muestras fueron ensayadas: CRclay (sin CLS) y con el 10%CLS. Todas las muestras fueron moldeadas con humedades cercanas a la humedad correspondiente a la saturación.

Las probetas poseían las mismas dimensiones empleadas para los ensayos UCS y fueron moldeadas con la misma densidad seca obtenida empleando el ensayo de compactación Harvard Miniatura: diámetro 49.5mm, altura 96mm, densidad seca 13,3kN/m<sup>3</sup>, humedad 33%. Cada ensayo

constó de etapas de saturación, consolidación y carga, las etapas de saturación y consolidación demandaban un tiempo cercano a las dos semanas. La etapa de rotura era programada con una velocidad de deformación constante de 0.3125%/hora. En cada ensayo se colocaron filtros verticales rodeando las probetas para acelerar la saturación y la consolidación (Fig.3.14).

Debido a la baja permeabilidad del suelo, los escalones de saturación realizados al comienzo de cada ensayo debían realizarse en pequeños incrementos, hasta alcanzar los 600kPa. La velocidad de deformación programada para los ensayos triaxiales CU con medición de presión de poros fue 0.3125 %/hora. Las presiones de confinamiento aplicadas fueron 100kPa, 200kPa y 400kPa.



**Fig.3.13-** Equipo triaxial utilizado para realizar los ensayos CU con medición de presión de poros

En la etapa de saturación de las probetas se utilizó agua desmineralizada. El agua expulsada de las probetas durante la etapa de consolidación poseía un alto contenido de sales en el caso de probetas de CRclay y sales mezcladas con CLS en el caso de las probetas con 10%CLS. Estos lixiviados retrocedían en las líneas de conducción y transmisión de presiones provocando incrustaciones y obturaciones en las

válvulas y conexiones. Todos los circuitos debían ser meticulosamente lavados luego de cada ensayo (Fig.3.15). Este mismo efecto pudo observarse en los ensayos de permeabilidad.



**Fig.3.14-** Drenes verticales colocados en las probetas para facilitar el drenaje.

En el caso de los ensayos realizados con 200kPa y 400kPa de presión de confinamiento los lixiviados fueron recolectados al finalizar la etapa de rotura. Con los lixiviados recolectados se realizaron los ensayos de toxicidad, determinación de sales, conductividad y pH.



**Fig.3.15-** Sales depositadas en uno de los sensores de presión de una de las líneas de la cámara triaxial. Depósitos salinos en una imagen magnificada de la misma válvula.

## – COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS MEZCLAS

### A. PERMEABILIDAD: PERMEÁMETRO DE CARGA VARIABLE

El ensayo de permeabilidad mediante el empleo del permeámetro de carga variable fue seleccionado debido a la baja permeabilidad de las muestras analizadas. En forma previa a la realización de estos ensayos se contaba con un valor aproximado obtenido indirectamente por medio de los ensayos edométricos. Las determinaciones de permeabilidad fueron realizadas sobre probetas CRclay y probetas con todos los porcentajes de CLS incluidos en el plan de trabajo. Los moldes empleados poseían un diámetro de 9.1cm y una altura de 11.7cm. La carga hidráulica máxima aplicada era de 2mca.

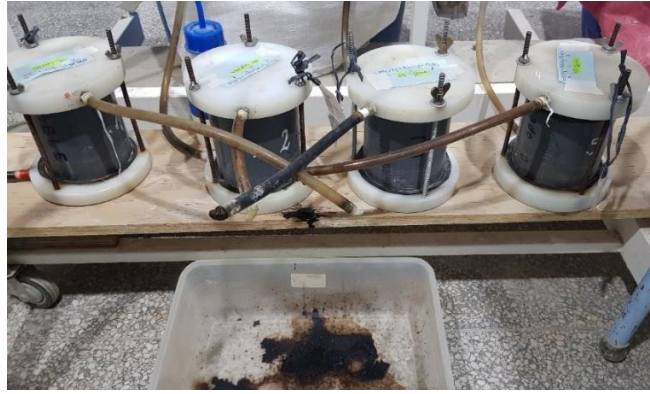
Para reducir el tiempo de saturación se realizaron modificaciones al ensayo:

- La altura de las probetas se redujo a 5cm y el espacio sobre las mismas se completó con una capa de arena de granulometría uniforme y granos de silicio. La permeabilidad de la arena empleada, una vez compactada, poseía una permeabilidad cinco órdenes de magnitud mayor que las muestras de CRclay con o sin CLS. Entre ambos materiales se colocaron papeles de filtro para evitar la intrusión de arcilla dentro de la capa de arena.
- La muestra fue moldeada con una humedad mayor a la empleada en el resto de los ensayos, y más cercana a la humedad de saturación. Con ello se buscaba reducir el tiempo necesario para saturar la probeta, la humedad inicial era 28% y la densidad seca 13,3kN/m<sup>3</sup>.

Los ensayos se extendieron un mes luego de estimar se había alcanzado la saturación, lo cual sucedió al cabo de 28 días. Durante ese período se analizó la evolución en los valores de permeabilidad en función de los porcentajes de aditivo y el tiempo. Se realizaron observaciones respecto al fluido que escurría de las probetas. El ensayo se realizó siguiendo la norma IRAM 10530/1988 (Mecánica de suelos, Método de ensayo de la permeabilidad a carga variable en suelos cohesivos).

En la Fig.3.16 pueden observarse ensayos de permeabilidad sobre cuatro probetas con diferentes porcentajes de CLS: 3%, 5%, 7%, 10%. La permeabilidad de CRclay fue determinada por duplicado en la etapa de selección de aditivo (etapa de selección y caracterización de suelos y aditivos) junto a las permeabilidades de GAclay y FRclay.

En la misma figura puede observarse el fluido que gotea del dren superior de la probeta. Posee consistencia viscosa, pero es completamente soluble en agua. En la Fig.3.17 se observa el contraste entre el color de la arena empleada para completar el molde (al fondo de la imagen y dentro de una bandeja) y la arena al finalizar el ensayo durante la etapa de desmontaje (muestra con CLS).

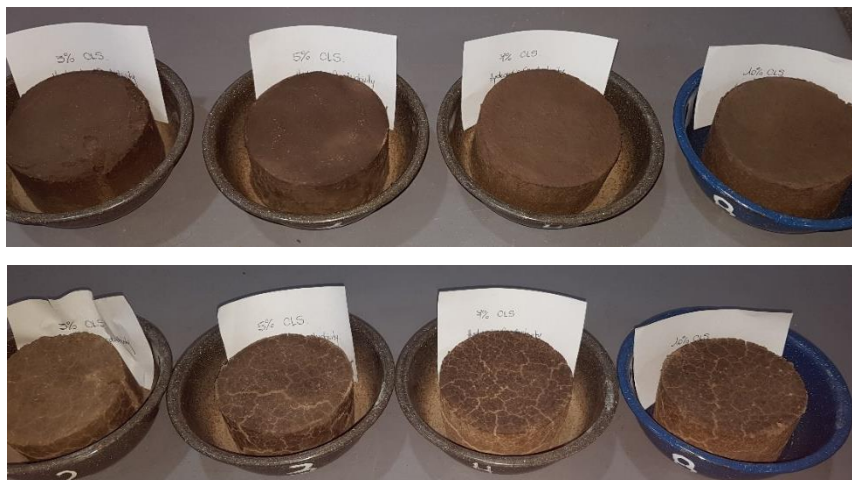


**Fig.3.16-** Ensayos en permeámetro de carga constante de cuatro probetas con diferentes porcentajes de CLS.



**Fig.3.17-** Fluidos pertenecientes a las probetas con CLS durante el ensayo de permeabilidad. Contraste entre la coloración de la arena antes y después del ensayo de permeabilidad.

La Fig.3.18 muestra la apariencia final de las cuatro probetas ensayadas (arriba), también la coloración y la apariencia luego de secadas al horno (abajo). La determinación de la humedad al final del ensayo permite comparar los estados inicial y final de las probetas.



**Fig.3.18-** Probetas una vez finalizado el ensayo de permeabilidad, antes de y después de secadas al horno para realizar la determinación de humedad.

## B. CURVAS DE PRESIÓN DE SUCCIÓN

La curva de retención de agua representa la relación que existe entre el contenido de agua o el grado de saturación y la succión desarrollada en un suelo. Las condiciones de compactación, densidad seca inicial, contenido de agua y contenido de sales inicial influyen directamente sobre la curva de retención de agua, por lo que el grado de saturación es un factor determinante en el comportamiento del suelo. Cada suelo posee una curva de succión total, una curva de presión osmótica y una de presión matricial.

Es así como la succión total ( $\psi$ ) está formada por dos componentes primarios (Fredlund et al., 2012) la succión matricial ( $u_a - u_w$ ) y la presión osmótica ( $\pi$ ). La succión matricial es un estado tensional de suelo relacionado con la tensión capilar. La variación del contenido de humedad del suelo, en el caso de los suelos in situ se relaciona directamente con los cambios estacionales y con la interfase agua-aire. La succión osmótica está asociada con el contenido de sales en el agua presente en los poros y a la doble capa difusa que se desarrolla alrededor de las partículas de suelo.

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (3.13)$$

Donde  $u_a$  y  $u_w$  son la presión poro-aire y poro-agua respectivamente. La obtención de la curva de saturación o curva característica de un suelo permite entender muchos de los problemas ingenieriles que se presentan como consecuencia de cambios de humedad en el medioambiente.

Los métodos empleados para la medición tanto de la succión total o energía libre del agua-suelo, la succión matricial y la succión osmótica se presentan en la Tabla 3.9, tomado de Fredlund et al. (2012). En nuestro caso las técnicas empleadas para determinar las curvas de succión fueron el método del papel de filtro y el psicrómetro. Ambos métodos permiten obtener las curvas de succión en rango medio a alto de presiones: 3 a 300MPa.

### MEDICIÓN DE LA SUCCIÓN MATRICIAL Y TOTAL EMPLEANDO LA TÉCNICA DEL PAPEL DE FILTRO

La técnica de papel de filtro fue desarrollada para su empleo en agronomía y agricultura. Puede aplicarse en una amplia gama de valores de succión. El procedimiento puede realizarse con papeles calibrados en contacto (succión matricial o mátrica) o sin contacto (succión total) con el suelo. Es considerado un método indirecto (Fredlund et al., 2012).

En el procedimiento empleado en la presente tesis se utilizaron tres papeles de filtro. Un primer papel circular secado al horno colocado entre otros dos papeles protectores de mayor diámetro, este paquete de tres papeles colocado entre dos muestras de suelo moldeadas con las mismas

características (humedad y densidad de diseño). Ambas muestras, luego de colocar el paquete interno de papeles, eran rodeadas con una cinta aislante para asegurar el contacto. Sobre este paquete de suelo-papeles se apoyaba un anillo plástico sobre el que se colocaban dos papeles de filtro de igual diámetro calibrados previamente secados al horno. Este conjunto se posicionaba dentro del recipiente dentro del cual se establecería un medio de condiciones de humedad y temperatura (22°C) controladas.

**Tabla 3.1-** Dispositivos empleados para medir succión y sus componentes (Tomado de Fredlund et al., 2012 y Cardoso et al., 2006)

Dispositivo	Componente de la succión medido	Rango	Comentarios
Psicrómetros	Total	1-60MPa (máx.300MPa)	Se requiere un medioambiente con temperatura constante
Papel de filtro	Total	Cualquier rango	Puede medir succión matricial cuando el contacto con el suelo húmedo es bueno
Tensiómetros	Presiones de poro negativas o presiones matriciales cuando la presión poro-aire es la atmosférica	0-90kPa	Presenta dificultad con la cavitación y difusión del aire a través del recipiente de cerámica
Traslación de ejes o plato de presión	Matricial	0-1500kPa	El rango de medición es función del valor de la entrada del aire del disco de cerámica
Sensores de conductividad térmica	Matricial	10-1500kPa (aprox.)	Medición indirecta utilizando un sensor de cerámico de tamaño de poro variable
Extractor de fluido de poros	Osmótica	Cualquier rango	Empleado junto con el psicrómetro o con medición de la conductividad eléctrica

El recipiente debía ser cerrado herméticamente, para ello se emplearon cintas aislantes que se colocaban rodeando la tapa. El papel colocado entre papeles protectores en contacto con el suelo permitía determinar la succión matricial. Los dos papeles que no estaban en contacto con el suelo y se encontraban sobre el paquete formado por dos muestras permitían determinar la succión total.

Los recipientes dentro de los cuales se colocaban las muestras debían poseer un volumen vacío una vez colocadas las probetas menor al 10% del volumen total. Cada ensayo fue realizado por duplicado (cada humedad se considera un ensayo), y cada par de recipientes era colocado dentro de dos cámaras que brindaban aislamiento térmico (una dentro de otra). Las cámaras eran de poliestireno expandido de alta densidad (HDPE). Las cámaras eran selladas con cinta aislante y posteriormente colocadas dentro de una cámara de temperatura controlada. El tiempo mínimo que se prolongaba el ensayo era de

catorce días continuos. Diferentes autores mencionan diferentes tiempos para asegurar se alcance el equilibrio en el medioambiente generado dentro del sistema (Leong et al., 2016, Lucas et al., 2011, Bicalho et al., 2015, Bulut et al., 2001, Bulut, 1996).

Al finalizar el ensayo cada papel de filtro era pesado con una balanza cuya resolución era 0,0001g. Luego de que el recipiente de HDPE era retirado de la cámara de temperatura controlada se permitía un tiempo máximo de 15 minutos desde el inicio mismo del proceso, lo cual incluía el pesado de los papeles. Diversos autores realizaron las mismas experiencias pero empleando diferentes tiempos de ensayo, y los tiempos recomendados variaron entre 2 días y 32 días (Fredlund et al., 2012, Lucas et al., 2011, Manzanal et al., 2021, Romero et al., 1999, Della Vecchia et al., 2015). En nuestro caso, superados los 21 días se desarrollaban microorganismos en los papeles de filtro lo que conducía a incertidumbre en los resultados y la necesidad de repetir los ensayos. En referencia a la habitación dentro de la cual se realizaba todo el procedimiento se encontraba libre de corrientes de aire y cambios bruscos de temperatura.

En cuanto al procedimiento de manipulación de los papeles que actuaban de sensores, los mismos eran manipulados con pinzas metálicas, las superficies en que los papeles eran apoyados eran higienizadas con alcohol y trapo de algodón, los operarios trabajaban con guantes estériles y barbijo para no respirar directamente sobre los papeles. Una vez retirados, los papeles de filtro eran secados a 105°C durante 24 horas en un horno específicamente destinado a su uso, estabilizados dentro de olla de secado para su posterior pesado en balanza analítica y luego finalmente determinar su humedad final.

En el caso de los papeles que no se encuentran en contacto con el suelo y se encuentran en la parte superior de la muestra mas no en contacto con ella, se genera un medioambiente en el cual se llega a un equilibrio entre la necesidad del papel de absorber humedad y la posibilidad del suelo de cederla. En el momento en que se alcanza el equilibrio, se considera se alcanza la presión de vapor. La humedad de los papeles de filtro permite de este modo determinar la succión total en ese punto.

En el caso del papel que se encuentra en contacto con el suelo la humedad ya sea líquida o en forma de vapor fluirá hasta alcanzar un equilibrio correspondiente a la succión matricial. Es así como por medio de la determinación de la humedad que posee el papel de filtro al finalizar el ensayo es posible determinar la succión matricial o total utilizando la curva de calibración correspondiente al papel de filtro. En nuestro caso se emplearon Papeles de filtro cuantitativo Whatman, Grado 589/2. La curva de calibración fue obtenida como parte del procedimiento previo a los ensayos siguiendo ASTM (1997b) standard (D5298-94, Committee D18 on Soil and Rock).

Este método es un método de bajo costo, que requiere seguir minuciosa y sistemáticamente los procedimientos y respetar los tiempos estipulados. Una vez incorporadas las rutinas es posible obtener curvas de saturación con baja dispersión siempre y cuando se asegure la temperatura en un ambiente controlado, con una variación de la temperatura no superior a +/-0,5°C.

## MEDICIÓN DE LA SUCCIÓN TOTAL CON EL MÉTODO DE PUNTO DE ROCÍO (WP4)

El psicrómetro de espejo frío utiliza la medición del punto de rocío para determinar la succión total en un suelo. La medición se realiza en condiciones isotérmicas en un recipiente sellado. Gee et al. (1992) introdujeron la técnica del espejo frío que puede utilizarse para la medición de la succión total en el rango de 3 a 300MPa (rango medio a alto de succiones) (Fredlund et al., 2012). Este tipo de técnica permite medir de forma directa la humedad relativa del suelo.

El higrómetro empleado fue el WP4, Chilled Dew-point Mirror Hygrometer, Dewpoint Potentia Meter, registered trademark of Decagon Devices, Inc. del IDIA (Instituto de Investigaciones Antisísmicas, Fac. de Ing. Universidad Nacional de San Juan) (Fig.3.19). Este dispositivo posee un control interno de temperatura, requiere de un pequeño intervalo de tiempo necesario para alcanzar la estabilización del ambiente dentro del cual se encuentra inmersa la muestra. El dispositivo cuenta con un pequeño ventilador que permite homogeneizar la atmosfera dentro de la cámara en la cual se realiza la medición. Se utiliza un sistema de refrigeración para reducir la temperatura en un pequeño espejo hasta alcanzar el punto de rocío. La condensación en el espejo es detectada (punto de rocío) por una celda fotoeléctrica y la temperatura del punto de rocío es medida por un termómetro de infrarrojos. Con ambas temperaturas, de la muestra y de punto de rocío, empleando la ecuación de Kelvin es posible calcular la succión total de la muestra. El aparato requiere ser recalibrado en forma periódica mediante el empleo de una solución estandarizada. Es un método confiable, rápido y de fácil empleo.



**Fig.3.19-** WP4: higrómetro de punto de rocío

El WP4-T entrega el registro de la presión total, la temperatura de la probeta y el peso de la cápsula. (Fig.3.20). Una vez finalizado el ensayo, las determinaciones de humedad de las probetas (Fig.3.21) se realizan empleando una balanza con resolución de 0,001g.

Dentro del marco de esta tesis se lograron las curvas de succión total para todos los porcentajes de CLS y CRclay obteniendo ocho puntos para cada una de las curvas, uno por cada

humedad. Las muestras fueron moldeadas en el momento, a la densidad de diseño 13,3kN/m<sup>3</sup> dentro de las cápsulas estandarizadas correspondientes al dispositivo (Fig.3.20). No se realizaron ensayos a diferentes edades de las muestras.



Fig.3.20- Cápsulas empleadas en WP4-T

### AJUSTE DE LA CURVA DE RETENCIÓN EMPLEANDO VAN GENUTCHEN

Las dos técnicas utilizadas para medir la succión mátrica y total junto a la determinación del contenido de humedad o grado de saturación de cada muestra permite evaluar la curva de retención de agua del suelo estudiado y las diferentes mezclas suelo-bioaditivo.

Las curvas de retención de agua obtenidas pueden ser analizadas con diversos modelos desarrollados y presentes en la bibliografía (Van Genutchen, 1980, Fredlund y Xing, 1994)

El modelo de curva de retención de agua propuesto por Van Genutchen (1980) utiliza las siguientes ecuaciones (Perez et al., 2013):

$$S_e = \left[ 1 + \left( \frac{s}{s_{ae}} \right)^{\left( \frac{1}{1-\lambda} \right)} \right]^{-\lambda} \quad (3.14)$$

$$S_r = S_e * [1 - S_{res}] + S_{res} \quad (3.15)$$

$s_{ae}$  = Valor de entrada de aire;

$S_{res}$  = Contenido de agua residual;

$S_r$  = grado de saturación;

$s$  = succión del suelo en kPa;

$\lambda$  = parámetro relacionado con la distribución del tamaño de los poros, pendiente de la curva característica.

Los datos experimentales se ajustaron al modelo de Van Genuchten por el Método de Mínimos Cuadrados. Los resultados se presentan junto con las ecuaciones de las curvas de ajuste.



**Fig.3.21-** Determinación de humedad de las muestras empleadas para las curvas de saturación de CRclay (de arriba hacia abajo CRclay, 3%, 5%, 7% y 10%CLS, de izquierda a derecha de menor a mayor porcentaje de humedad).

#### – **MINERALOGÍA Y MICROESTRUCTURA DE LAS MEZCLAS**

El estudio microestructural de las mezclas puede ayudar a comprender el comportamiento volumétrico de los suelos compactados. Empleando métodos directos e indirectos puede obtenerse información sobre la mineralogía, porosidad, superficie específica, tamaño y forma de las partículas. La realización de estos ensayos de microestructura a diferentes edades y porcentajes permite analizar en conjunto la interacción entre el aditivo y el suelo que contribuiría al entendimiento del mecanismo de estabilización.

La realización de ensayos de difracción por rayos X (DRX), y microscopía electrónica de barrido (SEM, Scanning Electron Microscope) acompañado de mapeo de elementos para todos los porcentajes de CLS y a dos edades de las muestras, completó el análisis microestructural de las mezclas.

La densidad de preparación de las muestras compactadas fue 13,3KN/m<sup>3</sup>, obtenida empleando el ensayo Harvard Miniatura. Las muestras fueron compactadas con una humedad de 18% y liofilizadas empleando la técnica de freeze-drying.

## **A. DIFRACCIÓN POR RAYOS X (DRX)**

El estudio por emisión de rayos visibles y no visibles permite determinar la composición mineralógica del suelo identificando para ello estructuras cristalinas, tamaño de granos, tensiones residuales, y fases de cada mineral por medio del análisis de la longitud de onda, la energía o la frecuencia empleando para ello patrones de comparación. El haz, al incidir sobre la superficie en estudio es absorbido o reflejado permitiendo de este modo analizar longitudes de onda y frecuencias de onda características.

Los ensayos fueron realizados en el CETMIC, Universidad Nacional de La Plata, en junio de 2020. El aparato empleado fue un Difractómetro Philips PW1800/10 con geometría, monocromador de grafito, tubo con ánodo de cobre y parámetros de trabajo estándar de 40kV y 30mA. Los difractogramas de rayos X se obtienen en un difractómetro Philips 3020 utilizando radiación  $\text{CuK}\alpha$  filtro de Ni (a 35 kV, 40 mA). El barrido se realiza entre  $3^\circ$  y  $70^\circ$   $2\theta$ , con un paso de  $0,04^\circ$  y un tiempo conteo de 2 seg/paso. Las aberturas de las ranuras de divergencia, recepción y dispersión son  $1,0,2$  y  $1^\circ$  respectivamente y no se utiliza monocromador. La identificación y de las fases minerales en roca total se realiza con la ayuda del programa X'Pert High Score. Para la Identificación y cuantificación de los minerales de arcilla se siguen los procedimientos normales descritos en la literatura y sintetizados por Moore y Reynolds, 1997. La cuantificación se basa en el trabajo de Biscayne (1965).

## **B. MICROSCOPIA POR BARRIDO ELECTRÓNICO (SEM)**

Por medio de este ensayo, microscopio de barrido electrónico de alta resolución (SEM), se obtiene información topográfica y de contraste químico por medio de un cañón de electrones. Posee un sistema óptico que permite lograr imágenes de alta resolución (12X hasta 500000X) sobre muestras metalizadas o no metalizadas dependiendo de la naturaleza de estas. En nuestro caso y dada la naturaleza no metálica de las muestras, el tamaño de las partículas, y la escala que se requería alcanzar, todas las muestras fueron metalizadas con carbono. Cada muestra poseía un peso cercano a los 5 gramos. Se trabajó con muestras de pequeño tamaño para trabajar con todas las muestras simultáneamente, pudiendo así comparar entre muestras de la misma edad y diferentes porcentajes de CLS, así como también muestras de diferentes edades y similares contenidos de CLS.

Mediante disparo de electrones retrodifundidos se obtuvieron imágenes de contraste que permitieron realizar mapeo de elementos y diferenciar áreas con pequeños cambios de composición química. En estos casos la magnificación resultaba menor, 12X a 100000X.

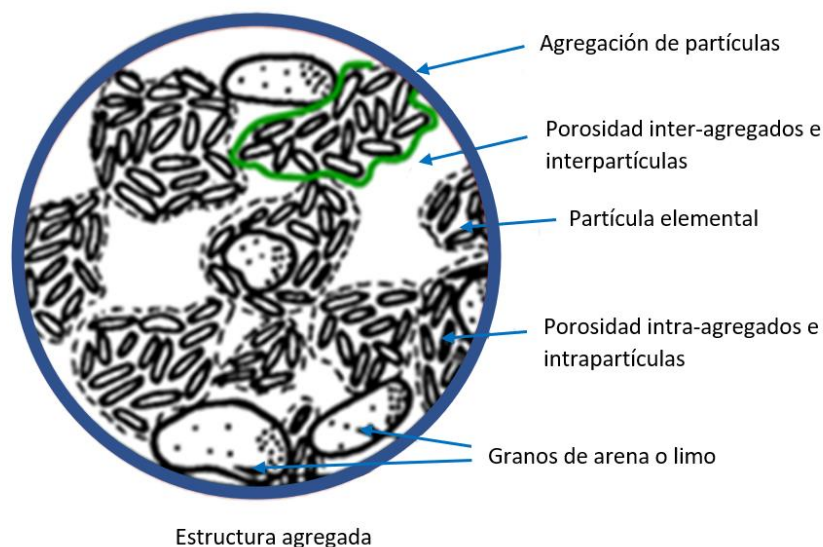
Los objetivos fijados al realizar el ensayo incluían: identificación de cambios microestructurales en cuanto a agregamiento de las partículas, identificación y análisis de la porosidad bimodal, identificación de estructuras diferentes en función de la edad y el contenido de aditivo, comparación de

datos obtenidos mediante mapeo buscando diferencias en la composición química. Todos los objetivos planteados pudieron cumplirse.

Los ensayos fueron realizados en el LAMARX (Laboratorio de Microscopía Electrónica y Análisis por Rayos X, de la Universidad Nacional de Córdoba), marzo 2021. El equipamiento empleado fue el SmartSEM®04 en01.

### C. POROSIMETRÍA

Dentro de las características físicas de un material poroso como el suelo, la porosimetría, el tamaño de los poros y su distribución en volumen son importantes para entender el comportamiento y la microestructura del suelo. Los suelos con una matriz arcillosa presentan un proceso de agregación de partículas (o flóculos) que permiten identificar diferentes rango de porosidad según los autores (Alonso et al., 1987, Delage et al., 1998). En la Fig. 3.22 se observa un esquema donde se pueden identificar una porosidad inter-agregados (Alonso et al., 1987) o inter-partículas (Delange et al., 1998) de mayor tamaño y una porosidad intra-agregados (Alonso et al., 1987) o intra-partícula (Delage et al., 1998) de menor tamaño. Esto fue identificado como una distribución bimodal de su porosimetría (Delage et al., 1998, 2007). En este documento nos referiremos como intraporosidad o porosidad intrapartículas a la porosidad que se desarrolla dentro de la agregación de partículas o flóculos, y como interporosidad o porosidad interpartículas es la que se desarrolla entre agregados o flóculos (Fig.3.22).



**Fig.3.22-** Estructura de poros de un suelo con matriz arcillosa: Intraporosidad e interporosidad (Alonso et al., 1987)

El estudio de la porosidad fue realizado empleando dos métodos: porosimetría por adsorción de Nitrógeno y porosimetría por intrusión y extrusión de Mercurio. Ambos ensayos se realizaron sobre

muestras con diferentes contenidos de CLS y dos edades: 1 día y 1 año. De este modo fue posible analizar el impacto del tiempo y del contenido de aditivo sobre la porosidad.

### **POROSIMETRÍA POR ADSORCIÓN DE NITRÓGENO (BET)**

El aparato utilizado es el MICROACTIVE ASAP® 2020 PLUS Accelerated Surface Area And Porosimetry System, Laboratorio LAMARX, UNC. Junio 2020. Por medio de la porosimetría por adsorción de Nitrógeno (BET) se obtiene información de la superficie del área analizada por medio de la condensación de nitrógeno en los poros del material. A partir de la intrusión de nitrógeno es posible obtener información sobre el volumen de los poros midiendo la cantidad de gas necesario para llenarlos.

Las pruebas de adsorción de nitrógeno brindan información sobre: área superficial determinada en varios puntos y empleando diferentes métodos de estimación, volumen total de poros, distribución del tamaño de los poros, diámetro medio de los poros, volumen de microporos, superficie específica. El tamaño de las muestras necesario para realizar el ensayo es cercano a los 5 gramos. Las muestras por ensayar deben ser liofilizadas para extraer el agua libre sin modificar la microestructura. En nuestro caso como el estudio incluía evaluar los cambios microestructurales en el tiempo fueron liofilizadas al alcanzar la edad de estudio.

El proceso de liofilización empleado fue el método de freeze-drying o también conocido como sublimation-dryer. Consiste en extraer el agua mediante sublimación previo congelamiento de las muestras por inmersión en nitrógeno líquido. Empleando esta técnica es posible preservar la microestructura del suelo. Una vez liofilizadas las muestras eran preservadas dentro de bolsas herméticas sumergidas en material absorbente para prevenir la rehidratación.

El peso de las muestras era superior a los 5 g e inferior a los 10 g, con superficies limpias y forma lo más cercana a una esfera. Las características fueron similares a las de las muestras empleadas en el ensayo SEM, de tamaño pequeño debido a que a mayor tamaño mayor resultaba el tiempo requerido para completar el ensayo.

### **POROSIMETRÍA POR INTRUSIÓN DE MERCURIO (MIP)**

La porosimetría por intrusión de Mercurio (MIP, mercury intrusion porosimeter) posee un rango de aplicación entre 0.003  $\mu\text{m}$  - 360  $\mu\text{m}$ . Debajo de porosidades menores a valores de entre 3 y 7nm se encuentra lo que se conoce como porosidad muy pequeña o “very thin porosity” en la cual no es posible intruir Mercurio. Esta porosidad depende del aparato y se encuentra identificada en los gráficos presentados en los resultados con una línea vertical discontinua. En nuestro caso ese límite es de 2nm.

No todos los materiales pueden ser ensayados empleando este método, debido a que se requiere aplicar presiones de hasta 400 MPa para inyectar el mercurio. El proceso consiste en aplicar un

incremento de presión mientras se registran los valores de fluido necesario para llenar los poros. Empleando los datos de la presión aplicada, los volúmenes intruidos y extruidos, las propiedades del mercurio a las diferentes presiones, y el ángulo de contacto suelo-mercurio, por medio de la ecuación de Washburn (Fisher y Lark, 1979) es posible calcular los volúmenes teóricos correspondientes a los diferentes rangos de diámetros de poros.

Dentro de la información que es posible obtener mediante este ensayo se encuentran los gráficos de área y volumen de poros, la densidad aparente, la densidad esquelética o gravedad específica y los valores de porosidad. Con estos datos pueden obtenerse gráficos porcentuales y cuantitativos, parciales y acumulados. El peso de las muestras necesarias es cercano a los 5 gramos, en nuestro caso fueron liofilizadas por el método de freeze-drying al igual que las muestras empleadas para el BET.

El aparato empleado fue el Autopore IV 9500 Micrometrics. Presión máxima 230 kPa. Los ensayos fueron realizados en la Navier Ecole des Ponts, Gustave Eiffel University, CNRS, Marne-la-Vallée, France, febrero de 2020.

#### – **IMPACTO AMBIENTAL DE LOS LIXIVIADOS DE LAS MEZCLAS Y EL CLS**

Para evaluar el impacto que las mezclas generan sobre el medioambiente se realizaron análisis químicos de los lixiviados, determinación del pH del suelo y de los lixiviados, ensayos de toxicidad empleando diferentes disoluciones de CLS en agua destilada, y lixiviados diluidos en agua destilada. Los lixiviados fueron recolectados de dos de los ensayos triaxiales realizados sobre probetas moldeadas con el 10% de CLS.

El pH es un indicador de cambios en el suelo de fácil determinación, mientras que la composición química de los lixiviados permite detectar interacción de las sales presentes en el suelo al compararlas con las de las mezclas. Los ensayos de toxicidad son ensayos biológicos que permiten diagnosticar en el marco de condiciones controladas específicas el desarrollo de organismos de prueba. De este modo la valoración de la toxicidad es la evaluación del impacto que una sustancia en una concentración específica produce sobre un determinado organismo. Muchos son los organismos que pueden ser empleados y el impacto producido sobre cada uno de ellos representa condiciones diferentes de estudio además del efecto del agente químico sobre el organismo vivo. En esta reducida selección de ensayos se buscó evaluar el impacto sobre el medioambiente sin considerar el efecto del tiempo.

#### **A. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS LIXIVIADOS, pH**

Para evaluar la composición química de los lixiviados se tomó como referencia el contenido de sales inicial del suelo CRclay. El contenido de sulfatos, carbonatos, bicarbonatos, iones  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{Mg}^{+3}$ , sales solubles totales, conductividad y pH permitieron estudiar el origen del suelo y clasificarlo desde

este punto de vista. Este análisis se incluyó en la selección del suelo a emplear perteneciente a este capítulo. Estos valores fueron determinados en el Laboratorio de Suelos de la UNPSJB, Sede Esquel. La determinación del pH permite evaluar rápidamente el impacto sobre el medioambiente.

De dos de los ensayos triaxiales realizados sobre muestras con 10%CLS se recolectaron los fluidos con los que se realizaron los ensayos sobre lixiviados. Estos fluidos fueron químicamente analizados y se obtuvieron las mismas valoraciones obtenidas para el suelo para de este modo comparar la influencia del aditivo sobre la composición química de los suelos.

## **B. ENSAYO DE TOXICIDAD CON SEMILLAS DE LACTUCA SATIVA.**

Con el fin de evaluar el impacto sobre el medioambiente debe evaluarse la toxicidad de los lixiviado y de la lignina. Los lixiviados están formados por la mezcla de sales pertenecientes al suelo CRclay, el agua que llena los poros de la mezcla compactada y parte del CLS diluido en el agua intersticial.

Para evaluar el impacto ambiental se emplearon

- fluidos expulsados durante las etapas de consolidación y carga obtenidos de dos ensayos triaxiales, del ensayo realizado sobre la probeta con 10%CLS y 200kPa de presión de confinamiento, y del ensayo realizado sobre la probeta con 10%CLS y 400kPa de presión de confinamiento. Los fluidos recolectados no superaron los 5ml en cada caso.

- muestras preparadas con una dilución de CLS en polvo con agua destilada, en diferentes porcentajes.

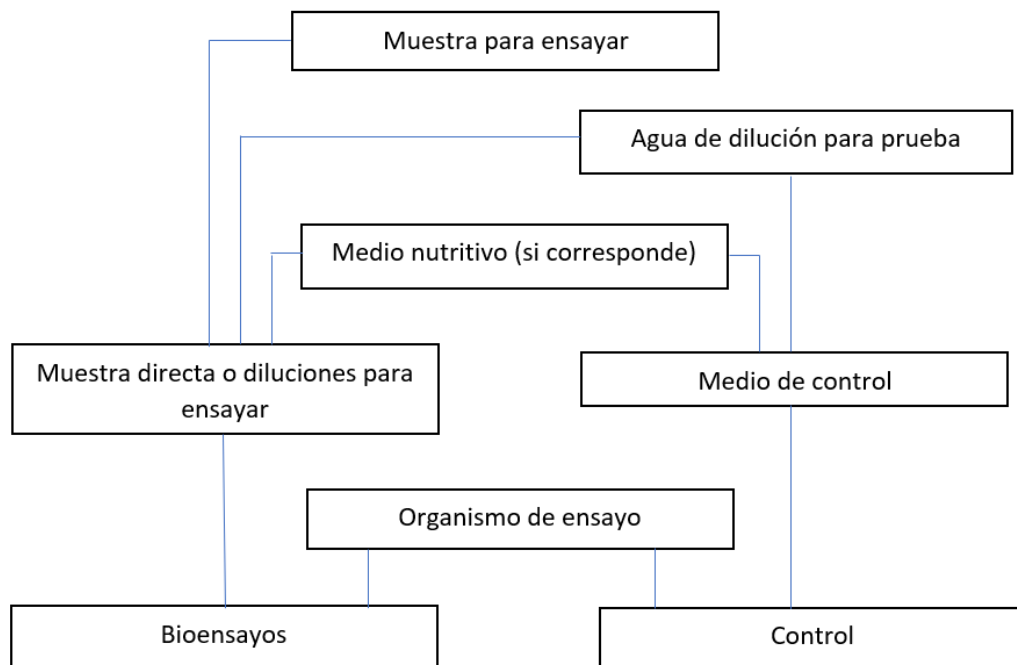
En ambos casos se empleó la técnica de ensayos con semillas de Lactuca Sativa (IRAM 29114:2008). La escasa cantidad de lixiviados recolectados impidió realizar estudios con otros organismos de prueba.

Existen otros métodos que emplean otros organismos de prueba (Romero & Mendoza, 2008) (Castillo, 2008), pero la disponibilidad de semillas de Lactuca Sativa, su alta capacidad de germinación, la limitación de volumen de muestra, estudio de la subletalidad nos condujo a optar por este organismo. Algunos de los organismos más difundidos y empleados son entre otros: brotes de cebolla (*Allium Cepa* L), crustáceos (*Daphnia Magna*), algas (*Selenastrum Capricornutum*), lombrices de tierra (*Eisenia Andrei*), micro invertebrados (*Cnidario Hydraattenuata*). La selección de uno u otro organismo de prueba depende de las aguas a evaluar. El empleo de semillas de lactuca sativa cuenta con la ventaja de permitir la evaluación no solo del impedimento de germinación sino también del retraso o suspensión en el crecimiento de la radícula constituyéndose en un indicador subletal. El empleo de brotes de cebolla, micro invertebrados y crustáceos permite evaluar la aparición de malformaciones durante el crecimiento pero se necesitan cantidades mucho mayores a las que fueron obtenidas en el presente trabajo. El empleo de algas o plantas acuáticas requiere del tratamiento previo del agua mediante filtrado, el cual altera las características del fluido a analizar. No es conveniente emplearlo en aguas

coloreadas, como es el caso de los lixiviados con contenido de lignina o de las disoluciones preparadas con lignina en polvo.

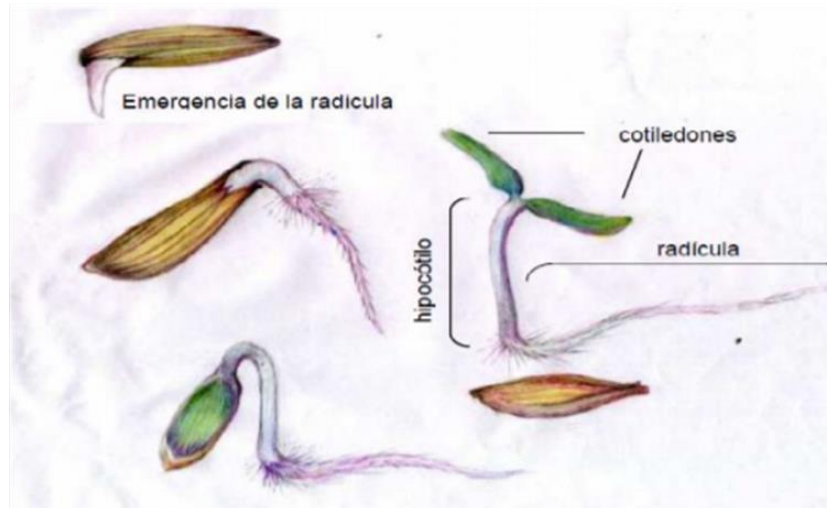
El procedimiento empleado en la realización del ensayo es el presentado en la Fig.3.23, tomado de Castillo (2004) y siguiendo la Norma IRAM 29114. Las muestras por ensayar fueron de dos tipos: diluciones preparadas con los lixiviados y diluciones preparadas con agua destilada y CLS. Como mencionamos, los organismos de ensayo fueron las semillas de Lactuca Sativa, provistas por el INTA, libres de sustancias químicas que pudiesen interactuar con el CLS. Cada ensayo fue realizado por triplicado, en el caso de los ensayos realizados con lixiviados solo pudo obtenerse un valor aproximado debido a la escasa disponibilidad de muestra. El contaminante en uno de los estudios es el CLS combinado con las sales del suelo, en el otro estudio es el CLS en estado puro en distintas diluciones en agua destilada.

Los resultados de los ensayos presentan el comportamiento de los organismos ante las condiciones a los que fueron expuestos: duración del ensayo, método utilizado para incorporar la muestra al sistema de ensayo, propósito para el que son utilizados. No debe perderse de vista que estos estudios únicamente presentan el impacto producido por el CLS mezclado con CRclay y de CLS disuelto en agua, no es extrapolable a otros CLS ni otros suelos expansivos. Tampoco es extrapolable a otros organismos.



**Fig.3.23-** Procedimiento empleado en los ensayos de toxicidad empleando semillas de Lactuca Sativa

Las muestras recogidas de los ensayos triaxiales fueron almacenadas en recipientes herméticos, químicamente inertes, y conservadas en heladera hasta su empleo. El ensayo permite determinar la inhibición en la germinación y en la elongación de la radícula y del hipocótilo (Fig.3.24). Los resultados son expresados en porcentaje de CLS y de disolución de la muestra de lixiviados obtenidos, que inhiben en un 50% el crecimiento de las radículas CI50, o que evitan la germinación en el caso de CE50.



**Fig.3.24-** Evolución de la semilla de *Lactuca Sativa* durante el proceso de germinación (Imagen tomada de Martín et al., 2018).

### 3.4. CONCLUSIONES

El diseño del plan de trabajo, los ensayos a realizar, las variables a considerar, las edades de las muestras y los porcentajes de aditivo sufrieron modificaciones y adaptaciones en función de la información obtenida y analizada en cada etapa del plan de trabajo. Algunos ensayos, como consecuencia de su duración, limitaron la evaluación del comportamiento de las muestras en función del tiempo. Es el caso de los ensayos de determinación de la presión de hinchamiento.

El estudio del comportamiento mecánico e hidráulico, el análisis microestructural de las mezclas y el análisis del impacto ambiental cubrieron todas las áreas que se plantearon como objetivo.

La etapa de preselección permitió definir el aditivo y el suelo a emplear. La etapa de ensayos se enfocó en obtener información sobre el comportamiento de las mezclas y sobre el mecanismo de estabilización. Con la información obtenida y el análisis en su conjunto fue posible analizar la eficacia del aditivo y la estabilidad de las muestras en el tiempo completando el estudio con la evaluación de la toxicidad de las mezclas.

## 4- RESULTADOS

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Cada prueba incluida dentro del programa de ensayos cumplía con brindar información en un determinado área del comportamiento de las mezclas. De este modo se agruparon los diferentes ensayos en aquellos que evaluaban el comportamiento mecánico, el comportamiento hidráulico, la microestructura o el impacto ambiental. Por otro lado, cada grupo de ensayos fue evaluado considerando el tiempo como variable. Los resultados y breves análisis son presentados en forma individual. El análisis de la información en conjunto combinando gráficos, resultados y ensayos se presenta en el capítulo correspondiente a la discusión.

### 4.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS.

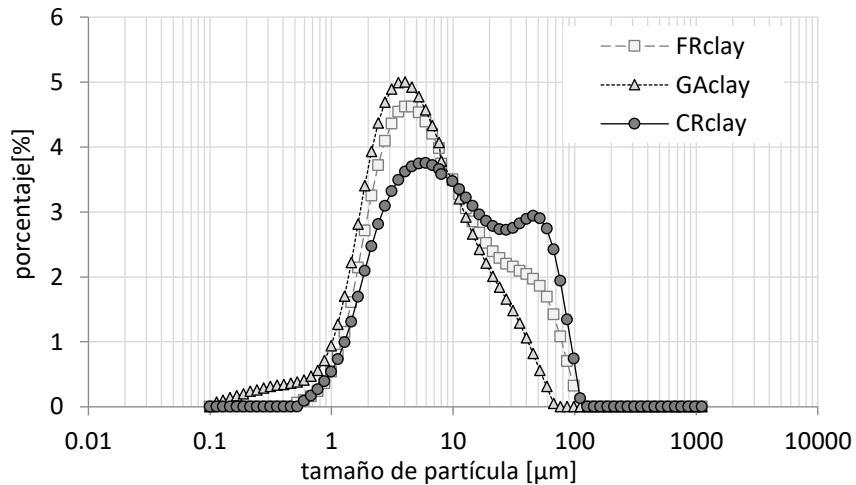
Los resultados de los ensayos de caracterización física (granulometría mecánica, hidrometría, granulometría láser, superficie específica, consistencia, actividad), química (contenido de sales, CIC, pH, cationes, contenido de materia orgánica), mineralógicos (DRX) se presentan en la Tabla 3.1.

**Tabla 4.1.** Caracterización física, química y mineralógica de los suelos en estudio.

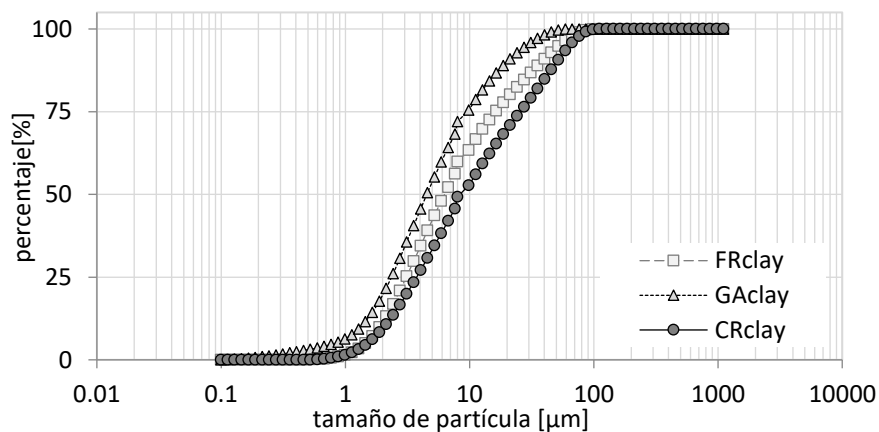
Muestra	CRclay	GAclay	FRclay	
% arcilla	76.64	68.2	58.2	
% limo	21.40	24.9	26.5	
% arena	1.96	6.9	15.3	
Clase textural (clasificación de suelos desde el punto de vista agronómico)	arcilla	arcilla	arcilla	
pH 1:2,5	8.51	7.18	7.53	
CE [dS/m]	10.81	5.09	5.83	
% MO W y B	0.6	0.4	0.7	
% CO W y B	0.3	0.2	0.4	
P disp [mg/kg]	11	23	23	
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> [mg/kg]	3608	11721	12460	
Ca [meq/100g]	16.0	20.0	29.5	
Mg [meq/100g]	1.5	11.0	12.5	
K [meq/100g]	7.8	5.3	4.2	
Na [meq/100g]	28.5	24.8	23.3	
CIC	55	54	49	
Superficie específica (*) [m <sup>2</sup> /g]	563	549	648	
Límites de consistencia	Límite líquido	74.5	105	159.2
	Límite plástico	39.2	40	46.5
	Índice Plástico	35.3	64	112.7
	Límite de Contracción	24.16	18.57	13.97
Clasificación SUCS	MH	MH	MH	
Expansiones libres	132%	42%	134%	
Identificación mineralógica DRX	100% esmectita Impurezas: (Ha), (F)	80% esmectita 20% illita Impurezas: (Cli), (Q), (F)	100% esmectita Impurezas: (Ca), (F)	
Actividad	0.52	1.06	1.59	

(\*): superficie específica secundaria

Los resultados de la distribución granulométrica parcial y acumulada con el equipo de difracción laser para las tres muestras de suelos estudiadas (FRclay, GAclay y CRclay) se presentan en la Fig.4.1 y la Fig.4.2, respectivamente. La curva granulométrica de las partículas para el suelo CRclay se encuentra entre 0.523 y 111 $\mu$ m, para FRclay 0.523 y 127 $\mu$ m y para GRclay entre 0.128 y 66.9 $\mu$ m.



**Fig.4.1.** Granulometría obtenida con Mastersizer 3000 (porcentajes parciales)



**Fig.4.2.** Granulometría obtenida con Mastersizer 3000 (porcentajes acumulados)

Los resultados contradicen lo que reportado de la granulometría por lavado debido a que en este método no se persigue la eliminación de las sales, mientras que la granulometría empleando el Mastersizer3000 es necesario eliminar durante el proceso de preparación de las muestras la totalidad de las sales.

Los límites líquidos de los tres suelos caracterizados muestran que todos poseen un potencial de expansión entre alto a muy alto lo cual coincide con los valores de la actividad y de la superficie específica secundaria (Mitchell, 1976) obtenidos. La clasificación SUCS de los tres suelos analizados corresponde a limos de alta plasticidad (suelo), y los resultados de superficie específica obtenida por

azul de metileno corresponden a montmorillonitas (mineral). Este resultado también se confirma con el ensayo de difracción de rayos X (DRX) que se muestran en las Fig.4.3 (FRclay), Fig.4.4 (GAclay), Fig.4.5 (CRclay). Los tres suelos están formados principalmente por esmectitas con un porcentaje bajo de impurezas, lo cual se observa del análisis de los picos característicos. El predominante correspondientes a esmectita (Sm) el primero de ellos en  $2\theta=7,2$  e intensidad cercana a 12.5 para la muestra en estado natural.

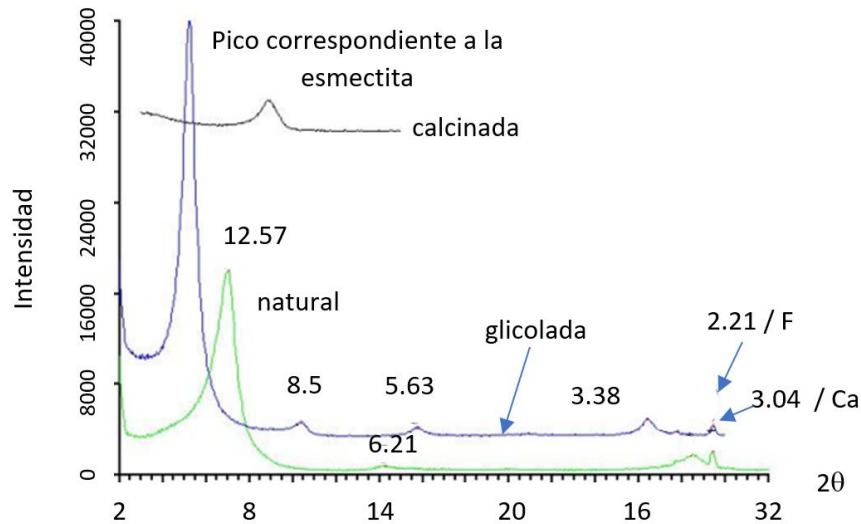


Fig.4.3- DRX correspondiente a FRclay

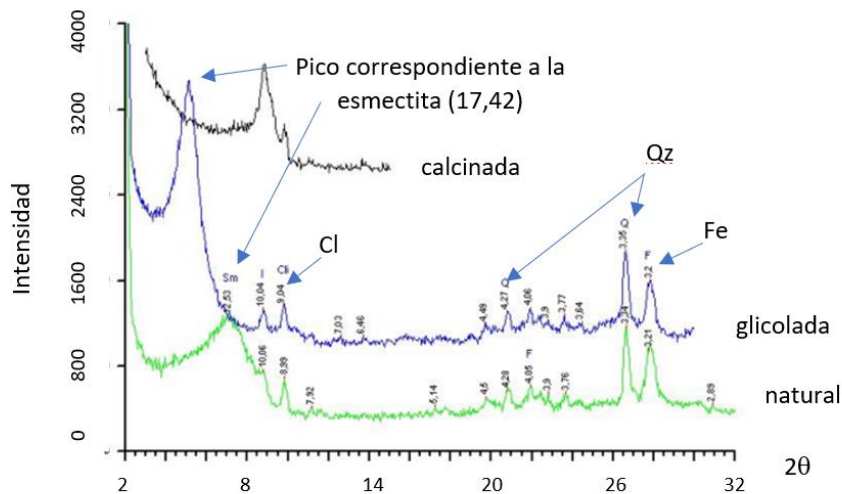


Fig.4.4- DRX correspondiente a GAclay

El análisis del contenido de sales, la capacidad de intercambio catiónico y el pH fueron presentados en la Tabla 4.1. De acuerdo con la conductividad, el contenido de sulfatos, el pH, y los

cationes los tres suelos son sódico alcalinos de origen marino. Los valores de CIC señalan que los tres suelos corresponden a arcillas mayoritariamente montmorilloníticas.

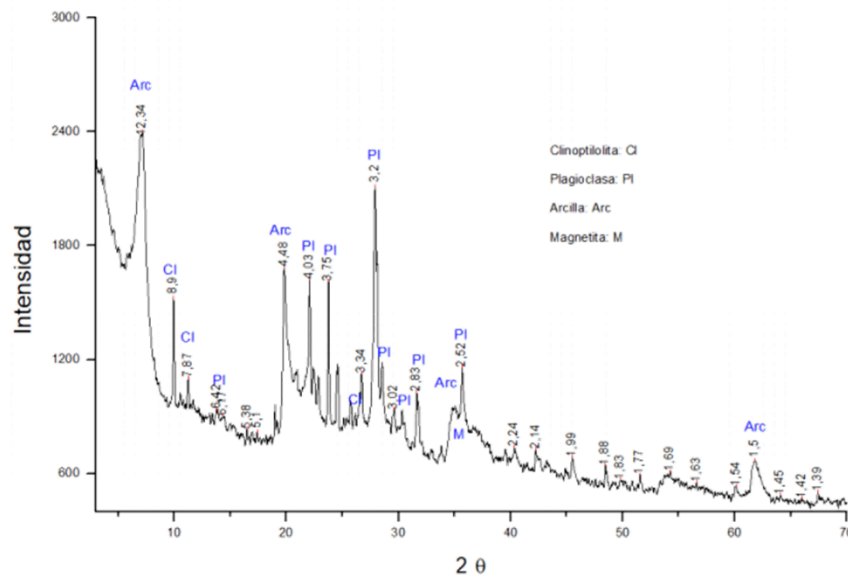


Fig.4.5. DRX correspondiente a CRclay

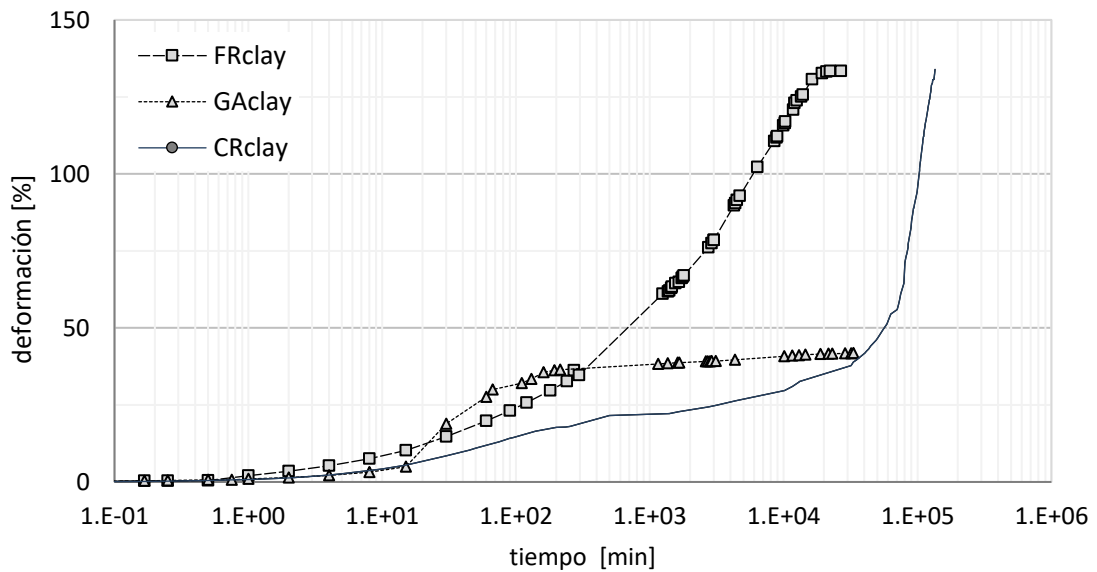


Fig.4.6- Deformación en expansión libre obtenida en el edómetro

Las expansiones libres registradas se muestran en la Fig.4.6. Los suelos presentan valores muy elevados de expansión en probetas moldeadas a una densidad seca de  $13.3\text{kN/m}^3$  y humedad de 18%, en el caso de CRclay superior al 132%, para GAclay cercana al 42% y para FRclay cercana al 134%. Las formas de las curvas de expansión libre presentan diferentes comportamientos en cada etapa de la expansión. CRclay muestra una expansión secundaria más importante siendo la pendiente de la curva en la etapa SS mayor a las de GAclay y FRclay. Las etapas que se desarrollan durante la expansión

libre son tres: expansión inicial, expansión primaria y expansión secundaria (Delage et al.,1997), en la etapa SS se destruye la microestructura debido al desarrollo completo de la doble capa difusa. Por otro lado, GAclay desarrolla la mayor parte de la deformación en la etapa PS, y solo muestra un porcentaje pequeño de la deformación total en la etapa SS.

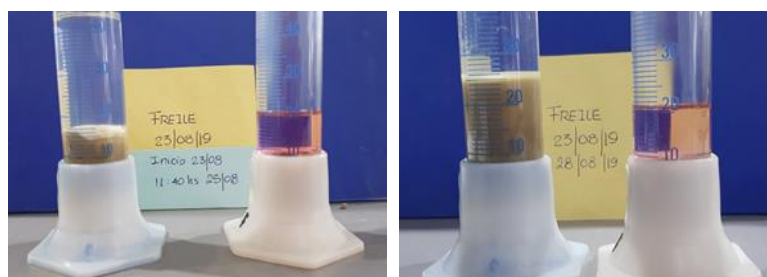
En la Fig. 4.7 puede observarse una secuencia de fotografías del ensayo de contracción lineal. La probeta que presentó mayor contracción lineal fue la FRclay con un valor de 30%, seguida por GAclay con 18% y CRclay con 16%. Empleando estos valores para identificar el potencial de expansión de los suelos estos clasifican como de alto a muy alto potencial de expansión, y corresponden al mismo orden presentado en cuanto a los límites líquidos. Para FRclay se observa la deformación y rotura de la probeta debido a factores como la heterogeneidad del material incluida la posible concentración de partículas de arena o limo, reducción de la humedad en forma diferencial, fuerte contracción de la probeta, entre otros.



**Fig.4.7-** Índice de contracción lineal (LC). Suelos CRclay (1), GAclay (2), FRclay (3)

Los resultados de la relación de expansión libre FSR (free swell ratio) y el índice de expansión libre FSI (free swell index) para los tres suelos analizados se presentan en la Tabla 4.2. La Fig.4.8 muestra las probetas para la muestra de FRclay, la Fig.4.9 para GAclay y por último la Fig.4.10 para CRclay. Este índice permite lograr una clasificación cualitativa del potencial de expansión del suelo. Los resultados de FSI y FSR coinciden en clasificarlos como de potencial de expansión alto a muy alto.

Los valores obtenidos para la actividad  $A_s$  (Skempton. 1953), FSI y el FSR (Asuri & Keshavamurthy, 2016), contracción lineal CL (ASTM D427, AASHTO T92, BS1377-2), índice de contracción IC (Ranganatham & Satyanarayana, 1965) para cada suelo se presentan en la Tabla 4.2. Los valores de LL, IP, fracción arcillosa pueden obtenerse de la Tabla 4.1. De todos los resultados, los obtenidos para el límite de contracción es el único que no clasifica a los suelos como de potencial de expansión alto, esto puede observarse en la Tabla 4.3



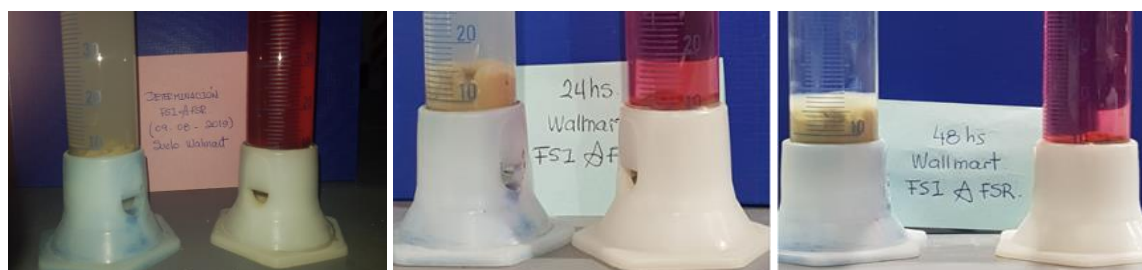
**Fig.4.8-** FSR y FSI para FRclay. En cada imagen se observan: a la izquierda muestras sumergidas en agua destilada, a la derecha muestras sumergidas en kerosene y su evolución.

**Tabla 4.2.** Parámetros indicativos del potencial de expansión de cada suelo: FSI, FSR, As, IC, CL

Suelo	FSI [%]	FSR [ ]	As [ ]	IC [ ]	CL [%]
FRclay	150	2.5	1.6	6.6	30.1
GAclay	100	2	1.1	4.9	17.7
CRclay	70	1.7	0.5	4.6	15.6



**Fig.4.9-** Evolución del ensayo para la obtención de FSR y FSI para GAclay.



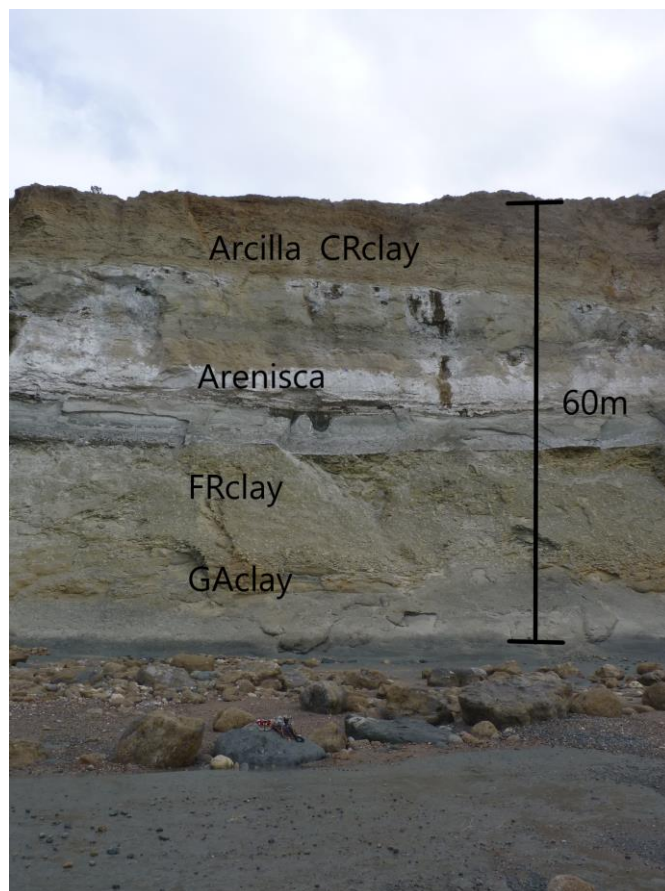
**Fig.4.10-** FSR y FSI para CRclay. En cada imagen puede observarse: a la izquierda muestras sumergidas en agua destilada, a la derecha: muestras sumergidas en kerosene.

Aplicando diferentes métodos de clasificación de suelos expansivos que emplean los parámetros previos es posible clasificar el suelo de acuerdo con un potencial de expansión cualitativo.

En la Tabla 4.3 se presenta la clasificación de los tres suelos empleando los sistemas propuestos por diversos autores.

Del análisis de la Tabla 4.3 podemos notar que los suelos FRclay, GAclay y CRclay clasifican como de potencial de expansión entre alto a muy alto. El LC y el IC condujeron a clasificaciones que no coincidieron con los restantes métodos. Los tres suelos poseen características que los vuelven aptos para ser empleados como suelo a estabilizar mediante el empleo de aditivos.

CRclay fue el suelo arcilloso expansivo seleccionado para evaluar los diferentes bioaditivos. Posee un potencial de expansión entre alto a muy alto, podía ser extraído de una zona con fácil acceso, y obtenido en cantidades ilimitadas. Corresponde a un estrato que se sitúa dentro de la secuencia estratigráfica por encima de los GAclay y FRclay. El acceso tanto a GAclay y FRclay era restringido y solamente lograron obtenerse cantidades de muestras reducidas. En forma adicional, como consecuencia del potencial de expansión de CRclay se presentaron patologías en construcciones civiles las cuales fueron estudiadas y publicadas en forma previa al desarrollo del presente trabajo (Orlandi et al., 2015). En la Fig.4.11 pueden observarse las posiciones relativas de los tres materiales expansivos incluida CRclay.



**Fig.4.11.** Formación Chenque, secuencia estratigráfica y posición relativa de los estratos

### 4.3. EVALUACIÓN DE LOS BIO ADITIVOS Y CARACTERIZACIÓN

La primera etapa de la investigación consistió en la selección de un grupo de aditivos de origen vegetal. Estos aditivos fueron divididos en tres subgrupos: almidones (polisacáridos), semillas trituradas (con alto contenido oleico), ligninas y lignosulfonatos. Dentro del grupo de los almidones se encontraban: almidón de maíz, almidón de mandioca, almidón de papa, harina de arroz, aglutinado y gluten. Dentro del grupo de los oleicos se encontraban: aceite de lino, semilla de lino, quinoa y girasol molidas. Dentro del grupo de las ligninas se encontraban: Aglupel®, Kraft®, Norlig® y Vixilex®. Las harinas, almidones, aceite y semillas se obtuvieron en almacenes naturales libres de aditivos químicos, en tanto que las ligninas fueron provistas por industrias nacionales las cuales exportaban los productos desde Brasil o Sudáfrica.

**Tabla 4.3-** Identificación del potencial de expansión de acuerdo con parámetros indicativos de cada suelo.

Autor	Parámetro	Suelo		
		CRclay	GAclay	FRclay
Chen (1965)	LL	PE muy alto	PE muy alto	PE muy alto
Snethan et al. (1977)	LL	PE alto	PE alto	PE muy alto
IS:1498 (1997)	LL	PE muy alto	PE muy alto	PE muy alto
Holtz & Gibbs (1956)	IP	PE muy alto	PE muy alto	PE muy alto
Chen (1988)	IP	PE muy alto	PE muy alto	PE muy alto
IS:1498 (1970)	IP	PE muy alto	PE muy alto	PE muy alto
Holtz & Gibbs (1956)	LC	PE bajo	PE muy bajo	PE bajo
Altmeyer	LC	Cambio de volumen no crítico	Cambio de volumen marginal	Cambio de volumen no crítico
IS:1498 (1977)	IC	PE bajo	PE bajo	PE bajo
Chen (1965)	Fracción arcillosa	PE medio	PE alto	PE alto
IS:1498 (1977)	Actividad	inactivo	PE medio	activo
Holtz & Gibbs (1956)	Edómetro	PE muy alto	PE muy alto	PE muy alto
Seed (1962)	Edómetro	PE muy alto	PE muy alto	PE muy alto
IS:1498 (1977)	FSI (determinado a tiempos mayores a 24hs)	PE medio	PE alto	PE medio
IS:1498 (1977)	FSR	PE moderado. Arcilla predominante: montmorillonita	PE moderado a alto. Arcilla predominante montmorillonita	PE moderado a expansivo. Arcilla predominante montmorillonita

(\*) PE= potencial de expansión

El proceso de selección del aditivo incluyó la determinación de los límites de consistencia (LL, LP, IP) a tres diferentes tiempos de contacto: 1 día, 1 mes, 3 meses. El porcentaje de aditivo seleccionado para iniciar la investigación fue 10% en peso. El grupo de los almidones fue ensayado a dos temperaturas del agua de mezclado diferentes: 20°C (considerada como la temperatura ambiente) y 90°C (seleccionada por ser la temperatura a la que todos los almidones seleccionados polimerizaban). Si bien desde el punto de vista práctico el empleo de temperaturas altas no resulta factible cuando la misma se introduce en el momento del mezclado, la posibilidad de aplicar temperaturas sobre las mezclas compactadas podría ser evaluada en investigaciones complementarias. Del proceso total, el grupo de las ligninas fue seleccionado para continuar con la investigación (Orlandi & Manzanal, 2018). Los resultados fueron comparados con los obtenidos de la adición de diferentes porcentajes de cal al mismo suelo y a una única edad de la muestra: 1 día (Tabla 4.4 y Tabla 4.5).

La tendencia de los aditivos en general fue a la reducción de los límites líquidos, tanto con el incremento del aditivo como con el incremento de la edad de las muestras. El grupo que produjo un mayor impacto fue el grupo de las ligninas, seguido por el grupo de las semillas y por último el grupo de los almidones. Las ligninas mostraron mayor reducción que en el caso de la cal para las muestras ensayadas a un día. No se realizaron ensayos con cal a diferentes tiempos de contacto.

**Tabla 4.4-** Porcentaje de variación de LL para diferentes porcentajes de aditivo y diferentes tiempos de contacto CRclay-aditivo, incluidos los resultados obtenidos utilizando cal.

LL	$t_{\text{contacto}}=1 \text{ día}$					$t_{\text{contacto}}=30 \text{ días}$					$t_{\text{contacto}}=90 \text{ días}$				
	Porcentaje de aditivo					Porcentaje de aditivo					Porcentaje de aditivo				
	0	3	5	7	10	0	3	5	7	10	0	3	5	7	10
LIGNINA	0	-2	-1.1	-4.2	-2	0	-8.4	-8	-9.9	-14.4	0	-8.4	-9.7	-7	-15.4
KRAFT	0	-11.7	-16	-17.9	-17.2	0	-14.1	-15.6	-18.1	-18.1	0	-10.4	-12.9	-15.2	-14.8
AGLUPEL	0	-19.8	-17.1	-24.3	-26.8	0	-13.2	-20.8	-23.6	-24.2	0	-11.7	-19.2	-21.4	-23.7
VIXILEX	0	-18.5	-19.7	-18.8	-22.8	0	-9	-11.8	-18.5	-24.6	0	-13	-11.9	-20.7	-19.3
CAL	0	0.5	-7.2	-5.5	N/E	0	N/E	N/E	N/E	N/E	0	N/E	N/E	N/E	N/E

Las propiedades de los cuatro aditivos pertenecientes al grupo de las ligninas y lignosulfonatos se presentan en la Tabla 4.6. Las temperaturas de transición vítrea, de degradación y

de fusión cristalina afectan las propiedades mecánicas del polímero, en este caso de las ligninas y lignosulfonatos. Puede observarse que estas temperaturas son superiores a las temperaturas de trabajo en campo y en laboratorio razón por la cual no tendrán mayor influencia en el comportamiento del polímero mezclado con el suelo así como tampoco con cambios en la estructura. Con respecto a la solubilidad, la lignina Kraft presenta un comportamiento hidrofóbico mientras que Aglupel, Vixilex y Norlig son materiales hidrofílicos además de no ser solubles en kerosene.

**Tabla 4.5-** Porcentaje de variación del IP para diferentes porcentajes de aditivo y diferentes tiempos de contacto CRclay-aditivo, incluidos los resultados obtenidos utilizando cal.

IP	$t_{\text{contacto}}=1 \text{ día}$					$t_{\text{contacto}}=30 \text{ días}$					$t_{\text{contacto}}=90 \text{ días}$				
	Porcentaje de aditivo					Porcentaje de aditivo					Porcentaje de aditivo				
	0	3	5	7	10	0	3	5	7	10	0	3	5	7	10
LIGNINA	0	1	3.4	5.6	9.8	0	-7.9	-13.4	-19.1	-11.5	0	-8.5	-21.5	-0.2	-13.4
KRAFT	0	-24.6	-38.5	-40.8	-36.5	0	-36.8	-43.1	-45	-51.3	0	-21.6	-42.4	-41.1	-46.4
AGLUPEL	0	-37.3	-36.7	-39.5	-48.9	0	-28.3	-34	-47	-38	0	-26.1	-43.5	-42.8	-41.8
VIXILEX	0	-14.4	-33.4	-24.4	-34.3	0	-15.9	-24.1	-32.6	-45.9	0	-29.2	-15.3	-39.9	-33.1
CAL	0	-17	-35.7	-37.1	N/E	0	N/E	N/E	N/E	N/E	0	N/E	N/E	N/E	N/E

En la primera etapa de selección se incorporó la determinación del potencial Z y FTIR (espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier o de sus siglas en inglés Fourier transform infrared spectroscopy) de los cuatro aditivos dentro del grupo de las ligninas y lignosulfonatos, y de CRclay. El FTIR entrega como información espectros con patrones asociados a estructuras moleculares características, cada espectro es único para cada muestra. Permite conocer las uniones moleculares y así identificar cadenas de polímeros y su preponderancia. El potencial Z por otro lado es el potencial electrostático que poseen en su superficie las partículas de un material sumergido en un medio acuoso (Hillel, 2003). Es el que genera las fuerzas de repulsión entre partículas cuando se encuentran dispersas, puede ser negativo, positivo o neutro. Se determina indirectamente por medio de la velocidad con que se desplazan las partículas sometidas a un campo electromagnético. El pH del medio en que se encuentran sumergidos influye sobre el valor del potencial Z. Este dato permite conocer las fuerzas con las que las moléculas de agua son atraídas por las partículas polarizadas de suelo, así como

el espesor de la doble capa difusa. Los valores de potencial Z de CRclay y de cada una de las ligninas se presenta en la Tabla 4.7, las determinaciones fueron realizadas en el Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química, INTEC (UNL-CONICET) utilizando Zetasizer Nano-series Malverl (ZS90) e incluidas en Orlandi et al. (2021).

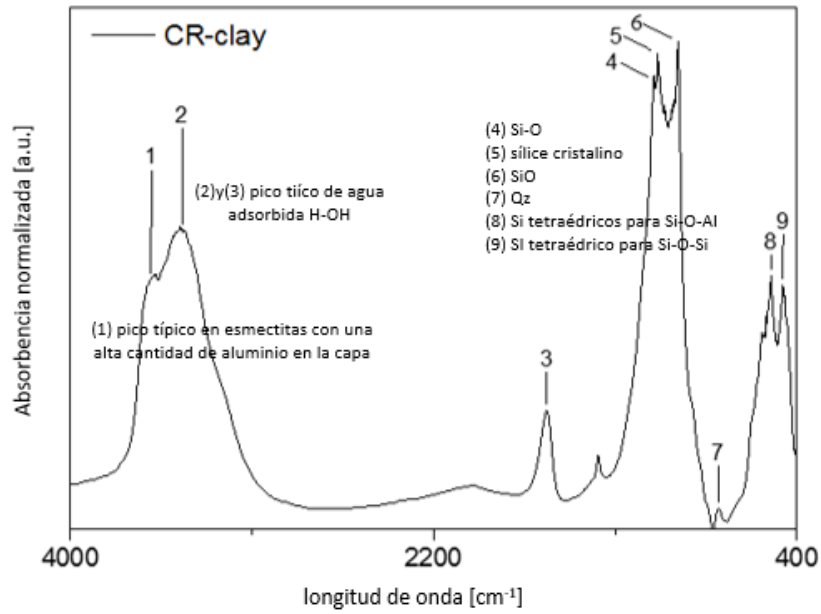
**Tabla 4.6.** Propiedades poliméricas de las ligninas empleadas como aditivos.

	Kraft	Vixilex®	Aglupel®	Norlig® (CLS)
% Humedad	7.01	13.49	14.16	18.37
% ceniza (dry basis)	21.67	23.45	22.52	10.33
(g mol <sup>-1</sup> ) $\bar{M}_w$	2140	5259	13213	11366
(g mol <sup>-1</sup> ) $\bar{M}_n$	1340	1520	2764	1137
Dispersividad $\bar{M}_w/\bar{M}_n$	1.59	3.45	4.78	9.99
Temperatura de degradación	≈400	≈300	≈300	≈300
Tg (°C)	163	186	130	80
Solubilidad	Kerosene	Parcialmente soluble	NO	NO
	Agua	NO	Soluble	Soluble

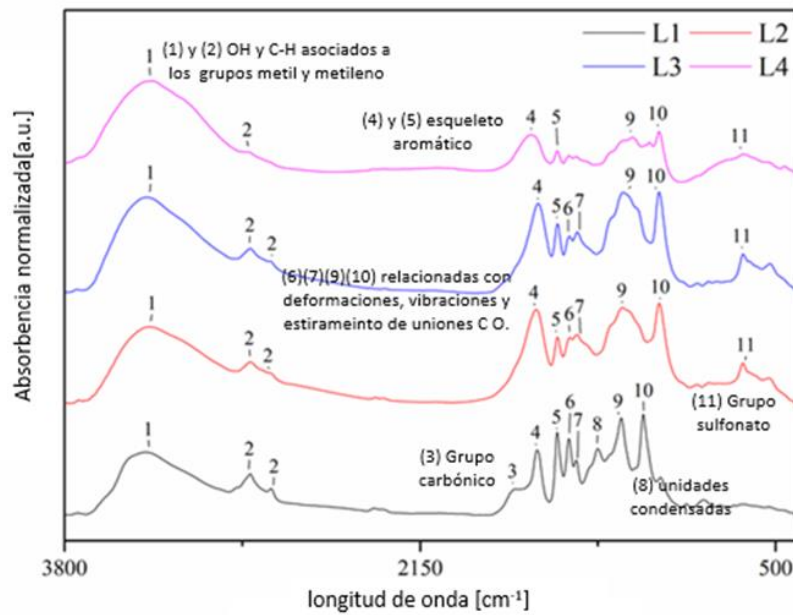
**Tabla 4.7-** Valores del potencial Z CRclay y ligninas.

Muestra	$\xi$ Potencial z [mV]
CRclay	-39.14±2.66
L1 (Kraft)	-31.81±1.56
L2 (Aglupel®)	-19.87±0.37
L3 (Vixilex®)	-29.78±0.73
L4 (Norlig®)	-19.83±1.53

Puede observarse que tanto CRclay como las ligninas poseen cargas superficiales negativas, esto está asociado a la naturaleza y composición mineralógica del suelo. Mientras que en el caso de las ligninas y los lignosulfonatos se encuentra asociado al origen. En la Fig.4.12, Fig.4.13 y Fig.4.14 se muestran los resultados del FTIR para CRclay y las cuatro ligninas empleadas. Estos ensayos permitieron realizar la caracterización molecular e identificación de grupos funcionales. Fueron llevados a cabo en Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química, INTEC (UNL-CONICET) e incluidos en Orlandi et al. (2021).



**Fig.4.12-** FTIR para CRclay



**Fig.4.13-** FTIR para los aditivos del grupo ligninas. L1= Kraft, L2=Vixilex, L3=Aglupel, L4=Norlig.

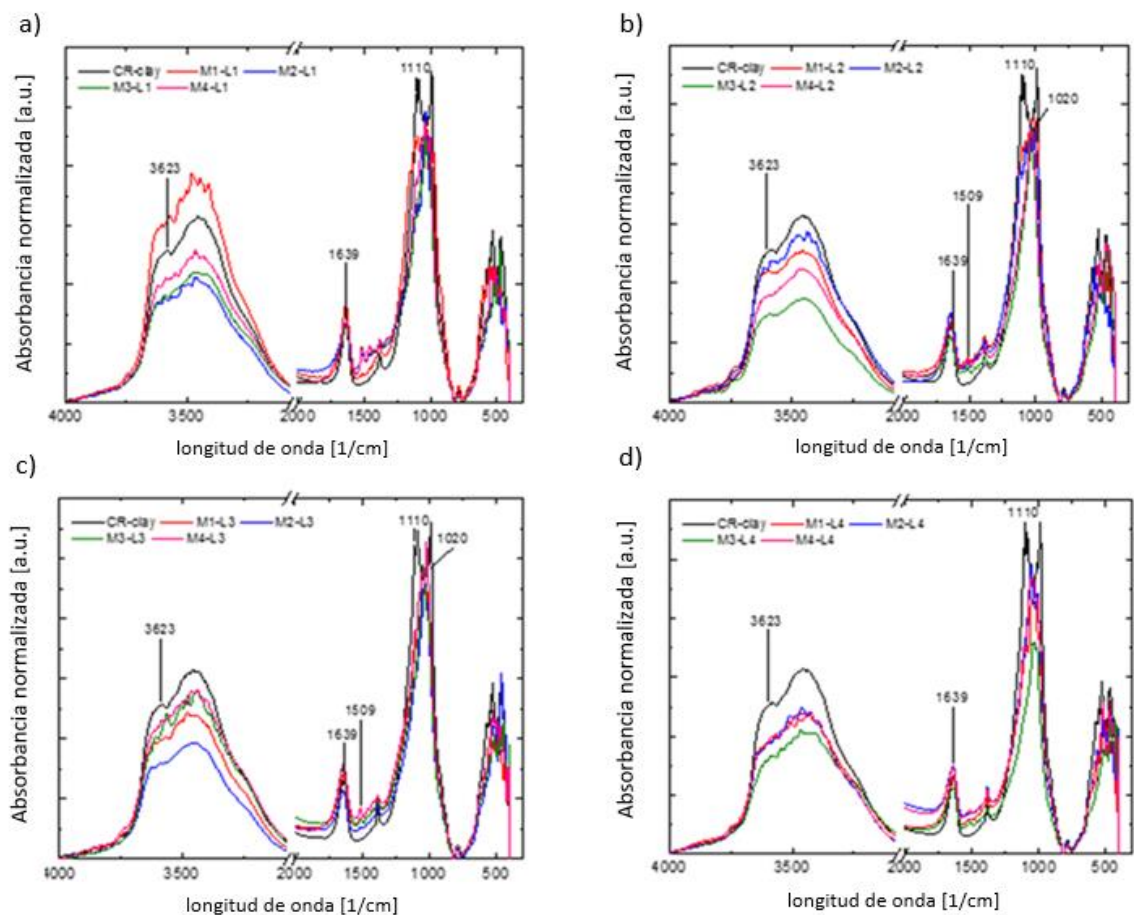
Por medio del análisis de estos resultados es posible entender la influencia del porcentaje de cada aditivo sobre las propiedades expansivas del suelo desde el punto de vista de las partículas. Como se determinó anteriormente, CRclay está constituida principalmente por esmectita (bentonita sódica). Debido a los enlaces rotos de las capas octaédricas de Al y tetraédricas de Si en el borde, los grupos anfóteros Al-OH y Si-OH están presentes y están cargados (negativa, neutra o positivamente). Generalmente, a valores de pH mayores, el borde (AlO-) está cargado negativamente, a pH moderado

el borde (Al-OH) es neutro, y a valores de pH menores el borde (Al-OH<sup>2+</sup>) está cargado positivamente (Li et al., 2015). Sin embargo, en una condición neutra también podría crearse un borde cargado positivamente debido a las capas octaédricas de Al expuestas. Los datos en Tabla 4.7. muestran que las partículas de lignina se encuentran cargadas negativamente.

Del análisis de los resultados, dentro del grupo denominado ligninas, el lignosulfonato de calcio Norlig® o L4 fue el aditivo seleccionado para continuar con la investigación de factibilidad para ser empleado como estabilizante de CRclay. Fue el aditivo dentro del grupo de los lignosulfonatos que redujo en mayor proporción el potencial Z (Tabla 4.8). Fue provisto por la empresa Norlig®, se desconocen las especies arbóreas de las que se obtuvo, es un producto originario de Sudáfrica. Es el aditivo que produjo menor reducción de los índices de consistencia o límites de Atterberg. Se encuentra dentro del grupo de las ligninas hidrofílicas junto con Vixilex y Aglupel, en adelante nos referiremos al aditivo como CLS debido a que es un lignosulfonato de calcio.

**Tabla 4.8-** Potencial Z para diferentes mezclas de aditivo y CRclay.

Muestra	$\xi$ Potencial [mV]
L1-3% (M1)	-39.08±1.01
L1-5% (M2)	-37.05±0.49
L1-7% (M3)	-39.51±0.81
L1-10% (M5)	-36.98±0.77
L2-3% (M1)	-38.01±1.11
L2-5% (M2)	-38.46±0.28
L2-7% (M3)	-38.26±0.51
L2-10% (M4)	-35.03±0.38
L3-3% (M1)	-44.81±0.44
L3-5% (M2)	-47.37±3.27
L3-7% (M3)	-42.21±0.51
L3-10% (M4)	-45.36±1.14
L4-3% (M1)	-40.86±1.76
L4-5% (M2)	-40.31±0.00
L4-7% (M3)	-39.31±0.75
L4-10% (M4)	-27.21±1.58



**Fig.4.14-** FTIR de las diferentes mezclas de CRclay y Kraft (L1), Vixilex (L2), Aglupel (L3) y Norlig (L4).

Las ligninas L1, L2 y L3 produjeron mayor reducción en el límite líquido analizado para diferentes edades y porcentajes, pero la reducción del potencial Z no respondió de la misma forma. Se tomó la decisión emplear la lignina Norlig o L4 con base en el estudio de la evolución del potencial Z sin considerar la evolución del límite líquido a pesar de que ambos se encuentran directamente relacionados entre sí.

En la Tabla 4.8 puede observarse que el comportamiento de las mezclas parecería mostrar que las ligninas L1, L2, L3 mantienen o inclusive incrementan el valor del potencial Z comparado con el de CRclay. Mientras que Norlig muestra una reducción cercana al 30% en dicho valor. Un próximo paso consistiría en avanzar en el empleo de L1, L2, y L3 en la realización de ensayos de expansión libre y presión de hinchamiento para evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas y su estabilidad en el tiempo.

#### 4.4. COMPORTAMIENTO MECÁNICO.

##### 4.4.1. COMPACTACIÓN EMPLEANDO HARVARD MINIATURA.

El ensayo de compactación Harvard Miniatura fue utilizado para definir la densidad seca y la humedad de compactación de las probetas que serían utilizadas en los ensayos incluidos en el plan de trabajo. En función de los resultados obtenidos estos valores fueron adoptados a lo largo de toda la investigación. En un pequeño grupo de ensayos se adoptó una humedad superior, cercana a la de saturación con el fin de reducir la duración de la etapa de saturación incorporada dentro de la rutina del ensayo (permeabilidad, ensayos triaxial CU).



Fig.4.15- Molde y pisón del aparato Harvard miniatura

En la Fig.4.16 pueden observarse las cinco curvas compiladas en un gráfico y la curva de saturación correspondiente a la curva de CRclay. En tanto que en la Fig.4.2 se presentan los valores de la humedad óptima y densidad seca máxima en función del porcentaje de CLS.

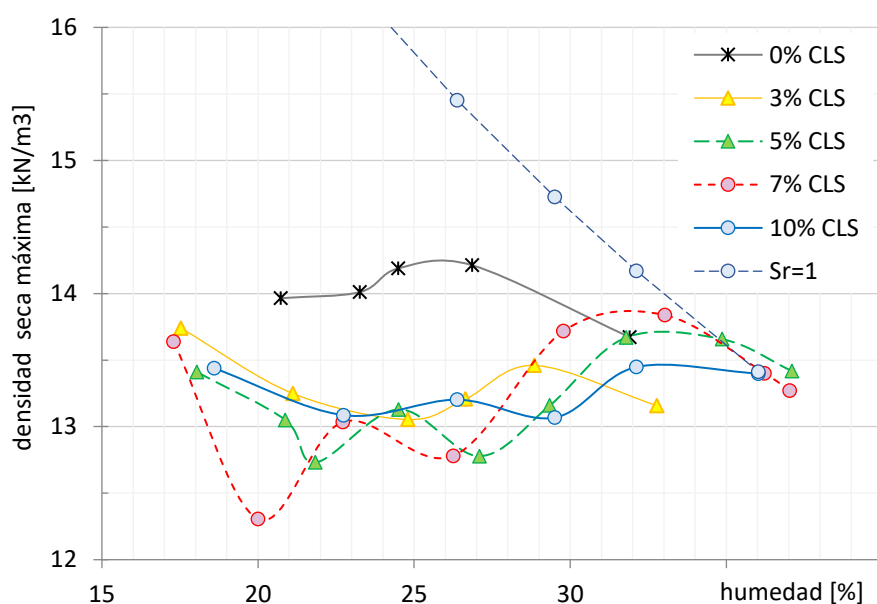
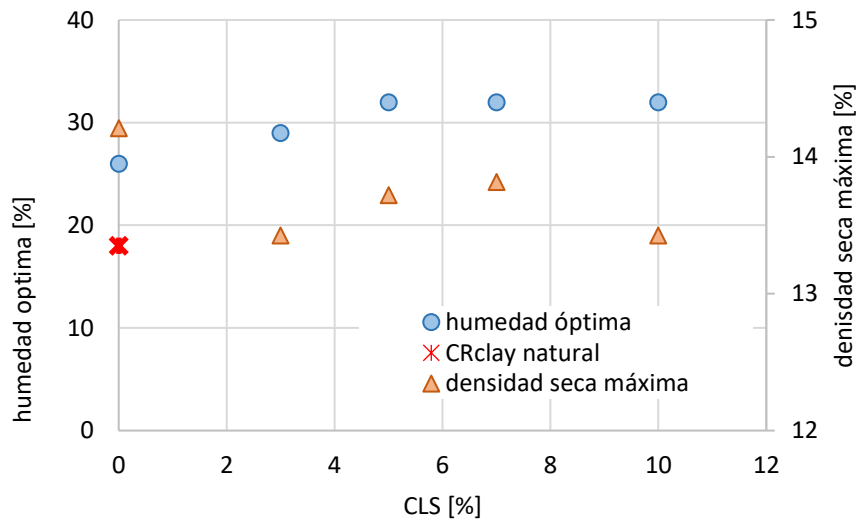


Fig.4.16- Curvas de compactación para CRclay todos los porcentajes de CLS



**Fig.4.17** Humedad óptima y densidad seca máxima en función del porcentaje de CLS

La densidad seca seleccionada para moldear las probetas fue  $13,3\text{kN/m}^3$  ( $1,3\text{kg/cm}^3$ ) y la humedad de compactación 18% la cual corresponde a la humedad natural del suelo al extraer las muestras. Las curvas de compactación obtenidas para los diferentes porcentajes de aditivo presentaron incrementos y decrementos en función de la humedad.

La disminución observada en la densidad seca para humedades cercanas a las del límite plástico (al aproximarse a la curvas de saturación) puede ser atribuida principalmente al hecho de que la gravedad específica del CLS es de 0.5 mientras que la gravedad específica de CRclay es de 2.7.

Para la densidad seca de diseño se adoptó un valor inferior al valor medio máximo debido a que en porcentajes altos de CLS el moldeo de las probetas a densidades secas por encima de este valor resultaba muy difícil de efectuar. Se producía pérdida de material por las uniones del molde, o entre el pisón y el cilindro, lo cual no aseguraba la obtención de la densidad correcta ni el tamaño de muestra adecuado. Para el valor de la humedad adoptada (18%) cuatro de cinco curvas de compactación presentaron valores de la densidad seca cercanos a  $13,3\text{kN/m}^3$ . Esta densidad parece coincidir con uno de los picos que presenta la curva de compactación. La densidad seca natural de CRclay es cercana a  $17\text{kN/m}^3$ .

#### 4.4.2. HINCHAMIENTO LIBRE.

Los resultados obtenidos de los ensayos de hinchamiento libre (HL) para el suelo CRclay y las mezclas con los cuatro porcentajes de aditivo ensayadas 1 día y 9 meses después de moldeadas se presentan en las Fig.4.18 y Fig.4.19, respectivamente. Se grafican en escala semilogarítmica debido a que resulta más fácil identificar las diferentes etapas desarrolladas durante el hinchamiento. La tendencia es similar a las muestras ensayadas 1 día después de moldeadas.

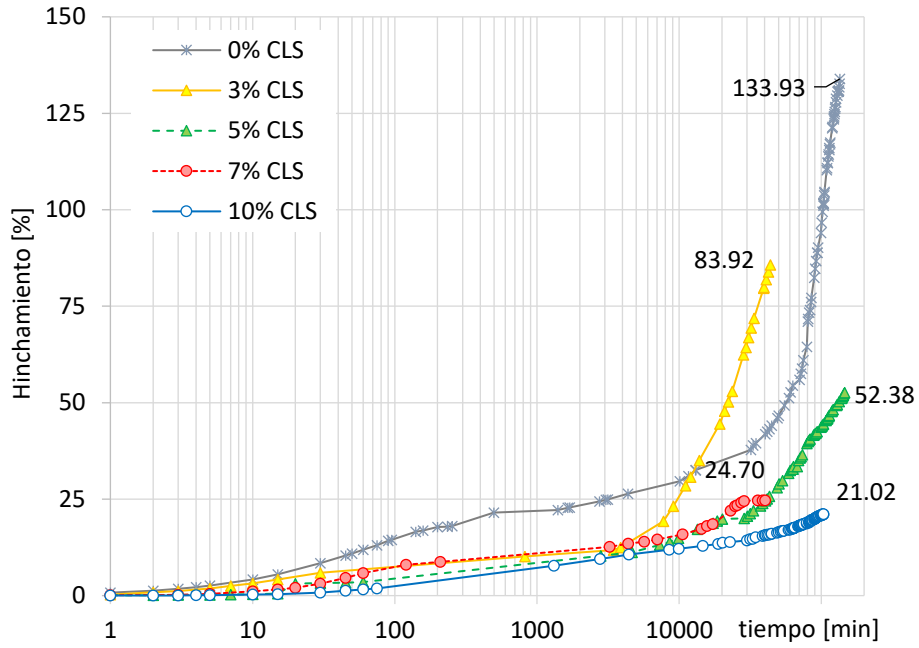


Fig.4.18- Hinchamiento libre para muestras ensayadas un día después de moldeadas

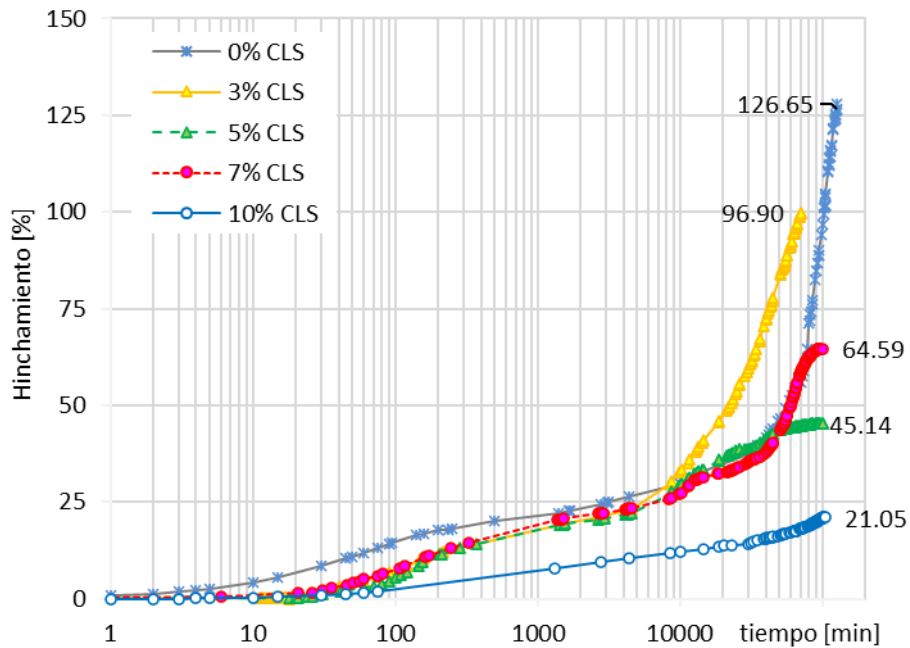
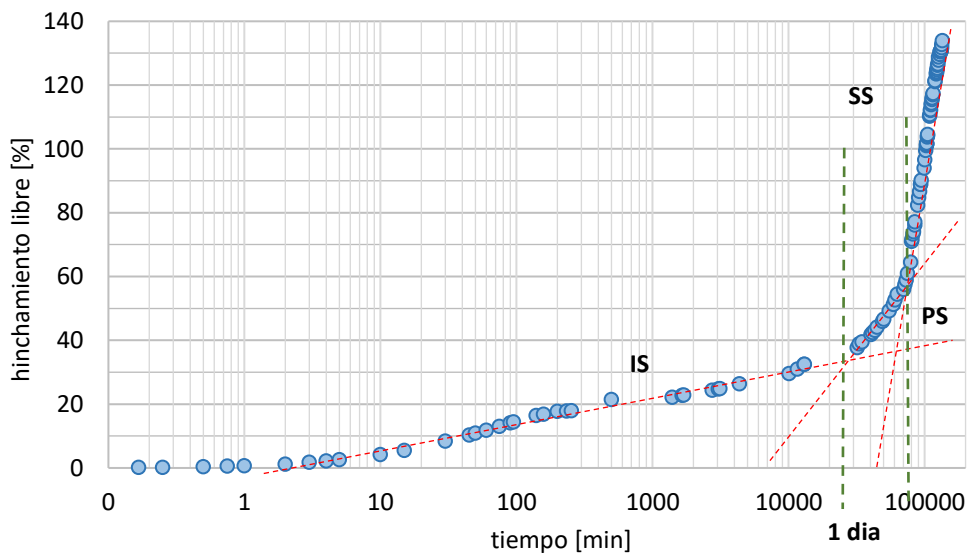


Fig.4.19- Hinchamiento libre para muestras ensayadas 9 meses después de moldeadas

El hinchamiento libre del suelo sin bioaditivo se desarrolla en la etapa inicial con mayor expansividad que todas las mezclas estudiadas. Luego de 92 días de ensayo presenta una expansión de 133,93% con respecto a la altura inicial de la muestra. Para 3%CLS el comportamiento de la muestra es más explosivo luego de los 8 días de ensayos. La expansividad de las mezclas con 7%CLS y 10%CLS desarrollan mucha menos variación volumétrica que la desarrollada por CRclay.

Durante la expansión libre pueden ser identificadas tres etapas (Alazigha, 2015, Delage, 1998) la etapa inicial (IS) donde los macroporos se cierran por el ingreso del agua, la etapa de expansión primaria (PS) en la cual se destruye la estructura del suelo, y la tercera y última etapa denominada de expansión secundaria (SS) en la cual la doble capa difusa se encuentra completamente desarrollada. En la Fig.4.20 se muestra la curva de HL de CRclay en la que se señalan las diferentes etapas.

En la Tabla 4.9 se presentan las pendientes de cada una de las etapas desarrolladas durante el HL para diferentes porcentajes de CLS. Todas las pendientes decrecen con el aumento del contenido de aditivo. Las etapas demoran mayor tiempo en desarrollarse comparadas con lo que ocurre con CRclay, el desarrollo del hinchamiento total ocurre en forma menos violenta. El tiempo transcurrido desde el moldeo de las probetas no presenta una gran influencia en el desarrollo del HL en las probetas con diferentes porcentajes de aditivo, las curvas y los valores finales del HL para las probetas de 1 día y 9 meses son similares como puede observarse en la Fig.4.21. De las rectas de tendencia para 1 día y 9 meses puede observarse que los hinchamientos libres muestran un incremento pequeño con la edad, aunque influido principalmente por el hinchamiento producido para 7%CLS (Fig.4.21).



**Fig.4.20-** Curva de HL para CRclay, etapas desarrolladas durante el proceso de expansión

La duración de los ensayos de expansión libre se extendió hasta la estabilización de las lecturas, limitada por la estabilización de las lecturas, observadas en gráficos de escala aritmética.

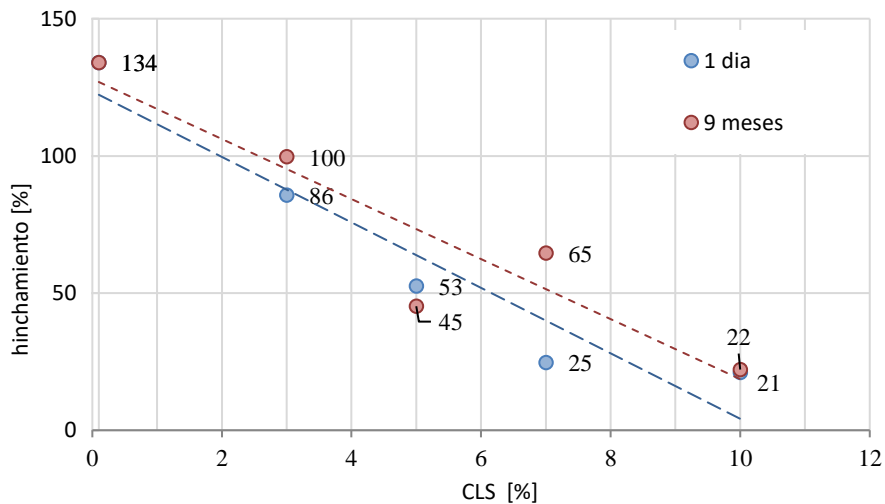
#### 4.4.3. PRESIÓN DE HINCHAMIENTO.

La presión de hinchamiento es uno de los parámetros que indican la peligrosidad de una arcilla expansiva. En este trabajo fueron empleados cuatro métodos para determinarla, uno de ellos empleando dos diferentes sistemas de medición. Se comparan los resultados obtenidos mediante la

utilización de cada uno de los métodos, considerando las metodologías empleadas y la alteración producida durante el ensayo sobre la microestructura.

**Tabla 4.9-** Pendientes de cada etapa de la curva de HL para diferentes porcentajes de CLS

%CLS	Pendiente		
	IS	PS	SS
0	3.50	25.44	128.63
3	0.92	6.75	50.88
5	1.88	7.33	20.73
7	0.36	4.20	6.38
10	0.30	2.21	7.94



**Fig.4.21-** Hinchamiento libre para dos tiempos transcurridos desde el moldeo de las probetas y todos los porcentajes de CLS

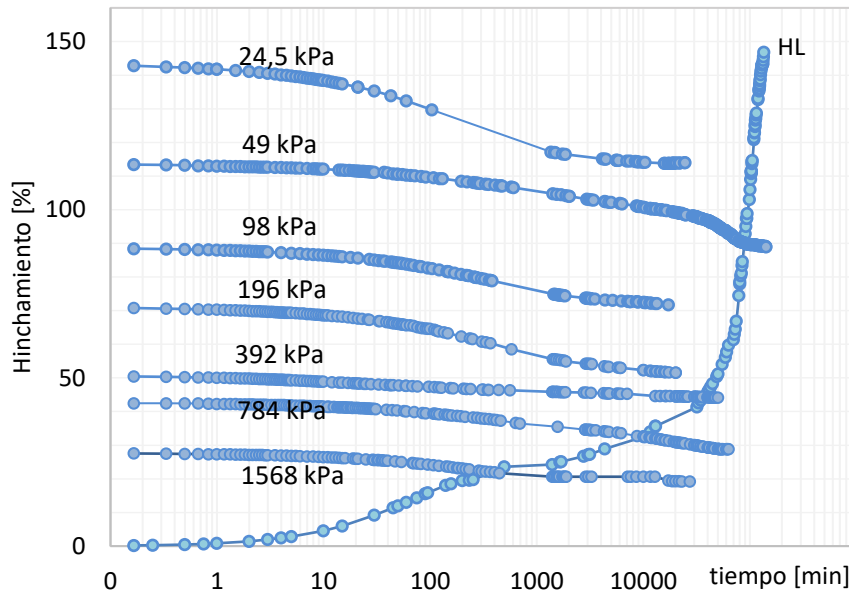
**Tabla 4.10–** Parámetros de las curvas de tendencia de los ensayos de hinchamiento libre:  $\Delta H = A \cdot CLS + B$  , y coeficiente de regresión  $R^2$

CLS	A	B	R2
1 día	-10.932	128.03	0.8671
9 meses	-11.923	123.49	0.9118

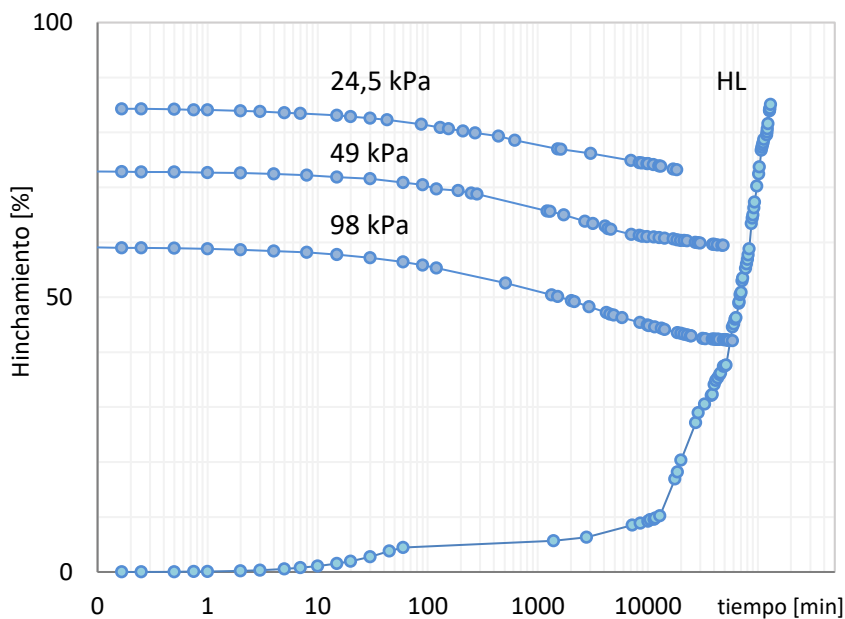
**a) MÉTODO DEL EDÓMETRO.**

Las curvas edométricas deformación versus tiempo obtenidas para cada porcentaje de aditivo se presentan en Fig.4.22 (CRclay), Fig.4.23 (3%CLS), Fig.4.24 (5%CLS), Fig.4.25 (7%CLS), Fig.4.26

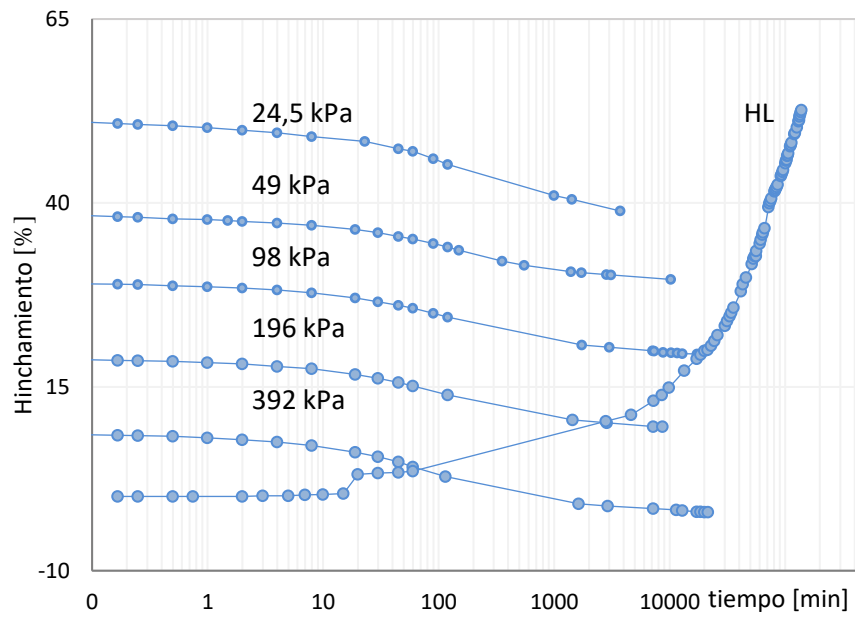
(10%CLS). Las pendientes correspondientes a las curvas edométricas de deformación versus carga correspondientes a cada porcentaje de aditivo se muestran en Fig.4.27. Puede observarse que el ensayo correspondiente al 3%CLS posee menores escalones de carga, debido a que el anillo se despegó de la base desarrollándose una deformación diferencial en la probeta. Al detectar la anomalía se detuvo el ensayo. Cabe destacar que en el eje de las ordenadas un valor positivo corresponde a un hinchamiento, mientras que un valor negativo corresponde a una contracción.



**Fig.4.22-** Ensayo edométrico para CRclay: curvas de deformación versus tiempo

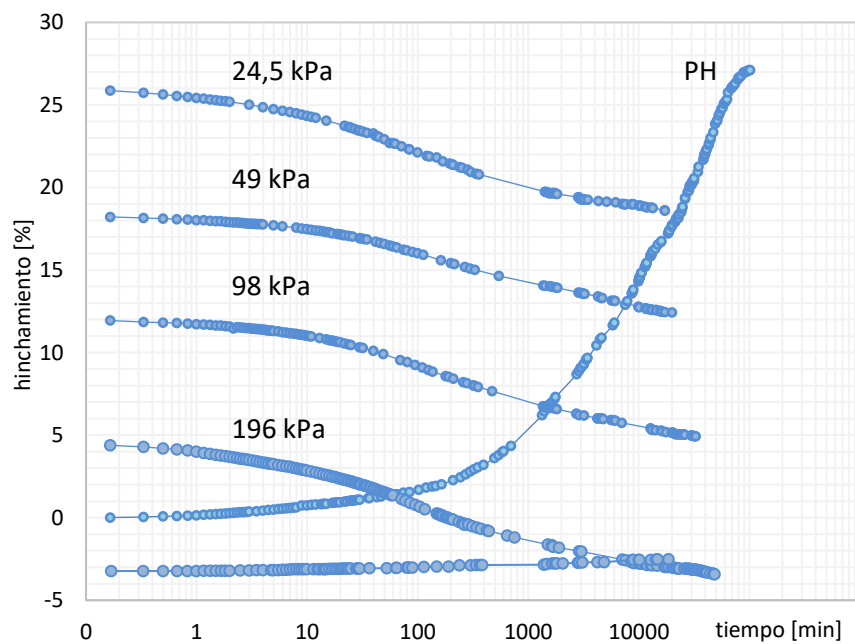


**Fig.4.23-** Ensayo edométrico para 3%CLS: curvas de deformación versus tiempo



**Fig.4.24-** Ensayo edométrico para 5%CLS: curvas de deformación versus tiempo

A partir de la información obtenida de las curvas de consolidación se obtiene la Fig.4.27 y la Tabla 4.12. En la Fig.4.27 puede observarse que la presión de hinchamiento determinada por medio del método del edómetro decrece con el incremento en el porcentaje de aditivo. Para 7%CLS y 10%CLS los valores obtenidos son cercanos. Todas las líneas de tendencia presentan un coeficiente de regresión alto.



**Fig.4.25-** Ensayo edométrico para 7%CLS: curvas de deformación versus tiempo

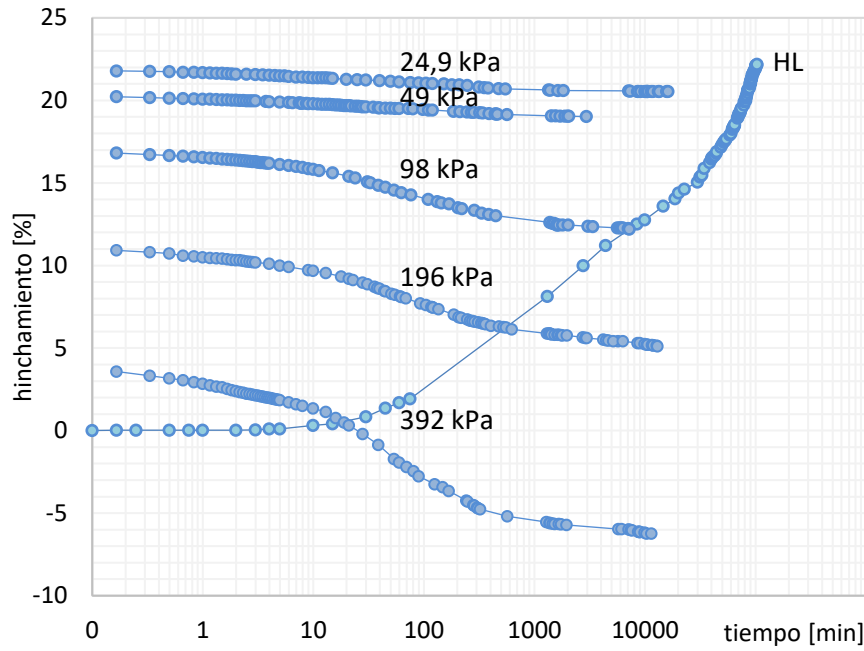


Fig.4.26- Ensayo edométrico para 10%CLS: curvas de deformación versus tiempo

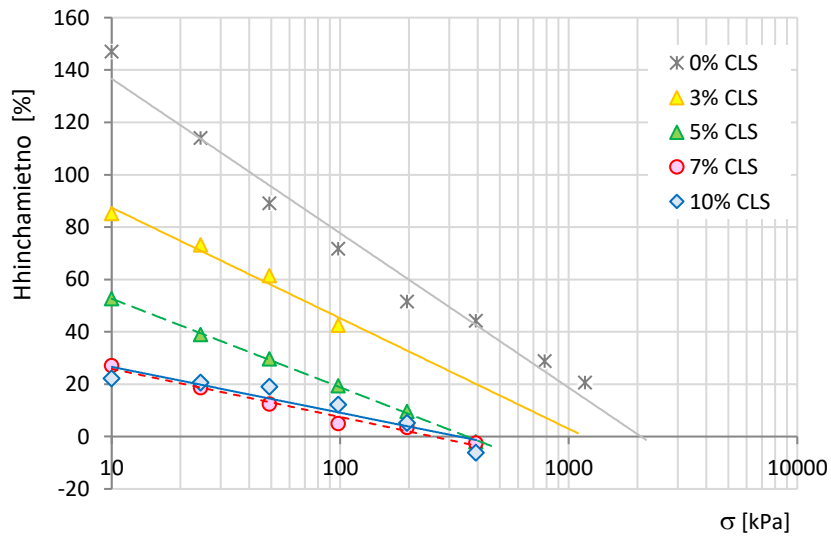


Fig.4.27- Datos obtenidos mediante el empleo de ensayos edométricos para la obtención de la presión de hinchamiento para diferentes porcentajes de CLS.

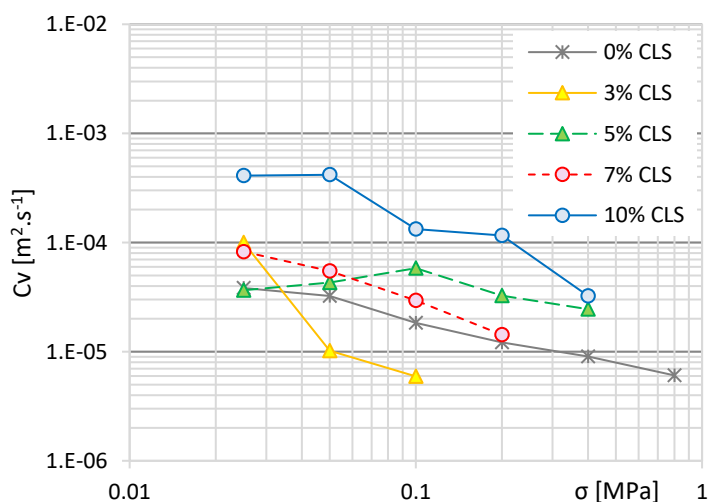
Tabla 4.11- Parámetros de las curvas de tendencia y R<sup>2</sup> de los ensayos edométricos:  $\Delta H = A \cdot \ln \sigma + B$

CLS	A	B	R2
0	-27.07	-39.502	0.9961
3	-14.45	-16.035	0.9878
5	-12.12	-31.589	0.9899
7	-8.744	-30.3	0.9149
10	-8.59	-32.889	0.8311

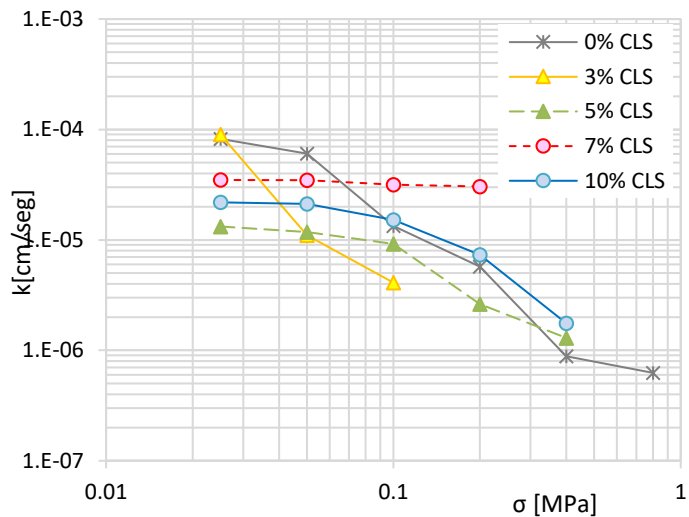
**Tabla 4.12-** Ensayos edométricos: información obtenida de las curvas en función del porcentaje de aditivo

CLS	duración del ensayo[días]	N° escalones de carga +descarga	Cargas aplicadas [kPa]	presión total [MPa]
0	335	7	0-12.5-25-50-100-200-400-800-1200	1.2
3	180	3	0-12.5-25-50-100	0.1
5	148	5	0-12.5-25-50-100-200-400	0.4
7	166	4 + 1	0-12.5-25-50-100-200-100	0.1
10	108	4 + 1	0-25-100-200-400	0.4

Los ensayos edométricos permiten también determinar indirectamente el coeficiente de permeabilidad al finalizar cada escalón de carga y en forma directa el coeficiente de consolidación  $C_v$  (Fig.4.28 y Fig.4.29). En referencia a la permeabilidad el primer valor obtenido es alto debido a que es el que corresponde al final de la etapa de expansión libre. Las muestras CRclay (0%CLS) y 3%CLS son las que tienen permeabilidades mayores debido a que son las que inicialmente más se expanden, las restantes muestras presentan coeficientes de permeabilidad menores y pendientes en las curvas de tendencia también menores. En cuanto al  $C_v$  la muestra 3%CLS al presentar mayor expansión que la probeta 0%CLS presenta una mayor velocidad de consolidación que se refleja en la reducción en el valor de  $C_v$  en el primer escalón del ensayo.



**Fig.4.28-** Coeficiente de consolidación en función de la presión aplicada y el porcentaje de aditivo en un ensayo edométrico

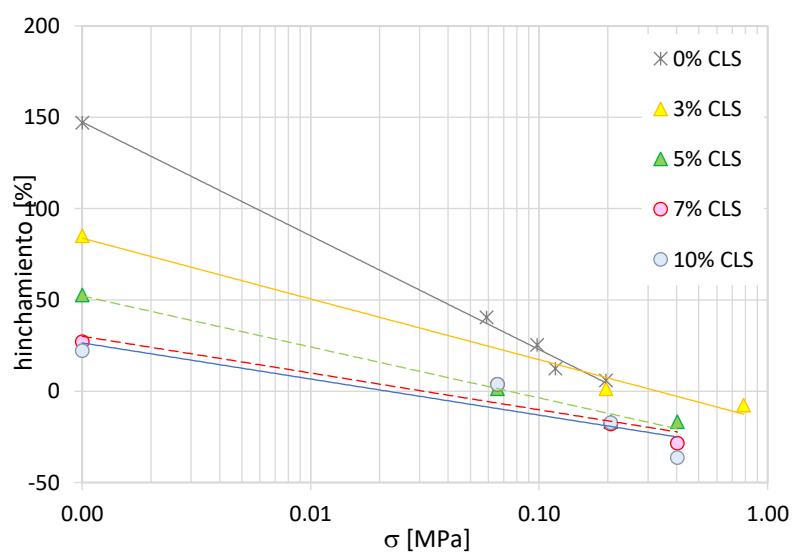


**Fig.4.29-** Coeficiente de permeabilidad en función de la presión aplicada y del porcentaje de aditivo en los ensayos edométricos.

**b) MÉTODO DE HINCHAMIENTO RESTRINGIDO.**

Los datos obtenidos para todos los porcentajes de CLS se encuentran en la Fig.4.30. Los resultados obtenidos presentan la misma tendencia que en el caso del empleo del método del edómetro. Debe recordarse que cada punto del gráfico representa una probeta ensayada con una presión aplicada inicial, a diferencia del método del edómetro en el cual que para cada ensayo necesita una sola probeta. Los valores de hinchamiento se obtienen al alcanzar la estabilización en las lecturas.

Al igual que en el método del edómetro, valores positivos en el eje de las ordenadas corresponde a hinchamientos, y valores negativos corresponden a consolidaciones.



**Fig.4.30-** Datos obtenidos mediante el empleo de ensayos de Hinchamiento Restringido para la obtención de la presión de hinchamiento para diferentes porcentajes de CLS.

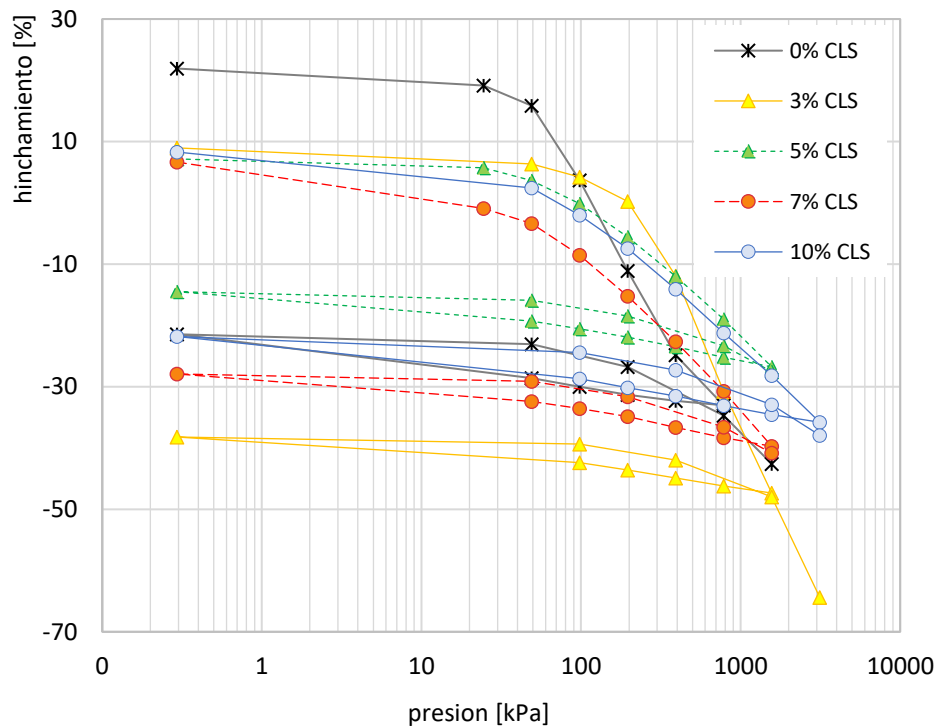
**Tabla.4.13-**Parámetros de las curvas de tendencia para los ensayos de hinchamiento restringido,  $\Delta H = A \cdot \ln \sigma + B$ , y coeficiente de regresión  $R^2$

%CLS	A	B	$R^2$
0	-27.07	-39.502	0.9961
3	-14.45	-16.035	0.9878
5	-12.12	-31.589	0.9899
7	-8.744	-30.3	0.9149
10	-8.59	-32.889	0.8311

Los resultados muestran la misma tendencia que aquellos obtenidos por medio del método del edómetro, incluyendo las rectas de 7%CLS y 10%CLS. Todas las curvas presentan un alto coeficiente de regresión (Tabla 4.13). Los resultados obtenidos para la presión de hinchamiento se muestran en la Tabla 4.14 junto con los resultados del Método ASTM y del aparato de Lambe.

**c) MÉTODO ASTM.**

Las curvas obtenidas para todos los porcentajes de CLS, empleando el método denominado ASTM se presentan en la Fig. 4.31. Estas curvas fueron realizadas con escalones de carga, descarga y recarga. Las pendientes de las zonas de carga fueron obtenidas y comparadas con aquellas obtenidas por el método del edómetro y el método de hinchamiento restringido.



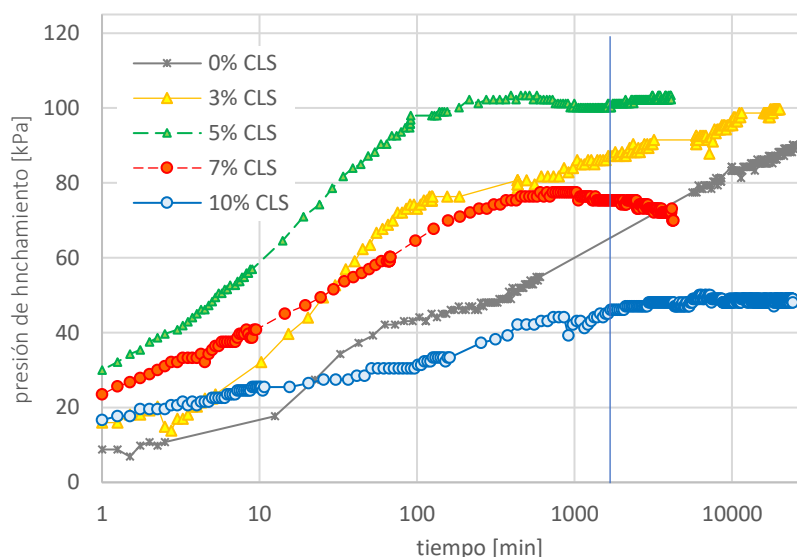
**Fig.4.31-** Curvas obtenidas mediante el método ASTM para todos los porcentajes de CLS.

Los valores de las presiones de hinchamiento para los diferentes porcentajes de CLS se presentan en la Tabla 4.14. junto con las presiones obtenidas empleando los otros métodos.

La presión de hinchamiento es aquella presión que corresponde al hinchamiento nulo, o en el caso de emplear la relación de vacíos en el eje de las ordenadas es aquella presión que corresponde a la relación de vacíos inicial. En nuestro caso, al igual que en los gráficos correspondientes al edómetro e hinchamiento restringido en el eje de las ordenadas los valores positivos corresponden a hinchamientos, mientras que los valores negativos corresponden a consolidaciones.

#### d) MÉTODO DE VOLUMEN CONSTANTE.

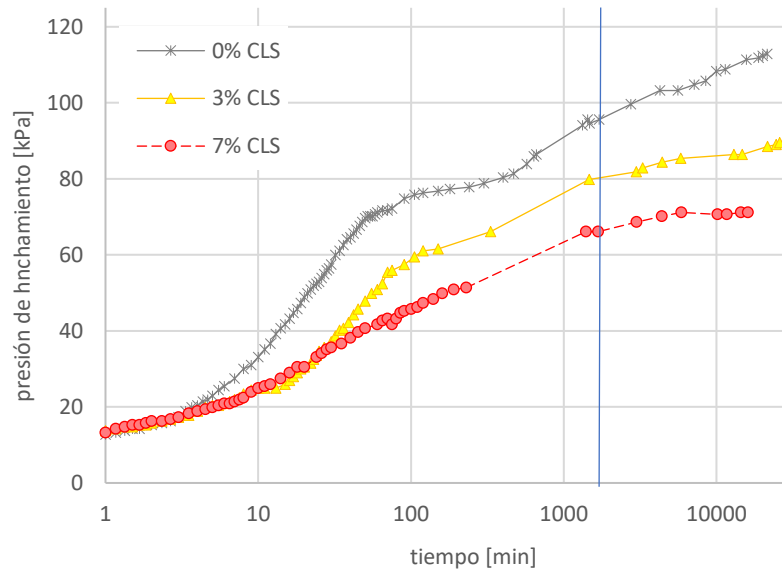
Para determinar la presión de hinchamiento empleando un método de los denominados directos se empleó el aparato de Lambe. En el registro de las presiones de hinchamiento desarrolladas durante cada uno de los ensayos se utilizaron dos sistemas diferentes: la celda de carga y el aro dinamométrico. Los resultados obtenidos se encuentran en las Fig.4.32 y Fig.4.33. Mediante la celda de carga no pudieron obtenerse las curvas correspondientes a todos los porcentajes de CLS debido a una falla presentada en el sistema de telemetría. Las variaciones que se presentan en las curvas obtenidas con el aro dinamométrico son consecuencia de la presión inicial aplicada. Una pequeña variación en la presión aplicada se traduce en una deformación inicial que aumenta o disminuye en concordancia.



**Fig.4.32-** Método del volumen constante: registro de cargas con aro dinamométrico

Este método al igual que los métodos anteriores muestra la influencia que el aumento del porcentaje de aditivo produce sobre la presión de hinchamiento. Estos ensayos se extendieron más allá de las 24 horas, aunque la norma toma la lectura a 24 horas como la correspondiente a la presión

de hinchamiento. Extendiendo las lecturas más allá de las 24 horas fue posible analizar en qué etapa de saturación se encontraba cada probeta realizando comparaciones con las curvas de expansión libre.



**Fig.4.33-** Método del volumen constante: registro de cargas con celda de carga

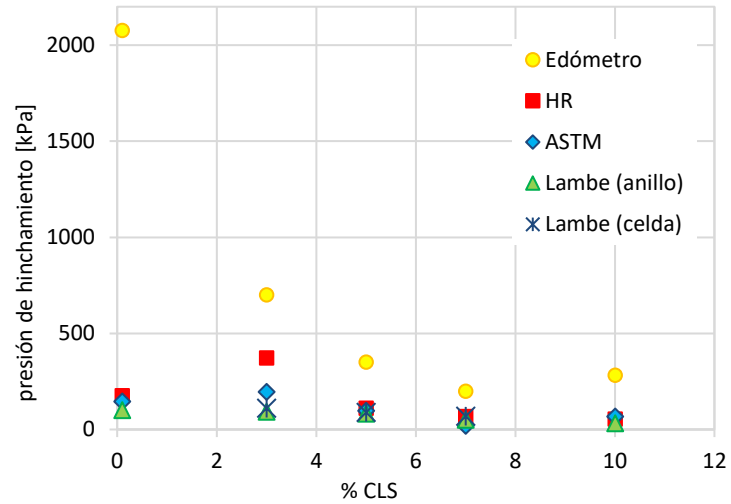
**e) COMPARACIÓN DE PRESIONES OBTENIDAS EMPLEANDO DIFERENTES TÉCNICAS**

La presión de hinchamiento es una medida del daño potencial que un suelo expansivo puede provocar sobre las construcciones civiles. La cuantificación de la presión de hinchamiento es necesaria para el diseño correcto de las estructuras incluidas las cimentaciones.

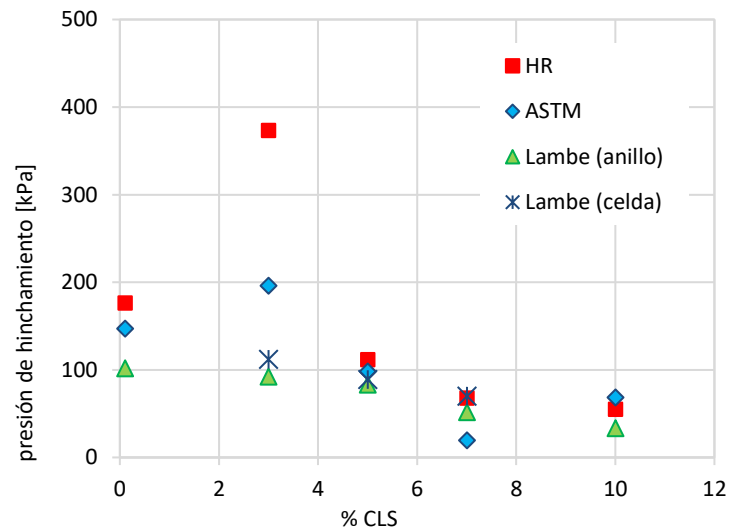
**Tabla 4.14-** Presión de hinchamiento para diferentes porcentajes de CLS

Método	Presión de hinchamiento [MPa] en función del porcentaje de CLS				
	0	3	5	7	10
Edómetro	1483.47	701.69	359.10	203.20	288.90
HR	176.40	373.38	111.72	67.62	54.88
Lambe (aro din.)	112.86	99.72	104.44	71.46	49.98
ASTM	147.00	196.00	98.00	19.60	68.60
Lambe (celda)	91.14	99.72	102.28	77.46	48.02

En Tabla 4.14, Fig. 4.34 y Fig.4.35 se presentan los resultados de la presión de hinchamiento obtenidos por cada método. En la Fig.4.34 se incluyen todos los métodos mientras que en la Fig.4.35 no se incluyen los resultados del método del edómetro. Esto permite visualizar los resultados en escalas diferentes.



**Fig.4.34-** Presión de hinchamiento empleando diferentes métodos



**Fig.4.35-** Presión de hinchamiento empleando diferentes métodos: cambio de escala en el eje de las ordenadas y eliminación de los resultados obtenidos por el método del edómetro

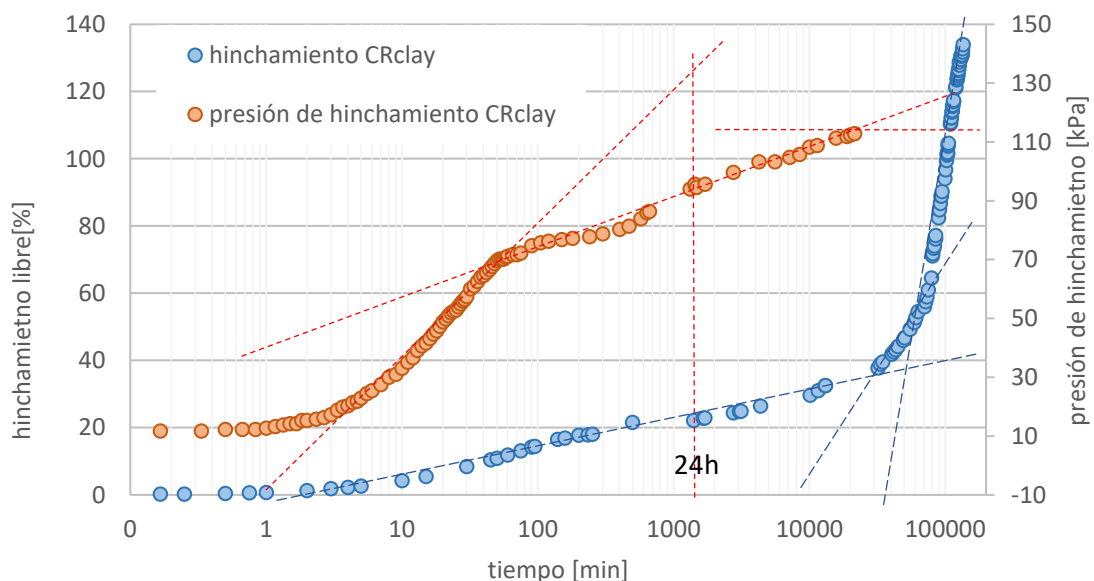
Durante la realización de los ensayos, cada uno de los procedimientos seguidos introduce mayor o menor alteración en la microestructura de las muestras. El método que menor impacto introduce en la microestructura es el método de volumen constante, en nuestro caso denominado Lambe (Trevisán, 1983, Nagaraj et al., 2009, Kayabali & Demir, 2011) por lo que fue utilizado como parámetro de comparación.

Después de las 24hs (tiempo en el cual se registra la presión de hinchamiento de acuerdo con ASTM D4829-19, 2008) en el caso del método denominado de Lambe la presión de hinchamiento continúa aumentando en el caso de CRclay y 3%CLS. Para los restantes porcentajes de CLS (5%, 7% y

10%) realizada la lectura de la presión correspondiente a 24 horas se obtiene un valor de la presión de hinchamiento muy cercana a la presión máxima absoluta.

En un gráfico de doble entrada en el cual el eje del tiempo está representado en escala logarítmica (CRclay en Fig.4.36, 3%CLS Fig.4.37, 5%CLS Fig.4.38, 7%CLS Fig.4.39, 10%CLS Fig.4.40) puede estudiarse la relación entre las diferentes etapas de deformación libre y las etapas en el desarrollo de la presión de hinchamiento. Recordemos que de acuerdo con Alazigha (2015) y Delage (2006) las etapas que se pueden identificar durante la expansión libre corresponden a una expansión inicial (IS) seguida por otra de expansión primaria (PS) y finalmente una etapa de expansión secundaria (SS).

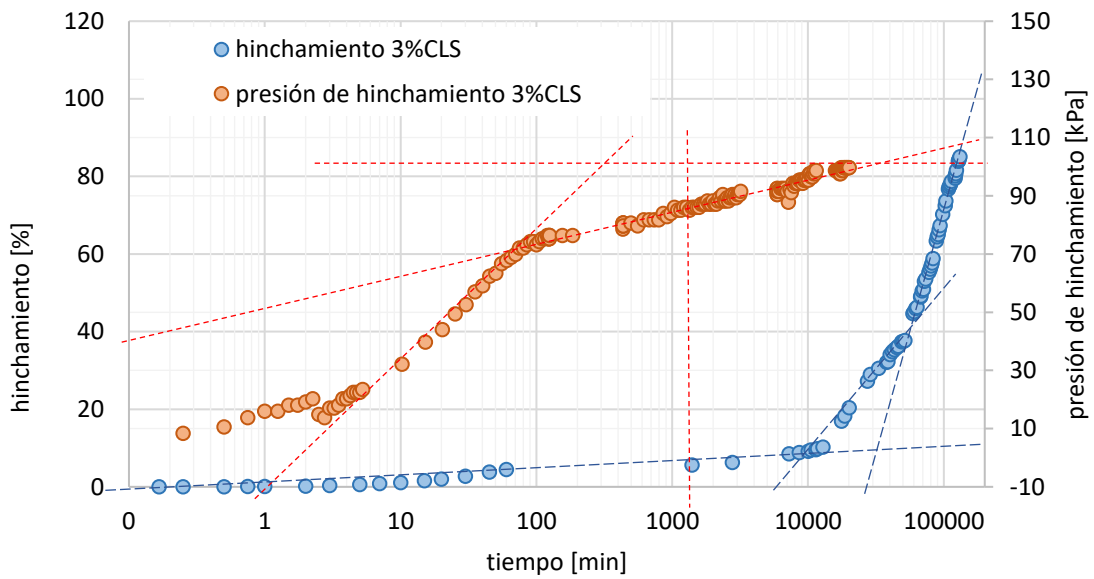
Puede advertirse que la presión de hinchamiento en CRclay se desarrolla en dos etapas: una inicial (ISP: initial swelling pressure) cuya velocidad de avance (pendiente de la curva de presión de hinchamiento vs tiempo en escala semilogarítmica) es mucho mayor. Le sigue una etapa secundaria (SSP: secondary swelling pressure) en la que la velocidad de aumento de la PH es mucho menor. Es claro que la pendiente en el gráfico logaritmo del tiempo versus deformación no corresponde a la velocidad tal como la conocemos.



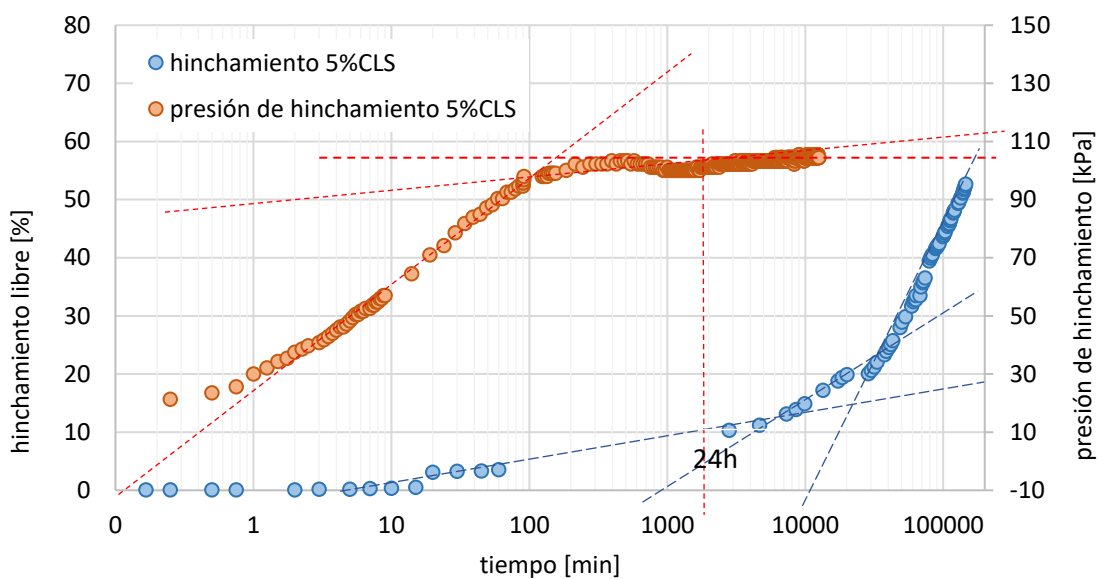
**Fig.4.36-** Hinchamiento libre y presión de hinchamiento en función del tiempo para CRclay

Con el agregado de CLS ambas pendientes en las zonas de ISP y SSP decrecen. Ocurre lo mismo con la máxima presión de hinchamiento (PH) desarrollada. La primera etapa ISP se desarrolla dentro de la etapa IS de la curva de expansión (para CRclay). Esta situación cambia en la medida que se incrementa el porcentaje de CLS moviéndose hacia la etapa PS. Recordemos que la doble capa difusa demora un tiempo mayor en desarrollarse en el caso de los porcentajes mayores de CLS (las curvas de

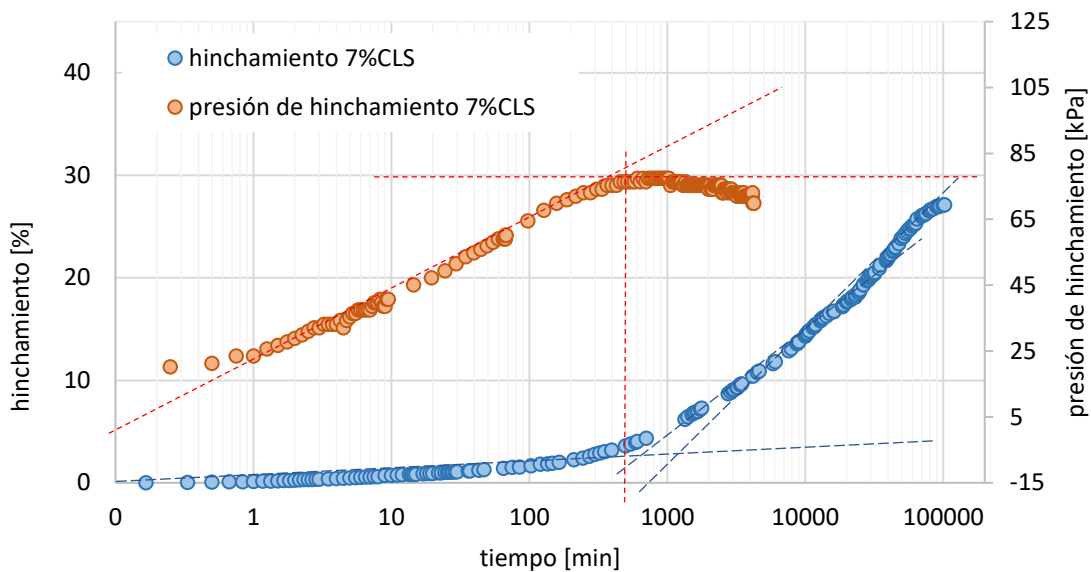
hinchamiento libre poseen una etapa inicial más prolongada, aunque la deformación es menor). Esto trae como consecuencia desarrollo de menores presiones de hinchamiento totales ya que la mayor parte de la presión de hinchamiento máxima se desarrolla en la etapa ISP antes que en SSP. Los valores de las presiones obtenidas con el aro dinamométrico difieren de los obtenidos con la celda. De acuerdo con Kayabali & Demir (2011) esto se debe a la mayor deformación que sufre el aro dinamométrico comparada con la deformación de la celda de carga. En nuestra experiencia, analizadas las deformaciones desarrolladas empleando ambos sistemas de medición estas resultaron similares entre sí, y en el caso de la celda de carga levemente mayores a las desarrolladas con el aro dinamométrico.



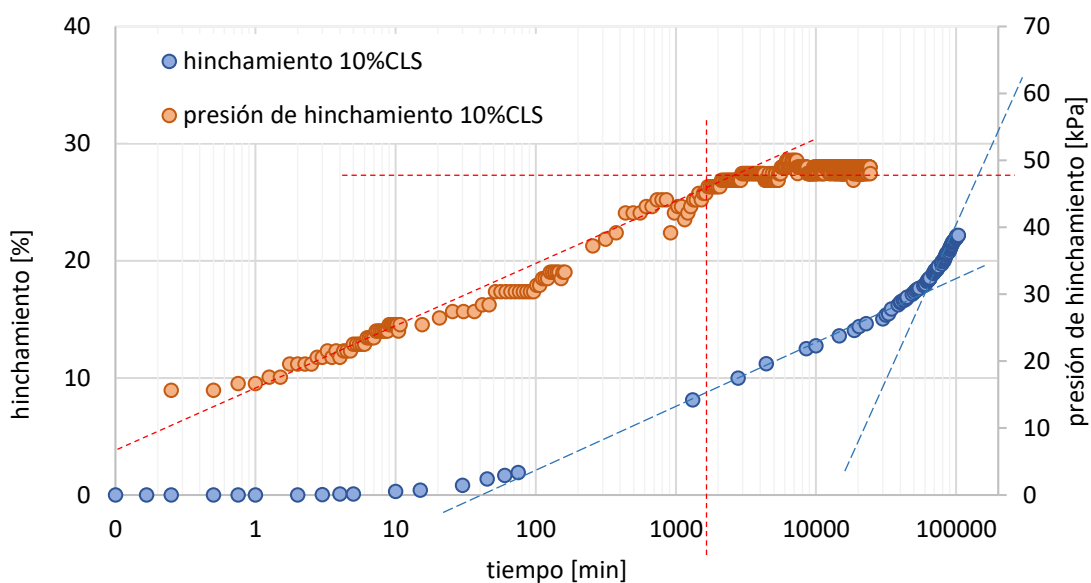
**Fig.4.37-** Hinchamiento libre y presión de hinchamiento en función del tiempo para 3%CLS



**Fig.4.38-** Hinchamiento libre y presión de hinchamiento en función del tiempo para 5%CLS



**Fig.4.39-** Hinchamiento libre y presión de hinchamiento en función del tiempo para 7%CLS



**Fig.4.40-** Hinchamiento libre y presión de hinchamiento en función del tiempo para 10%CLS

El descenso mostrado para la curva de presión de hinchamiento obtenida para 7%CLS (Fig.4.39) puede deberse a la disolución de parte de la lignina en el agua en que se encuentra sumergida la probeta. Por otro lado también puede observarse que el tiempo en el que se alcanza la máxima presión de hinchamiento es menor que aquel de las probetas con menor porcentaje de CLS.

Del análisis de las presiones de hinchamiento registradas con el método ASTM puede verse que estos resultan menores a los obtenidos por Lambe a excepción de 3%CLS. Menor es el porcentaje de aditivo empleado mayor es la diferencia entre los valores de PH determinados por ambos métodos.

Mayor es el porcentaje de aditivo más cercanos resultan los valores de presión entre sí. Estas diferencias pueden ser atribuidas a la condición impuesta por la norma en cuanto a la duración de cada escalón en 24 horas. Dependiendo de la velocidad con que se produzca la consolidación del suelo será el porcentaje de dicha consolidación que se alcance a las 24 horas.

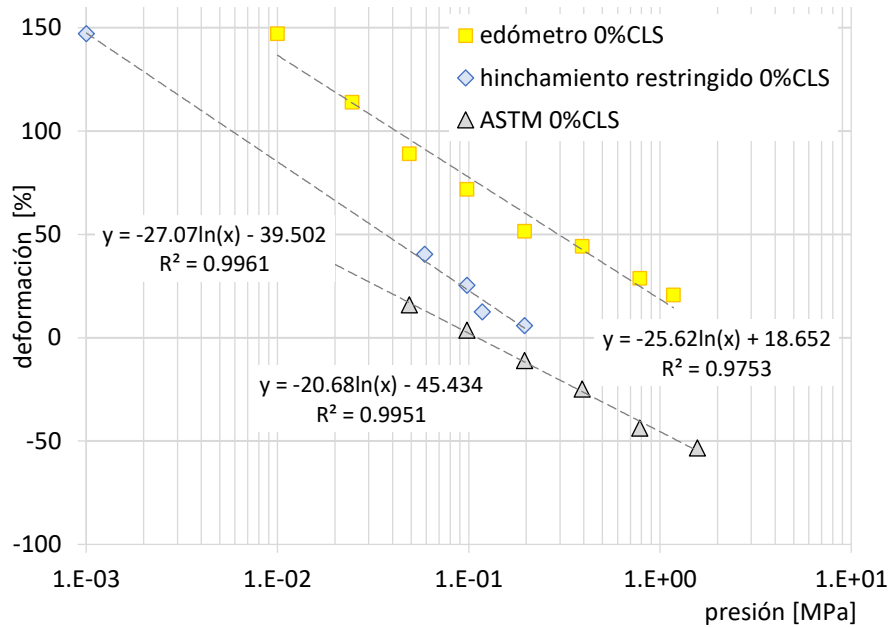


Fig.4.41- Pendientes obtenidas por los tres métodos indirectos para 0%CLS

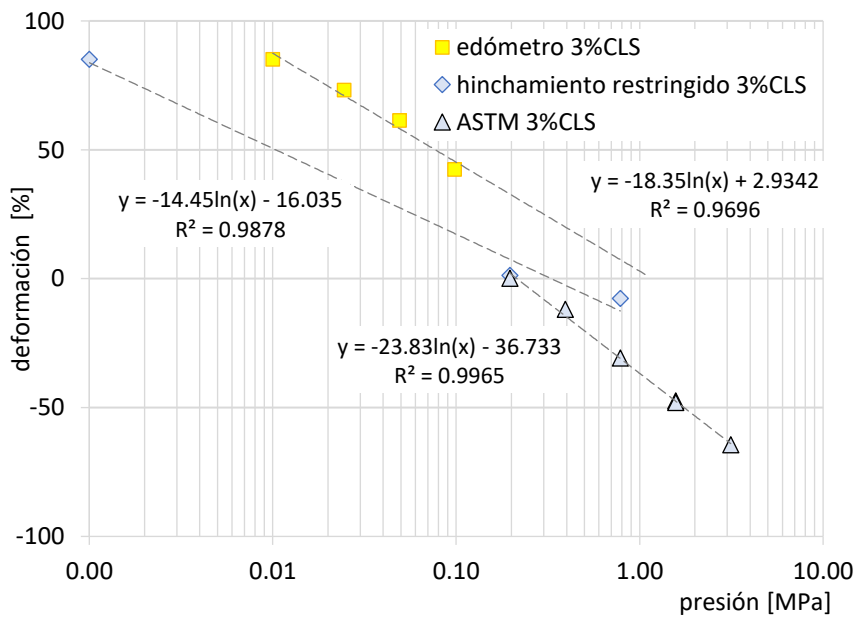
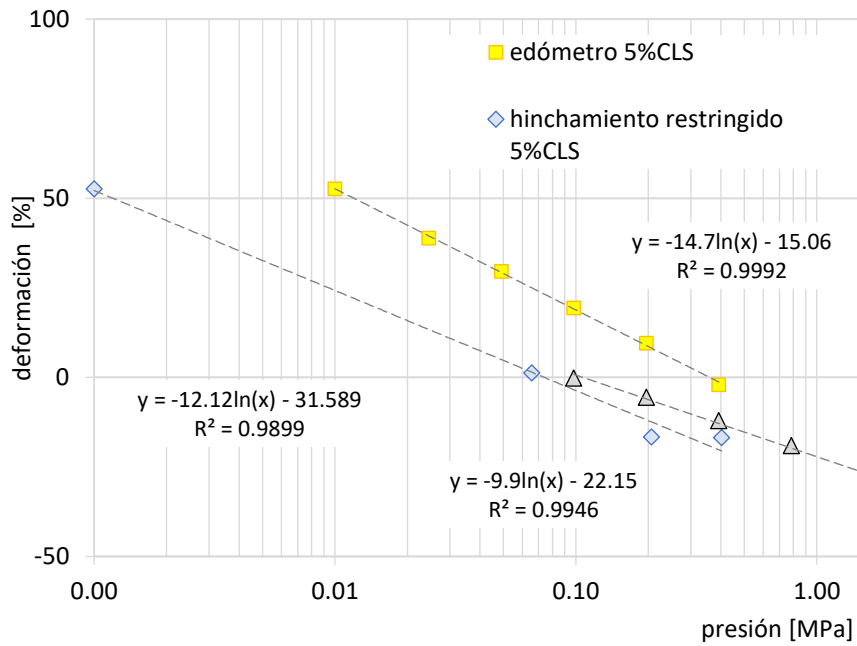
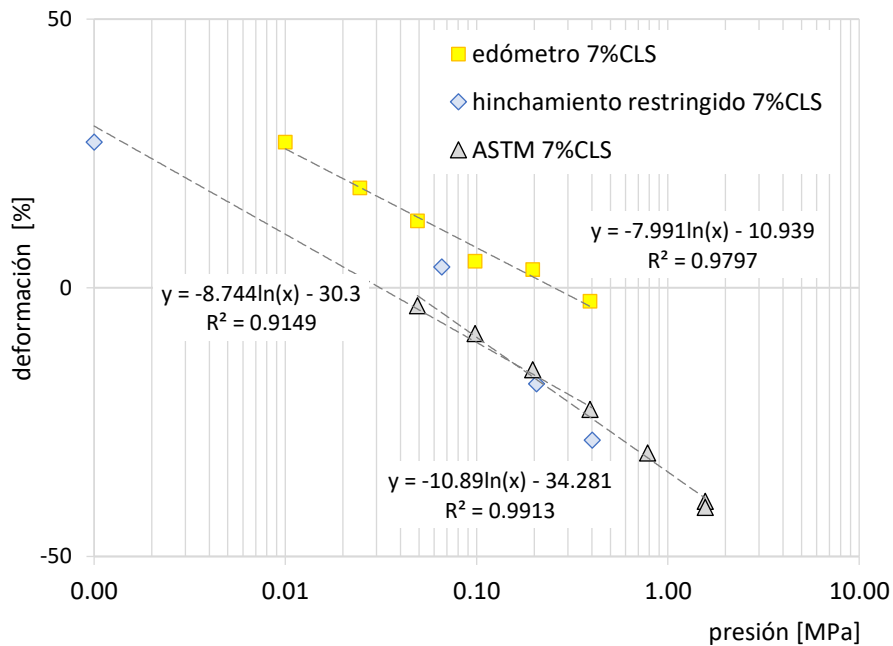


Fig.4.42- Pendientes obtenidas por los tres métodos indirectos para 3%CLS

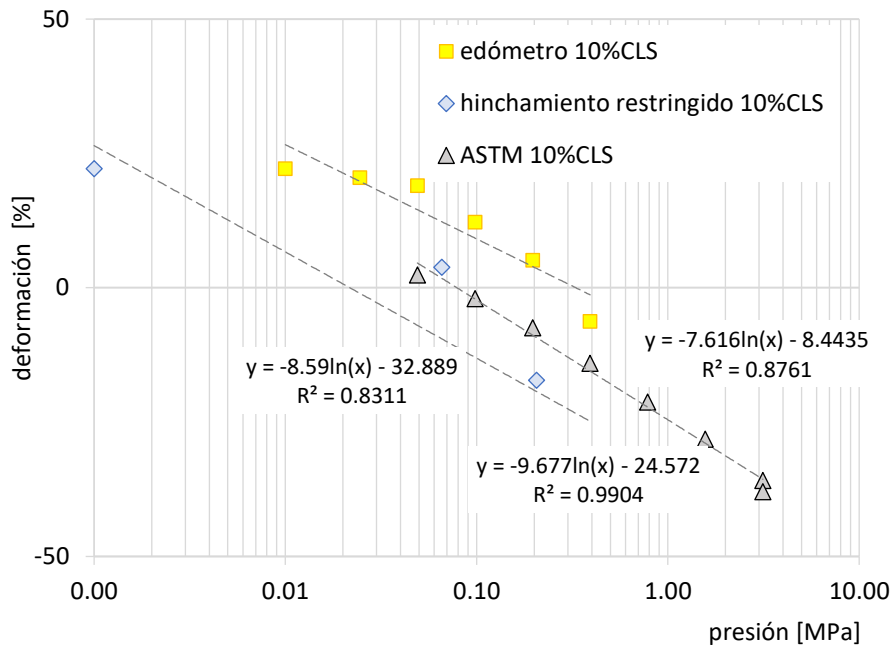


**Fig.4.43-** Pendientes obtenidas por los tres métodos indirectos para 5%CLS

En las Fig.4.41, Fig.4.42, Fig.4.43, Fig.4.44, Fig.4.45 pueden compararse las pendientes de las curvas obtenidas por medio del método del edómetro, hinchamiento restringido y ASTM. Es posible observar que las pendientes de hinchamiento restringido y edómetro son similares en todos los casos y ASTM presenta pendientes distintas, las cuales también varían en función del porcentaje de aditivo. A mayor porcentaje de aditivo más se aproximan a las del método del edómetro e hinchamiento restringido, tendiendo a ubicarse inclusive por encima de las de HR.



**Fig.4.44-** Pendientes obtenidas por los tres métodos indirectos para 7%CLS



**Fig.4.45-** Pendientes obtenidas por los tres métodos indirectos para 10%CLS

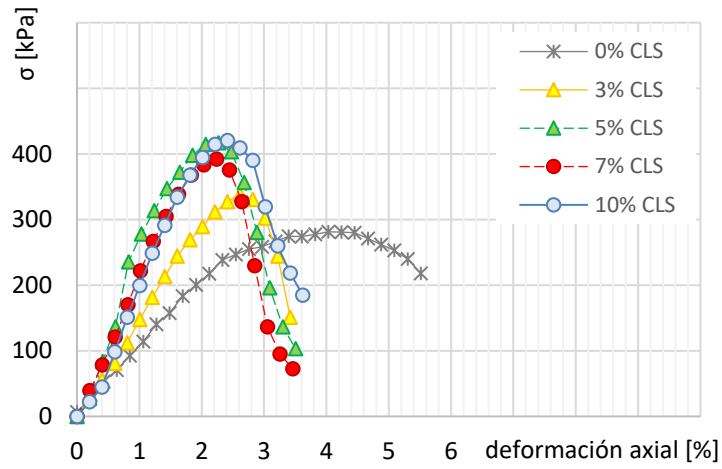
Como mencionamos, a valores mayores de hinchamiento libre mayor es la diferencia entre los valores de hinchamiento obtenidos con el método del edómetro. Con el método de hinchamiento restringido ocurre algo similar, menor es la carga inicial aplicada mayor será el valor de la presión de hinchamiento en referencia al obtenido por medio de Lambe en cualquiera de sus dos versiones. Respecto a ASTM los valores son menores a los obtenidos con Lambe para el mismo porcentaje de aditivo.

Del análisis de las curvas de tendencia que el método del edómetro sobrestima fuertemente los valores de presión de hinchamiento cuando mayor es el hinchamiento libre que presenta ese material. Lambe (aro dinámico) arroja valores menores a los obtenidos con Lambe (celda de carga) atribuible a la mayor deformación del aro en comparación con la celda. ASTM presenta valores subdimensionados respecto a Lambe consecuencia de la restricción en el tiempo entre cada escalón, la cual puede convertirse en una sobrevaloración en las mezclas con mayor contenido de CLS. Esta tendencia disminuye al aumentar el porcentaje de aditivo debido al incremento en la permeabilidad.

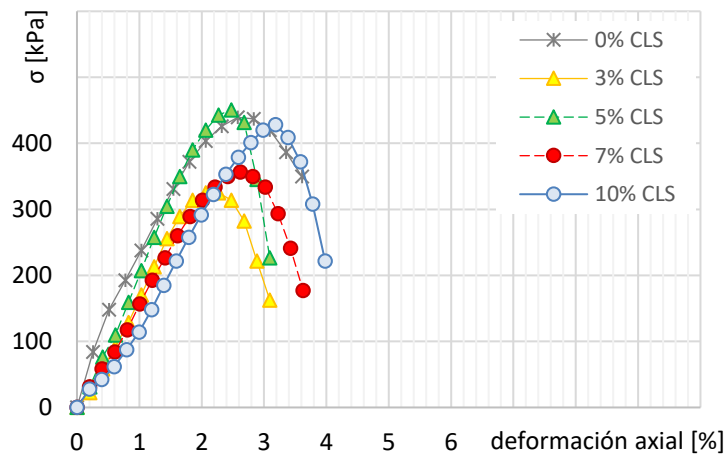
#### 4.4.4. ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE (UCS).

Los ensayos UCS fueron los ensayos seleccionados para evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas. Para ello se consideraron dos variables: el porcentaje de CLS y el tiempo transcurrido desde el moldeo de las probetas (al cual denominaremos edad). Todos los gráficos que se presentan son función de ambas variables, así como el posterior análisis de los resultados. Los ejes fueron

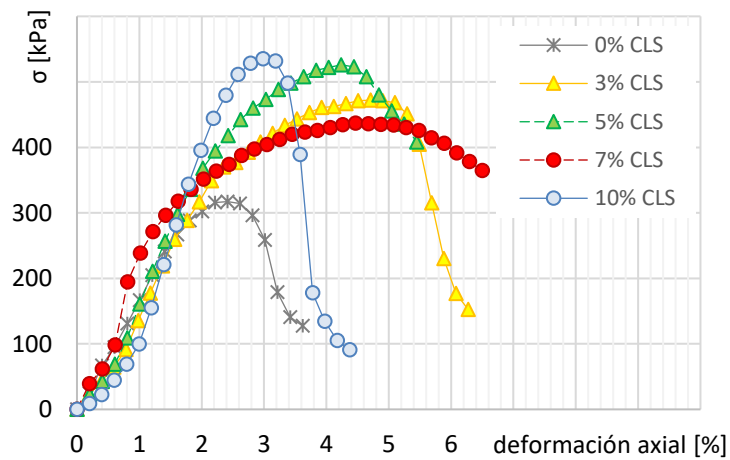
dibujados en el mismo rango y escala para facilitar la comparación visual (Fig.4.46, Fig.4.47, Fig.4.48, Fig.4.49, Fig.4.50, Fig.4.51).



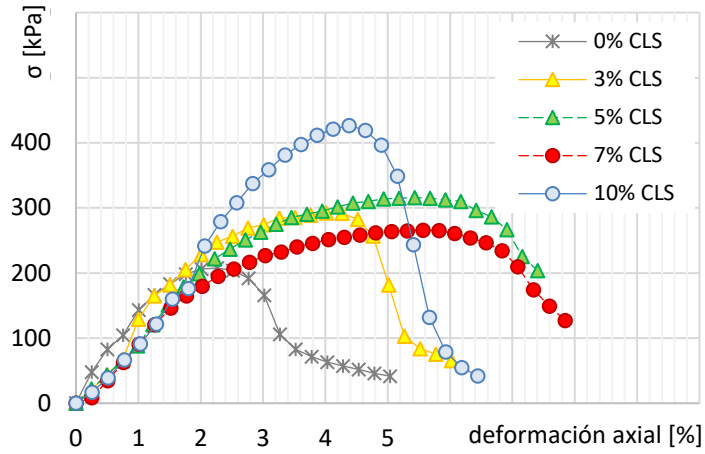
**Fig.4.46-** Resultados ensayos UCS para muestras de 1 día



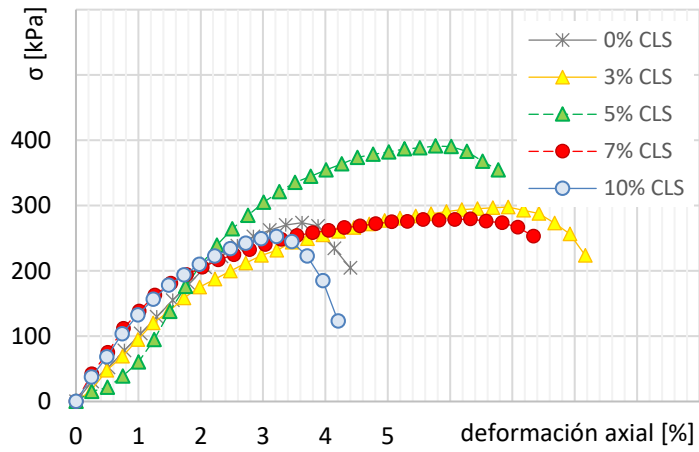
**Fig.4.47-** Resultados ensayos UCS para muestras de 1 mes



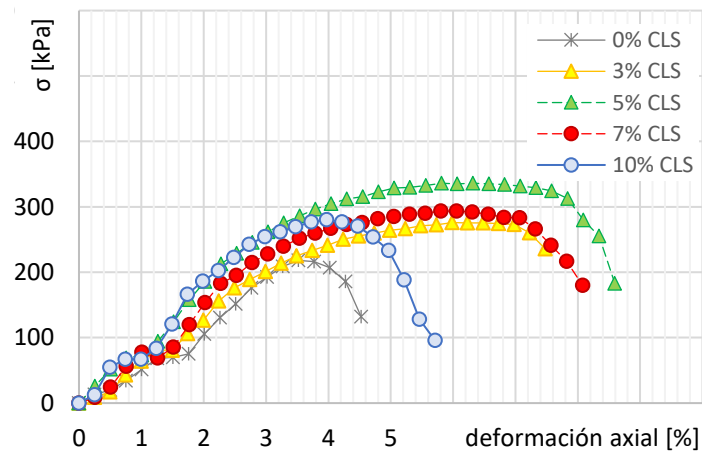
**Fig.4.48-** Resultados ensayos UCS para muestras de 3 meses



**Fig.4.49-** Resultados ensayos UCS para muestras de 6 meses

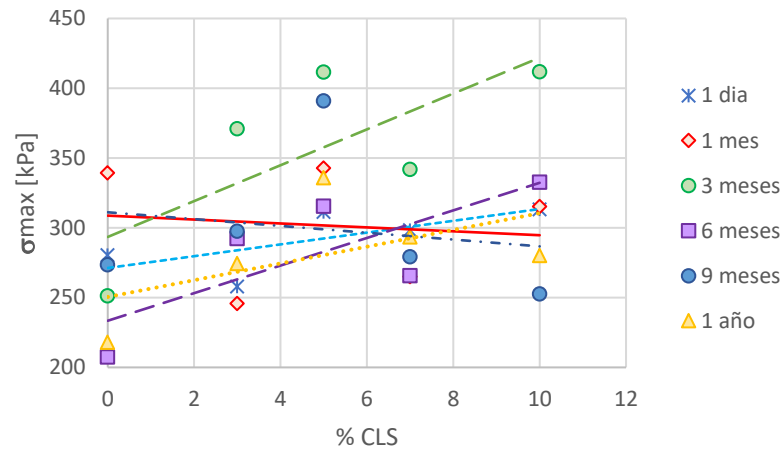


**Fig.4.50-** Resultados ensayos UCS para muestras de 9 meses

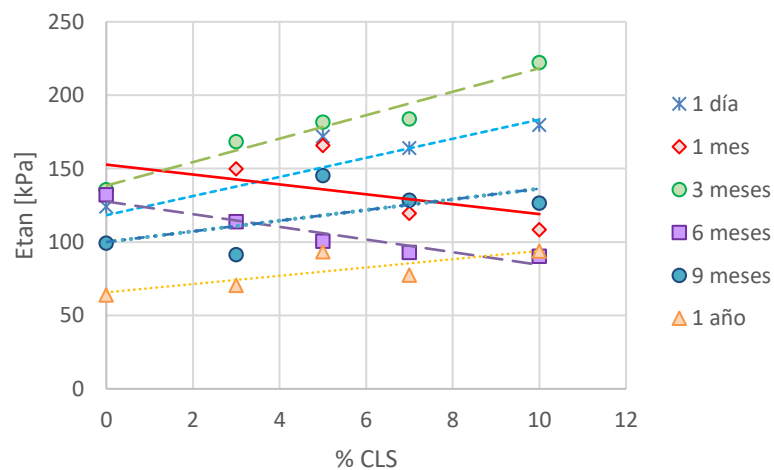


**Fig.4.51-** Resultados ensayos UCS para muestras de 1 año

Del análisis de cada uno de los gráficos se obtuvieron los módulos de elasticidad tangentes, módulos de elasticidad secantes y resistencias máximas a la compresión simple (Fig.4.52, Fig.4.53, Fig.4.54). Con estos valores fue posible analizar el comportamiento mecánico de las mezclas. El módulo de elasticidad tangente es la pendiente obtenida en la zona de deformaciones iniciales de la curva esfuerzo-deformación, denominada comúnmente como zona de deformaciones elásticas. El módulo de elasticidad secante es la pendiente de la recta que une el punto inicial del ensayo UCS con el punto al que corresponde la máxima resistencia a la compresión simple.



**Fig.4.52-** Máxima resistencia a la compresión simple para diferentes porcentajes de CLS y tiempos transcurridos desde el moldeo de las probetas.

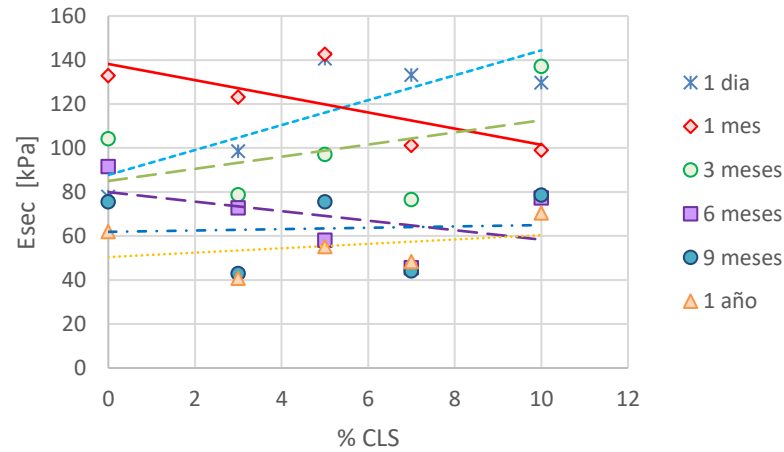


**Fig.4.53-** Módulos de elasticidad tangentes para diferentes porcentajes de CLS y tiempo transcurrido desde el moldeo de las probetas.

El índice de ductilidad  $D$  y el parámetro de resistencia  $R$ , definidos en Capítulo 3 permitieron evaluar la evolución tanto en función del tiempo como en función del porcentaje de aditivo.

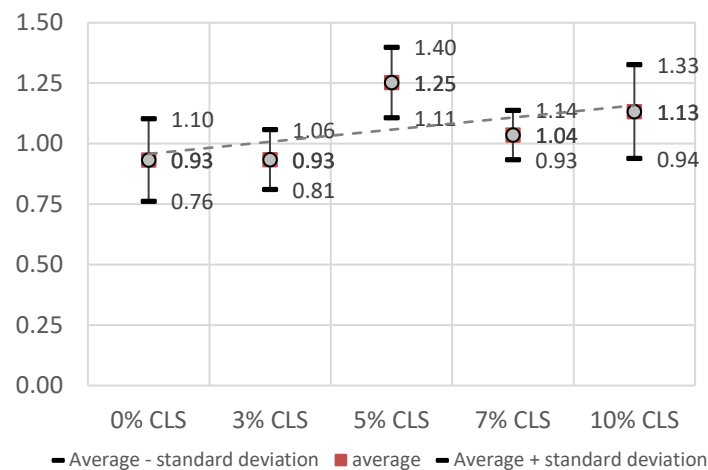
El  $R_{abs}$  se obtiene de la relación entre el  $R$  de una probeta de cualquier porcentaje de CLS y  $R$  de la probeta CRclay-1día. Promediando los  $R$  para el mismo porcentaje de aditivo se obtiene  $\overline{R_{abs}}$ .

El  $R_{rel}$  se obtiene de la relación entre el R de una probeta con cualquier porcentaje de CLS-edad-X y R de la probeta CRclay-edad-X. Promediando los R para el mismo porcentaje de aditivo se obtiene  $\overline{R_{rel}}$ . En la Fig.4.36 y Fig.4.37 se presentan los valores obtenidos para  $\overline{R_{rel}}$  y  $\overline{R_{abs}}$ .



**Fig.4.54-** Módulos de elasticidad secantes para diferentes porcentajes de CLS y tiempos transcurridos desde el moldeo de las probetas.

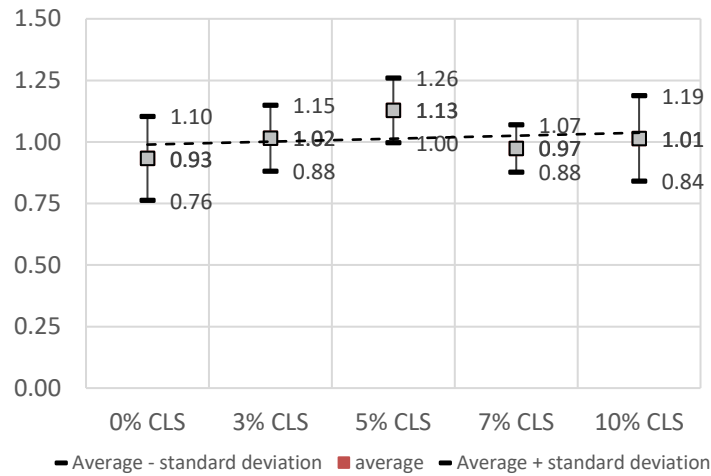
Los valores de  $\overline{R_{abs}}$  y  $\overline{R_{rel}}$  muestran tendencia a aumentar con el porcentaje de CLS. En otras palabras  $UCS_{max}$  para cualquier porcentaje de CLS en promedio es mayor que el obtenido para la muestra de CRclay de un día. Comparando las muestras para el mismo tiempo transcurrido desde el moldeo de las probetas se presenta la misma tendencia.



**Fig.4.55-**  $\overline{R_{abs}}$  acompañado de la desviación estándar para cada uno de los porcentajes de CLS

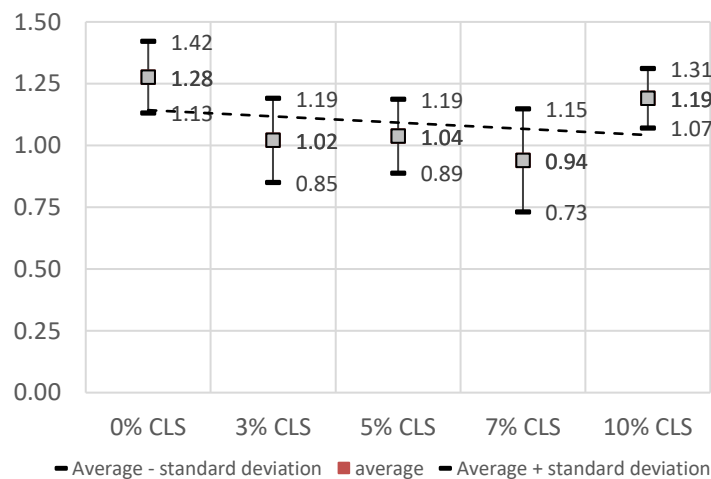
A pesar de que la tendencia general promedio muestra un mejoramiento en el comportamiento mecánico de las muestras, en el período comprendido entre 1 día y 1 año, las muestras presentaron incrementos y decrementos en la resistencia a la compresión simple, así

como incrementos y decrementos en sus módulos de elasticidad tangente y secante. El análisis de los cambios que se presentan en la microestructura sobre muestras de diferentes edades y porcentajes de CLS permite entender mejor el comportamiento mecánico y los efectos de la edad. Tanto la interporosidad como la intraporosidad se ven influenciados por la relación CRclay-CLS.



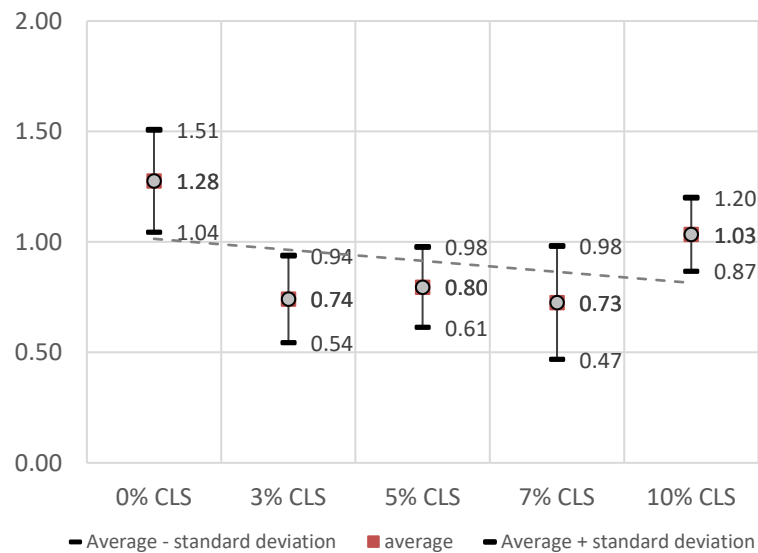
**Fig.4.56-**  $\overline{R_{rel}}$  acompañado de la desviación estándar para cada uno de los porcentajes de CLS

$D_{abs}$  se obtiene de la relación entre D para cualquier probeta de cualquier edad y D para la probeta CRclay-1día.  $D_{rel}$  se obtiene de la relación entre D para cualquier probeta de edad-X y D para la probeta de CRclay-edad-X. Si luego obtenemos los promedios de  $D_{abs}$  y  $D_{rel}$  para los valores obtenidos con el mismo porcentaje de CLS obtendremos  $\overline{D_{abs}}$  y  $\overline{D_{rel}}$ . Estos valores se presentan en Fig.4.57 y Fig.4.58.



**Fig.4.57-**  $\overline{D_{abs}}$  acompañado de la desviación estándar para cada uno de los porcentajes de CLS

Del análisis se observa que  $\overline{D_{abs}}$  y  $\overline{D_{rel}}$  disminuyen con el incremento en el porcentaje de CLS, presentan valores por debajo de 1. Esto muestra que  $D_{abs}$  muestra una tendencia a reducirse con el incremento en el porcentaje de aditivo a valores por debajo de los correspondientes al suelo sin CLS y un día de edad. Como el valor de  $D$  surge de la relación entre  $E_{sec}$  y  $E_{tan}$  y observando la tendencia general de  $E_{tan}$  a incrementarse con el incremento del porcentaje de CLS, las muestras se comportan en forma más frágil. Este comportamiento más frágil y menos dúctil se observó directamente en la forma de rotura de las probetas y durante el manejo de estas luego de los ensayos (Fig.4.59 y Fig.4.60).



**Fig.4.58-**  $\overline{D_{rel}}$  acompañado de la desviación estándar para cada uno de los porcentajes de CLS



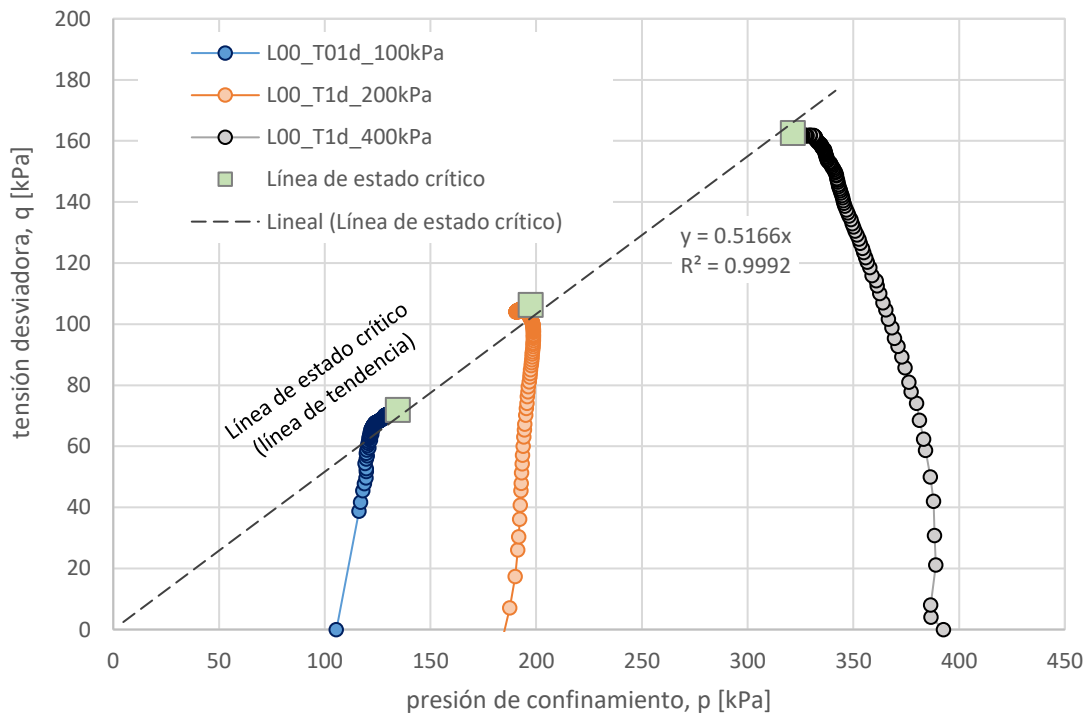
**Fig.4.59-** Rotura a la compresión simple de probetas de la misma edad (9 meses) y diferentes porcentajes de CLS



**Fig.4.60-** Probetas de la misma edad (9 meses) y diferentes porcentajes de CLS al finalizar el ensayo UCS

#### 4.4.5. ENSAYO TRIAXIAL CU CON MEDICIÓN DE PRESIÓN DE POROS.

El último ensayo empleado para evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas compactadas fue el ensayo triaxial consolidado no drenado con medición de presión de poros. Se realizaron tres ensayos dentro de una serie sobre probetas CRclay. Se intentó realizar ensayos CD a una velocidad de carga lo suficientemente pequeña para permitir la disipación de la presión de poros, pero realizando la etapa de rotura a una velocidad de deformación controlada de 0.3%/hora no se logró. Los fluidos recolectados durante la realización de los ensayos con probetas con 10%CLS fueron empleados para la realización de ensayos de toxicidad.



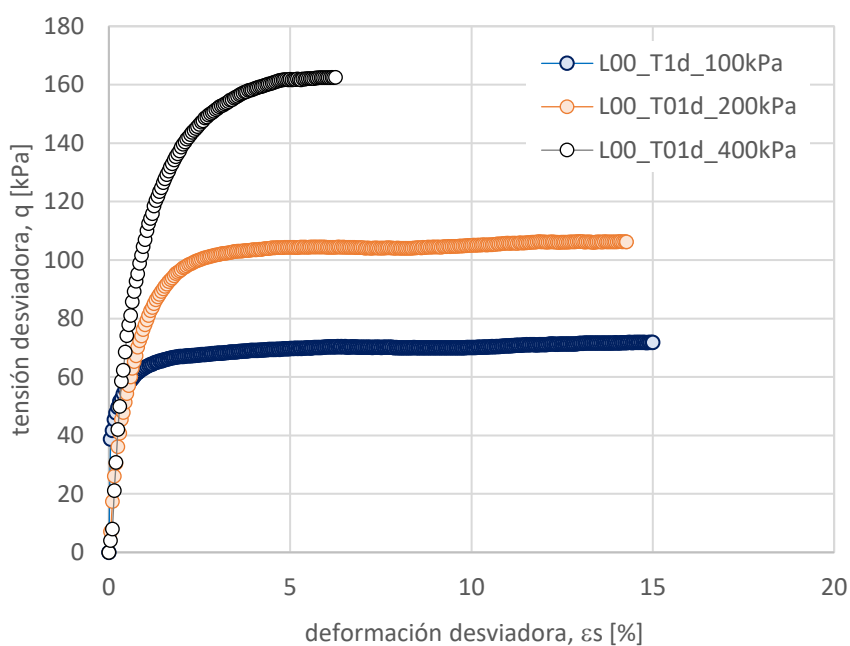
**Fig.4.61-** Gráfico p-q obtenido con los datos de tres ensayos triaxiales CU con medición de presión de poros.

En la Fig.4.61 se muestra el diagrama p-q obtenido de los tres ensayos triaxiales realizados para CRclay. La Tabla 4.15 resume los resultados de los tres ensayos triaxiales para 13kN/m<sup>3</sup> y el ensayo para 14kN/m<sup>3</sup> de densidad seca.

Las curvas obtenidas de los ensayos CU con medición de presión de presiones neutras para las muestras de CRclay con tres presiones de confinamiento 100kPa, 200kPa y 400kPa permiten obtener la línea de estado crítico en el plano p'-q con un buen coeficiente de regresión (Fig.4.61). Las Fig.4.62 y Fig.4.63 permiten completar la información de las tensiones desviadoras y exceso de presión de poros de los mismos ensayos. La pendiente de la recta obtenida, como se observa en Fig.4.61 es 0.5166.

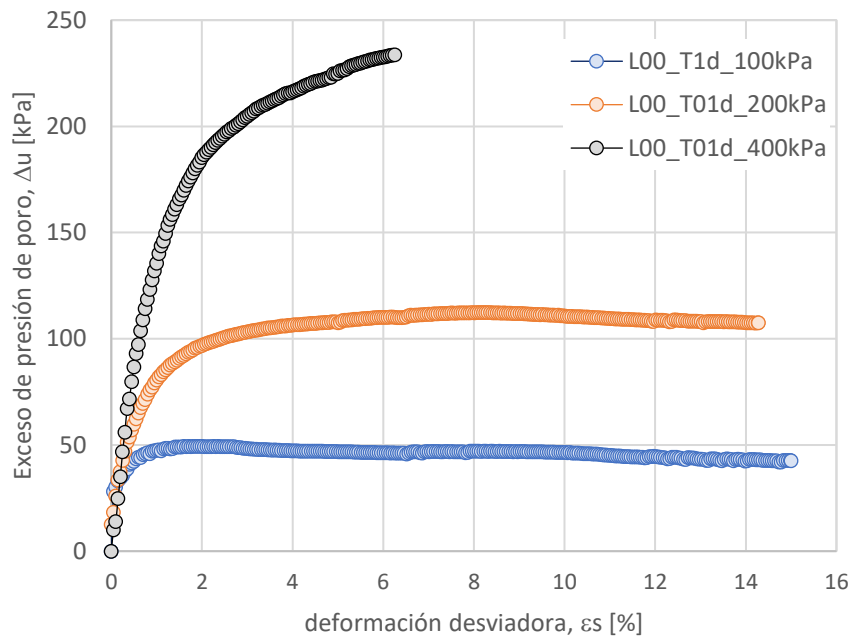
**Tabla 4.15-** Datos obtenidos de los ensayos triaxiales sobre probetas con presiones de confinamiento de 100, 200 y 400 kPa.

	po	pf	qf	eo	ef
L00_T01d_100kPa_13_37	105.54	134.74	71.84	1.05	1.05
L00_T01d_200kPa_13_37	198.82	197.56	106.25	0.79	0.79
L00_T01d_400kPa_13_37	392.58	321.54	162.60	0.79	0.79
L00_T01d_200kPa_14_20	194.17	184.90	89.52	0.73	0.73



**Fig.4.62-** Gráfico ε vs q obtenido con los datos de tres ensayos triaxiales CU con medición de presión de poros

Los datos de relación de vacíos inicial y final no permiten obtener las curvas CSL ni NCL con precisión. Se realizó un ensayo extra con una relación de vacíos menor (densidad seca=14kN/m<sup>3</sup> mientras la densidad seca de los restantes tres ensayos era de 13,3kN/m<sup>3</sup>) aun así no pudieron obtenerse las curvas como consecuencia de la dispersión y la cercanía entre ambas curvas.



**Fig.4.63-** Gráfico  $\epsilon$  vs  $\Delta u$  obtenido con los datos de tres ensayos triaxiales CU con medición de presión de poros

De los resultados mostrados en Fig.4.61 es posible decir que la probeta ensayada con una presión de confinamiento de 100kPa y 13,3kN/m<sup>3</sup> posee un comportamiento dilatante. Las restantes probetas, presión de confinamiento y densidad seca son 200kPa y 13,3kN/m<sup>3</sup>, 400kPa y 13,3kN/m<sup>3</sup>, 200kPa y 14 kN/m<sup>3</sup> muestran comportamiento contráctil.

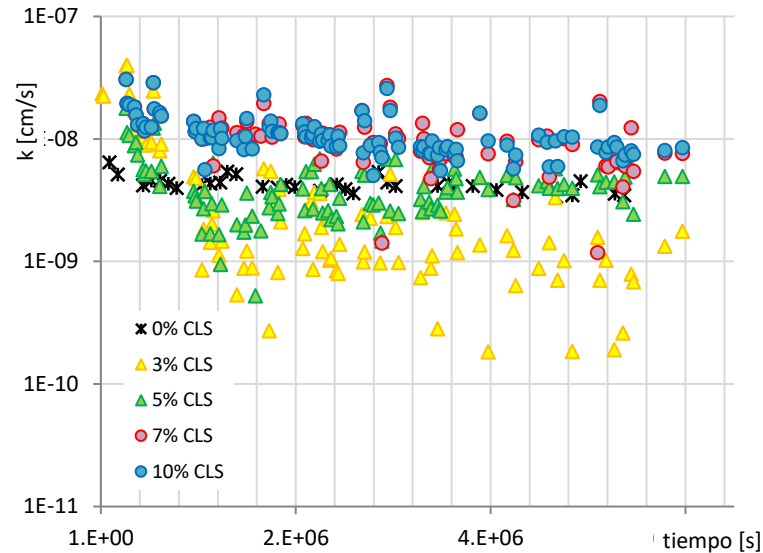
#### 4.5. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO.

El estudio del comportamiento hidráulico de las mezclas permite incluir la relación que se desarrolla entre dos de las tres fases que componen un suelo no saturado. En este apartado se incluye el estudio hidromecánico en el que fueron determinadas las curvas de saturación de las muestras empleando dos diferentes métodos: WP4 y método del papel de filtro.

##### 4.5.1. PERMEABILIDAD: ENSAYO DE CARGA VARIABLE.

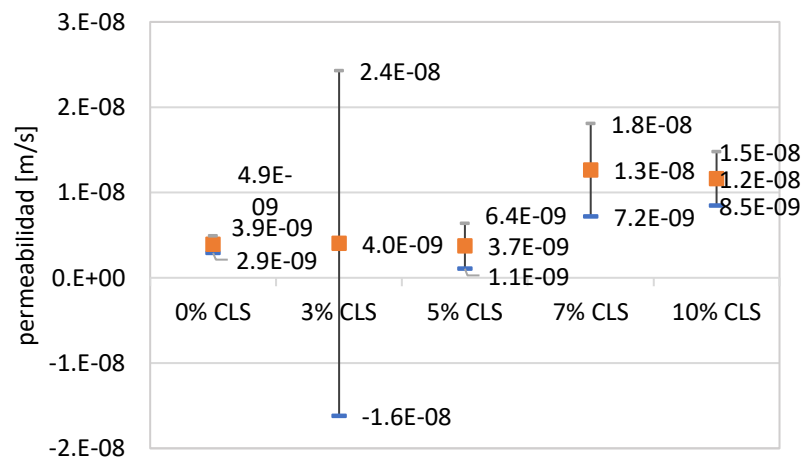
Los ensayos fueron realizados por medio del permeámetro de carga variable. Los objetivos principales fueron dos: obtener información sobre la influencia del aditivo empleado y estudiar la

evolución en el tiempo del coeficiente de permeabilidad. Para ello se moldearon probetas con humedades cercanas a la humedad de saturación, la cual fue calculada considerando la gravedad específica de CRclay, la relación de vacíos, y la densidad seca de diseño. Se realizaron ensayos que se prolongaron por 69 días después de alcanzada la saturación de las probetas.



**Fig.4.64-** Coeficientes de permeabilidad para diferentes porcentajes de CLS a lo largo del tiempo.

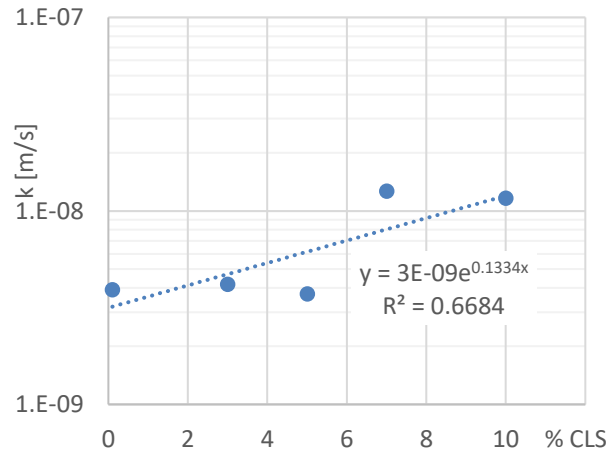
Del análisis de los resultados obtenidos y presentados en Fig.4.64, Fig.4.65 y Fig.4.66 se observa que la permeabilidad aumenta con el incremento en el porcentaje de CLS incorporado. En una misma muestra, cuanto mayor es el tiempo de ensayo menor es la permeabilidad de la probeta.



**Fig.4.65-** Coeficientes de permeabilidad promedio acompañados de su correspondiente desviación estándar para diferentes porcentajes de CLS.

La permeabilidad promedio obtenida para 3%CLS es la que mayor dispersión presenta (Fig.4.65). Para 0%, 3% y 5% los valores promedio son muy cercanos entre sí. Los mayores valores del

coeficiente de permeabilidad corresponden a 7%CLS y 10%CLS, y son prácticamente iguales lectura a lectura a lo largo del tiempo (Fig.4.64). La agregación de las partículas es la que modifica el comportamiento hidráulico del conjunto.



**Fig.4.66-** Coeficientes de permeabilidad promedio para diferentes porcentajes de CLS, escala semilogarítmica

#### 4.5.2. CURVA DE RETENCIÓN

En esta sección se presentan los resultados de mediciones de la succión sobre las distintas mezclas estudiadas con dos técnicas: a) papel de filtro (PFT) y b) picnómetro de punto de rocío (WP4). La determinación de las condiciones de humedad y densidad seca de cada muestra permiten obtener la relación entre la humedad o el grado de saturación y la succión (matricial o total). Estas curvas las denominaremos en esta sección como curvas de retención de agua de las mezclas. Como se viene realizando en esta investigación, estas curvas serán comparadas con la curva correspondiente al suelo CRclay sin adiciones. Los resultados experimentales de las curvas de retención se presentan junto al modelo propuesto por van Genutchen (1980).

La evaluación del comportamiento parcialmente saturado del suelo requiere la determinación de las curvas de retención de agua (WRC) del mismo. Varios autores (Delage et al., 1997, Romero y Lloret, 1999, Pedarla et al., 2012, Sridharan & Rao, 1975) han estimado a partir de las mediciones de la succión y la humedad comportamientos asociados que van desde la presión de hinchamiento, la permeabilidad, el módulo de elasticidad y la capacidad portante.

La información de las SWRC permitió obtener las ecuaciones que correlacionan el grado de saturación con la presión de hinchamiento para CRclay y 10%CLS, y la ecuación que correlaciona la succión total con la presión de hinchamiento también para CRclay y 10%CLS. Ambas ecuaciones son válidas para la densidad seca de diseño 13,3kN/m<sup>3</sup> empleada a lo largo de toda la investigación. El mismo procedimiento podría emplearse para un mayor número de densidades secas determinando

las SWRC y realizando series de ensayos Lambe para diferentes  $S_r$  para cada densidad. Estas ecuaciones fueron determinadas a partir de las SWRC obtenidas con PFT.

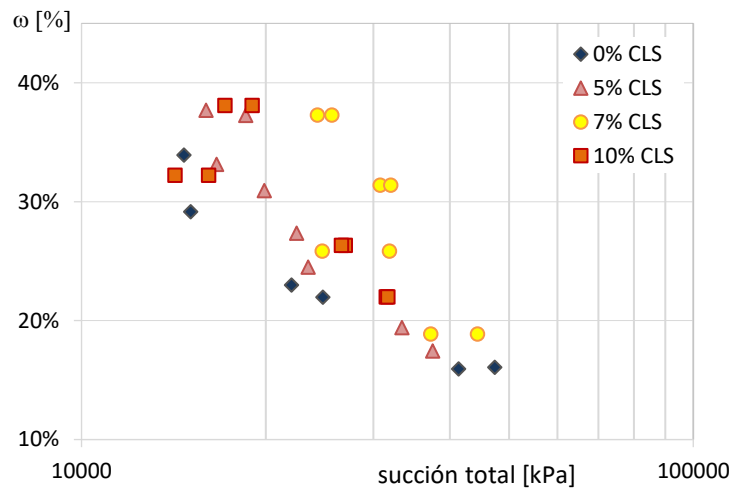
#### a. MÉTODO DE PAPEL DE FILTRO (PFT)

La aplicación de esta técnica no se encuentra restringida a un rango determinado de acuerdo con Fredlund (2012).

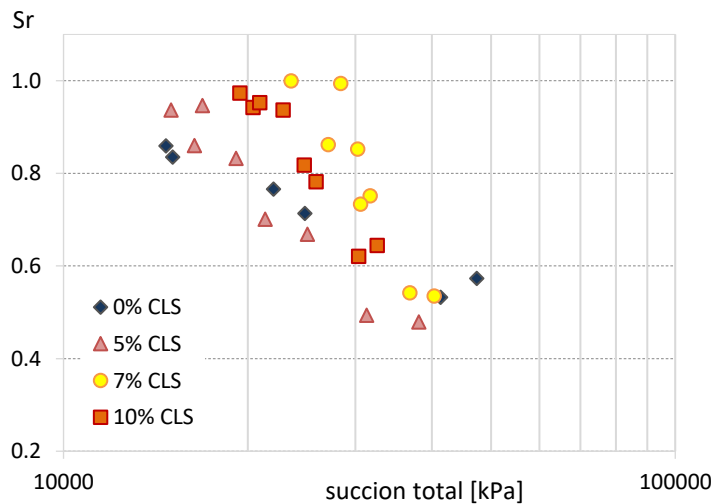
**Tabla 4.16**-Resultados del PFT para CRclay, 5%CLS; 7%CLS, 10%CLS

	Yd real[g/cm <sup>3</sup> ]	Humedad real	e	Sr	SUCCIÓN MATRICIAL [kPa]		SUCCIÓN TOTAL [kPa]			
					W (%)	INTERIOR	W (%)	ABAJO	W (%)	ARRIBA
0%	14.6	16%	0.808	0.532	4.9	52595	6.4	41340	6.4	41340
	15.1	16%	0.757	0.573	5.9	44394	5.5	47374	5.5	47374
	14.4	22%	0.832	0.713	23.4	2797	9.6	24782	9.6	24782
	14.6	23%	0.810	0.766	22.4	3257	10.4	22041	10.4	22041
	13.6	29%	0.943	0.835	26.6	1693	12.8	15070	12.8	15070
	12.8	34%	1.067	0.859	22.3	3341	12.9	14693	12.9	14693
5%	12.8	19%	1.062	0.494	0.1	22773	7.7%	33380	8.2	31279
	13.3	17%	0.982	0.479	0.1	31657	7.0%	37494	6.9	38083
	13.3	25%	0.989	0.669	0.2	2285	10.0%	23454	9.6	25042
	12.9	27%	1.054	0.701	0.3	1268	10.2%	22468	10.6	21357
	13.2	31%	1.003	0.833	0.4	418	11.0%	19896	11.3	19143
	13.0	33%	1.040	0.860	0.4	194	12.1%	16629	12.2	16367
	12.7	38%	1.087	0.937	0.6	19	12.4%	15975	12.8	14980
	12.8	37%	1.063	0.946	0.4	180	11.4%	18558	12	16869
7%	13.6	19%	0.940	0.542	0.1	35125	7.1%	37205	7.1	36796
	13.6	19%	0.952	0.535	0.1	37267	5.9%	44390	6.5	40348
	13.7	26%	0.929	0.751	0.2	6055	9.6%	24727	8.1	31713
	13.6	26%	0.952	0.733	0.3	1840	8.0%	31841	8.3	30582
	13.3	31%	0.983	0.862	0.3	2088	8.3%	30756	9.1	27067
	13.3	31%	0.994	0.852	0.3	989	8.0%	32020	8.4	30233
	13.2	37%	1.000	1.000	0.4	197	9.7%	24302	9.9	23558
	13.1	37%	1.013	0.994	0.5	79	9.4%	25646	8.8	28372
10%	13.8	22%	0.922	0.644	0.1	13409	8.1%	31489	7.9	32555
	13.5	22%	0.957	0.621	0.1	11590	8.1%	31659	8.3	30361
	13.9	26%	0.909	0.782	0.2	6890	9.1%	26974	9.3	25873
	14.2	26%	0.870	0.818	0.2	3538	9.2%	26605	9.6	24736
	13.8	32%	0.923	0.942	0.2	3679	13.1%	14217	10.9	20394
	13.7	32%	0.929	0.937	0.4	298	12.3%	16133	10.1	22860
	12.9	38%	1.056	0.974	0.5	28	11.3%	19003	11.2	19417
	12.7	38%	1.080	0.953	0.5	62	11.9%	17152	10.7	20928

El método de papel de filtro fue empleado para obtener la succión matricial y total del suelo CRclay y las mezclas 5%CLS, 7%CLS y 10%CLS. También se empleó para analizar el comportamiento a densidades diferentes de las mezclas. La técnica se realizó sobre muestras compactadas a una densidad objetivo de 13,3KN/m<sup>3</sup> y diferentes humedades iniciales (Tabla 4.16). Los resultados se presentan como la relación entre la humedad y la succión total (Fig.4.67), el grado de saturación y la succión total (Fig.4.68), la humedad y la succión matricial (Fig.4.69), el grado de saturación y la succión matricial (Fig.4.70).



**Fig.4.67-** Relación entre la humedad y la succión total, PFT.



**Fig.4.68-** Relación entre el grado de saturación y la succión total, PFT.

La determinación de succiones totales fue realizada empleando dos papeles de filtro, mientras que la determinación de la succión matricial se determinó empleando un solo papel de filtro. En ambos casos se empleó papel Whatman Grado 589/2 x 100u. Diámetro: Ø 125mm, calibrado para ser empleado en este método. Por este método es posible determinar la succión osmótica ( $\pi$ ) que

surge de la diferencia entre la presión total ( $\psi$ ) y la matricial ( $u_a - u_w$ ). Esta presión puede observarse cumple con lo planteado por Mitchel & Soga (2005), a valores menores de saturación menor la influencia de la succión osmótica comparada con la succión total.

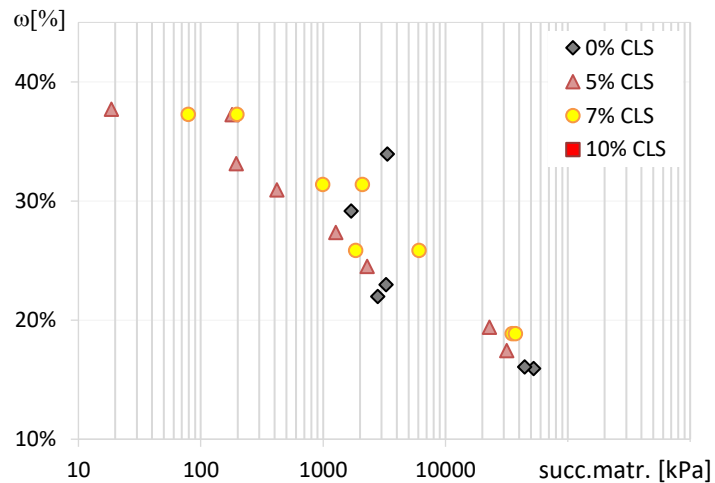


Fig.4.69- Relación entre la humedad y la succión matricial, PFT.

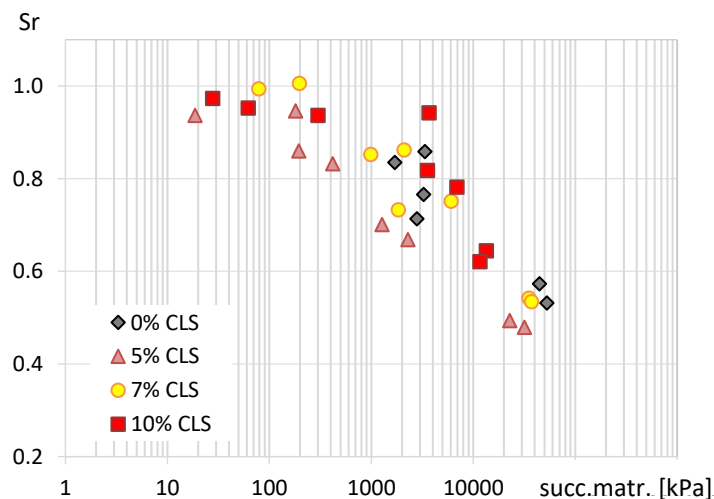


Fig.4.70- Relación entre la saturación y la succión matricial, PFT

#### b. WP4 (PSICRÓMETRO DE PUNTO DE ROCIO)

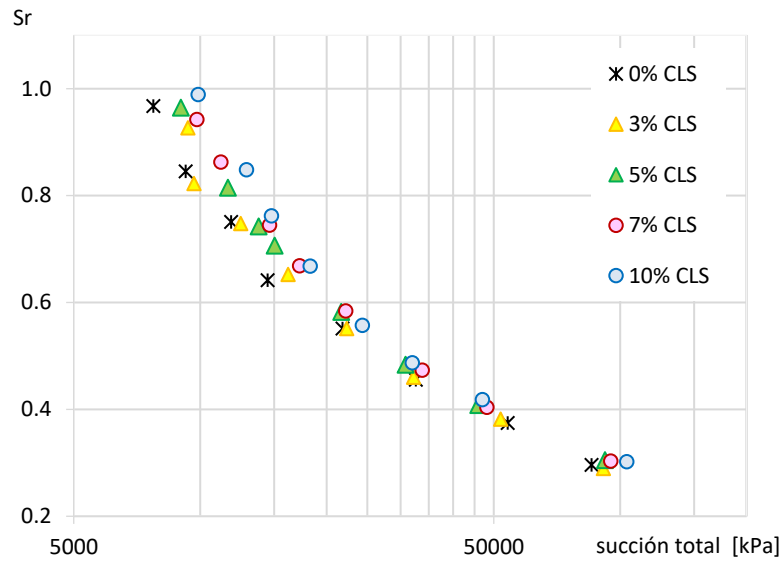
El rango de aplicación de esta técnica fue presentado en la Tabla 3.9 (Fredlund, 2012), se encuentra entre 100 y 8000kPa. Los resultados obtenidos se encuentran fuera del rango estipulado por Fredlund, aunque el manual del aparato hace referencia a que el rango de aplicación se encuentra entre 0 y -60 MPa, con una precisión de  $\pm 0.1$ MPa en el rango de 0 a -10MPa, y una exactitud de  $\pm 1$ MPa en el rango de -10 a -60MPa. El instrumento es fácil de usar y mantener, con una sencilla calibración. De los valores obtenidos podemos observar que para las humedades menores los registros se encuentran fuera del rango de utilización del aparato, 60MPa. Estos valores fueron marcados en rojo

en la Tabla 4.17. Y por debajo de alrededor del 33% de humedad de las probetas el error en las succiones determinadas posee un error de  $\pm 1$ MPa.

El psicrómetro solamente permite determinar succiones totales. La Fig.4.71 muestra los datos obtenidos para cada porcentaje de aditivo empleado

**Tabla 4.17**-Resultados del PFT para CRclay, 3%CLS, 5%CLS; 7%CLS, 10%CLS y 13.3kN/m<sup>3</sup> de densidad seca de diseño.

	Humedad real	Yd real[kN/m <sup>3</sup> ]	e	Sr	W (%)	Succión total
0% CLS	11.83%	13.30	1.0769	0.2965	11.83%	85460
	14.95%	13.30	1.0769	0.3749	14.95%	54000
	18.18%	13.30	1.0769	0.4559	18.18%	32630
	25.60%	13.30	1.0769	0.6418	25.60%	14480
	22.00%	13.30	1.0769	0.5516	22.00%	21820
	29.96%	13.30	1.0769	0.7512	29.96%	11850
	33.72%	13.30	1.0769	0.8454	33.72%	9250
	38.60%	13.30	1.0769	0.9678	38.60%	7740
3% CLS	11.55%	13.30	1.0769	0.2897	11.55%	91340
	15.24%	13.30	1.0769	0.3820	15.24%	51960
	18.36%	13.30	1.0769	0.4603	18.36%	32240
	21.99%	13.30	1.0769	0.5514	21.99%	22340
	26.04%	13.30	1.0769	0.6529	26.04%	16200
	29.84%	13.30	1.0769	0.7480	29.84%	12500
	32.82%	13.30	1.0769	0.8229	32.82%	9670
	36.98%	13.30	1.0769	0.9271	36.98%	9350
5% CLS	12.17%	13.30	1.0769	0.3052	12.17%	92080
	16.29%	13.30	1.0769	0.4084	16.29%	45940
	19.30%	13.30	1.0769	0.4839	19.30%	30880
	23.24%	13.30	1.0769	0.5826	23.24%	21700
	28.19%	13.30	1.0769	0.7066	28.19%	15050
	29.62%	13.30	1.0769	0.7427	29.62%	13790
	32.52%	13.30	1.0769	0.8153	32.52%	11660
	38.49%	13.30	1.0769	0.9651	38.49%	9000
7% CLS	12.11%	13.30	1.0769	0.3036	12.11%	95090
	16.12%	13.30	1.0769	0.4043	16.12%	48190
	18.88%	13.30	1.0769	0.4734	18.88%	33830
	23.32%	13.30	1.0769	0.5846	23.32%	22220
	26.68%	13.30	1.0769	0.6690	26.68%	17270
	29.73%	13.30	1.0769	0.7453	29.73%	14640
	34.41%	13.30	1.0769	0.8628	34.41%	11220
	37.59%	13.30	1.0769	0.9424	37.59%	9820
10% CLS	12.07%	13.30	1.0769	0.3025	12.07%	103800
	16.69%	13.30	1.0769	0.4184	16.69%	46980
	19.45%	13.30	1.0769	0.4876	19.45%	32010
	22.24%	13.30	1.0769	0.5575	22.24%	24350
	26.67%	13.30	1.0769	0.6686	26.67%	18280
	30.41%	13.30	1.0769	0.7624	30.41%	14800
	33.86%	13.30	1.0769	0.8488	33.86%	12900
	39.46%	13.30	1.0769	0.9892	39.46%	9900



**Fig.4.71-** Relación entre la saturación y la succión matricial, WP4.

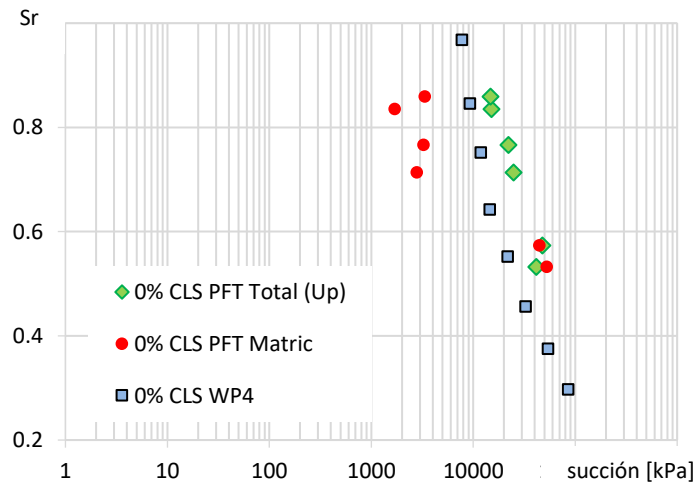


**Fig.4.72-** Relación entre la humedad y la succión matricial, WP4.

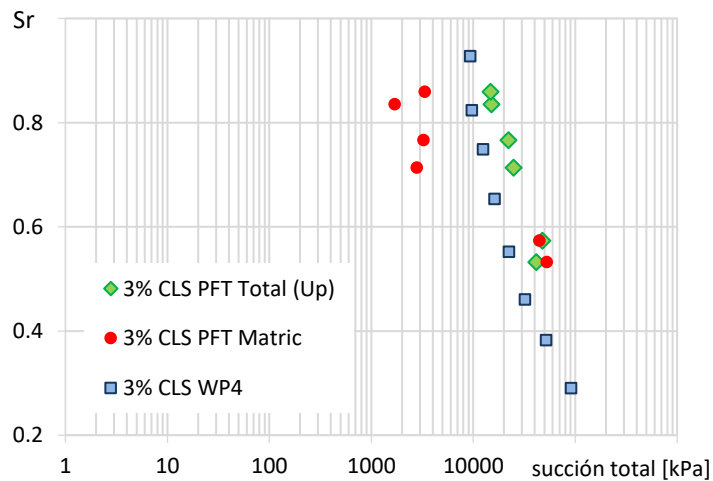
Al igual que los resultados obtenidos empleando PFT los valores obtenidos muestran una pendiente mayor cuanto mayor es el porcentaje de aditivo empleado. Este comportamiento muestra la formación de partículas de mayor tamaño coincidente con los resultados obtenidos en las porosimetrías MIP y BET las cuales serán analizadas en el capítulo de discusión de resultados

Mediante el empleo de este método se pudieron obtener valores de succión total para Sr menores a los empleados en PFT. Las probetas moldeadas a humedades muy bajas (debajo de 15%) empleando la técnica de PFT se desmoronaban y delezaban con facilidad impidiendo el manejo durante el proceso de montaje de los ensayos.

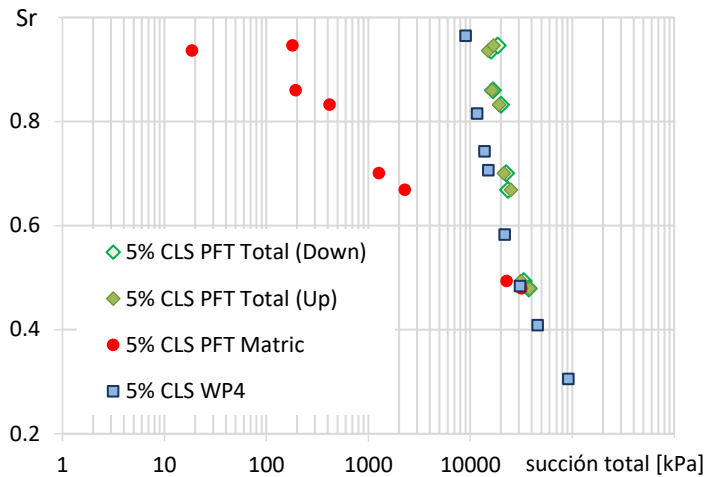
Los resultados derivados del empleo de la técnica de PFT y WP4 para 0%CLS o CRclay (Fig.4.73), 3%CLS (Fig.4.74), 5%CLS (Fig.4.75), 7%CLS (Fig.4.76), 10%CLS (Fig.4.77) muestran que las succiones totales PFT son superiores a las obtenidas con WP4. Esta diferencia puede ser atribuida al mayor volumen libre dentro del frasco en el que se realizaron los ensayos con la técnica de papel de filtro.



**Fig.4.73-** Resultados obtenidos con WP4 (succión total) y PFT (succión total y matricial) para CRclay

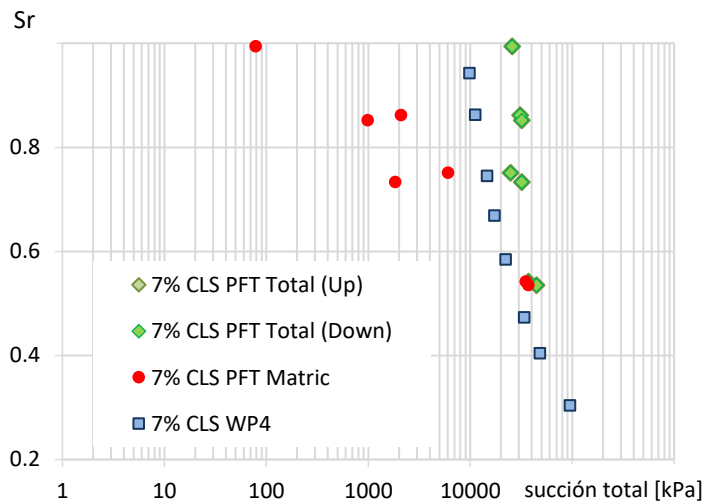


**Fig.4.74-** Resultados obtenidos con WP4 (succión total) y PFT (succión total y matricial) para 3%CLS

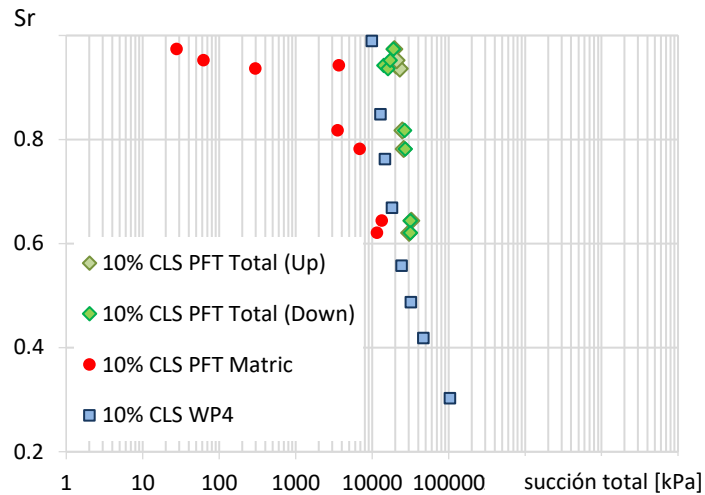


**Fig.4.75-** Resultados obtenidos con WP4 (succión total) y PFT (succión total y matricial) para 5%CLS

En cambio, con la determinación de la SWRC por medio del WP4 las probetas eran moldeadas dentro del mismo recipiente en que se realiza el ensayo. Esto permitió obtener la succión total hasta valores de humedad iguales a aquellos en que las muestras alcanzan el equilibrio al ser secadas al aire. Las curvas compiladas obtenidas de cada porcentaje de CLS muestran que para saturaciones cercanas a 0,5 los valores de succión total y matricial se acercan disminuyendo a valores muy bajos la succión osmótica. Este efecto fue verificado cambiando la escala del eje de las abscisas lo cual no evidenció influencia.



**Fig.4.76-** Resultados obtenidos empleando WP4 (succión total) y PFT (succión total y matricial) para 7%CLS



**Fig.4.77-** Resultados obtenidos empleando WP4 (succión total) y PFT (succión total y matricial) para 10%CLS

#### 4.6. MINERALOGÍA Y MICROESTRUCTURA DE LAS MEZCLAS

##### a) DIFRACCIÓN POR RAYOS X (DRX)

Los ensayos de difracción por rayos X fueron realizados en dos laboratorios diferentes: CETMIC y LAMARX. En el CETMIC se realizaron los DRX correspondientes a mezclas de diferentes edades y porcentajes. Los resultados en cuanto a minerales identificados de acuerdo con los porcentajes de CLS y edades se presentan en la Tabla 4.7.

**Tabla 4.18-** Minerales identificados en función de la edad y contenido de CLS de la muestra analizada

%CLS	edad	Esmectita [%]	Plagioclasa [%]	Clinoptildita-Heulandita [%]	Magnetita [%]
0	1 día	62	32	5	1
3	1 día	67	28	4	trazas
10	1 día	63	30	6	trazas
5	1 año	65	29	5	trazas
7	1 año	66	27	6	trazas
0	2 años	63	31	5	trazas
3	2 años	68	27	4	trazas
10	2 años	62	31	6	1

La Fig.4.78 muestra la superposición de las dos muestras sin CLS, y dos edades diferentes: 1 día y 2 años. Las muestras de 3%CLS se encuentran en la Fig.4.79, 7%CLS en la Fig.4.80. En ellas se analiza si existen efectos consecuencia de la edad por la interacción entre el CLS y CRclay. En la Figura

4.78 se superponen los difractogramas para muestras de la misma edad sin CLS, con 3%CLS y 10%CLS. En Fig.4.82 se comparan las dos muestras de 1 año: 5%CLS y 7%CLS y finalmente en Fig.4.83 se superponen dos muestras de 2 años, con 3%CLS y 10%CLS.

Del análisis de los difractogramas y sus diferencias no es posible observar nuevos picos, los cuales corresponderían a cambios en la mineralogía de CRclay, ni redondeamiento de los picos existentes. Nuestros resultados coinciden con los obtenidos con Alazigha (2015) a pesar de que trabajó con un CLS hidrófugo. Esto demuestra que el CLS empleado en este trabajo presenta mecanismos de estabilización como los propuestos por Scholen (1992): químicos, físicos, físico químicos. Los físicos involucran procesos aglutinantes. Los químicos involucran intercambio iónico. Los fisicoquímicos involucran reacciones químicas pero incluyen la aglutinación.

En los difractogramas en general, las pequeñas variaciones observadas en los porcentajes de cada mineral (altura de los picos) pueden ser atribuidas a la dispersión propia del suelo acopiado al comienzo de la investigación.

En los ensayos de DRX en los que se comparó la influencia de la edad en muestras con el mismo porcentaje de aditivo se lograron las siguientes observaciones:

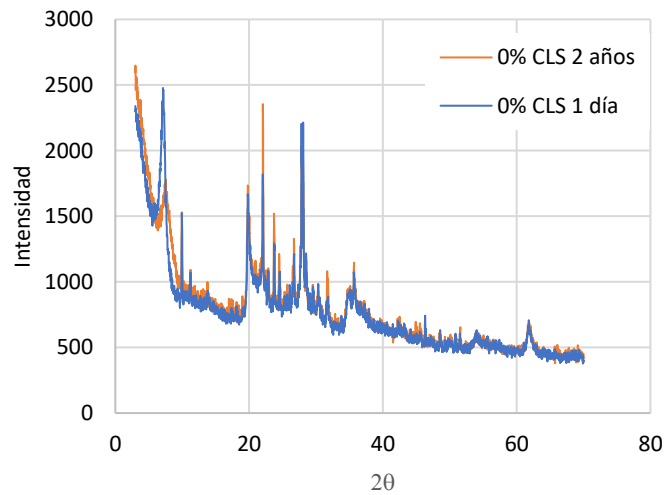
- a. 0%CLS de 1 día versus 2 años (Fig.4.78): los registros son iguales en cuanto a posición de los picos y perfil. Se muestra un incremento en el primer pico de la arcilla en  $2\theta=7.5$  el cual se reduce y desplaza levemente hacia la derecha. También un incremento en el segundo pico correspondiente a la plagioclasa.
- b. 3%CLS de 1 día versus 2 años (Fig.4.79): los picos coincidieron exactamente. No se presentaron zonas suavizadas ni picos ensanchados, ni desplazamientos a ángulos menores. No se observó redondeo en los picos de difracción, aunque si se observaron pequeños aumentos y reducciones en las intensidades que dada la constancia en el cambio a lo largo de todo el difractograma puede asociarse a un fenómeno de orientación preferente no a una alteración de la composición mineralógica de las muestras. Se observa el mismo decremento en el pico de la arcilla e incremento en el de la plagioclasa por influencia del tiempo.
- c. 10%CLS de 1 día versus 2 años (Fig.4.80): las mismas observaciones realizadas en cuanto a los picos en arcilla y plagioclasa de las Fig.4.78 y Fig.4.79 se observan para 10%CLS.

En los ensayos de DRX en los que se comparó la influencia del porcentaje de aditivo sobre muestras de la misma edad se pudo observar:

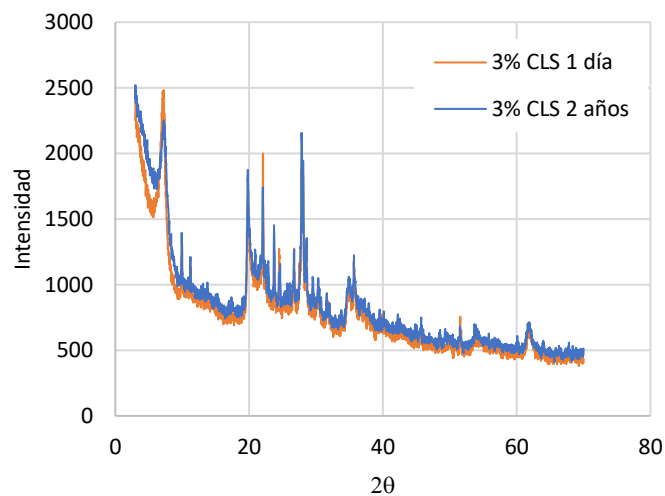
- a. 1 día y 0%, 3%, 10% CLS (Fig.4.81): los difractogramas presentan las mismas características en la posición de los picos, intensidad y perfil. Se observa una pequeña modificación en el primer pico correspondiente a la arcilla en  $2\theta=7.5$ .

b. 1 año y 5%, 7% CLS (Fig.4.82): los difractogramas presentan un nuevo pico en aproximadamente en el ángulo  $2\theta=52$  que no se observa en ninguna otra muestra. No pudo ser asociado a un nuevo mineral. Los difractogramas presenta una modificación constante en la intensidad que puede asociarse a un fenómeno de orientación preferente.

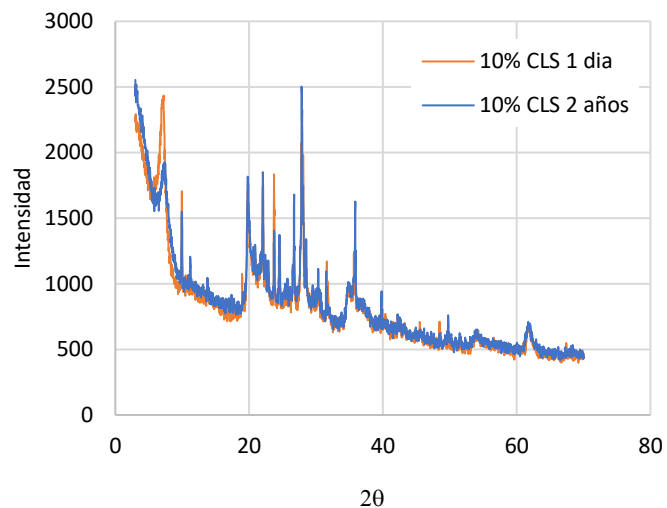
c. 2 años y 0%, 3%, 10% CLS (Fig.4.83): los difractogramas presentan la misma posición de los picos. Se observa una modificación en el primer pico correspondiente a las arcillas, la intensidad se modifica con el incremento en el porcentaje de CLS pero la intensidad es mayor para 3% comparada con la de 10%. En el pico correspondiente a las plagioclasas para 10%CLS,  $2\theta=22.5$ , se produce un incremento en la intensidad que coincide con el incremento en el porcentaje de CLS independientemente de la edad de la muestras (Fig.4.80, Fig.4.81, Fig.4.83).



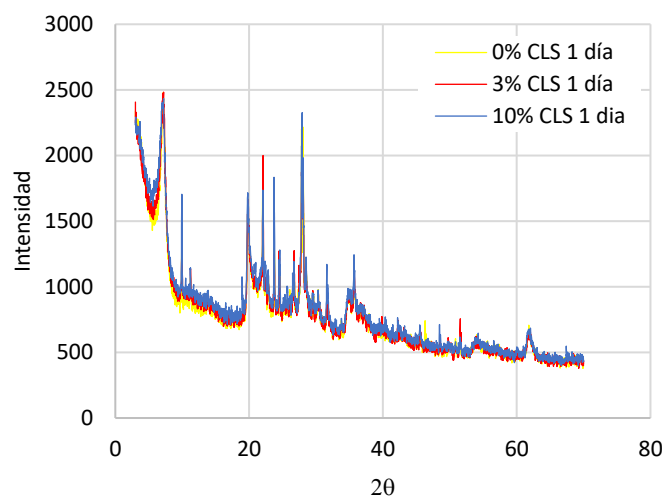
**Fig.4.78-** DRX sobre dos muestras con 0%CLS y diferente edad



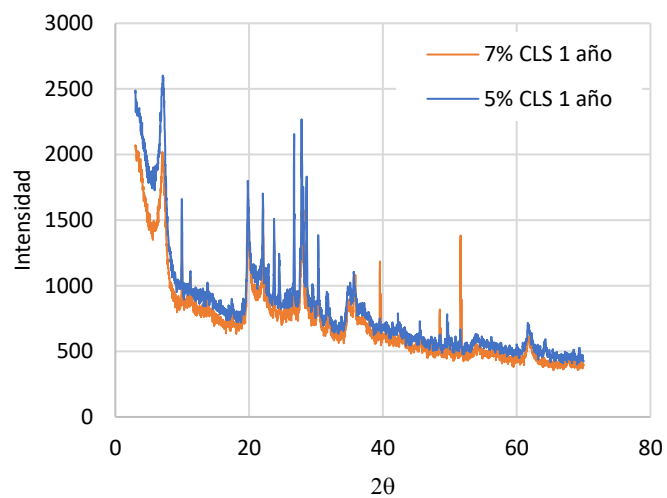
**Fig.4.79-** DRX sobre dos muestras con 3%CLS y diferente edad



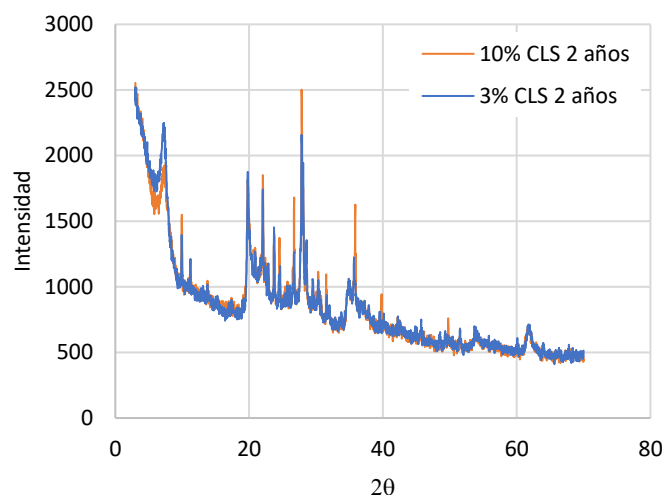
**Fig.4.80-** DRX sobre dos muestras con 10%CLS y diferente edad



**Fig.4.81-** DRX sobre dos muestras de 1 día y diferente porcentaje de CLS



**Fig.4.82-** DRX sobre dos muestras de 1 año y diferente porcentaje de CLS



**Fig.4.83-** DRX sobre dos muestras de 2 años y diferente porcentaje de CLS

En resumen, los difractogramas realizados sobre muestras remoldeadas de diferentes edades y contenidos de CLS presentan una pequeña variación en la intensidad del primer pico correspondiente a la arcilla. También presentan una pequeña variación en la intensidad de uno de los picos correspondientes a las plagioclasas. En uno de los difractogramas aparece un nuevo pico (muestra de 7%CLS-1año, Fig. 4.82, 2θ de 40 y 52) que no se muestra en ninguna de las restantes muestras, se asocia a impurezas que no han podido identificarse. Los pequeños cambios en la posición de dos de los picos, pequeños desplazamientos en el primer pico de la arcilla y en uno de los picos de la plagioclasa, podrían encontrarse asociados a cambios en los planos cristalográficos (separación cuando se desplazan hacia la derecha y acercamiento cuando se desplazan hacia la izquierda). Y los cambios en la intensidad de los picos (disminución en el primer pico de la arcilla e incremento en uno de los picos de la plagioclasa) y ensanchamiento de la base del pico estarían mostrando la variación del tamaño de los granos.

#### **b) POROSIMETRÍA POR INTRUSIÓN DE MERCURIO (MIP)**

La determinación y análisis de la porosimetría de las diferentes muestras remoldeadas permitió comparar las variaciones en las distribuciones de los tamaños de poros para diferentes porcentajes de CLS y diferentes edades. Los ensayos MIP fueron realizados para cuatro muestras con diferentes porcentajes de CLS y dos edades: 0%, 3%, 7% y 10%, 1 día y 1 año. Por falta de disponibilidad del equipamiento necesario para el ensayo se eliminó la serie de 5%CLS.

Entre las características analizadas se encuentran la distribución de la porosidad, las variaciones en muestras con el mismo porcentaje de aditivo y diferente edad, la influencia del

porcentaje de CLS sobre la distribución de poros, rangos de porosidad en los cuales realizar observaciones en los ensayos SEM.

Del análisis de las curvas de distribución de diámetros de poros obtenidas puede observarse que el suelo remoldeado compactado y el suelo mezclado con diferentes porcentajes de CLS presentan una distribución bimodal de poros. Dependiendo de la edad de la muestra y el porcentaje de CLS la distribución de los poros presenta dos picos, uno mayor y uno menor. Esta distribución bimodal es característica de suelos arcillosos compactados. Con la adición de CLS a la arcilla se observa en la Fig.4.84 que el pico correspondiente al tamaño de poro menor en muestras de 1 día de edad se desplaza desde  $0,3\mu\text{m}$  (0%CLS) a  $0,4\mu\text{m}$  (10%CLS) y el aumento en el tamaño de los poros es mayor cuanto mayor es el contenido de CLS. El pico más alto se presenta para 3%CLS. El segundo pico se desplaza también hacia tamaños mayores y crece en altura con el aumento del porcentaje de aditivo (Fig.4.84). También puede observarse que el volumen intruido es mayor al final de la prueba lo cual demuestra que la porosidad se ha incrementado (Fig.4.85) coincidiendo con la mayor permeabilidad obtenida en las probetas con CLS.

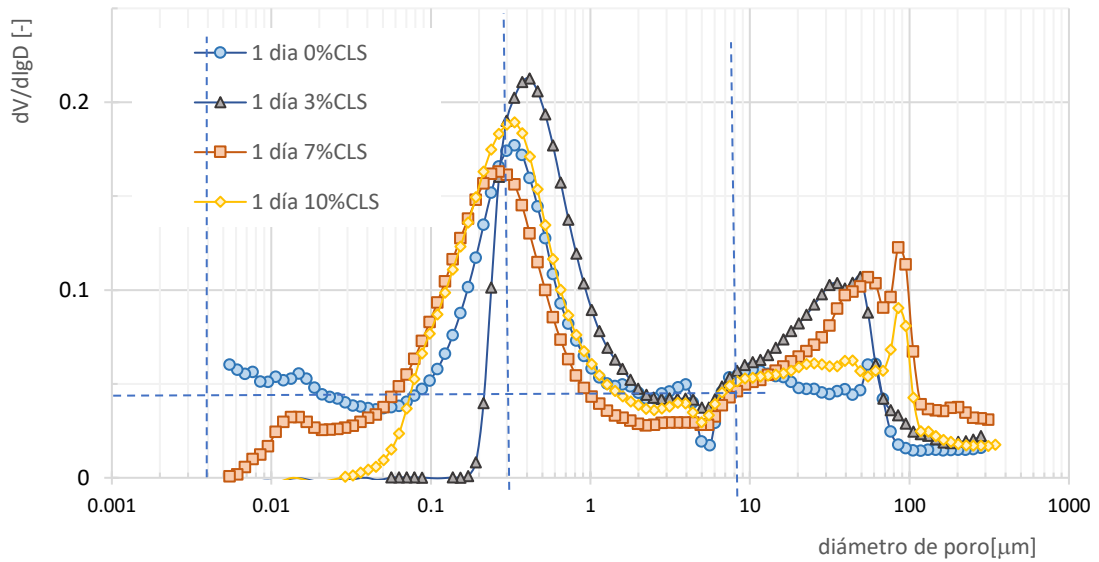
Para las probetas de 1 año, la probeta de arcilla compactada sin aditivo cambia completamente su distribución bimodal por una con un único pico situado en un diámetro de entre 10 y  $20\mu\text{m}$ , mientras que las probetas con aditivo, 3%, 7% y 10% presentan su pico en un diámetro entre 30 y  $40\mu\text{m}$ . El pico es más suave cuanto mayor es el porcentaje de aditivo (Fig.4.86) y el volumen intruido es mayor (entre 0,90 y 1,05, Fig.4.85) comparado con las probetas de 1 día (entre 0,70 a 0,72, Fig.4.85).

En la Fig.4.86 puede observarse claramente el cambio en la porosidad producida como consecuencia del tiempo sobre las probetas sin aditivo.

En la Fig.4.87 se puede comparar el comportamiento de probetas con 3%CLS a 1 día y 1 año. El primer pico correspondiente al diámetro de poros más pequeño solo se reduce pero no se modifica el diámetro preponderante. El segundo pico correspondiente al diámetro preponderante mayor aumenta en cantidad y se mantiene prácticamente en el mismo rango de magnitud.

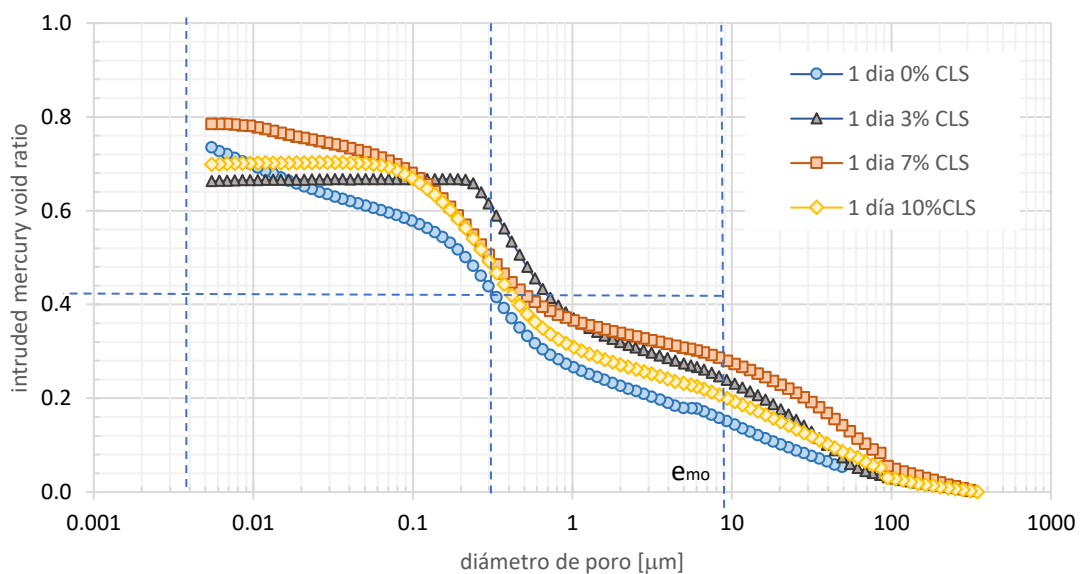
Para las mezclas con 7%CLS (Fig.4.88) y 10%CLS (Fig.4.89) los resultados son similares a los de 3%CLS. El primer pico de la curva bimodal de porosimetría decrece para 1 año comparado con 1 día. El diámetro del poro permanece prácticamente igual. El segundo pico de la curva bimodal se desplaza hacia la izquierda lo que muestra un decremento en el tamaño del poro con la edad. Este comportamiento también lo muestra la muestra sin CLS. Comparando los cuatro pares de curvas, correspondientes a diferentes porcentajes de CLS y diferentes edades, la adición de CLS modifica el diámetro de poros correspondiente al segundo pico (Fig.4.84) para la misma edad las muestras presentan un incremento en el diámetro de poros mayor. Con el incremento de la edad de las probetas los diámetros correspondientes al pico mayor se reducen. Un resumen de estos resultados se muestra

en la Tabla 4.19. El análisis del comportamiento está relacionado con los mecanismos de estabilización desarrollados entre CRclay y CLS.

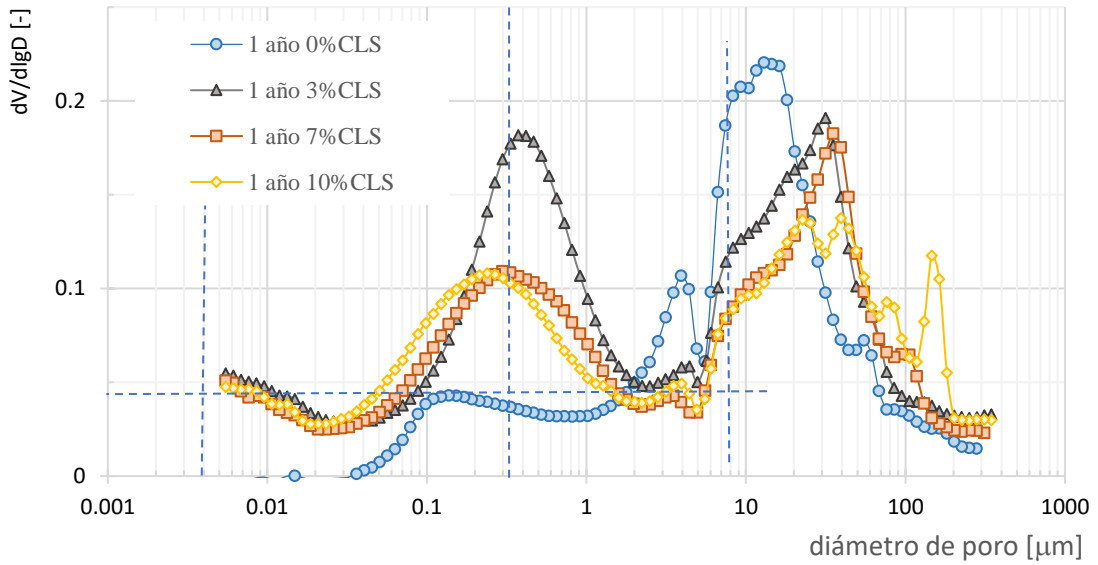


**Fig. 4.84-** Distribución de diámetros de poros para diferentes porcentajes de CLS y 1 día

En las curvas acumuladas los diámetros de poros con mayor ocurrencia se presentan como un quiebre en la pendiente que es mayor cuanto mayor es el porcentaje de ese diámetro (Fig.4.85 y Fig.4.87). En la curva correspondiente a 3%CLS puede observarse un error no detectado al realizar el ensayo sino en la etapa de interpretación y análisis, razón por la cual no fue posible repetirlo.



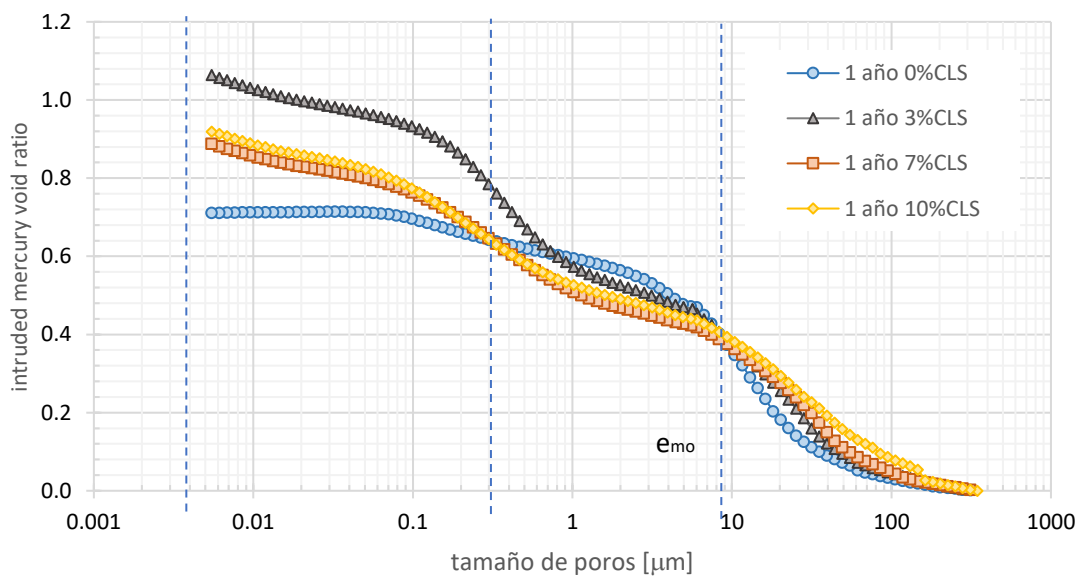
**Fig. 4.85-** Acumulado del volumen de mercurio inyectado para diferentes porcentajes de CLS y 1 día



**Fig. 4.86-** Distribución de diámetros de poros para diferentes porcentajes de CLS y 1 año

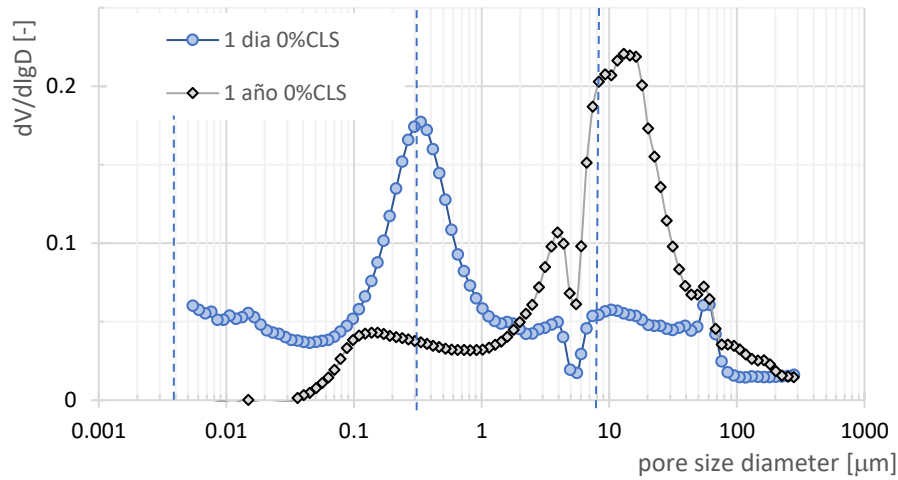
La relación de vacíos inicial o  $e_{mo}$  a la cual comienza a ingresar mercurio se encuentra en el orden de 0.15 a 0.29  $\mu\text{m}$  (Tabla 4.19 y Tabla 4.20). El valor más bajo es 0.15 y corresponde a CRclay sin CLS. La tendencia para las probetas de 1 día es a incrementarse con el incremento en el porcentaje de CLS. En cambio para las probetas de 1 año el valor de  $e_{mo}$  permanece prácticamente igual.

La relación de vacíos última o  $e_{mf}$  tanto para las muestras de 1 día y 1 año no puede observarse una tendencia clara en función del porcentaje de CLS de las muestras ni de la edad.

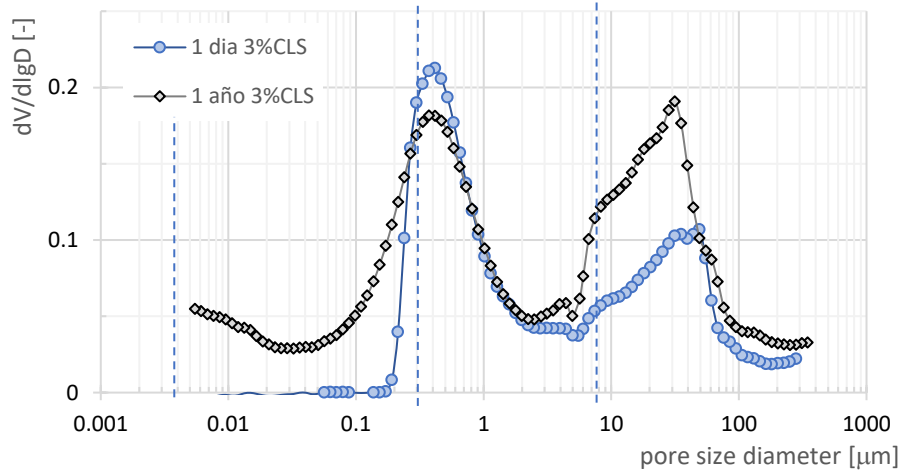


**Fig. 4.87-** Acumulado del volumen de mercurio inyectado para diferentes porcentajes de CLS y 1 año

En la curva correspondiente a 3%CLS (Fig.4.87) puede observarse un error no detectado al realizar el ensayo sino en la etapa de interpretación y análisis, razón por la cual no fue posible repetirlo.



**Fig. 4.88-** Comparación entre porosimetrías correspondientes a 1 día y 1 año con 0%CLS

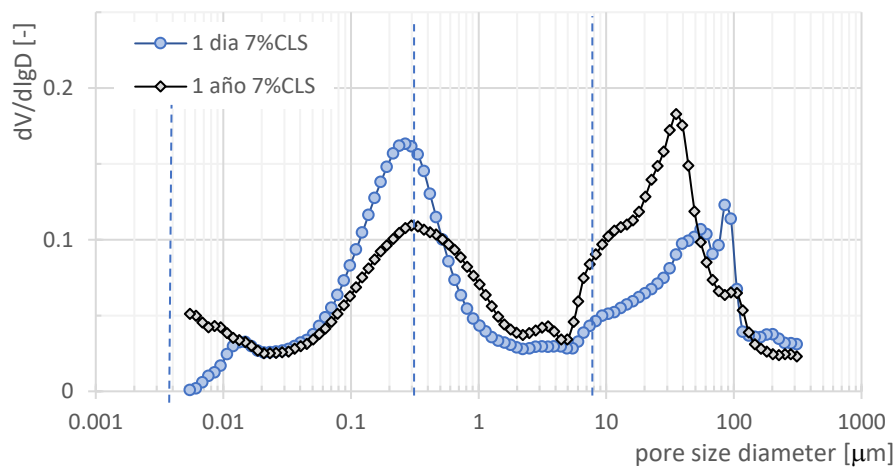


**Fig. 4.89-** Comparación entre porosimetrías correspondientes a 1 día y 1 año con 3%CLS

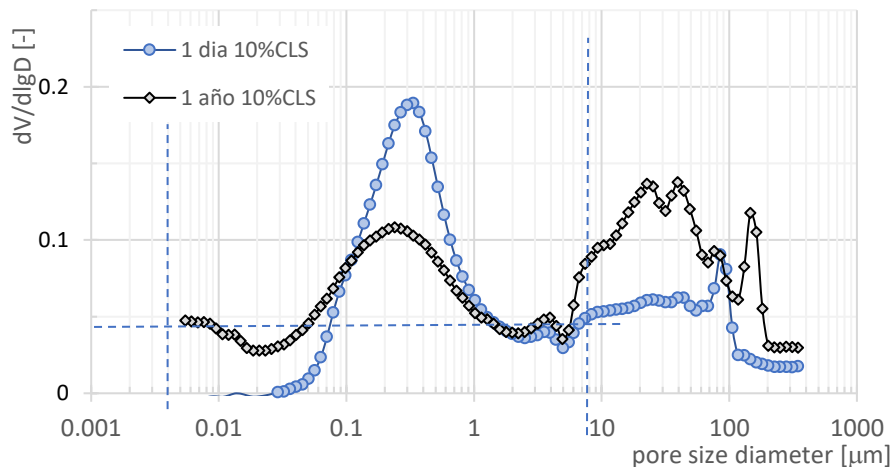
La interporosidad (porosidad entre agregados de partículas) se incrementa para las muestras de un año respecto a las de 1 día, mientras que la intraporosidad (porosidad dentro de los agregados de partículas) se reduce para las muestras de un año respecto a las de 1 día. Esto puede deberse a la redistribución de las moléculas bipolares de agua en la masa de CRclay y CLS, ambos con potencial Z negativo alto. El CLS empleado como aditivo es hidrofílico a diferencia del empleado por Alazigha (2015) el cual es hidrófugo. Todo este análisis coincide con las observaciones realizadas por Lloret (2003) y Delage (2007) sobre muestras compactadas de arcillas fuertemente expansivas en las que se demostró se presenta una distribución bimodal de la porosidad.

Las Fig.4.90 y Fig.4.91 muestran el descenso del primer “pico” (intraporosidad) en las curvas de volumen inyectado versus tamaño de poro, y el ascenso en el volumen inyectado en el segundo “pico” (interporosidad). Esto muestra un cambio claro en la distribución de las partículas consecuencia de la reagrupación de partículas en agregados cuya intraporosidad disminuye e interporosidad se incrementa. En la

Empleando los datos que surgen del análisis de las porosimetrías puede evaluarse la evolución de algunos de los parámetros en función de la edad de las probetas y del porcentaje de CLS.



**Fig. 4.90-** Comparación entre porosimetrías correspondientes a 1 día y 1 año con 7%CLS



**Fig. 4.91-** Comparación entre porosimetrías correspondientes a 1 día y 1 año con 10%CLS

**Tabla 4.19-** Resultados obtenidos de las porosimetrías para diferentes contenidos de CLS y diferentes edades de las muestras.

CLS %	edad [días]	Volumen total intruido ml/g	Diámetro de poros medio (Volumen) = μm	Diámetro de poros medio (Área) = μm	Diámetro de poro promedio(4V/A) = μm	n %	e equipo -	e calculada -	eHg (para valor medio de porosidad) -
0	1	0.2721	0.423	0.0106	0.064	49.47	0.98	0.73	0.22
3	1	0.2456	1.6384	0.5705	1.7557	37.07	0.59	0.66	0.30
7	1	0.2907	0.6671	0.0246	0.1469	45.89	0.85	0.79	0.33
10	1	0.2588	0.6478	0.2121	0.4764	40.74	0.69	0.70	0.24
0	365	0.2631	10.0323	0.2132	1.4998	40.14	0.67	0.71	0.59
3	365	0.3967	1.8963	0.0102	0.1061	57.03	1.33	1.07	0.50
7	365	0.3289	3.421	0.01	0.1005	52.37	1.10	0.89	0.46
10	365	0.3405	3.7341	0.0105	0.0979	69.55	2.28	0.92	0.49

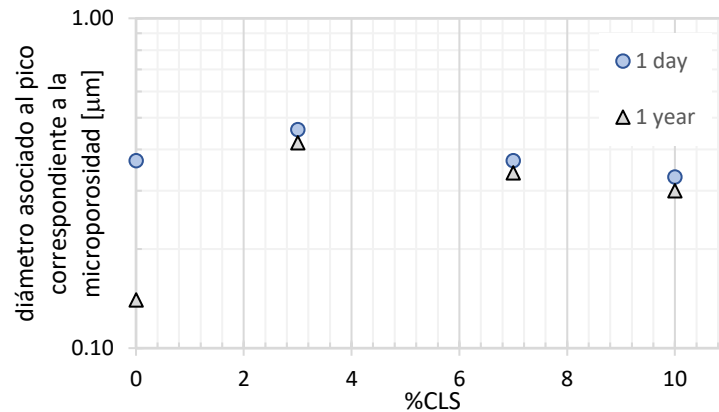
(\*) los valores de e se ven influenciados fuertemente por el número de decimales de los parámetros empleados para su obtención. Para ajustar estos valores se requiere de un alto número de decimales los cuales no fueron empleados por el grado de precisión con el que se trabaja en la determinación de estos.

**Tabla 4.20-** Resultados obtenidos de las porosimetrías para diferentes contenidos de CLS y diferentes edades de las muestras.

CLS %	edad [días]	eintrap. -	porcentaje de eintrap %	peso de la muestra empleada g	pico1	pico2	nequipo	ncalculado	emo	emf
0	1	0.51	70	0.8707	0.37	11.63	49.47	42.35	0.15	0.73
3	1	0.36	55	1.5524	0.46	49.24	37.07	39.87	0.24	0.66
7	1	0.46	58	1.3273	0.37	85.07	45.90	43.98	0.28	0.79
10	1	0.46	66	1.4969	0.33	85.10	40.74	41.13	0.2	0.7
0	365	0.12	17	1.4119	0.14	14.51	40.14	41.56	0.38	0.71
3	365	0.57	53	0.9322	0.42	31.55	57.03	51.71	0.39	1.05
7	365	0.43	48	1.0701	0.34	35.28	52.37	47.03	0.38	0.91
10	365	0.43	47	0.78	0.30	39.40	69.55	47.90	0.4	0.91

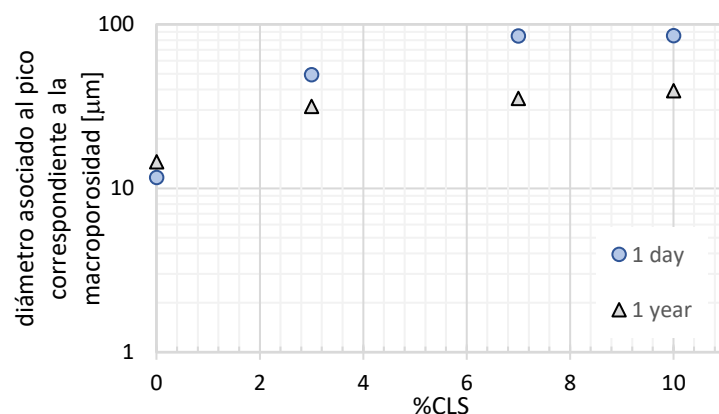
En Fig.4.92 puede observarse que se presenta un cambio en el diámetro asociados al pico correspondiente a la microporosidad. Este cambio puede asociarse a la redistribución de la humedad dentro del suelo compactado, desde los macroporos hacia los microporos provocando la reducción del diámetro de los macroporos. Observando las distribuciones en los poros del segundo pico (Fig.4.93) se

muestra un incremento coincidente con el aumento en el porcentaje de aditivo, que se presenta en las probetas de 1 día y se sostiene al año.



**Fig. 4.92-** Diámetros de poros de menor tamaño que presentan mayor concentración en la curva de distribución de poros bimodal para diferentes porcentajes de %CLS

Mediante el estudio de las curvas de distribución de tamaños de poros estamos en condiciones de seleccionar las escalas en que debemos analizar y observar la microestructura durante los ensayos SEM. Debe considerarse que los valores de la presión de intrusión se convierten directamente en el tamaño de poro correspondiente mediante la ecuación de Washburn, sin embargo, debe considerarse que la porosimetría de mercurio no mide realmente el tamaño de poro interno, sino que determina la mayor conexión (garganta o canal de poro) desde la superficie de la muestra hacia ese poro.



**Fig. 4.93-** Diámetros de poros de mayor tamaño que presentan mayor concentración en la curva de distribución de poros bimodal para diferentes porcentajes de %CLS

### c. POROSIMETRÍA POR ADSORCIÓN DE NITRÓGENO (BET)

La porosimetría BET (Brunauer-Emmett-Teller en cuya teoría se fundamenta la obtención de parámetros a través de este ensayo) realizadas sobre muestras con todos los porcentajes de CLS,

permitieron realizar el análisis del efecto de la adición del CLS a CRclay en la microestructura. El método se basa en la adsorción o en la desorción física de moléculas de un gas (generalmente nitrógeno aunque también puede emplearse CO<sub>2</sub> o hidrocarburos) distribuidas sobre la superficie del material en estudio. Conocida la superficie que ocupa una molécula del gas empleado es posible determinar la superficie de las partículas del suelo sobre las que se distribuye el gas en forma de monocapa.

Este método permite obtener de forma indirecta diferentes propiedades del material en estudio, como la superficie específica, el diámetro de poros, y el tamaño de las partículas, todos ellos conforman la caracterización de la textura porosa del sólido. En la Tabla 4.21 se presentan los resultados de esas propiedades obtenidas empleando diferentes métodos de análisis, por ejemplo BET, BJH, t-plot, entre otros.

Kuila & Prasad (2013) presentan en su artículo la comparación, limitaciones y aplicación de las técnicas BEY y MIP para la obtención de los parámetros relacionados con la porosidad.

Características como la rugosidad de las partículas, la distribución bimodal o mono modal de la porosidad, forma de las partículas, y permeabilidad, influyen en los resultados obtenidos y su representatividad. Empleando los datos compilados en la Tabla 4.2 se obtuvieron las figuras que analizan la evolución en función del porcentaje de aditivo.

La Fig.4.94 muestra los valores de la superficie específica obtenida empleando tres técnicas diferentes las cuales utilizan la información que surge de la técnica BET: Langmuir, BET, método de un punto.

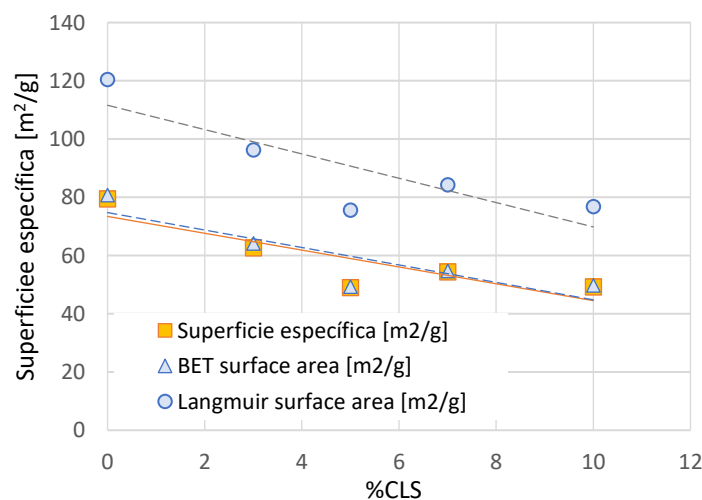
La fig. 4.95 presenta los resultados del tamaño promedio de partículas, la Fig. 4.96 presenta los resultados del tamaño promedio de poros y la Fig.4.97 el volumen de poros máximo todos ellos en función del porcentaje de aditivo.

**Tabla 4.21-** Datos obtenidos de los ensayos BET para todos los porcentajes de CLS.

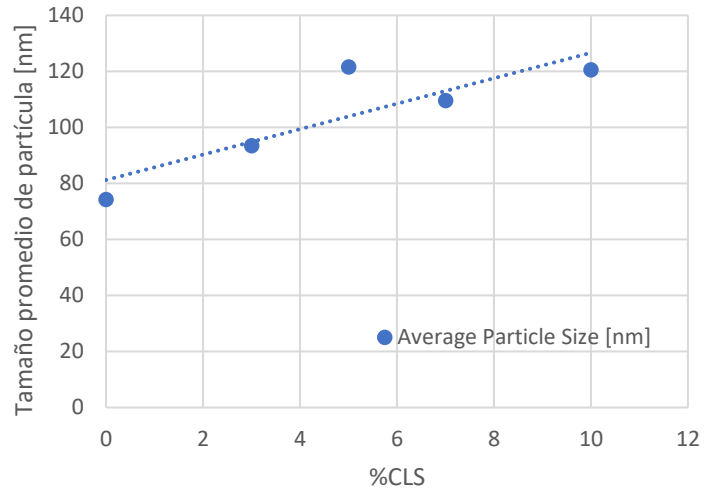
		0%CLS	3%CLS	5%CLS	7%CLS	10%CLS
Superficie específica	Superficie específica [m2/g]	79.5196	62.6419	48.9922	54.4159	49.2563
	Superficie específica BET [m2/g]	80.7815	64.1539	49.3204	54.7628	49.7732
	Superficie específica Langmuir [m2/g]	120.4885	96.2732	75.6727	84.3068	76.8109
	Area de microporos t-Plot [m2/g]	11.1128	3.2205	1.1558	1.2411	0.0538
	Superficie específica externa t-plot [m2/g]	69.6688	60.9334	48.1646	53.5217	49.7194
	BJH Superficie específica acumulada de poros en adsorción para diámetros entre 1,7nm y 300nm [m2/g]	56.9057	49.7746	38.6838	42.4757	40.0401
	BJH Superficie específica acumulada de poros en desorción para diámetros entre 1,7nm y 300nm [m2/g]	74.2959	67.2557	53.6518	58.4471	57.6183
Volumen de poros	Volumen total de poros por el método de un único punto en adsorción para diámetros menores que 198,2144 nm para $p/p^{\circ} = 0,990242875$ [cm3/g]	0.090358	0.072543	0.052199	0.058253	0.063964
	Volumen total de poros por el método de un único punto en desorción para diámetros menores que 108,0409 nm para $p/p^{\circ} = 0,981906814$ [cm3/g]	0.09174	0.074125	0.056382	0.062488	0.065995
	Volumen total de microporos por el método t-Plot [cm3/g]	0.005539	0.001315	0.00077	0.000926	0.000221
	Volumen de poros acumulado por el método BJH en adsorción para diámetros de poros entre 1,7000 nm and 300,0000 nm [cm3/g]	0.078525	0.066336	0.04732	0.052523	0.060665
	Volumen de poros acumulado por el método BJH en desorción para diámetros de poros entre 1,7000 nm and 300,0000 nm [cm3/g]	0.08467	0.07206	0.059835	0.068096	0.066384
Tamaño de poros	Diámetro de poros promedio en adsorción (4V/A by BET) [nm]	4.4742	4.523	4.2334	4.255	5.1404
	Diámetro de poros promedio en desorción (4V/A by BET) [nm]	4.5426	4.6217	4.5727	4.5643	5.3036
	BJH diámetro de poros promedio em absorción (4V/A) [nm]	5.5196	5.3309	4.893	4.9462	6.0605
	BJH diámetro de poros promedio en desorción (4V/A) [nm]	4.5585	4.2857	4.461	4.6604	4.6086
Tamaño de nanopartículas	Tamaño promedio de partículas [nm]	74.2744	93.5251	121.6534	109.5634	120.5468
	Volumen de poros máximo a $p/p^{\circ}$ [cm3/g]	0.031199	0.023748	0.018499	0.020617	0.01852
	Ancho promedio de poros (Horvath-Kawazoe) [nm]	1.507	1.5051	1.509	1.509	1.5109

La información refleja el impacto del empleo de CLS sobre las propiedades de CRclay:

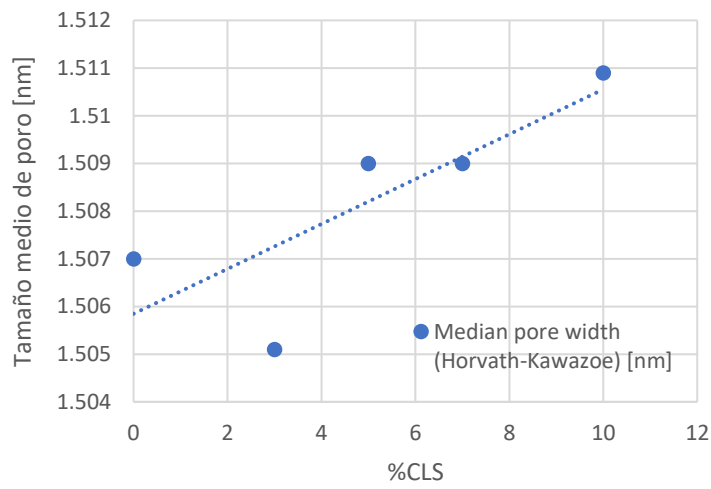
- Comparando los resultados obtenidos en diferentes etapas del ensayo se observa la reducción de la superficie específica con el incremento del porcentaje de aditivo. Dos de los métodos arrojan resultados similares, en tanto que otro, a pesar de dar valores superiores, muestra que la superficie específica decrece con el aumento del porcentaje de CLS incorporado.
- La superficie y el volumen de los microporos muestra una tendencia decreciente, lo cual parecería indica un acomodamiento en la estructura del suelo. Esta tendencia parece presentarse tanto en la etapa de adsorción como en la de desorción de Nitrógeno.
- La tendencia general del volumen de poros es a reducirse debido a la agrupación de partículas y aumento del tamaño medio de los poros.
- El tamaño de las partículas se incrementa con el incremento de porcentaje de CLS lo cual, asociado a la reducción de la superficie específica, indica tanto el cambio en la estructura del suelo como la agregación de partículas de arcilla que reduce la intraporosidad y aumenta la interporosidad.
- Las curvas que se obtuvieron en adsorción y en desorción, que representan diámetro promedio de poro versus volumen acumulado de poros sigue la misma tendencia: el volumen de diámetros menores decrece mientras que el volumen de diámetros mayores crece con el agregado de CLS.
- Las curvas no indican la distribución bimodal de la porosidad mostrada en los ensayos MIP debido a la escala dentro de la cual se realiza este ensayo: 1.7 nm a 300 nm. En las porosimetrías MIP se trabaja en el rango entre 1mm a 3,6 nm, encontrándose los picos de las curvas en el orden de 0.1 a 1  $\mu\text{m}$  y 50 a 70  $\mu\text{m}$ .



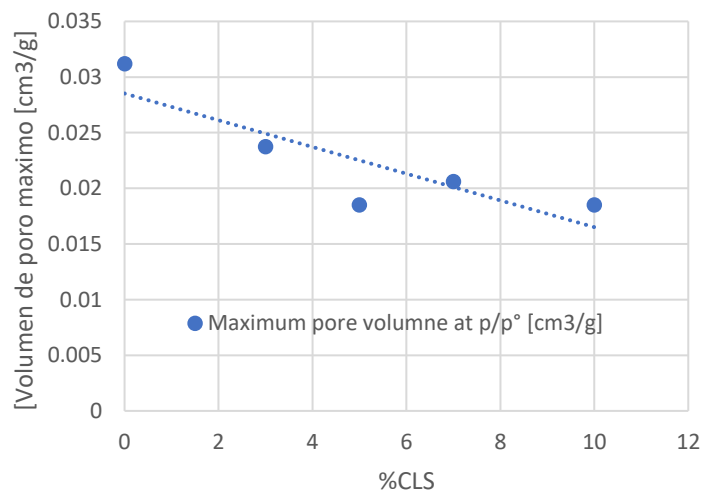
**Fig.4.94-** Superficie específica de las partículas obtenida mediante BET en función del porcentaje de CLS



**Fig.4.95-** Tamaño promedio de partículas obtenida mediante BET en función del porcentaje de CLS



**Fig.4.96-** Tamaño promedio de poro obtenido mediante BET para diferentes porcentajes de CLS



**Fig.4.97-** Volumen de poro máximo obtenido mediante BET para diferentes porcentajes de CLS

#### **d. MICROSCOPIA DE BARRIDO ELECTRONICO (SEM)**

Los ensayos de microscopía de barrido electrónico fueron realizados en el laboratorio LAMARX (UNC). Las muestras fueron analizadas y comparadas siguiendo el siguiente criterio:

- Muestras de igual edad y diferente contenido de CLS:
  - 0%CLS-1día vs 3%CLS-1día,
  - 1%CLS-1día vs 10%CLS-1 día,
  - 5%CLS-1año vs 7%CLS-1año.
  
- Muestras de diferente edad y contenidos similares de CLS:
  - 3%CLS-1día versus 5%CLS-1año,
  - 10%CLS-1día vs 7%CLS-1año.
  
- Todo el rango de contenidos de CLS y dos de las edades del rango de muestras ensayadas en el proyecto: 0%, 3%, 5%, 7% y 10%; 1 día y 1 año.

El criterio de análisis incluía comparar porosimetría bimodal y sus cambios, tamaño y forma de las partículas, la distribución y agrupamiento de las partículas, el desarrollo de nuevas estructuras e identificación de elementos no convencionales.

Las imágenes de las Fig.4.98 y Fig.4.99 corresponden a una muestra de 0%CLS-1día. Las principales características observadas en estas imágenes:

- La microporosidad puede observarse en las Fig. 4.98-a, b, c, d y Fig.4.99-a, b dentro del rango determinado por medio de la porosimetría de mercurio, esto es 0.1mm a 1  $\mu$ m. La denominada porosidad intraparticular es la predominante, con pequeña ocurrencia de poros de mayor tamaño sin prevalencia de un tamaño específico. Es visible la distribución bimodal de la porosimetría, característica típica de las arcillas.
  
- En escalas del orden de 1 $\mu$ m y menores es posible distinguir estructuras constituidas por lamelas (Fig.4.98- d, e, f, Fig.4.99- d, e).
  
- La estructura general es homogénea, con algunas concentraciones puntuales de sulfato de calcio de forma esférica con diámetros de 5  $\mu$ m aproximadamente (Fig.4.100- a, b, c, d). Recordemos que del análisis de sales presentes en CRclay, los sulfatos se encuentran en gran proporción relacionados directamente con el origen marino del suelo. La estructura encontrada coincide con una de las formas en las que se presentan los sulfatos en los suelos.

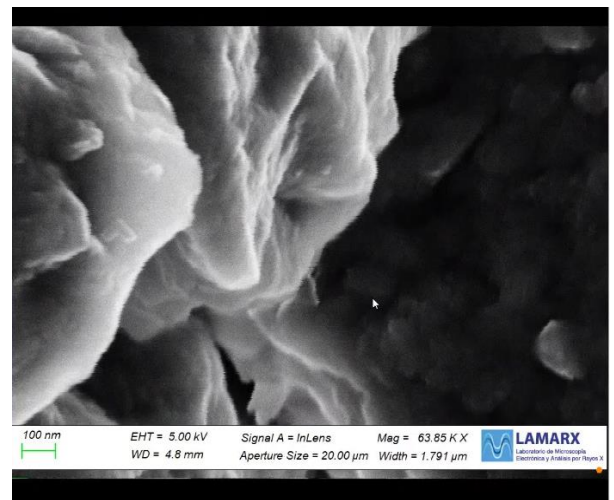
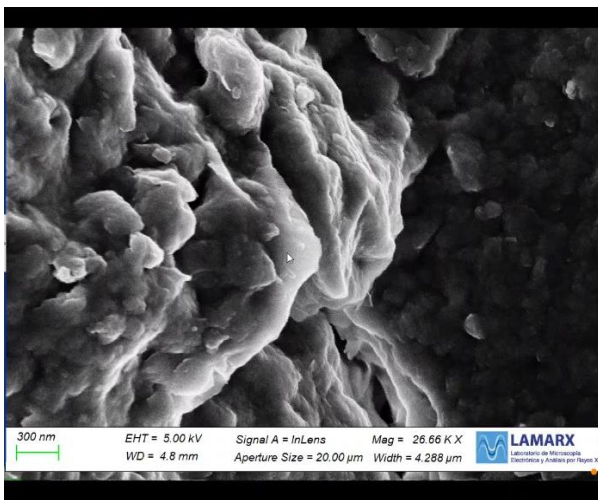
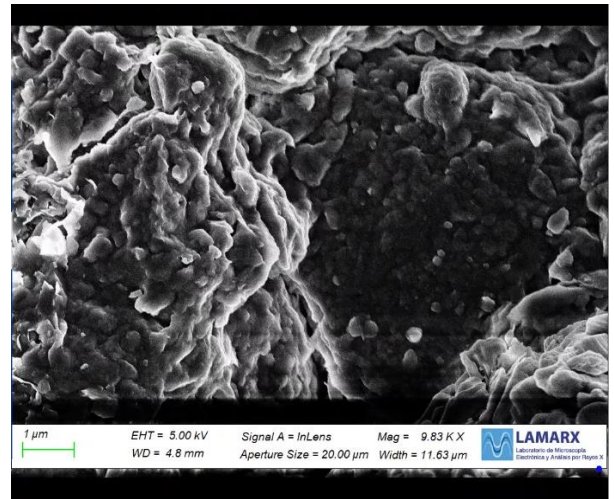
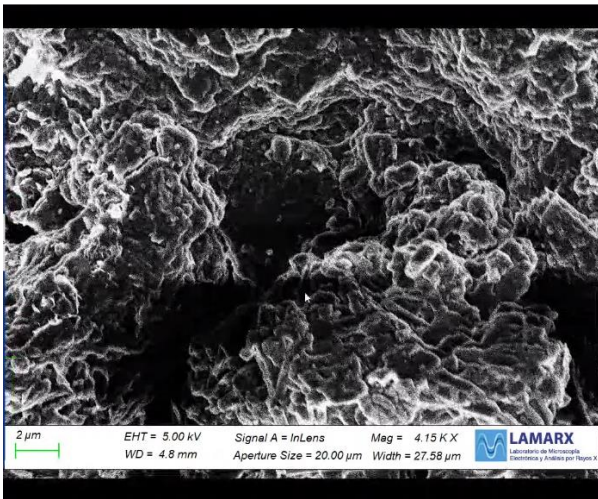
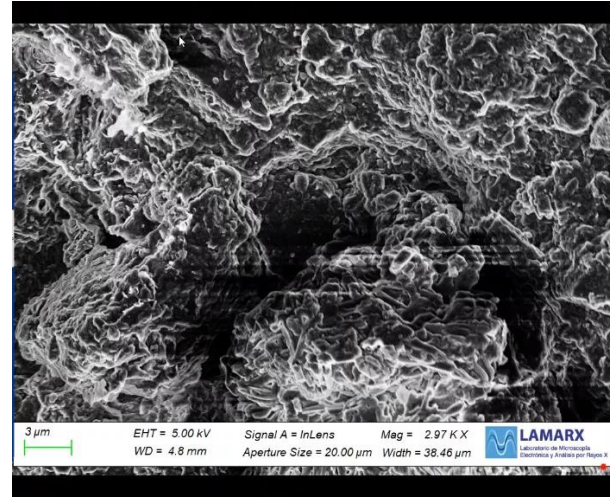
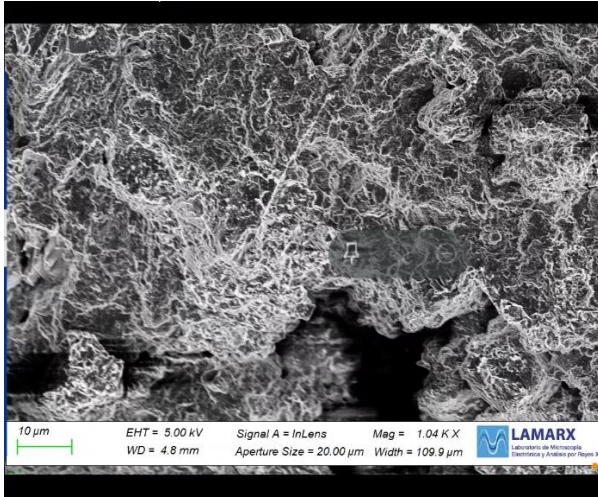
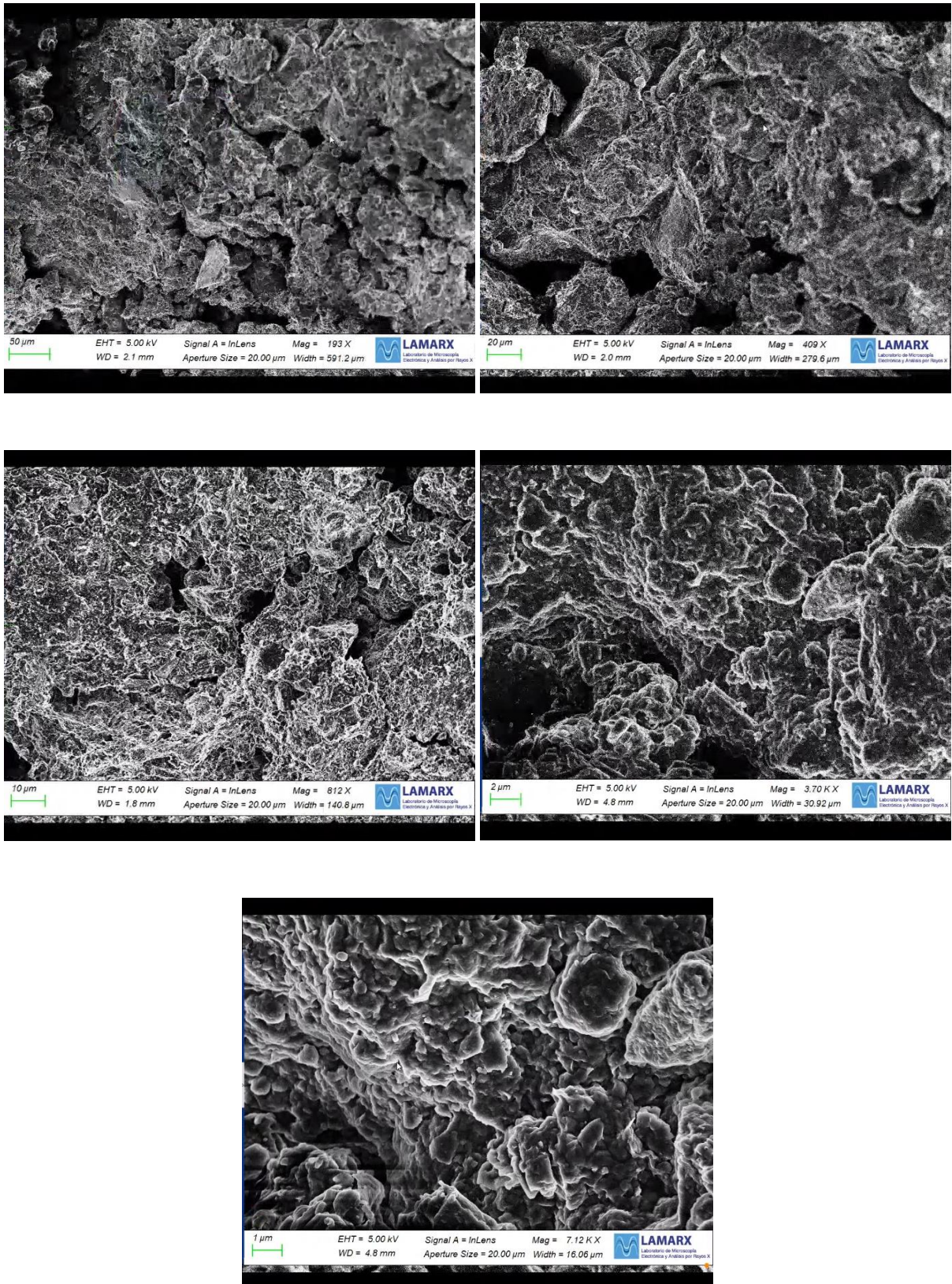


Fig.4.98 a, b, c, d, e, f- Secuencia de imágenes obtenidas con el SEM en escalas entre 10μm y 1μm para 0%CLS-1día

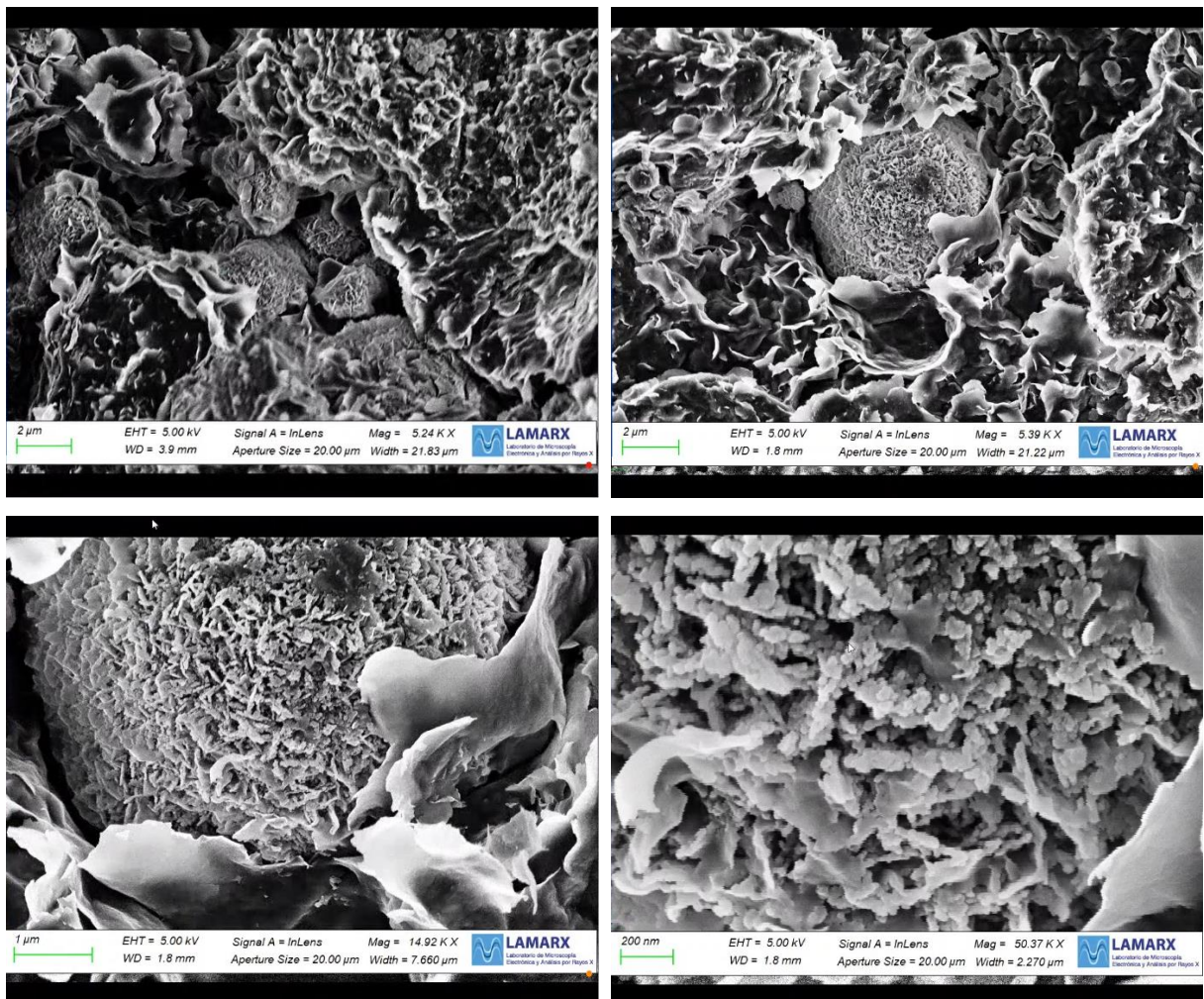


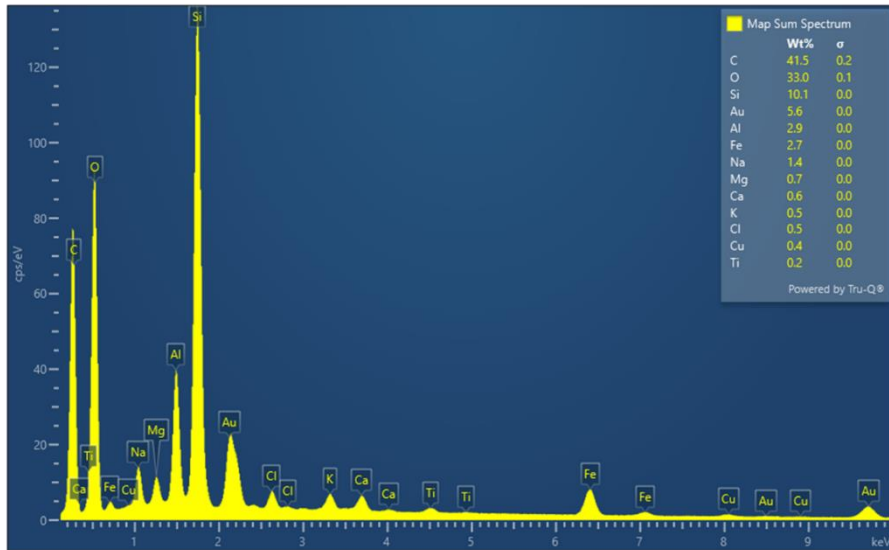
**Fig.4.99 a, b, c, d, e-** Secuencia de imágenes obtenidas mediante el SEM en escalas entre 50 $\mu\text{m}$  y 1 $\mu\text{m}$ . Para 0%-1día

Se realizaron tres mapeos de elementos sobre dos de las muestras: 0%CLS-1día (Fig.4.101), 10%CLS-1día (Fig.4.120), y sobre un elemento longilíneo (Fig.4.114) encontrado generalmente en las muestras con CLS, el elemento examinado y analizado se encontró específicamente en la muestra 7%CLS-1año. Debe recordarse que la dispersión que poseen los resultados obtenidos por mapeo de elementos es del orden del 10%. En la esquina superior derecha de las imágenes propias de los mapeos puede observarse el listado de los elementos y sus correspondientes porcentajes.

Del análisis de las imágenes (Fig.4.100) puede observarse:

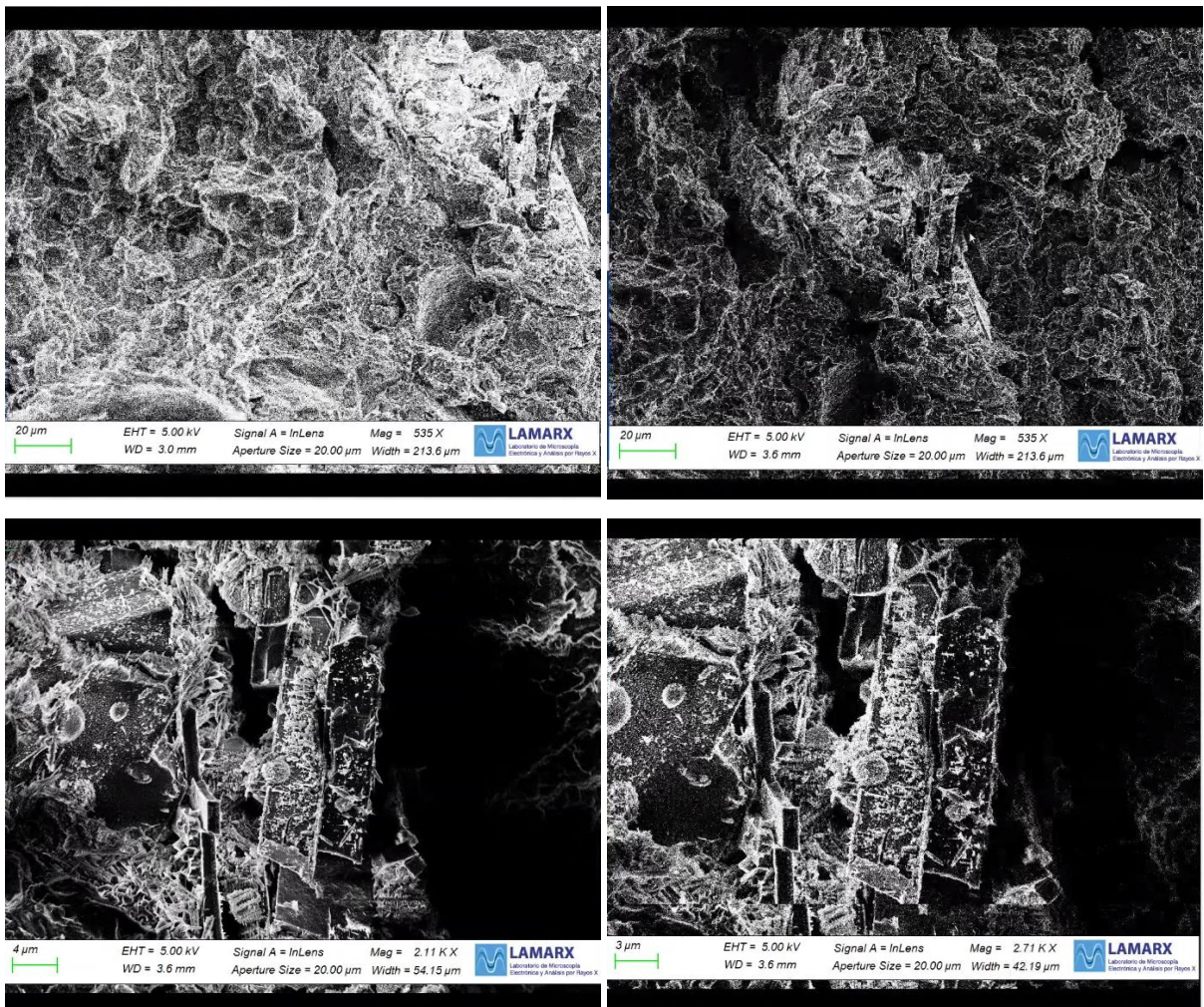
- Estructura y apariencia a gran escala similar a la muestra de 0%CLS-1día;
- Formaciones cristalinas similares a sales en la arcilla natural;
- Estructuras con forma longilínea, que se desintegraban al incidir el haz de electrones





**Fig.4.101-** Imagen obtenida del mapeo de elementos mediante SEM para muestra CRclay-1 día

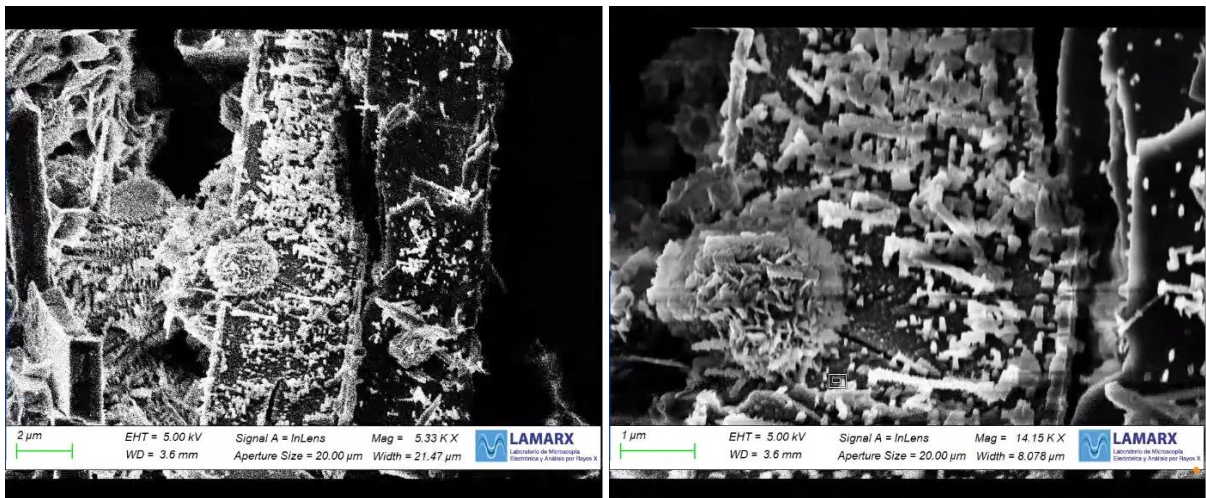
Las imágenes siguientes (Fig.4.102, Fig.4.103, Fig.4.104, Fig.4.105) corresponden a la muestra 3%CLS-1día.



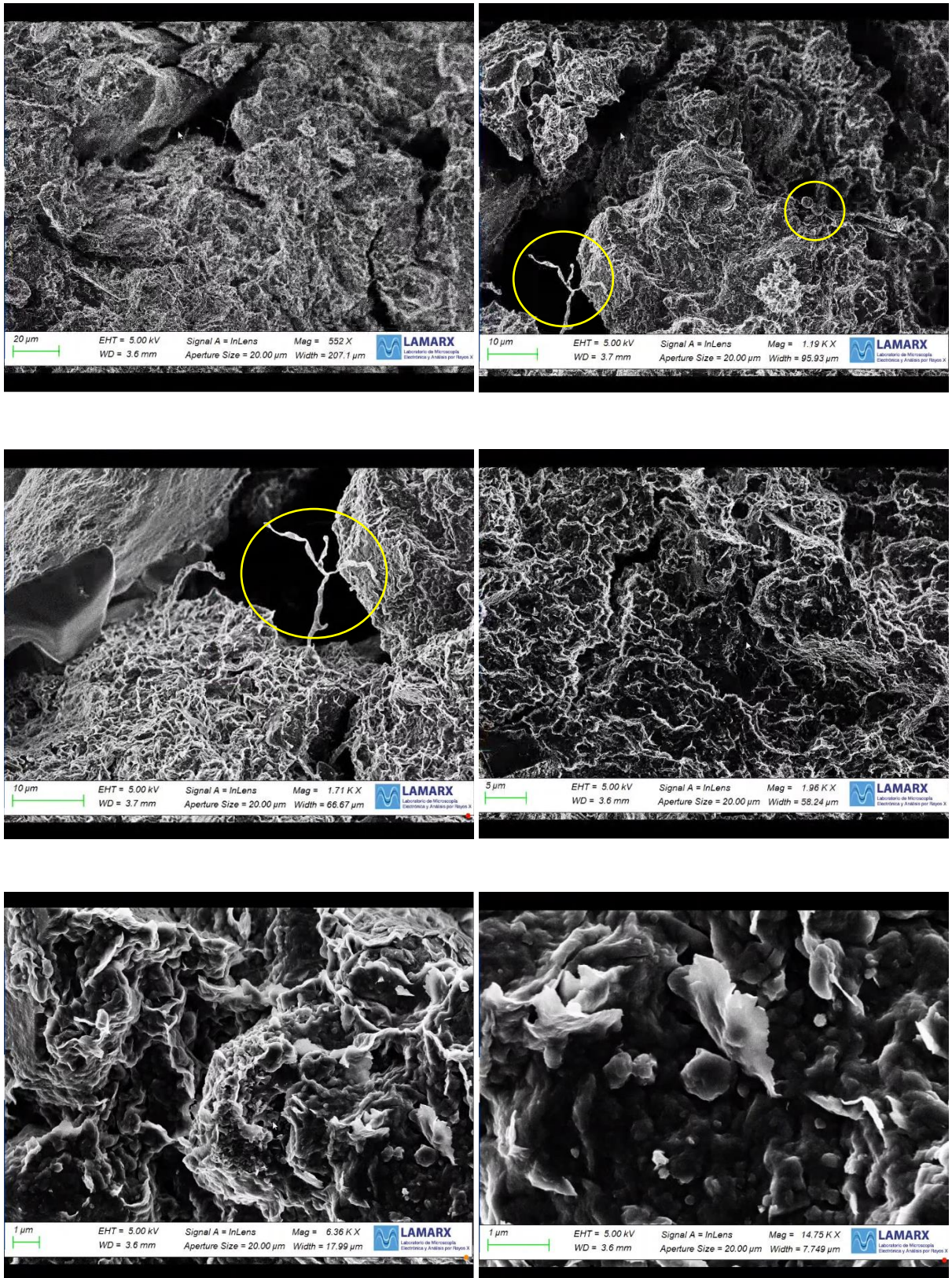
**Fig.4.102. a, b, c, d.** Imágenes obtenidas mediante el SEM en escalas entre 20μm y 1μm, concentración de SO<sub>4</sub>Ca de forma esférica y cristales. Muestra 3%CLS-1día

Del análisis de las imágenes puede observarse:

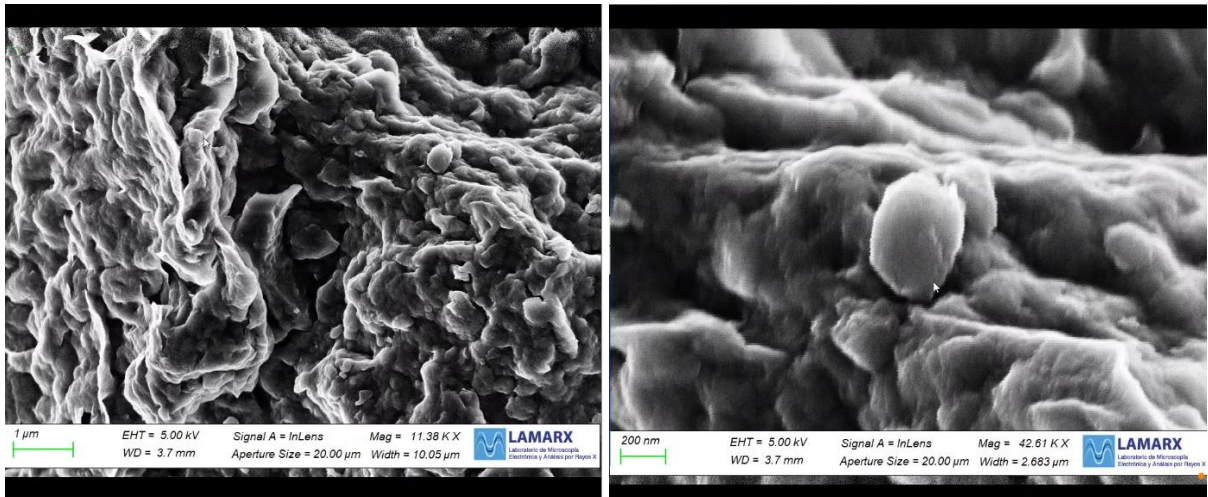
- Estructura y apariencia a gran escala similar a la muestra de 0%CLS-1día;
- Formaciones cristalinas similares a sales en la arcilla natural;
- Elementos con forma longilíneas, que se desintegraban al incidir el haz de electrones;
- Pequeña cantidad de dos tipos de estructuras: una ovoide con una hendidura longitudinal y otro cuya superficie era visualmente espinosa. La búsqueda bibliográfica de estas formas coincide con esporas aisladas e identificadas en muestras de suelo por Nour El Dein et al. (2019). Corresponden a la clasificación Spora Thinghirensis S10 y Spora Lienomycini 5C;
- Partículas laminares o lamelas que conforman la arcilla (Fig.4.86. f) visibles e identificables en la imagen 6000X y 17000X;
- Interporosidad (Delage et al., 2015) e intraporosidad. La apertura de los interporos presenta un pico en  $50\mu\text{m}$  (Fig.4.106, Imagen 500X). En tanto que la máxima concentración de apertura de intraporos se encuentra en  $0,5\mu\text{m}$  (Fig.4.107, Imagen 6000X y 15000X). Esto coincide con los resultados obtenidos empleando la porosimetría de mercurio (MIP).



**Fig.4.103- a, b.** Imágenes obtenidas mediante el SEM en escalas entre  $20\mu\text{m}$  y  $1\mu\text{m}$ , concentración de  $\text{SO}_4\text{Ca}$  de forma esférica y cristales. Muestra 3%CLS-1día

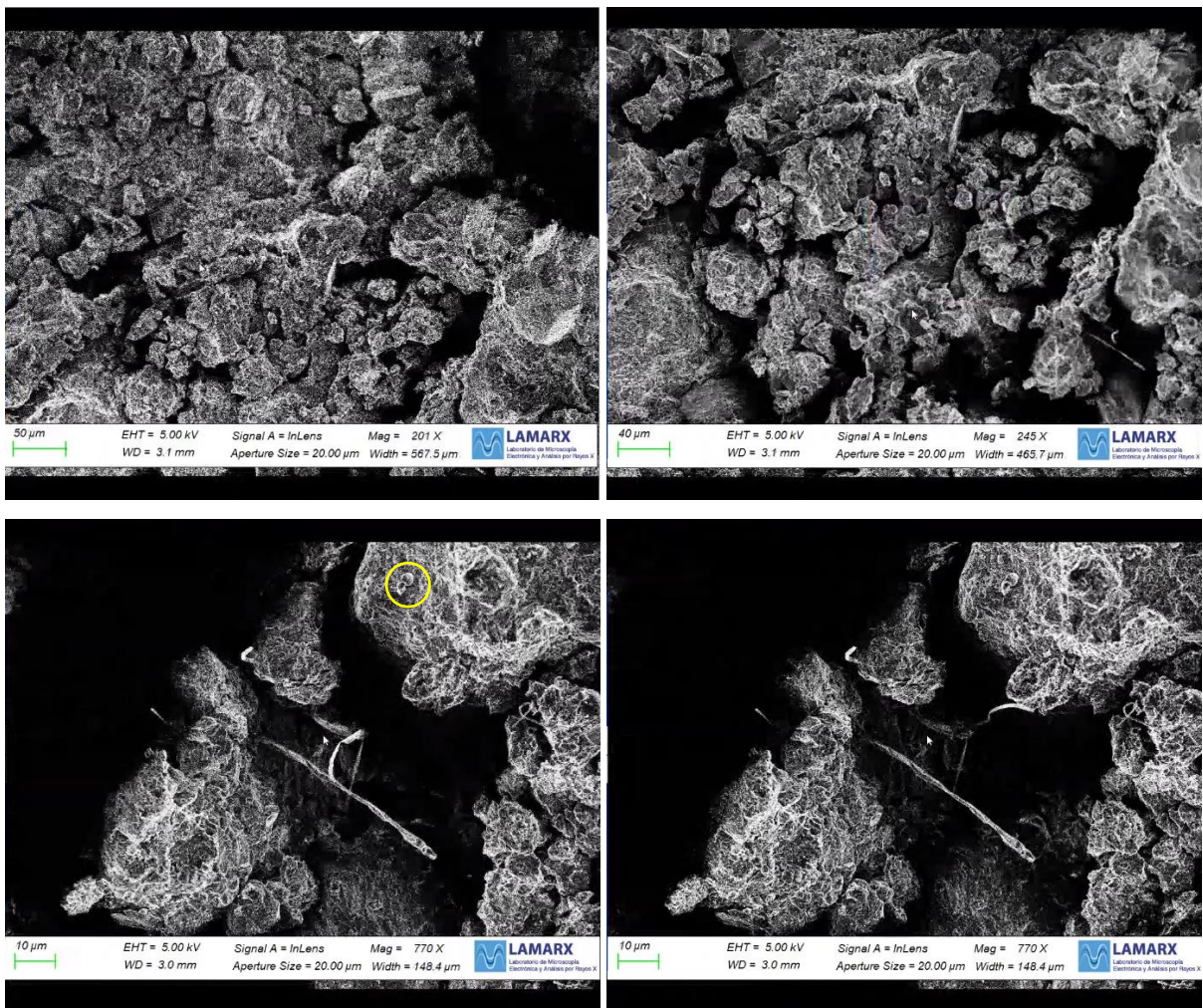


**Fig.4.104- a, b, c, d, e, f-** Imágenes obtenidas mediante el SEM en escalas entre 20 $\mu\text{m}$  y 5 $\mu\text{m}$ , observación de inter e intraporosidad. Esporas de *S. Thinghirensis* S10. Muestra 3%CLS-1dia

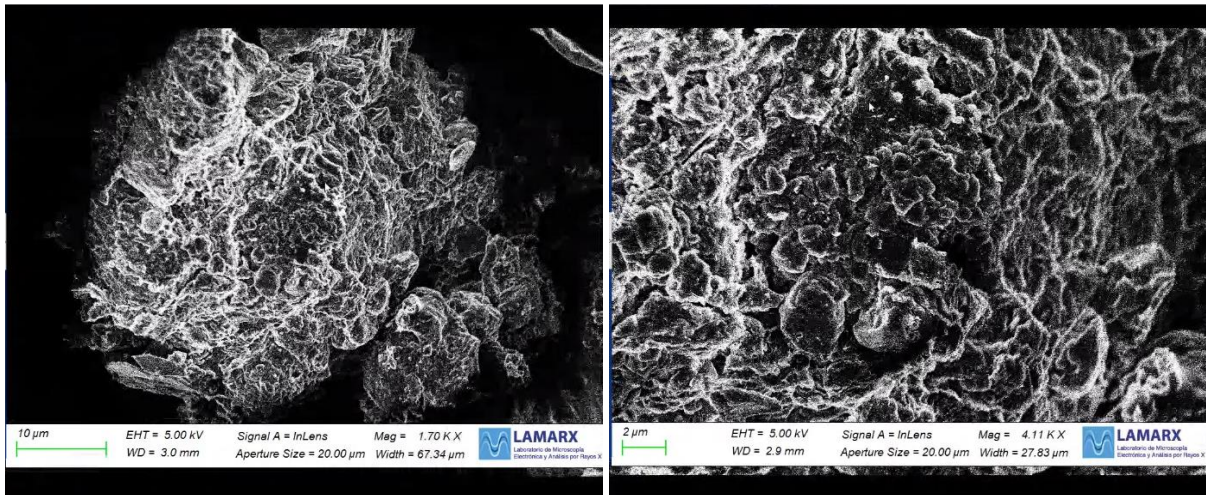


**Fig.4.105- a, b.** Imágenes obtenidas mediante el SEM en escalas entre 20μm y 200nm, observación de inter e intraporosidad. Esporas de *S. Thinghirensis* S10. Muestra 3%CLS-1dia

Las siguientes imágenes corresponden a la muestra de 5%CLS-1año.



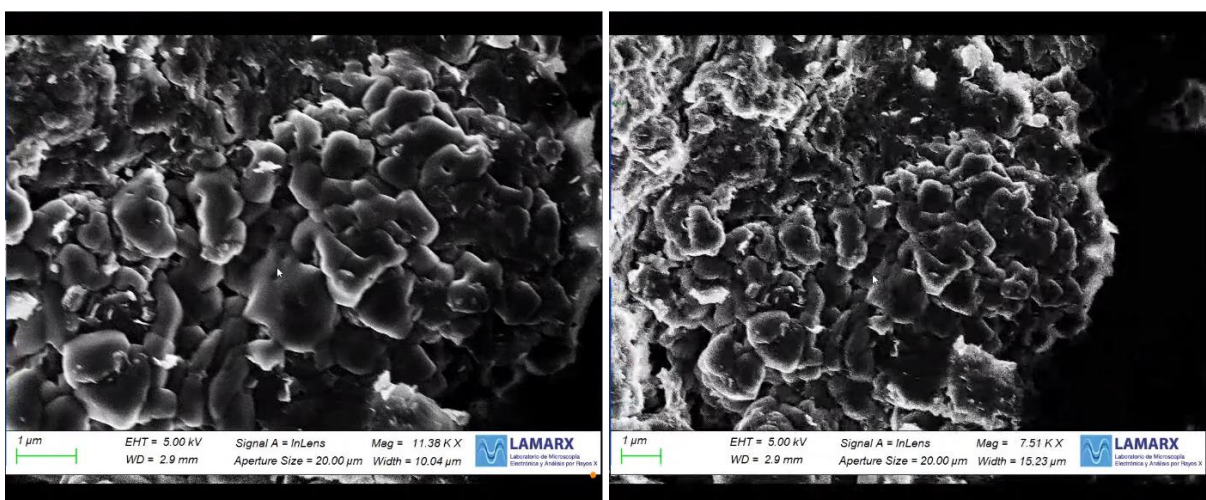
**Fig.4.106. a, b, c, d.** Estructura de la muestra en general, fibras, esporas S10 y 4F. Muestra 5%CLS-1año. Forma longilínea que se degrada al incidir el haz de electrones



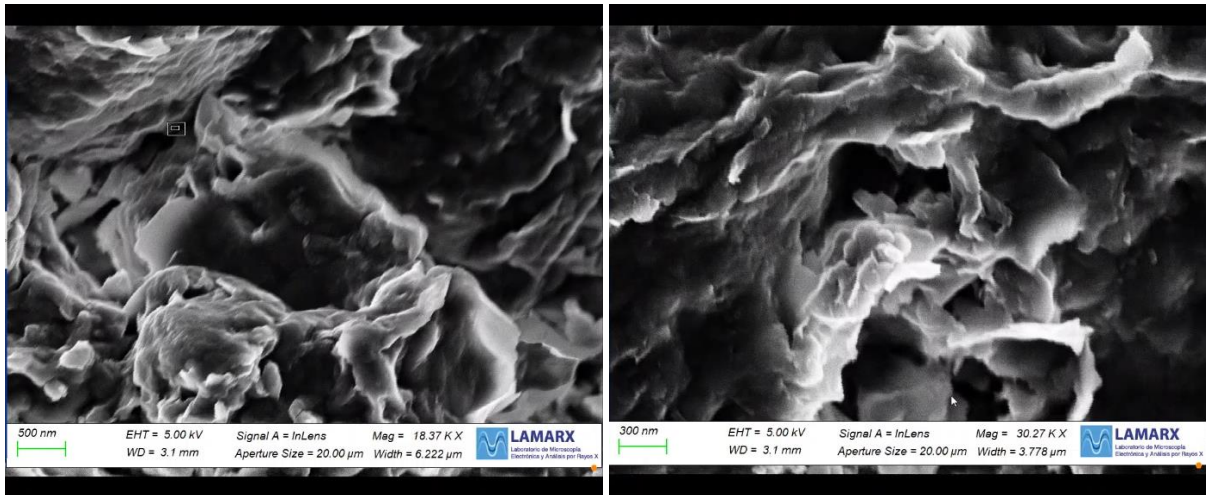
**Fig.4.107. a, b.** Estructura de la muestra en general, fibras, esporas S10 y 4F. Muestra 5%CLS-1año

Del análisis de las imágenes (Fig.4.106, Fig.4.107, Fig.4.108, Fig.4.109) 5%CLS-1año se observa:

- Estructura y apariencia a gran escala diferente a la muestra de 0%CLS-1día.
- Aparente incremento en la interporosidad (Fig.4.106.a, b y Fig.4.107.a);
- Intraporosidad visible importante (Fig.4.108.a, b);
- No se detectaron formaciones cristalinas que puedan asociarse a formaciones salinas o concentración de sales;
- Formas longilíneas (Fig.4.106. c, d). Estas dos imágenes consecutivas capturaron el proceso de degradación de una de estas estructuras;
- Pequeña cantidad de estructuras ovoides Spora Thinghirensis S10 (Fig.4.106. c);
- Partículas laminares o lamelas que conforman la arcilla en sectores reducidos. La estructura general a menor escala se presenta con formas más redondeadas o suavizadas (Fig.109.a, b).



**Fig.4.108. a, b.** Estructura de la muestra en general 5%CLS-1año

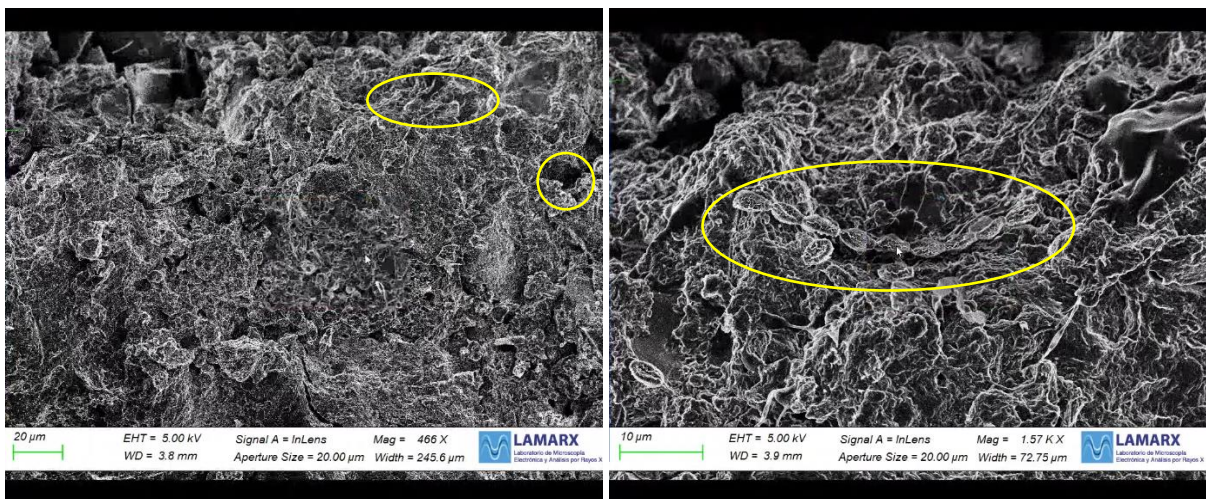


**Fig.4.109. a, b.** Estructura de la muestra en general 5%CLS-1año

Las siguientes imágenes corresponden a la muestra 7%CLS-1año.

Las principales características que se pueden observar:

- Estructura y apariencia a gran escala diferente a la muestra sin aditivo;
- Se observa un aparente incremento en la interporosidad (Fig.4.110) y decremento en la intraporosidad (Fig.4.110);
- No se detectaron formaciones cristalinas que puedan ser asociadas con sales;
- Formas longilíneas en mayor cantidad (Fig.4.111 y Fig.4.112);



**Fig.4.110. a, b.** Estructura de la muestra en general, fibras, esporas S10 y 4F. Escala entre 20μm y 1μm.

Muestra 7%CLS-1año

- Gran cantidad de formas ovoides reconocidas como Spora Thinghirensis S10 y Spora Lienomycini 4F, presentadas en cadenas. Estas cadenas poseen una apariencia envejecida comparada con las estructuras presentes en las muestras de un día de edad (Fig.4.111);

– No es posible detectar partículas laminares o lamelas que conforman la arcilla. La estructura general a menor magnitud se presenta en formas totalmente redondeadas o suavizadas diferenciándose radicalmente de la de la arcilla sin aditivo (Fig.112).

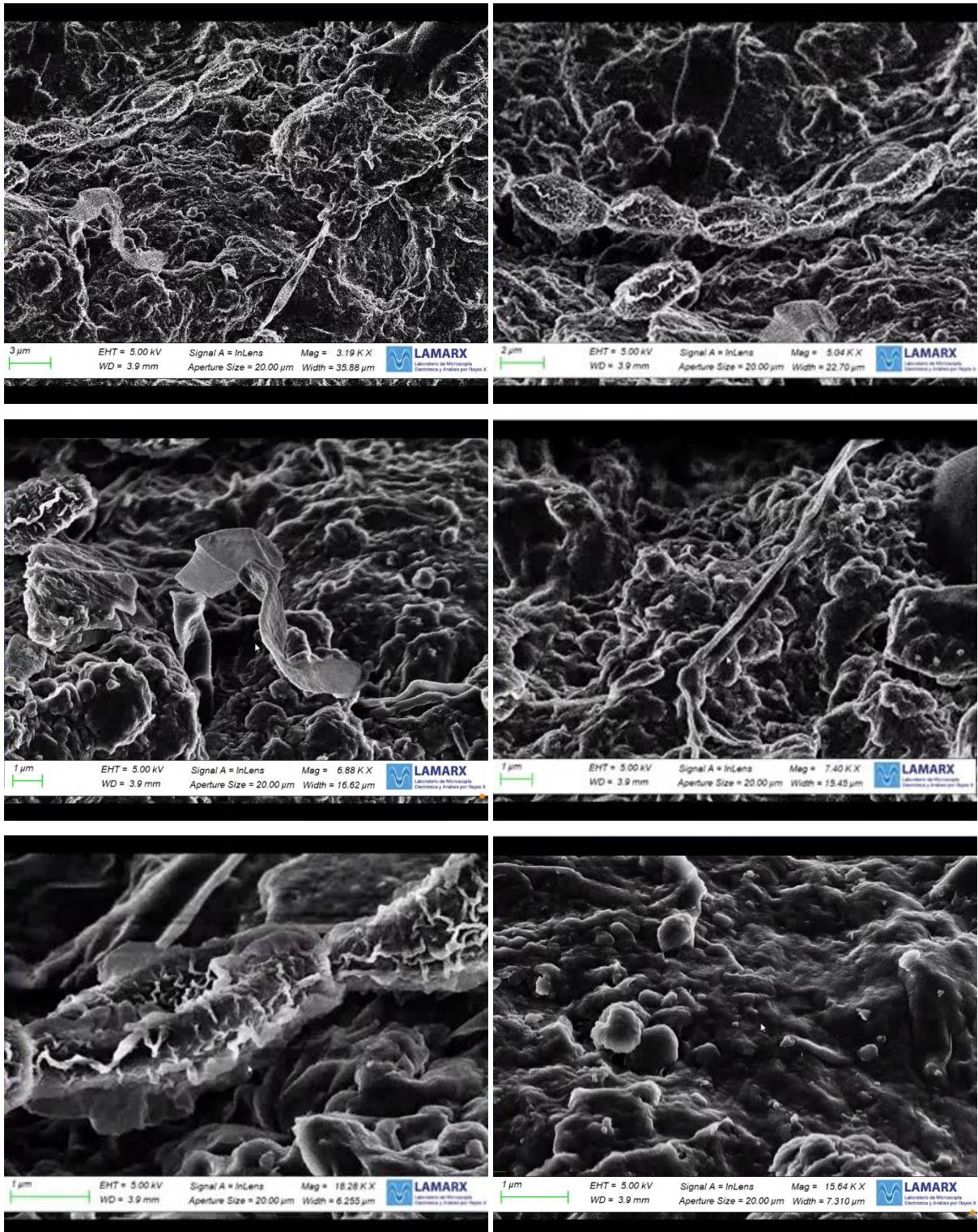
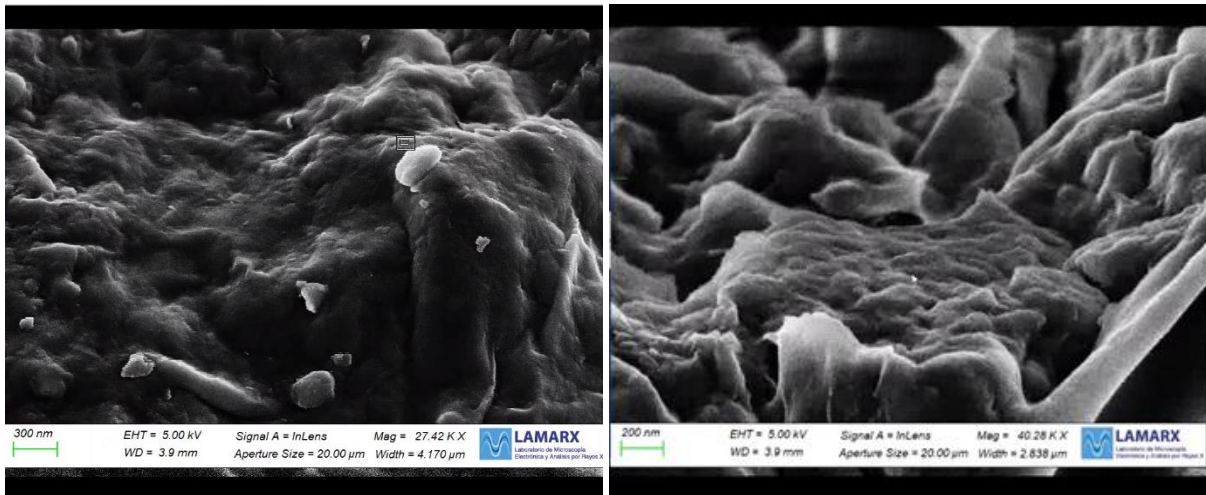
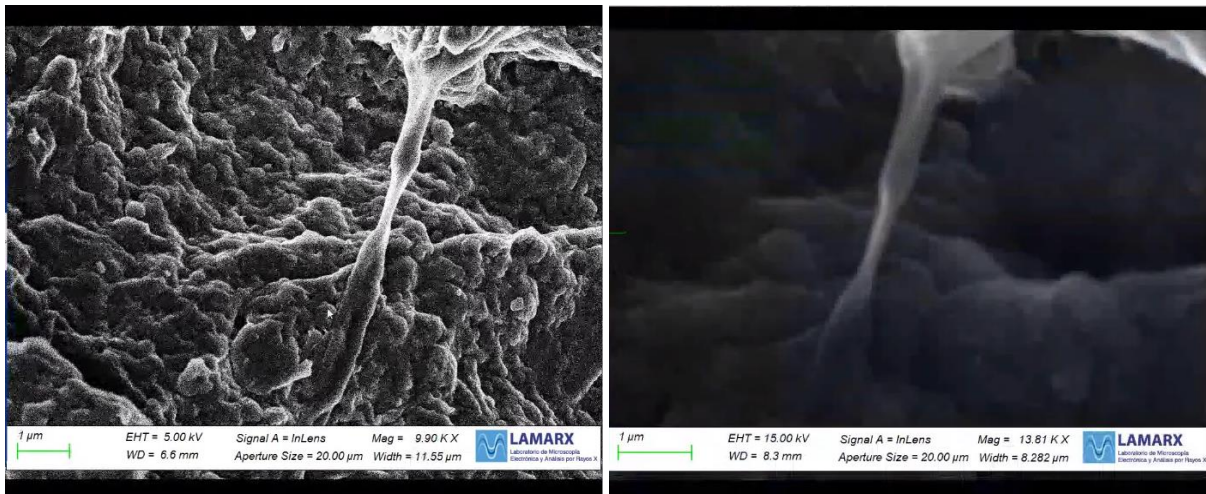


Fig.4.111. a, b, c, d, e, f. Estructura de la muestra en general, fibras, esporas S10 y 4F. Escala entre 20μm y 1μm. Muestra 7%CLS-1añ



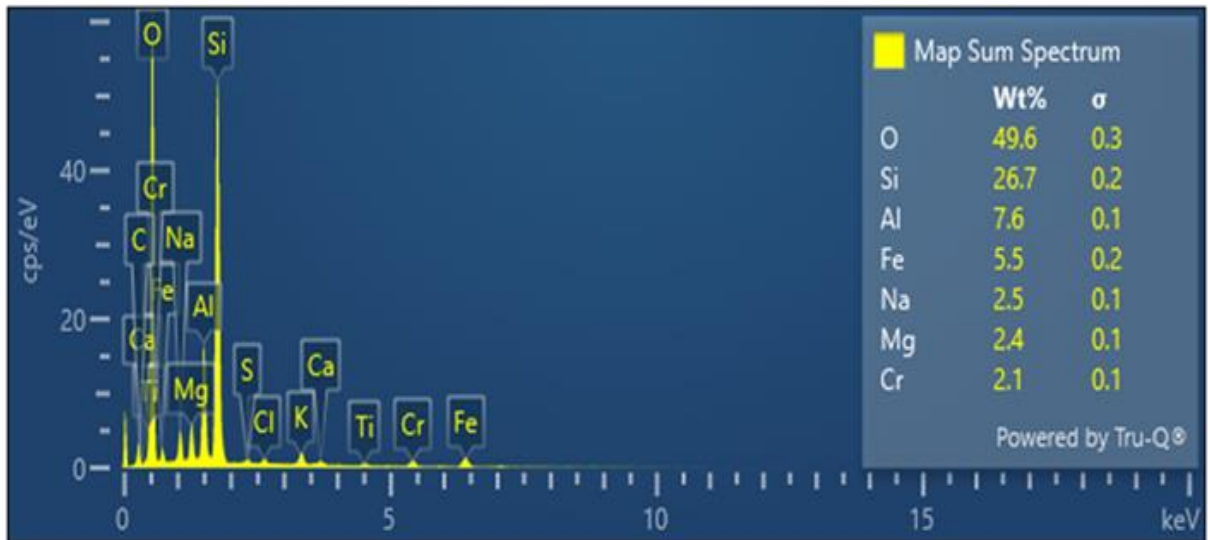
**Fig.4.112- a, b.** Formas redondeadas. Muestra 7%CLS-1año

Se seleccionó una de las estructuras longilínea encontradas y se realizó un mapeo de elementos. Los elementos detectados resultaron ser los mismos y en proporciones muy similares a los componentes de la muestra de 10%CLS-1dia. Dada la interferencia del medio en el que se encuentra inmersa la estructura resulta difícil obtener información sin considerar que el haz no solo incide sobre la fibra sino también sobre lo que se encuentra detrás de ella.



**Fig.4.113-a, b.** Forma longilínea seleccionada para realizar el mapeo de elementos. Muestra 7%CLS-1año

En la Fig.4.113-a, b se observa la forma sobre la cual se realizó el mapeo de elementos y la misma forma analizada durante el mapeo. Este tipo de estructura se observó en las diferentes muestras pero visualmente la cantidad se incrementó con el aumento en el contenido de CLS. No fue posible identificar y/o caracterizar su composición. No fueron observadas muestras de CLS en estado puro con las cuales comparar la existencia de este tipo de formas.



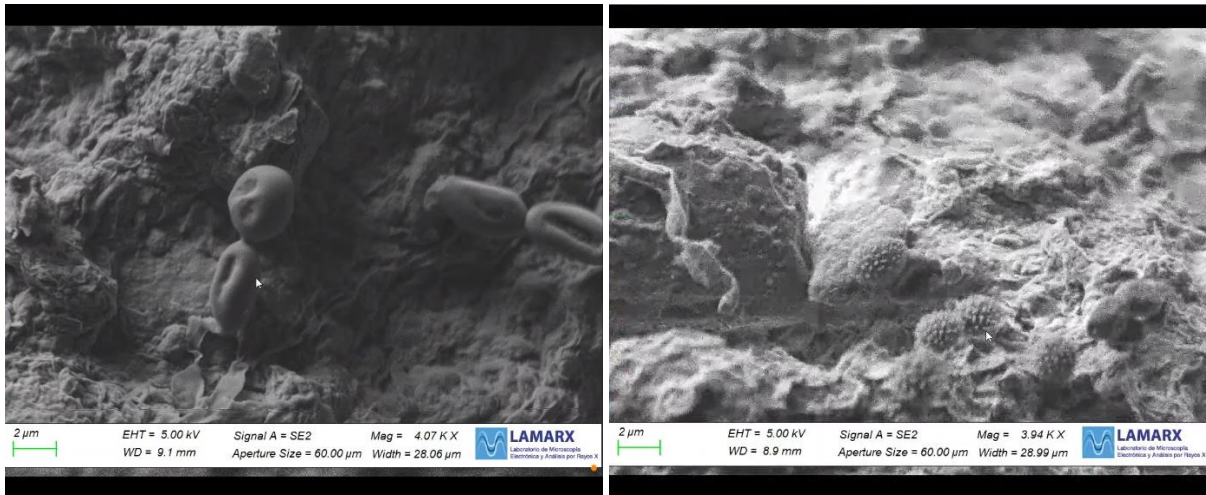
**Fig.4.114-** Imagen obtenida del mapeo de elementos mediante SEM para una estructura longilínea seleccionada de la muestra 7%CLS-1año

Las siguientes imágenes corresponden a la muestra 10%CLS-1día

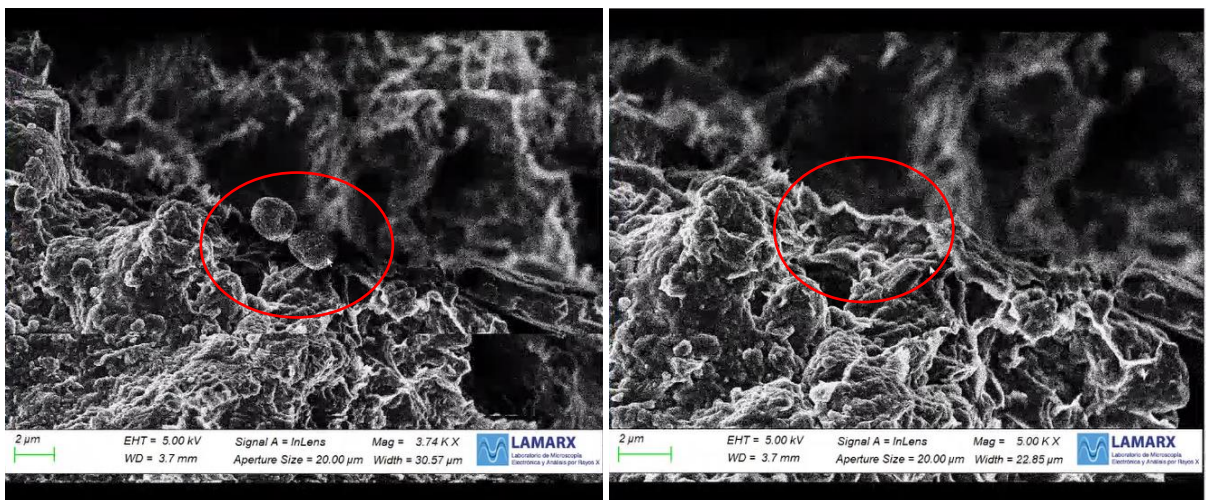


**Fig.4.115-a, b, c, d.** Estructuras y esporas capturadas con diferentes apertura y contraste de la cámara para la muestra 10%CLS-1día. Algunas de las partículas se desintegran al incidir el haz de electrones lo cual pudo observarse directamente durante la realización de los ensayos de los cuales se tomaron tanto videos como imágenes.

En la Fig.4.117 pueden observarse dos imágenes consecutivas, tomadas con diferencia de décimas de segundo en las cuales se logra capturar partículas que “desaparecen”, se queman, al incidir sobre ellas el haz de electrones. Esto mostraría que se trata de elementos formados por carbono.



**Fig.4.116-a, b, c, d.** Estructuras y esporas capturadas con diferentes apertura y contraste de la cámara para la muestra 10%CLS-1día. Algunas de las partículas se desintegran al incidir el haz de electrones (Fig.4.117)



**Fig.4.117-a, b.** Partículas se desintegran al incidir el haz de electrones

Se pueden identificar las siguientes características:

- Estructura y apariencia a gran escala diferente a la muestra de 0%CLS-1día, se presenta mayor interporosidad (Fig.4.118- a, b) y menor intraporosidad (Fig.4.119- c, d, e).
- Los elementos identificados como esporas se presentan suaves y conservados en las muestras liofilizadas un día después de moldeadas, con una apariencia envejecida o deteriorada en las muestras liofilizadas al año;
- No se detectaron formaciones cristalinas que puedan ser asociadas con sales;
- Forma longilíneas en apariencia en mayor cantidad y masa;
- Gran cantidad de elementos ovoides *Spora Thinghirensis* S10 y *Spora Lienomycini* 5C, presentadas en cadenas. Estas cadenas son de gran longitud. Algunas de ellas se destruyeron al incidir el haz de electrones denotando su composición básicamente de carbono;

– Las estructuras arcillosas se encuentran presentes en una muy pequeña proporción. Prevalcen las formas redondeadas o suavizadas con una cantidad mucho mayor de ambos tipos de esporas identificadas.

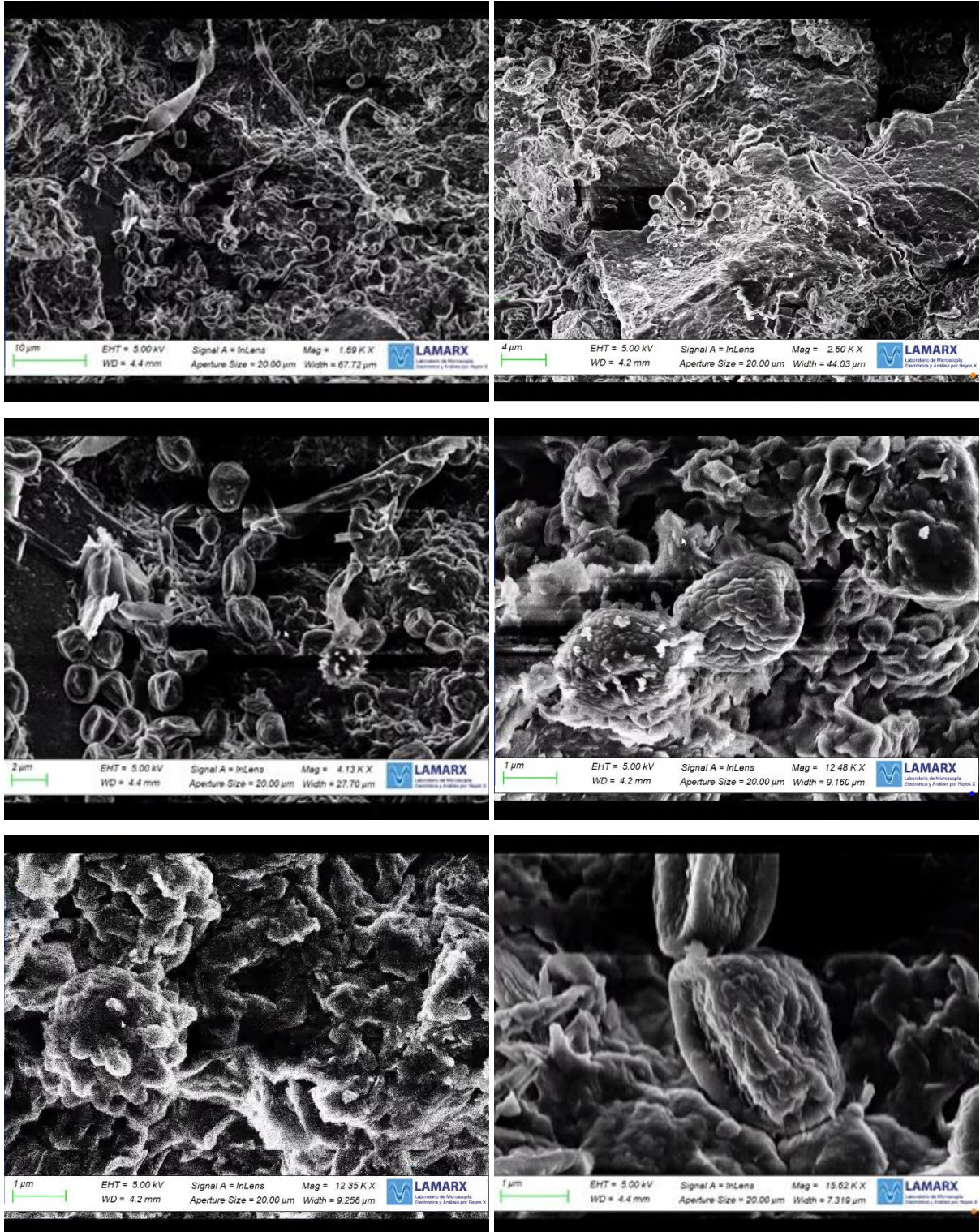


Fig.4.118- a, b, c, d, e, f- Fibras, estructuras y esporas de la muestra 10%CLS-1día.

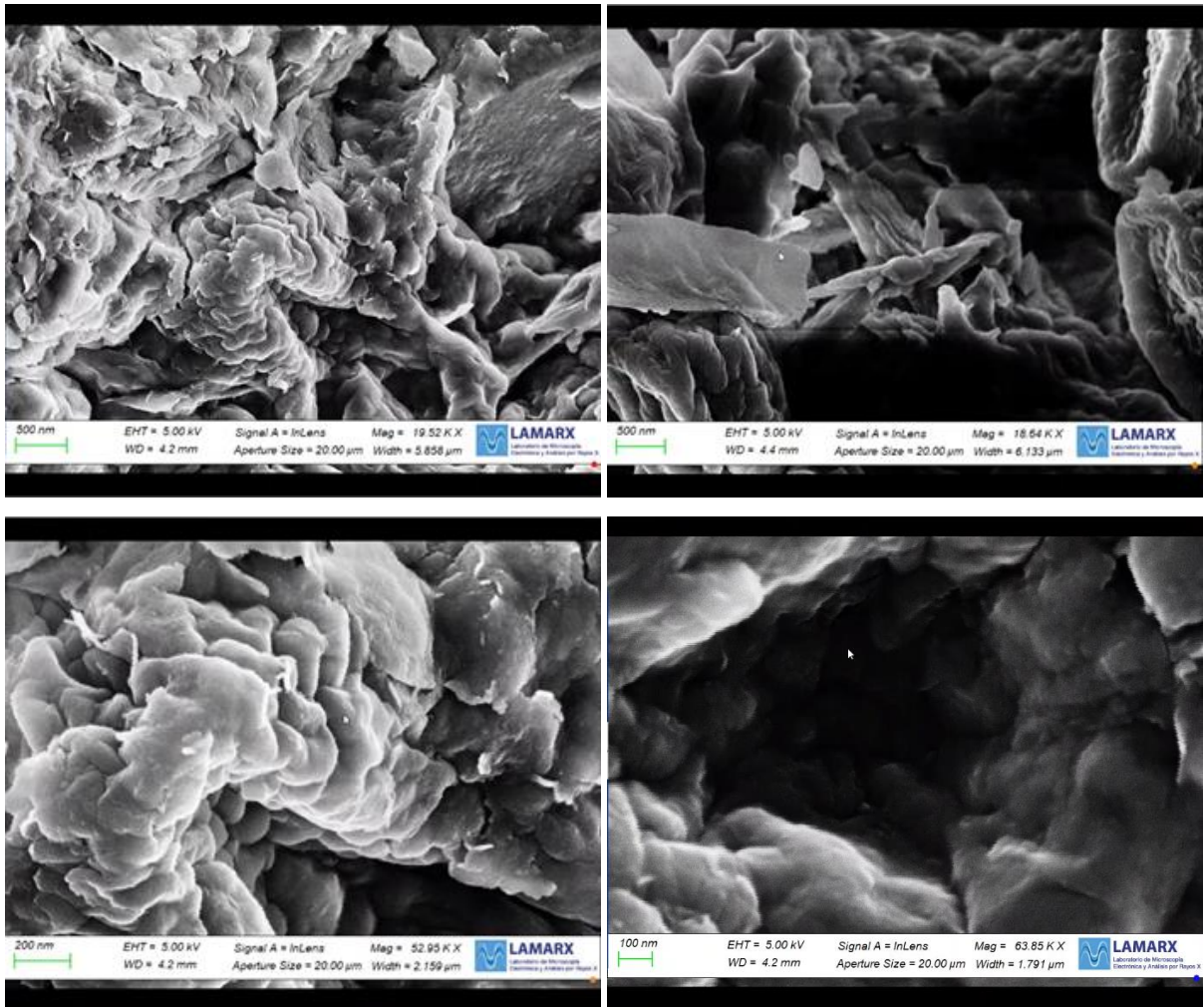


Fig.4.119- a, b, c, d- Formas redondeadas en muestra de 10%CLS-1día.

Del mapeo de elementos realizado sobre esta muestra se obtienen los resultados presentados en la Fig.4.120.

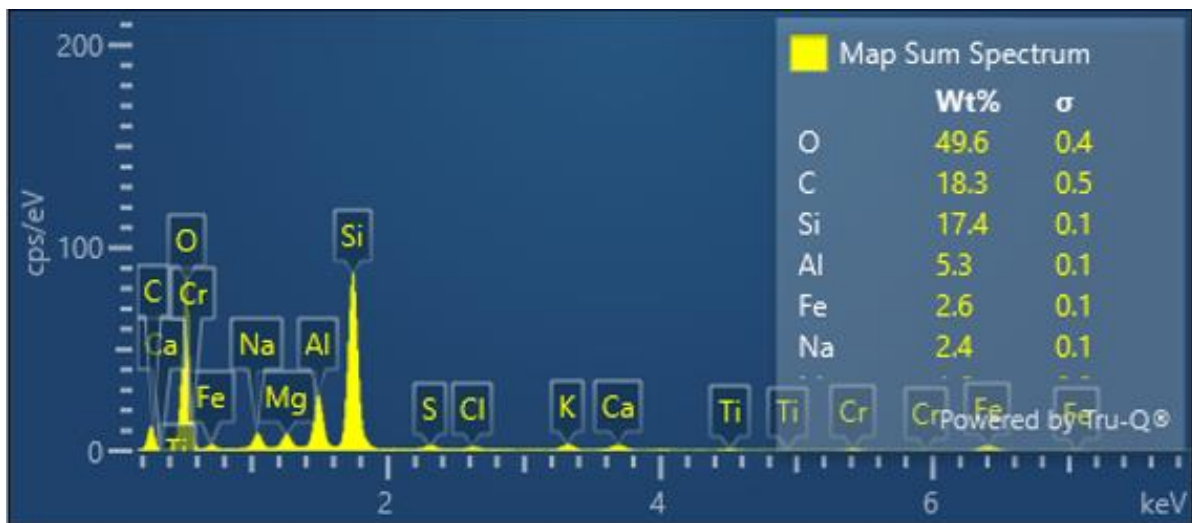


Fig.4.120- Imagen obtenida del mapeo de elementos mediante SEM para muestra 10%CLS-1día

Comparando las imágenes, los principales cambios que pueden observarse son:

- cambios en la estructura general desde la típica estructura de una arcilla en la que las lamelas son identificables hacia una estructura de apariencia suavizada;
- aparición de esporas en cadena cuya cantidad se incrementa con el incremento en el contenido de CLS;
- decrecimiento en la porosidad interpartículas y crecimiento de la porosidad intrapartículas;
- crecimiento en el número de estructuras longilíneas cuya composición es similar a la del resto de las muestras;
- estructuras longilíneas que al incidir el as de electrones se desintegran, indicando que en su composición se encuentra principalmente el elemento carbono;
- concentraciones de sales en forma de cristales las cuales decrecen con el incremento de CLS.

#### **4.7. IMPACTO AMBIENTAL**

Un aspecto muy poco analizado en las publicaciones relacionadas con ligninas y lignosulfonatos es el impacto que las mezclas producen sobre el medioambiente. Si bien el aditivo empleado es un biopolímero producto de la industria de la pasta de papel, lo cual mencionan diversos autores en sus artículos, Alazigha (2016a, 2016b), Argyropoulos & Menachem (1997), Aro et al. (2017), Canakci et al. (2015), Lin & Cerato (2012), Kim et al. (2012), Aro & Fatehi (2017), Kim et al. (2012), Kozam (1955), Orlandi et al. (2021) ninguno de artículos analiza el efecto combinado de los suelos mezclados con lignina.

En este trabajo se analiza la química de los lixiviados y la toxicidad empleando un único y representativo ensayo en el que se emplean semillas de *Lactuca Sativa* como organismo de control.

##### **a) COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS LIXIVIADOS, pH Y SALES DEL SUELO**

El primer paso para analizar la toxicidad del suelo, las mezclas y el CLS es la determinación del contenido de sales del suelo sin CLS (Tabla 4.22), el pH del suelo y de las diferentes disoluciones de CLS en agua (Tabla 4.23), las sustancias químicas que componen el CLS, el contenido de sales y pH en los lixiviados (Tabla 4.24).

Del análisis del pH (Tabla 4.23) puede observarse que CRclay posee un pH ligeramente básico y que con el aumento en el porcentaje de CLS este pH disminuye. La reducción del pH mejora las condiciones del suelo comparado con el pH resultante del agregado de cal. Debe recordarse (se menciona en la revisión de literatura) que para determinar el contenido óptimo de cal en el proceso de estabilizar un suelo expansivo el pH es el parámetro de selección más empleado.

**Tabla 4.22-** Contenido de sales, conductividad y capacidad de intercambio catiónico de CRclay.

Propiedades, sales y minerales	CRclay
Conductividad eléctrica [S/m]	1.081
% MO W y B	0.6
% CO W y B	0.3
Fósforo disp [mg/kg]	11
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/kg)	3608
Ca (meq/100g)	16.0
Mg (meq/100g)	1.5
K (meq/100g)	7.8
Na (meq/100g)	28.5
CIC (meq/100g)	50

**Tabla 4.23-** Cambio en el pH de la mezcla de CRclay con diferentes contenidos de CLS.

Porcentaje de CLS	0	3	5	7	10	100
pH (determinado en una solución de 1:2,5)	8.31	7.64	7.48	7.42	6.90	4.64

**Tabla 4.24-** Contenido de sales de las muestras de lixiviados correspondientes a los ensayos triaxiales CU10%CLS200kPa y CU10%CLS400kPa de presión de confinamiento.

Parámetro	Muestra 43044 (CU10%CLS400kPa)	Muestra 43045 (CU10%CLS200kPa)	Método / Norma
Carbonatos [mg/l]	0	0	SM2320B
Bicarbonatos [mg/l]	4743	1199	SM2320B
pH [ ]	7.82	8.18	SM4500-H+
Conductividad [S/m]	3.5200	1.0490	SM2510B
Sales solubles totales [mg/l]	33528	6714	SM2540C
Sulfato [mg/l]	2250	401	SM4500-SO <sub>4</sub>

Con los valores obtenidos para CRclay podemos describir al suelo como salino sódico, lo cual restringe o anula fuertemente el crecimiento de vegetales. Esto conduce a que el contenido de materia orgánica (MO) del suelo sea casi nulo consecuencia del pobre desarrollo de vegetación (Tabla 4.22). Los diferentes contenidos de cada sal ubican a este tipo de suelos entre los que poseen una

concentración excesiva de sales solubles (Alconada et al., 2018) altamente lavables y cuyos iones poseen alta capacidad de acumulación.

La alta salinidad y la sodicidad demuestran los efectos negativos que posee CRclay en su comportamiento. La alta salinidad el efecto floculante al que son sometidas las partículas, en tanto que la alta sodicidad a la capacidad de hinchamiento. Ambas se encuentran directamente relacionadas con la permeabilidad, la velocidad de filtración, el tipo de arcilla, las reacciones químicas y la clase textural del suelo.

De acuerdo con porcentaje de sodio de intercambio (PSI) determinado (Tabla 4.22) considerando el contenido de sodio y la capacidad de intercambio catiónico (Romero, 1999) CRclay clasifica como un suelo entre moderadamente sódico y ligeramente sódico. El porcentaje de sodio de intercambio determinado es de 57% (Tabla 4.22) y el RAS aproximadamente 10. La relación de adsorción de sodio (RAS) muestra valores superiores al agua de riego en tanto que empleando la conductividad eléctrica es posible evaluar sus efectos sobre los cultivos. En este último caso clasifica como de rendimiento satisfactorio solo en cultivos tolerantes (Ver clasificación en Tabla 4.25, tomada de Carrow & Duncan, 2011).

**Tabla 4.25-** Clasificación de los suelos salinos según su efecto sobre los cultivos empleando la conductividad eléctrica (Tomada de Carrow & Duncan, 2011).

Clasificación del suelo	Conductividad eléctrica	Efecto sobre el cultivo
no salino	0-2	No afecta en los cultivos
ligeramente salino	2-4	Puede disminuir el rendimiento en los cultivos sensibles
moderadamente salino	4-8	Disminuye el rendimiento de la mayoría de los cultivos
salino	8-16	Rendimiento satisfactorio solo de cultivos tolerantes
extremadamente salino	>16	Rendimiento satisfactorio solo de cultivos muy tolerantes

Las pequeñas discrepancias que se presentan en las clasificaciones es consecuencia de que los métodos empleados poseen carácter cualitativo. En general puede considerarse a CRclay como un suelo salino-sódico o sódico, en cuyo caso ambas clasificaciones destacan la poca utilidad para los cultivos y el alto contenido de sales totales presentes.

Comparando los resultados de conductividad, sulfatos y pH entre los lixiviados obtenidos de los triaxiales sobre muestras de 10%CLS y las determinaciones sobre CRclay se observa lo siguiente:

- El pH de los lixiviados comparado con el pH obtenido sobre CRclay es menor para ambas muestras.

– El contenido de sulfatos (Tabla 4.22 para CRclay y Tabla 4.24 para lixiviados) a pesar de presentar diferencias se encuentra en el mismo orden de magnitud.

– La conductividad (Tabla 4.24) aumenta en los lixiviados de la probeta con 10%CLS y presión de confinamiento de 400kPa respecto a CRclay y se mantienen en el mismo orden de magnitud en el caso de la probeta con 10%CLS y 200kPa de presión de confinamiento.

De estos resultados puede observarse que la adición de CLS a CRclay modifica las sales, la conductividad y la alcalinidad del suelo y sus lixiviados. En el caso de los lixiviados, debido a la solubilidad de las sales presentes en el suelo se produce la solubilización y el arrastre de parte del CLS. El CLS combinado con las sales modifica el pH del suelo y de los lixiviados.

Dependiendo de la presión de consolidación aplicada a las probetas son los resultados que se obtienen, lo cual encuentra explicación en el tiempo que conlleva disipar las presiones de poro en cada uno de los ensayos realizados. La probeta ensayada con una presión de confinamiento de 200kPa necesita un período menor de consolidación que la probeta con 400kPa. Por otro lado, cuando mayor es la cantidad de agua expulsada, mayor es la posibilidad de solubilizar y arrastrar las sales.

Se puede afirmar que parte de la lignina es expulsada junto con un porcentaje de las sales, ambas solubilizadas en agua. Esto se deduce del cambio en el pH (reducción similar a la que se produce sobre mezclas de CRclay y CLS) y los cambios en los contenidos de sales detectados en las mediciones.

**Tabla 4.26-** Clasificación de suelos salinos según U.S.Laboratory (Tomada de Carrow & Duncan, 2011).

Suelo	Conductividad eléctrica	PSI	SAR	pH
Salino	≥4	<15	<12	<8,5
Sódico	<4	≥15	≥12	>8,5
Salino-sódico	≥4	≥15	≥12	<8,5

**Tabla 4.27-** Clasificación de los suelos salinos de acuerdo con su PSI (tomado de Massoud, 1971)

PSI	Evaluación del suelo
<7	No sódico
7 - 15	Levemente sódico
15 - 20	Moderadamente sódico
20 - 30	Fuertemente sódico
>30	Extremadamente sódico

## **b) ENSAYOS DE TOXICIDAD EMPLEANDO SEMILLAS DE LACTUCA SATIVA**

La evaluación de toxicidad de un suelo puede realizarse de muchas y muy variadas maneras. Dependerá de los agentes a evaluar y de los organismos que se seleccionen, el procedimiento a seguir (Castillo et al., 2004). Como se presentó dentro del Capítulo III Métodos, en nuestro caso emplearemos la NORMA IRAM 29114 de calidad ambiental, más precisamente el método de toxicidad aguda con semillas de Lactuca Sativa (lechuga).

El principal inconveniente con que se contó al momento del ensayo fue el limitado volumen de lixiviados con los que realizar todas las series de ensayos por triplicado y luego ajustar el porcentaje que resultaría nocivo para la germinación de las semillas. Por ello se pudieron realizar ensayos por duplicado en el caso de muestras líquidas.

Para la realización de los ensayos se llevaron a cabo dos series de ensayos en paralelo. El primero con diluciones de los lixiviados en agua destilada. El segundo con diluciones de CLS en estado sólido, diluido también en agua destilada. El tiempo de exposición fue de 120 horas. La obtención de los porcentajes de inhibición de la germinación ( $CE_{50}$ ) e inhibición de la elongación ( $CI_{50}$ ) se realizó mediante regresión lineal.

Dos de las experiencias realizadas con diluciones de 0%CLS y 10%CLS se muestran en Fig.4.121 y Fig.4.122. Puede observarse que con 1%CLS sólido diluido en agua, todas las semillas de Lactuca Sativa germinaron. En cambio en el caso de 10%CLS sólido diluido en agua en todas las semillas de Lactuca Sativa se inhibió la germinación.

Los valores obtenidos y presentados en la Tabla 4.28 corresponden a  $CE_{50}$ , concentración efectiva media, es el porcentaje de dilución con el que se alcanzó una mortalidad del 50% o inhibición de la concentración. El  $CI_{50}$ , inhibidor de la elongación, corresponde al porcentaje de dilución con el que se alcanzó la inhibición de la elongación de la radícula del 50% de las semillas. El control negativo de inhibición se realizó con agua destilada, mientras que el control positivo de inhibición se realizó empleando como tóxico de referencia  $SO_4Zn$ . Algunos de los parámetros poseen un par de valores debido a que pudieron obtenerse valores por duplicado.

En la Tabla 4.26 puede observarse que la concentración de inhibición media ( $CE_{50}$ ) para ambos lixiviados es de entre 27% y 33%. Esto significa que con una dilución que contenga entre 27% y 33% de lixiviado preparada en agua destilada se impide la germinación del 50% del organismo seleccionado, en nuestro caso semillas de Lactuca Sativa. En el caso de emplear lignina diluida en agua en una proporción de entre 4,1 y 5% en peso se obtiene el  $CE_{50}$  o concentración de inhibición media.

En referencia a la  $CI_{50}$ , se observa que con un porcentaje de entre 14,6 y 11,3% de solución de lixiviado en agua destilada, se inhibe la elongación en el 50% de los organismos de control. Para el caso de emplear CLS en estado sólido y preparar la dilución en peso, con un porcentaje cercano a 1,1 se inhibe el desarrollo de la radícula en un 50% de las semillas

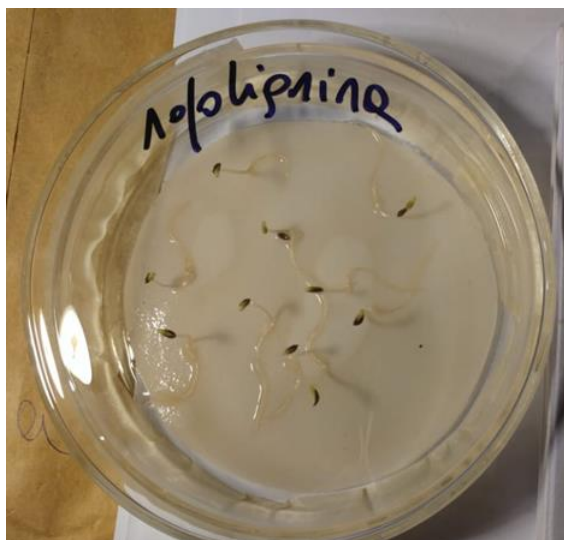


Fig.4.121- Ensayo con Lactuca sativa para CLS en estado sólido diluido al 1% en agua.

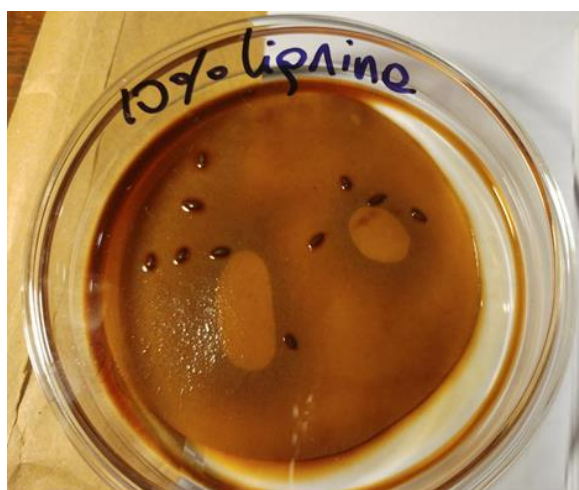


Fig.4.122- Ensayo con Lactuca sativa para CLS en estado sólido diluido al 10% en agua.

**Tabla 4.28-** Resultados correspondientes a CE50 y CI50 para muestras sólidas y líquidas empleando semillas de Lactuca sativa como organismo de control

Parámetro	CU10%CLS400kPa	CU10%CLS200kPa	CLS	
CE50 (germinación)*	33%	27%	5,1%	4%
CI50(elongación)*	14,6%	11,3% 13,4%	1,2%	1,1%
Tipo de concentración	V/V [%]	V/V [%]	W/V [%]	
Muestra	líquida	líquida	polvo	

V/V: volumen/volumen

W/V: Peso /volumen

(\*) ambos parámetros se determinan por observación

Como conclusión, el agregado de CLS a CRclay posee características tóxicas aplicado en determinadas proporciones. La mezcla de los lixiviados con agua destilada reduce el impacto producido sobre las semillas aun considerando la combinación con las sales disueltas provenientes del CRclay. La dilución en peso del CLS en agua destilada fue realizada para evaluar el impacto del CLS sin sales diluidas adicionales. Puede observarse que el CLS produce un impacto negativo sobre el organismo de control a pesar de que en las pruebas realizadas de pH mostraban una reducción en este parámetro.

#### **4.8. CONCLUSIONES**

En este capítulo se presentó el estudio desglosado de las mezclas CRclay y CLS mediante el estudio del comportamiento mecánico, hidráulico, hidromecánico, microestructural. Para ellos se ensayaron muestras de CRclay con distintos porcentajes de lignosulfonato de calcio remoldeadas y de diferentes edades. Los resultados obtenidos fueron presentados y analizados en forma aislada, sin considerar los mismos de forma interrelacionada. Aun así se pudieron observar los cambios que se produjeron en las muestras en función de las dos variables planteadas: la edad y el contenido de aditivo.

Adicionalmente, se evaluó la influencia que posee la combinación de sales solubles con el CLS, y el CLS disuelto en agua sobre el medioambiente, ambos a través del análisis químico y toxicológico de dos muestras líquidas recolectadas y una solución obtenida a partir de lignina sólida.

El análisis pormenorizado y combinado de los resultados se presenta en el Capítulo 5, discusión de resultados, donde se pretende justificar el porcentaje de aditivo óptimo, analizar la influencia del tiempo sobre el comportamiento de las mezclas, interpretar los cambios en función de los mecanismos de estabilización, e incorporar el impacto medioambiental que la adición de CLS a un suelo local denominado CRclay.

## **5- DISCUSIÓN: COMPORTAMIENTO DEL SUELO EXPANSIVO TRATADO CON UN LIGNOSULFONATO DE CALCIO**

### **5.1. INTRODUCCIÓN**

La selección del porcentaje de aditivo óptimo debe ser abordado considerando los cambios producidos en las diferentes propiedades de las mezclas, tomando como parámetro de comparación el suelo en su estado original, su evolución en el tiempo, y el impacto ambiental generado. Cada suelo en función de sus propiedades y cada aditivo en función de su composición y proceso de obtención presentarán diferentes comportamientos.

El CLS fue seleccionado dentro de un grupo de bioaditivos. Todos ellos eran aditivos de origen orgánico, los cuales fueron sometidos a un proceso de preselección en el cual el grado de modificación de los límites de Atterberg fue empleado como criterio de rechazo. De esta primera selección surgieron cuatro ligninas y lignosulfonatos de los cuales Norlig®, denominado en principio L4 y finalmente CLS, resultó seleccionado para continuar con la investigación.

El comportamiento de diferentes proporciones de mezclas suelo-aditivo a diferentes edades y la evaluación de su efecto sobre el medioambiente son discutidas en este capítulo.

### **5.2. SELECCIÓN DEL PORCENTAJE OPTIMO DE CLS CON BASE EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS**

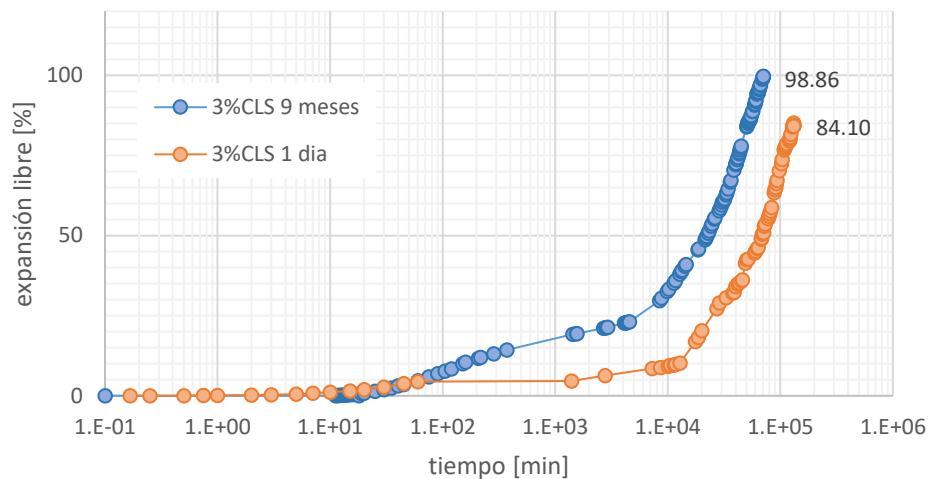
Una primera serie de ensayos mecánicos fueron llevados adelante para comprobar la modificación de las propiedades expansivas de las mezclas. Los ensayos de expansión libre y presión de hinchamiento permitieron demostrar la reducción en el porcentaje de expansión libre y en la presión de hinchamiento. El rango de porcentajes fue seleccionado teniendo en cuenta los siguientes factores:

- Algunos investigadores presentaron resultados positivos para muestras preparadas con porcentajes cercanos al 3%CLS, Alazigha et al. (2018 a, 2018b, 2015), y Prasad Chavali y Reshmaran (2020). Pero el rango de CLS publicado alcanzaba valores de hasta 50%, publicaciones recientes presentaron resultados positivos para 20%CLS en Chao Zeng et al. (2020), 15%CLS en Tao Zhang et al. (2020), 20%CLS en Canakci et al. (2015), 12%CLS en Chao Zeng et al. (2015), 8%CLS en Zhang et al. (2016), 50%CLS en Tokede et al. (2020). Cada uno de los autores trabajó con suelos expansivos locales (India, Australia, China, Turquía) y lignosulfonatos de diferentes procedencias y obtenidos por diferentes métodos de extracción (proceso sulfito, de calcio, de sodio, de calcio y sodio).
- La gravedad específica del CLS empleado en esta tesis (0,51) es muy baja. Por ello compactar las muestras a las mismas densidades secas para altos contenidos de CLS resultaba un proceso difícil y lento, considerando que 2,7 es la gravedad específica de CRclay.
- Los primeros ensayos mecánicos realizados al inicio de la investigación mostraron una reducción importante para valores de las muestras con un contenido de 7%CLS y 10%CLS.

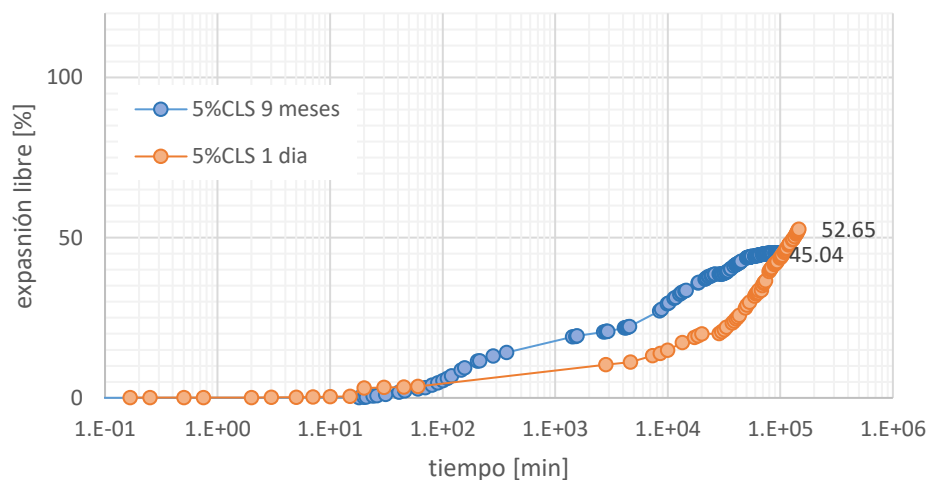
- Los porcentajes analizados en investigaciones previas empleando cal como estabilizante mostraban que la cal resultaba efectiva hasta valores del orden del 7%.
- En la determinación de los límites de Atterberg las mezclas con más de 10%CLS resultaban difíciles de homogeneizar.

Basándonos en la información previa presente en publicaciones se trabajó en el rango de 3% a 10% de CLS, empleando los resultados de CRclay como parámetro de comparación

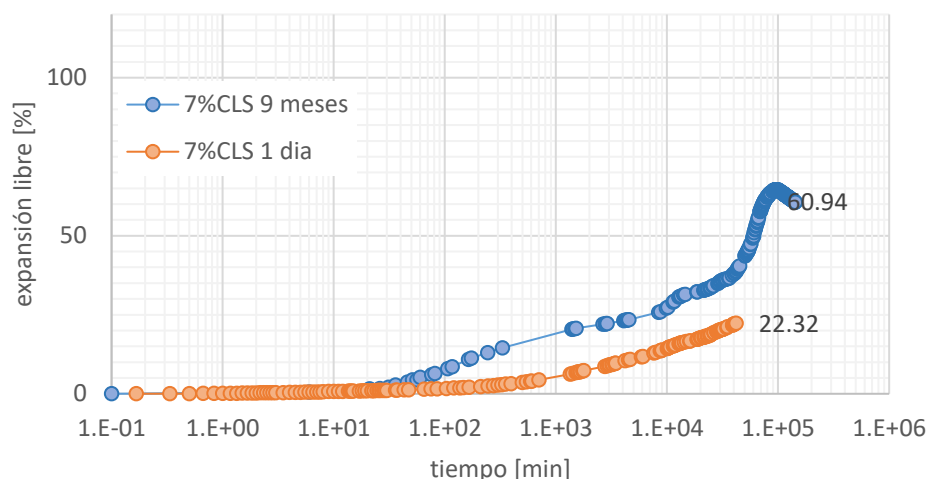
En cuanto a considerar la edad de las muestras como variable, el rango dentro del cual se trabajó fue 1 día y 1 año, en este rango la influencia del aditivo resultó positiva en reducir el HL. La tendencia general presentó pequeños incrementos a los 9 meses, 3%CLS en la Fig.5.1, 5%CLS en la Fig.5.2, 7%CLS en la Fig.5.3, y 10%CLS en la Fig.5.4. La probeta que mayor incremento mostró fue la de 7%CLS, la cual aun habiéndose incrementado el HL redujo su expansión casi a la mitad de la expansión libre presentada por la probeta CRclay.



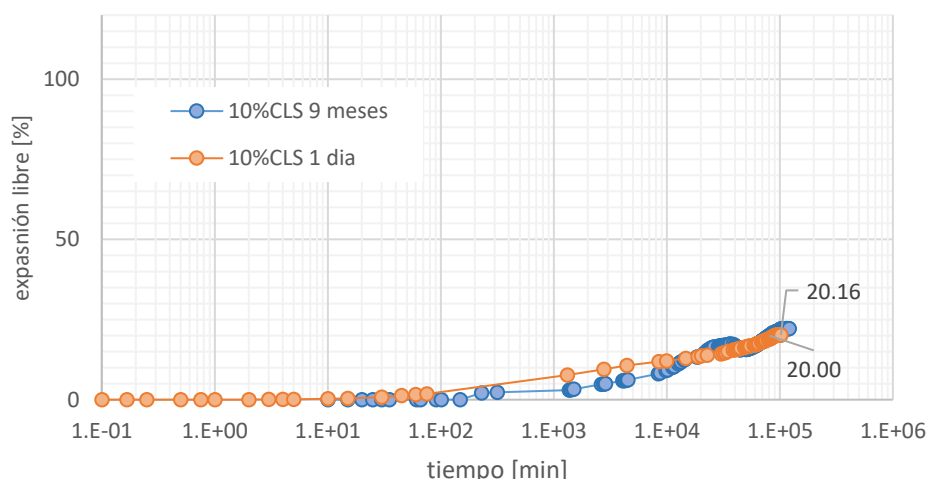
**Fig.5.1-** Comparación en las expansiones libres desarrolladas para 1 día y 9 meses para 3%CLS



**Fig.5.2-** Comparación en las expansiones libres desarrolladas para 1 día y 9 meses para 5%CLS



**Fig.5.3-** Comparación en las expansiones libres desarrolladas para 1 día y 9 meses para 7%CLS



**Fig.5.4-** Comparación en las expansiones libres desarrolladas para 1 día y 9 meses para 10%CLS

Los cambios presentados a nueve meses pueden ser consecuencia de la disolución de una pequeña proporción del lignosulfonato incorporado. Las probetas sumergidas teñían el agua de la celda después de la primera semana, una de las características del CLS seleccionado era su solubilidad en agua. Los valores obtenidos de los gráficos de expansión libre se presentan en la Tabla 5.1. Las probetas eran montadas en celdas distribuidas en bancadas con más de un edómetro, por lo que un pequeño movimiento podía introducir errores en los ensayos montados en paralelo. Esto obligaba a extender algunos ensayos más allá de alcanzada la estabilización de las expansiones. Esto permitió observar un asiento en lugar de una expansión en las probetas con 7%CLS y 10%CLS y 9 meses de edad.

Las curvas de HL presentaron cambios en el desarrollo de las diferentes etapas descritas por Alazigha (2016) mostrando de este modo que la intraporosidad y la interporosidad habían sufrido

modificaciones. Esas etapas corresponden a IS, PS, y SS. Recordemos que están asociadas a diferentes fases de ingreso de agua a los poros del suelo y por lo tanto de saturación:

- IS o expansión inicial: es una etapa en la que la expansión se desarrolla en forma explosiva en la cual ocurre la saturación de los macroporos y expansión dentro de los macroporos junto con la destrucción y desorientación de los grandes agregados (grupos de partículas).
- PS o expansión primaria: asociado al cambio microestructural;
- Hinchamiento secundario: asociado al desarrollo completo de la doble capa difusa y destrucción de la estructura inicial.

**Tabla 5.1.** Expansión libre para probetas de diferentes edades y porcentajes de CLS.

%CLS	1 día	9 meses	Variación [%]
0	134.2	133.9	-0.2
3	85.1	99.7	17.2
5	52.7	45.3	-14.1
7	22.3	64.6	189.4
10	21.1	22.1	5.0

**Tabla 5.2.** Variación en la expansión libre [%] para probetas de diferentes edades y porcentajes de CLS, referidas a la expansión libre de CRclay de la misma edad, variación de la expansión libre para las probetas de 9 meses referidas a las probetas de 1 día.

%CLS	1 día	9 meses	Variación [%]
0	134.2	133.9	-0.2
3	85.1	99.7	17.2
5	52.7	45.3	-14.1
7	22.3	64.6	189.4
10	21.1	22.1	5.0

Los porcentajes de incremento (+) o decremento (-) respecto al valor de expansión sobre la probeta con el mismo porcentaje de CLS y la misma edad se muestran en la Tabla 5.2.

La mezcla de CRclay y 10%CLS es la que muestra mayor estabilidad en el tiempo en cuanto a hinchamiento libre. También es la que presenta mayor reducción en la expansión libre y en las presiones de hinchamiento obtenidas empleando diferentes métodos.

Analizando los resultados de UCS para todas las edades y porcentajes de CLS pueden observarse cambios función del tiempo y del porcentaje de CLS. Estos cambios se deben a la redistribución del agua dentro de la microestructura del suelo (Delage et al., 2006), desarrollo de los

mecanismos de interacción fisicoquímica entre CRclay y CLS, desarrollo de nuevas estructuras laminares y longilíneas observadas en la masa de suelo mediante ensayos SEM. Debido a que no fue posible analizar la composición de estas estructuras no es posible analizar su aporte en el comportamiento del conjunto.

La aparición de esporas cuya función en la naturaleza es polimerizar las ligninas naturales podría generar efectos los cuales no fueron evaluados.

En referencia a los resultados obtenidos para PH, los métodos empleados dieron resultados positivos en cuanto al empleo de CLS como aditivo (Fig.5.6):

- Método del edómetro, Fig.4.27;
- Hinchamiento restringido, Fig.4.30;
- Método ASTM, Fig.4.31;
- Método del volumen constante registro con aro dinamométrico, Fig.4.32;
- Método del volumen constante registro con celda de carga, Fig.4.33.

La incorporación de todos los resultados en un único gráfico permite observar que el incremento en el porcentaje de CLS produce la reducción en la presión de hinchamiento desarrollada (Tabla 4.3 y Fig.4.26, Tabla 5.3). La presión de hinchamiento de la muestra 3%CLS registrada mediante el método HR es mayor a la desarrollada con CRclay lo cual, al igual que el comportamiento presentado en HL está asociado a la muy baja reducción en el pH y al incremento que se produce en el potencial Z (Tabla 5.4). Obsérvese que el 10%CLS muestra reducción en el potencial Z, los restantes porcentajes se mantienen con potenciales Z cercanos a CRclay.

**Tabla 5.3.** Influencia del porcentaje de CLS sobre la presión de hinchamiento considerando para su comparación un hinchamiento relativo al suelo sin tratar.

Método	Reducción en la presión de hinchamiento [%] en función del porcentaje de CLS				
	0	3	5	7	10
Edómetro	0	-53	-76	-86	-80
HR	0	106	-39	-61	-72
Lambe (aro din.)	0	-9	-100	-27	-100
ASTM	0	33	-33	-87	-53
Lambe (celda)	0	11	11	-11	-44

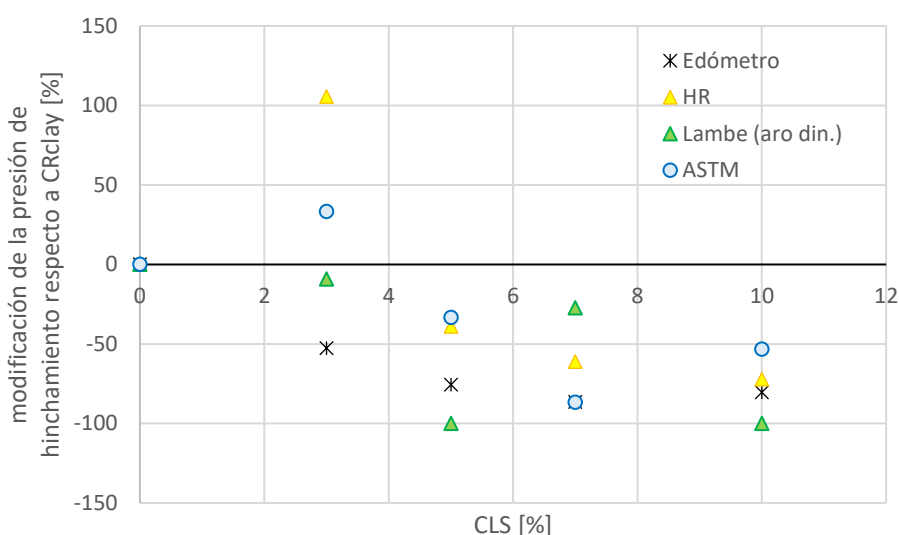
La modificación que se produce en la presión de hinchamiento de acuerdo con método empleado y en función del porcentaje de CLS se presenta en la Tabla 5.3, Fig.5.3 y Fig.5.4. Los valores negativos representan efectos opuestos a los esperados en la presión de hinchamiento, esto es un incremento. Mientras que los valores positivos representan el efecto esperado, entiéndase reducción

en la PH. Al tomar como referencia el valor obtenido para CRclay los porcentajes de  $PH_{rel}$  son nulos para  $PH_{rel}$  CRclay de cada método.

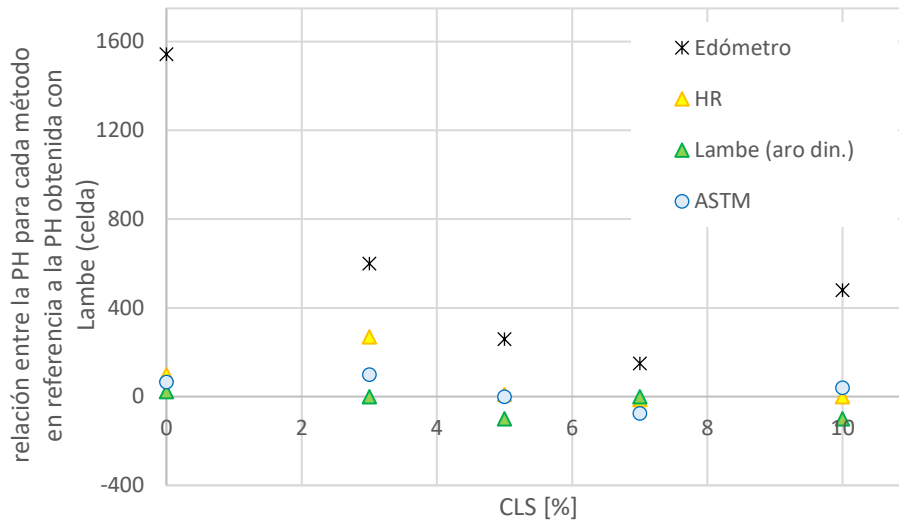
**Tabla 5.4.** Potencial zeta y pH para probetas con diferentes porcentajes de CLS.

% Aditivo	Nombre	$\zeta$ Potencial Z [mV]		pH
0	CR-clay	-39.14± 2.66	-39.14	8.31
3	3%CLS	-40.86±1.76	-40.86	7.64
5	5%CLS	-40.31±0.00	-40.31	7.48
7	7%CLS	-39.31±0.75	-39.31	7.42
10	10%CLS	-27.21±1.58	-27.21	6.90
100	CLS	-19.83±1.53	-19.83	4.64

Debido a que no todos los autores presentan las caracterizaciones de las ligninas o los lignosulfonatos con los que trabajan, esto puede representar un inconveniente en el momento de comparar resultados. Algunos de estos aditivos son hidrófilos en tanto que otros son hidrófugos, su composición química y caracterización polimérica depende del tipo de proceso del que son producto. Factores como el pH, disponibilidad y tipo de cationes intercambiables, solubilidad, definen el comportamiento de la lignina o del lignosulfonato. Los mismos investigadores al emplear suelos con menor potencial de expansión, menor contenido de montmorillonita, requieren de menor porcentaje de aditivo para lograr la reducción en el potencial de expansión.



**Fig.5.5-** Reducción en la presión de hinchamiento obtenida empleando diferentes métodos, tomando como referencia el valor de PH para CRclay.



**Fig.5.6-** Presión de hinchamiento obtenida empleando diferentes métodos tomando como referencia el valor de PH obtenido con el método de Lambe, empleando celda de carga.

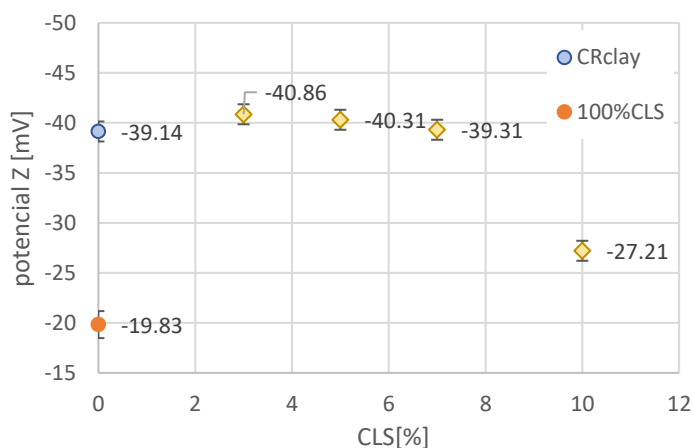
Analizando los datos en gráficos de doble entrada (Fig.4.36, Fig.4.37, Fig.4.38, Fig.4.39, Fig.4.40) se observa:

- La modificación del porcentaje de CLS introduce cambios en las curvas de HL, directamente sobre el tiempo en el que se desarrollan de las diferentes etapas: IS, PS, SS.
- Cuanto mayor es el porcentaje de CLS de la mezcla, más próximo a las 24 horas se desarrolla la PH máxima. Recordemos que 24 horas es el tiempo que se emplea en el método de volumen constante para registrar la presión de hinchamiento.
- Cuanto mayor es el porcentaje de CLS menor es el valor de PH alcanzada.
- Por último, a mayor porcentaje de CLS, menor el porcentaje del total de la PH máxima alcanzada durante el desarrollo de la etapa SS. La PH se desarrolla casi por completo en la etapa IS y parte de PS.
- Del análisis combinado de los HL y PH para cada porcentaje de CLS en nuestro caso se observa que 3%CLS no es un porcentaje que contribuya a mejorar el suelo, a pesar de ello, algunos investigadores han mostrado que porcentajes de este orden o menores resultan adecuados para emplear con algunos suelos expansivos.

En resumen, analizando los resultados de HL y PH para las muestras moldeadas a una densidad seca de 13kN/m<sup>3</sup> y 18% de humedad se observa mejor comportamiento al utilizar entre 7 y 10% de CLS. Estos porcentajes resultan más efectivos modificando las propiedades expansivas de CRclay. Las muestras desarrollan la etapa de IS con un porcentaje menor de hinchamiento, el tiempo en que se alcanza el total del HL y la etapa de SS en la cual se desarrolla la doble capa difusa también resultan menores debido a que el espesor de la capa difusa es menor.

Este comportamiento se asocia a la reducción en el potencial Z y reducción en el pH de las mezclas lo cual fue presentado en el Capítulo 3, Métodos y Materiales. Puede observarse que el CLS posee un potencial Z negativo al igual que CRclay (Fig.5.7), que puede atribuirse a la naturaleza del suelo en el caso de CRclay (Asselman & Garnier, 2000) así como a los procesos de extracción de la lignina en el caso de CLS. Para mezclas de 3%, 5% y 7% de CLS con CRclay puede observarse que el valor del potencial Z se incrementa, mientras que para 10%CLS la reducción del potencial Z es importante.

Los porcentajes 5% y 7% muestran reducción en el pH. El primer registro de reducción del potencial Z corresponde a la muestra con 7% de CLS, acompañado por el primer registro de pH ácido. 10%CLS muestra una gran reducción en el potencial Z comparado con los otros porcentajes.

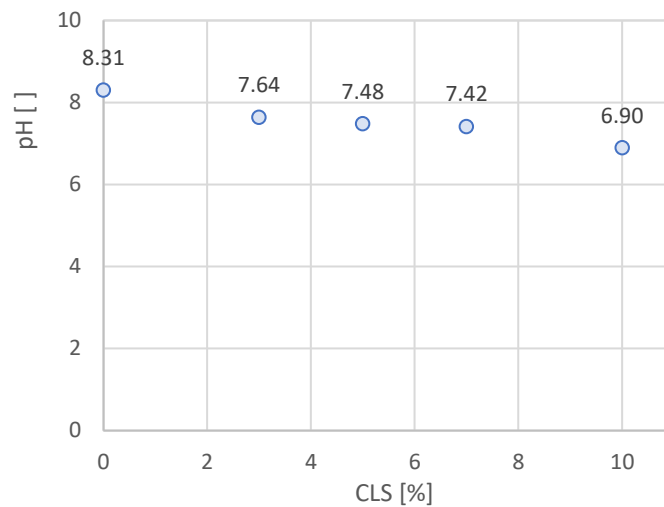


**Fig.5.7-** Potencial Z de CLS, CRclay, y CRclay con diferentes porcentajes de CLS

La interpretación de los resultados obtenidos y del comportamiento de la mezcla se encuentra asociada al aporte de iones polivalentes provenientes del CLS. Estos iones hidratados se distribuyen sobre las superficies de las partículas de suelo cargadas negativamente.

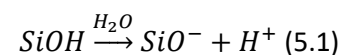
Los elementos encontrados por medio de los ensayos de determinación de contenidos de sales, DRX (Tabla 4.7), MIP (Fig.4.101, Fig.4.113, Fig.4.114) fueron predominantemente  $\text{Si}^{+4}$ ,  $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{Na}^{+1}$ ,  $\text{K}^{+1}$ ,  $\text{Mg}^{+3}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ . Estos elementos coinciden con los esperados en suelos arcillosos de origen marino de características expansivas. De acuerdo con Mitchel (1976) la valencia de los cationes afecta el potencial Z y el espesor de la doble capa difusa. Un incremento en la valencia del catión presente en la disolución (en este caso en el agua entre las láminas o “platelets” de arcilla) reduce las fuerzas de repulsión entre las láminas. Debido a que el CLS empleado es un lignosulfonato de calcio soluble en agua, como consecuencia del aumento en la concentración de calcio las fuerzas de repulsión entre las

partículas se reducen, también se reducen las capas de moléculas de agua polarizadas reduciéndose de este modo también la expansión.



**Fig.5.8-** pH para CRclay y CRclay con diferentes porcentajes de CLS

Otro factor que influye sobre el potencial Z es el pH (Mitchel, 1976). En nuestro caso, el efecto producido al incrementarse el porcentaje de CLS de la mezcla es una reducción en el pH (Fig.5.8). La evolución del pH del suelo (ISO 10390) es una forma de evaluar la toxicidad y la corrosión de los bioaditivos sobre la fauna, la flora y las aguas subterráneas del suelo. De acuerdo con Mitchel (1976) cuanto mayor es el pH mayor la tendencia de los hidroxilos a disociarse. La disociación producida (ecuación 5.1) conduce a la incorporación de H<sup>+</sup> a la solución, lo cual reduce la carga positiva neta de la partícula, reduciéndose de este modo el desequilibrio aniónico de las partículas lo que produce una reducción en el potencial Z y en la doble capa difusa. El pH de CRclay si bien es superior al neutro, se encuentra dentro del rango correspondiente al agua de mar, lo cual coincide con el origen de la formación a la que pertenece. CRclay, que está constituida principalmente por esmectitas, debido a los enlaces rotos de las capas octaédricas de Al y tetraédricas de Si en el borde, los grupos anfóteros Al-OH y Si-OH están presentes y tienen carga condicional ligeramente negativa (pH= 8.31) por lo que los bordes son negativos (AlO<sup>-</sup>) a neutros (Al-OH) (Li et al., 2015).



Las interacciones desarrolladas entre CRclay y CLS implican la combinación de algunos de los siguientes mecanismos de estabilización:

- Adsorción periférica de la molécula formada por el catión-agua en la superficie del mineral (Theng et al, 1982; Alazigha et al, 2016) consecuencia de la naturaleza hidrofílica y amorfa de CLS.
- Encapsulación de los minerales de arcilla (Scholen, 1992).
- Intercambio de cationes monovalentes por cationes covalentes.
- Ruptura química de la estructura mineral de la arcilla, lo que resulta en la reducción de la doble capa difusa.
- Absorción de moléculas orgánicas entre capas, lo que resulta en la reducción de la susceptibilidad a la humedad (Tingle y Santoni, 2003).
- Fuerzas de van der Waals, interacciones electrostáticas y enlace de hidrógeno (Chen y Zhang, 2006).

Estos mecanismos de interacción entre la lignina y el suelo contribuyen a entender y justificar la reducción del porcentaje de hinchamiento y de la presión de hinchamiento.

Con el objeto de entender mejor estos mecanismos, se realizaron mediciones FTIR (Fig.4.13 y Fig.4.14) para investigar la presencia de interacciones entre la lignina y CRclay. Las diferentes mezclas (CRclay-ligninas) muestran diferencias espectrales en comparación con el espectro de CRclay sin aditivo. Se observan desplazamientos de banda y deformaciones identificables teniendo en cuenta los picos de CRclay. Es importante señalar que las interacciones se evalúan teniendo en cuenta las bandas más importantes del espectro de CRclay ( $3623\text{ cm}^{-1}$ ,  $1639\text{ cm}^{-1}$ ,  $1110\text{ cm}^{-1}$ ) (Alazigha et al., 2018b). Con la adición de CLS (L4), el pico a  $3623\text{ cm}^{-1}$  presenta, en general, una disminución de la intensidad de la absorbancia. En este caso, las mezclas exhiben una banda desplazada de  $1639\text{ cm}^{-1}$  a aproximadamente  $1650\text{ cm}^{-1}$  debido a la absorción perturbada del agua (Alazigha et al., 2018b; Tomasini et al., 2012; Carazo et al., 2018). En general, el pico a  $1110\text{ cm}^{-1}$  muestra una disminución en la intensidad de la absorbancia con los aumentos de la concentración de CLS.

Los resultados obtenidos por medio de BET indican que al incrementarse el porcentaje de aditivo incorporado en las muestras: decrece la superficie específica de las partículas (superficie específica secundaria) (Fig.4.94), aumenta en el tamaño de las partículas (Fig.4.96), incrementa en el diámetro de poros (Fig.4.96), aumenta en la permeabilidad (Fig.4.64). Todos estos cambios se encuentran asociados a la modificación de la microestructura de las mezclas, reflejando los efectos de los mecanismos de estabilización desarrollados:

- Aglutinación de partículas lo que aumenta el tamaño medio de las partículas (Fig.4.96). El incremento en el tamaño de las partículas muestra la absorción periférica a que se encuentran sometidas las partículas de arcilla.

- El incremento en la permeabilidad a pesar del decremento relativo de la misma en función del tiempo coincide con los resultados obtenidos por medio de las porosimetrías: las porosimetrías realizadas sobre muestras de 1 día presentan aproximadamente la misma intraporosidad para todos los porcentajes de CLS mientras que la interporosidad muestra tamaños de poros mayores con el incremento de CLS. Las porosimetrías realizadas sobre muestras de un año muestran una reducción en el volumen de intraporos, un incremento en el volumen de interporos y mayor tamaño de interporos.

- La reducción del tiempo en el cual se desarrollan las diferentes etapas en las curvas de hinchamiento libre, incluida SS en la que se desarrolla la doble capa difusa (Fig.4.18, Fig.4.19), coincide con la reducción en el potencial Z y en el pH con el incremento en el porcentaje de CLS.

- Las curvas obtenidas en los ensayos HL (Fig.4.27), HR (Fig.4.30), ASTM (Fig.4.31), Lambe (Fig.4.32, Fig.4.33) empleados para la determinación de la presión de hinchamiento, con el incremento en el porcentaje de CLS tienden a mostrar el mismo valor en la pendiente. Esto se debe al cambio producido en la permeabilidad de las mezclas. Las muestras de CRclay al ser menos permeables, demoran más de 24 horas en completar la consolidación primaria. Las muestras con 10%CLS, más permeables que CRclay, al cabo de 24 horas completan casi en su totalidad la consolidación primaria. El ensayo ASTM limita la duración de cada escalón a 24h independientemente del tipo de muestra y su permeabilidad.

Siguiendo con el análisis de los ensayos mecánicos, los ensayos UCS realizados permitieron evaluar tanto la influencia del porcentaje de aditivo como de la edad de las muestras, mediante el empleo de los coeficientes D y R, medios, relativos y absolutos. Estos coeficientes fueron empleados debido a que los valores de los módulos de elasticidad tangente, módulo de elasticidad secante, y UCS máximos mostraron resultados muy variables tanto en función del porcentaje de aditivo como de la edad de las muestras. Esta variabilidad se encuentra asociada a los cambios propios de CRclay, los cuales ocurren a lo largo del tiempo durante el año de estudio.

Luego de obtener y analizar los grupos de gráficos el comportamiento general de las muestras de diferentes edades y diferentes porcentajes de CLS puede resumirse:

- Las probetas ensayadas al año muestran mayor resistencia a la compresión simple, también un comportamiento más frágil.

- En el intervalo de edades entre 1 día y 1 año todas las muestras presentaron incrementos y decrementos en la resistencia a la compresión simple, el módulo de elasticidad tangente, y el módulo de elasticidad secante incluidas las muestras de CRclay tomadas como parámetro (Fig.4.46, Fig.4.47, Fig.4.48, Fig.4.49, Fig.4.50, Fig.4.51). Después de una declinación en la

resistencia a los 6 meses, las muestras ensayadas a los 9 meses y un año recuperaron la resistencia inicial. Las probetas de CRclay sin aditivo presentan el mismo comportamiento por lo cual los cambios no son atribuibles al aditivo.

– En relación con el contenido de CLS la tendencia es similar, las muestras con mayor contenido de CLS se comportaron de forma más frágil y con mayor resistencia UCS relativa. Manifestaron mejoramiento en las propiedades en el período comprendido entre 1 mes y nueve meses y un decrecimiento a los 3 meses y 6 meses.

– Los ensayos triaxiales realizados sobre muestras de CRclay presentaron falla dúctil para las tres presiones de confinamiento aplicadas, lo cual puede observarse en Fig.4.44. Las probetas ensayadas con 200kPa y 400kPa de presión de confinamiento mostraron comportamiento contráctil. La probeta ensayada con 100kPa de presión de confinamiento mostró comportamiento dilatante (Fig.4.61).

– Desde el punto de vista mecánico no se observaron factores que puedan asociarse con el debilitamiento de las muestras en función del porcentaje de CLS ni con la edad.

### 5.3. EVALUACIÓN DE LOS CAMBIOS CON BASE EN EL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

El comportamiento desde el punto de vista de la permeabilidad de las probetas moldeadas con diferentes porcentajes de aditivo e iguales condiciones de compactación se muestran en las Fig.5.9 y Fig.5.10. El ensayo comienza cuando el suelo ya se encuentra saturado. A lo largo del ensayo, la permeabilidad disminuye progresivamente. Se estima que este proceso es consecuencia del desarrollo de la doble capa difusa, la cual ocurre en la etapa de expansión secundaria. El incremento de porcentaje de aditivo produce el incremento en la permeabilidad.

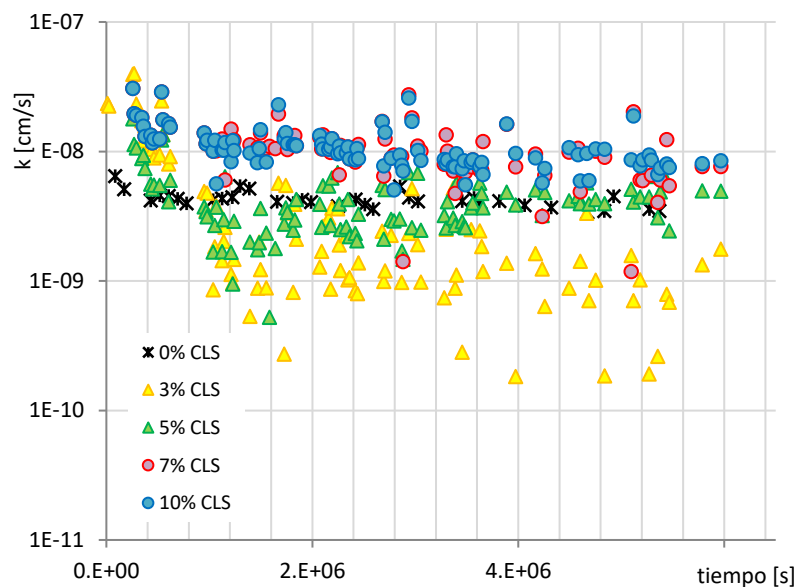
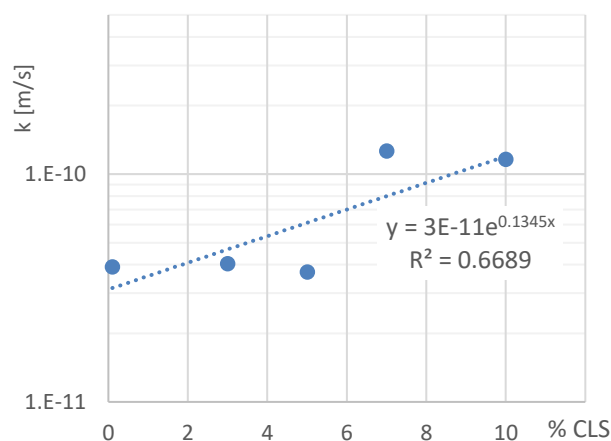


Fig.5.9- Permeabilidad en función del tiempo de ensayo



**Fig.5.10-** Permeabilidad para diferentes porcentajes de CLS

De la Fig.5.9 puede observarse que a pesar de que el valor promedio obtenido para 3%CLS y 5%CLS son similares los valores aislados no lo son. Las lecturas de permeabilidad para 3%CLS poseen mucha dispersión comparadas con las de 5%CLS. Completamente diferente es lo que ocurre para las permeabilidades de 7%CLS y 10%CLS que se comportan de forma prácticamente igual. En cuanto a CRclay los valores presentan una tendencia clara con valores de permeabilidad por debajo de los porcentajes más altos de CLS.

Ambas series de ensayos de porosidad llevados a cabo, MIP y BET, muestran el incremento en la porosidad, la reducción de la superficie específica, la reducción del volumen total de poros pero un incremento en tamaño medio de poros. Esto coincide con la reducción de la distancia intraparticular por la reducción del potencial z, la menor atracción de moléculas de agua dentro de los microporos debido al menor espesor de la doble capa difusa. El agrupamiento de partículas más cercanas entre sí se refleja en una reducción de la superficie específica de las partículas (recordemos que la superficie específica determinada mediante BET es la  $S_e$  secundaria que corresponde a la superficie de grupos de partículas no a la  $S_e$  de cada partícula).

Todos estos resultados coinciden con lo presentado por Delage et al. (2006) quien sugiere que el agua se redistribuye a lo largo del tiempo desde el momento en que se termina la etapa de compactación. Esta migración dentro de una muestra produce alteraciones en la distribución de los macro y microporos la cual variará dependiendo del contenido de la humedad y densidad seca iniciales de las mezclas. Dicha redistribución se desarrollará en los diferentes niveles estructurales y dependerá de las fuerzas desarrolladas en cada nivel. Esta redistribución podría ser el causal de las variaciones en función del tiempo observadas en la permeabilidad y la resistencia a la compresión simple.

Una serie de ensayos realizados en el aparato de Lambe con diferentes  $S_r$  para probetas de CRclay y 10%CLS permitió observar y analizar la importancia de las etapas desarrolladas durante el proceso de expansión en referencia a la saturación del suelo. También permitió evaluar los cambios que se producen en el comportamiento del suelo no saturado. Estos ensayos fueron realizados para entender el desarrollo de la presión de hinchamiento en función del grado de saturación. En ellos, el análisis de la humedad de las probetas al final del ensayo está representado en la Fig.5.11. En este ensayo el volumen permanece constante hasta su finalización (recordemos que existe una pequeña deformación la cual es necesaria para el registro de las presiones desarrolladas por el suelo durante el proceso de saturación).

En Fig.5.11 pueden observarse dos rectas: una obtenida para CRclay y otra para 10%CLS. La curva correspondiente a CRclay se obtuvo con la información de las muestras al finalizar los ensayos cuya duración fue 28 días. La curva de 10%CLS fue obtenida también al finalizar los ensayos que en este caso correspondió a 24 horas.

Los diferentes tiempos de ensayo se deben a que de acuerdo con las curvas de expansión libre y de presión de hinchamiento) correspondientes a 10%CLS, a las 24 horas se encuentra completamente desarrollado el hinchamiento inicial (IS) o explosivo y con un porcentaje importante de desarrollo de la segunda parte de la curva de hinchamiento denominada expansión primaria (PS). Para CRclay a los 28 días se encuentran completamente desarrolladas la IS y la PS, y en proceso de desarrollo de la expansión secundaria (SS).

Del análisis de ambas rectas obtenidas (Fig.5.11), se puede observar que CRclay muestra una reducción en la humedad final con el incremento en el grado de saturación. 10%CLS muestra que el grado de saturación de las muestras coincide independientemente del grado de saturación inicial. Para 10%CLS el desarrollo de la etapa SS posee una importancia menor debido a que el espesor de DDL es menor. En cambio en CRclay el desarrollo de la DDL tiene mayor importancia pero también necesita mayor tiempo para su desarrollo. Dado que en este ensayo (presión de hinchamiento empleando el aparato de Lambe o método de volumen constante) la saturación de una probeta que se encuentra restringida en su deformación desarrollará un proceso diferente al del hinchamiento libre, el desarrollo de la doble capa difusa y de la presión máxima de hinchamiento serán también diferentes.

Estos resultados demuestran que en el caso de un suelo expansivo precargado o restringido en su expansión requerirá de un tiempo diferente para desarrollar la máxima presión de hinchamiento como consecuencia de los procesos desarrollados durante la saturación. Esto explicaría en parte los cambios producidos en los valores de permeabilidad obtenidos por medio del ensayo de permeabilidad de carga variable, lo cual no contradice la teoría de la migración del agua debido a que se trata de dos estados diferentes: saturado y no saturado. Estos ensayos se encuentran restringidos volumétricamente en su deformación. En otras palabras la relación de vacíos de las muestras

permanece constante a lo largo del ensayo y probablemente el proceso de saturación se desarrolle por una redistribución de los poros: disminución del volumen de los macroporos e incremento del volumen de los microporos. Esto justificaría la reducción de la permeabilidad en el tiempo (Fig.5.9)

Mediante el análisis de las curvas de saturación combinadas con las que muestran el desarrollo de la presión de hinchamiento (Fig.5.12 y Fig.5.13) fue posible obtener gráficos en los cuales por medio de  $S_r$ , para CRclay y 10%CLS, es posible determinar la PH y la succión total en función de la humedad. En ambos gráficos se representó el  $S_r$  correspondiente al LC como referencia. No se observó ningún cambio en el comportamiento de PH ni en la succión total en relación con el LC.

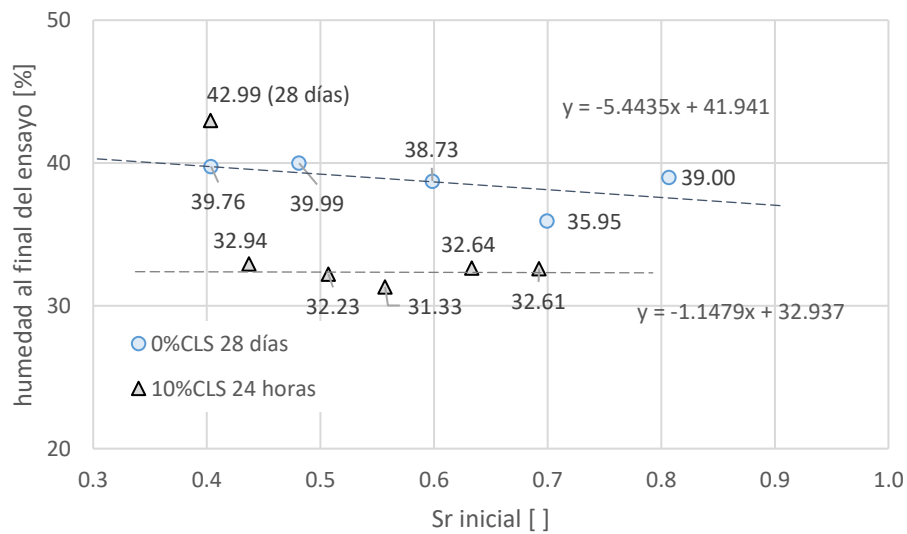


Fig.5.11- Humedad final en función del grado de saturación inicial para probetas de CRclay y 10%CLS

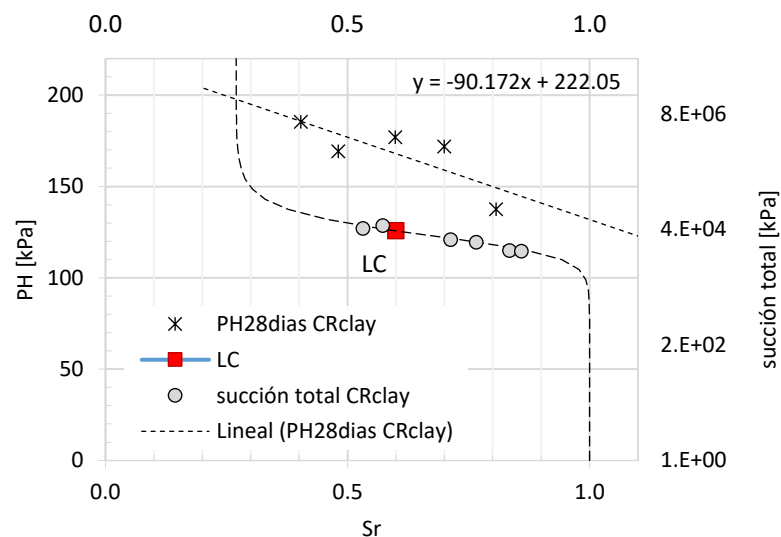
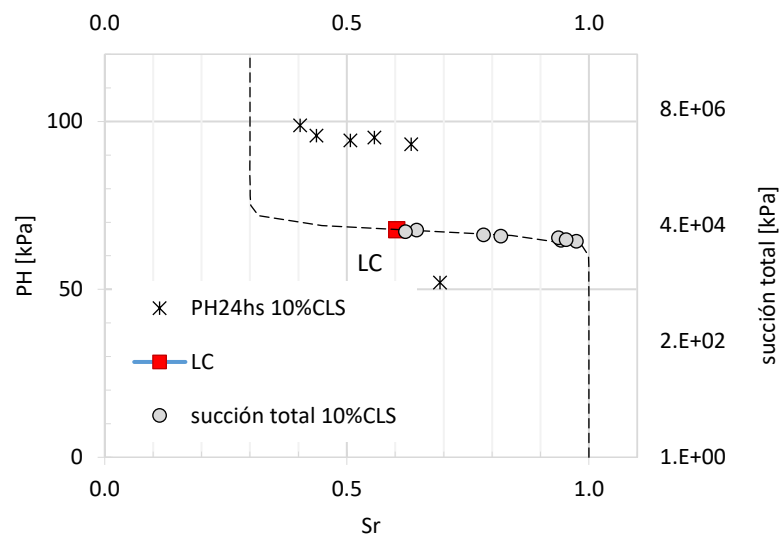


Fig.5.12- Succión total y presión de hinchamiento en función del grado de saturación para las probetas CRclay moldeadas con una densidad seca de 13kN/m<sup>3</sup>

El comportamiento hidráulico también nos permite evaluar directamente la respuesta de las mezclas de suelo no saturado-aditivo ante cambios en el contenido de humedad, la influencia del contenido de sales dentro de la succión total y evaluar indirectamente el potencial de expansión. Para ello se realizaron ensayos para la determinación de la succión en las mezclas con diferentes contenidos de humedad. Se emplearon dos técnicas diferentes: FPT y WP4. Los resultados se encuentran en las Fig. 5.14, Fig.5.15, Fig.5.16.

Los resultados de ambos ensayos mostraron la misma tendencia: cambio en la pendiente de las curvas de succión total que muestra un comportamiento más cercano al de un material granular sin reducción importante en los valores de las succiones. Dado que los ensayos fueron realizados sobre probetas de un día no pudo analizarse la influencia del tiempo sobre el comportamiento de las muestras. Por otro lado en caso de determinarse la succión matricial por un método diferente al PFT los valores obtenidos no deberían sufrir grandes cambios debido a que el contenido de sales no varía por al agregado del CLS.



**Fig.5.13-** Succión total y presión de hinchamiento en función del grado de saturación para las probetas 10%CLS moldeadas con una densidad seca de 13kN/m<sup>3</sup>.

El movimiento de la curva correspondiente a 10%CLS hacia la izquierda, comparándola con la curva de 7%CLS muestra una pequeña reducción en la succión total que coincide con un pequeño aumento en el tamaño de los poros. Las curvas fueron útiles en la obtención de un método indirecto que emplea la humedad o el grado de saturación para la obtención de la presión de hinchamiento. En nuestro caso se realizó el procedimiento para una sola densidad seca, 13,3kN/m<sup>3</sup>. En caso de obtenerse curvas similares para densidades secas diferentes sería posible trabajar dentro de un amplio rango de

Sr y densidades secas. De esa forma se obtendría la PH de forma indirecta para cualquier densidad seca del mismo suelo compactado

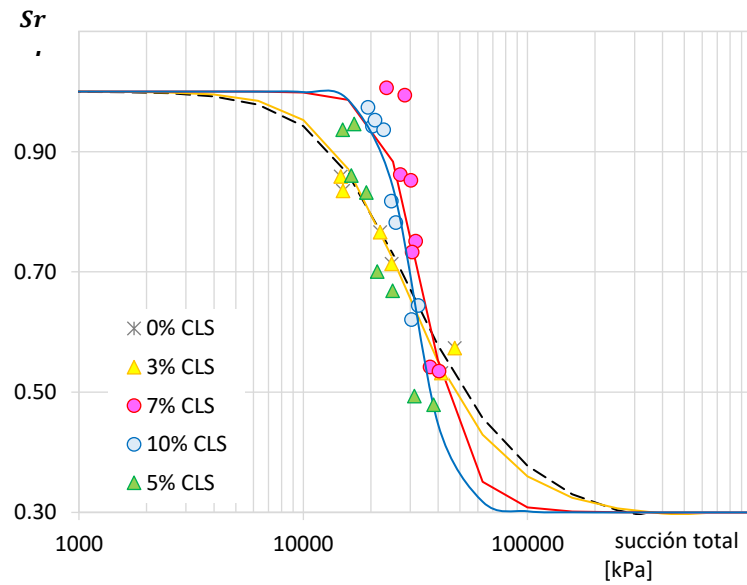


Fig.5.14- Compilado de curvas de succión total obtenidas con la técnica de papel de filtro

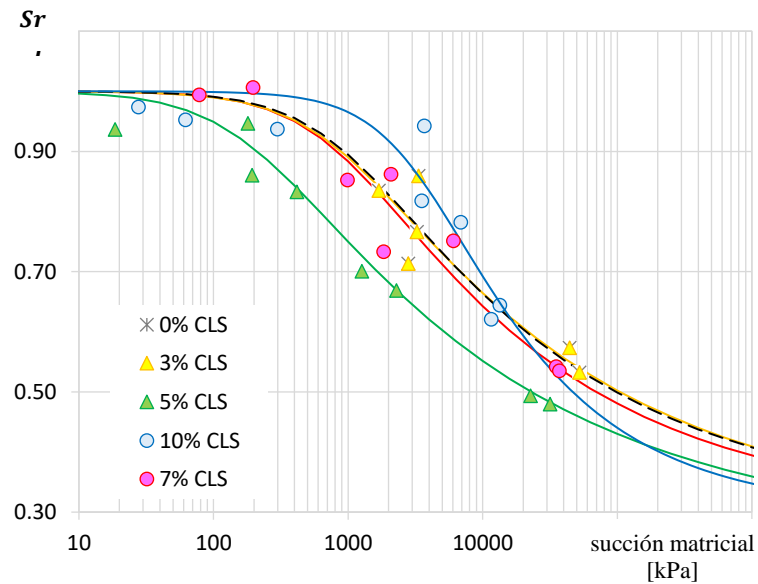
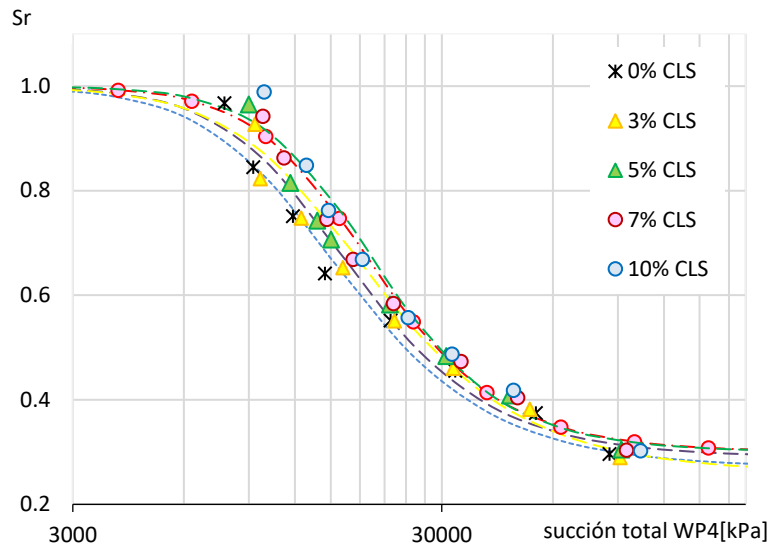
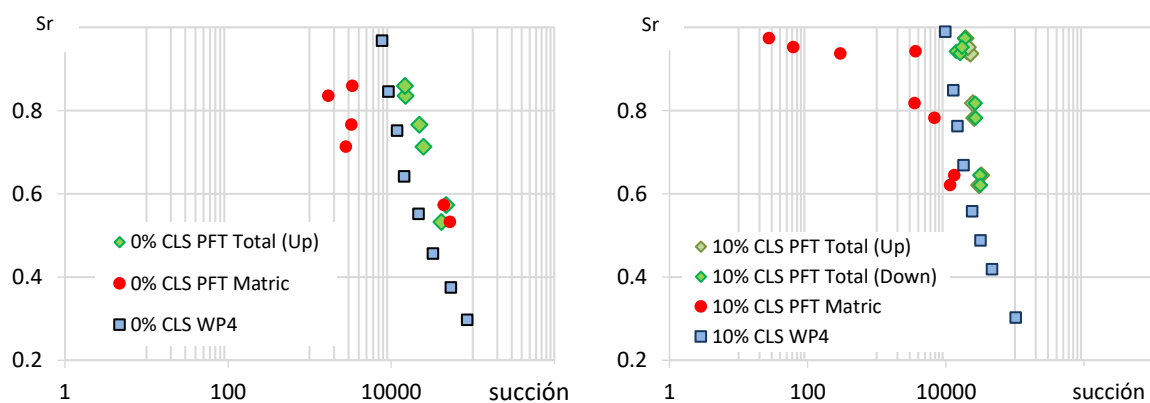


Fig.5.15- Compilado de curvas de succión matricial obtenidas con la técnica de papel de filtro



**Fig.5.16-** Compilado de curvas de succión matricial obtenidas con WP4

Los valores de succión matricial (Fig.5.15) comparados con los de succión total (Fig.5.14) muestran la importancia de las sales sobre la succión total. Recordemos que de la diferencia entre la succión total y la matricial se obtiene la presión osmótica. Ambos gráficos representados en la misma escala muestran los cambios mencionados. En la Tabla 5.5, se muestran los parámetros que definen la curva de ajuste del modelo de van Genuchten. El incremento en el valor de  $\lambda$  refleja el comportamiento más cercano al de un material de granos de mayor tamaño. El incremento en el valor de  $S_{ae}$  representa el movimiento de la curva de ajuste hacia la izquierda mostrando un pequeño incremento en las succiones totales.

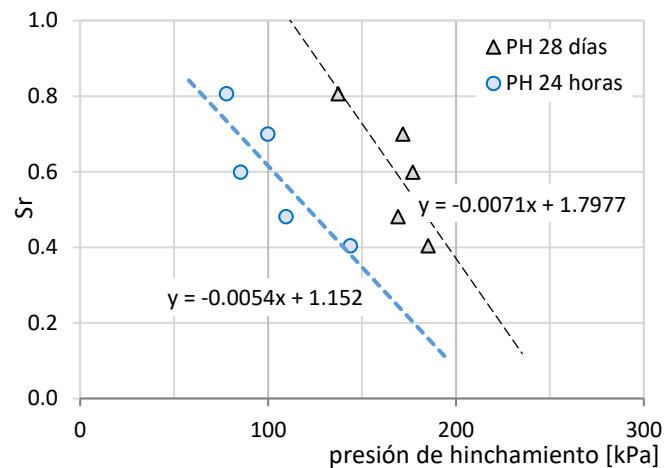


**Fig.5.17-** Comparación entre los datos obtenidos para CRclay y 10%CLS.

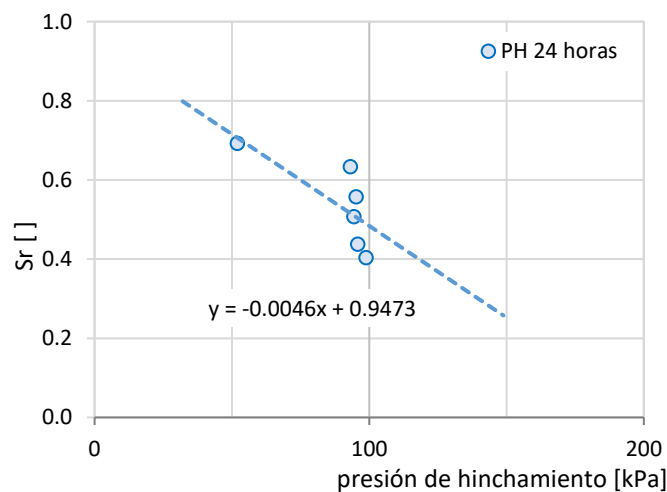
**Tabla 5.5-** Parámetros que definen el ajuste de van Genuchten para WP4 (obtenidos a partir de Fig.5.16)

CLS	Succión	$\lambda$	Sae	Sres	R <sup>2</sup>
0%	total	0.62	12500	0.27	0.97
3%	total	0.64	13600	0.29	0.98
5%	total	0.61	14600	0.61	0.98
7%	total	0.66	16000	0.66	0.98
10%	total	0.67	16700	0.67	0.98

Fueron determinadas las presiones de hinchamiento mediante ensayos de volumen constante en aparato Lambe, para CRclay y 10%CLS en un amplio rango de humedades. Los datos obtenidos se muestran en Fig.5.18. En el caso de CRclay, debido a que las lecturas no se estabilizaban a las 24 horas los ensayos se continuaron hasta 28 días. Para 10%CLS las lecturas se encontraban prácticamente estabilizadas en 24hs, por esta razón se obtuvo una única serie de datos presentados en la Fig.5.19.



**Fig.5.18-** Presión de hinchamiento obtenida por el método de volumen constante para dos tiempos de ensayo: 24 horas y 28 días, CRclay (0%CLS)



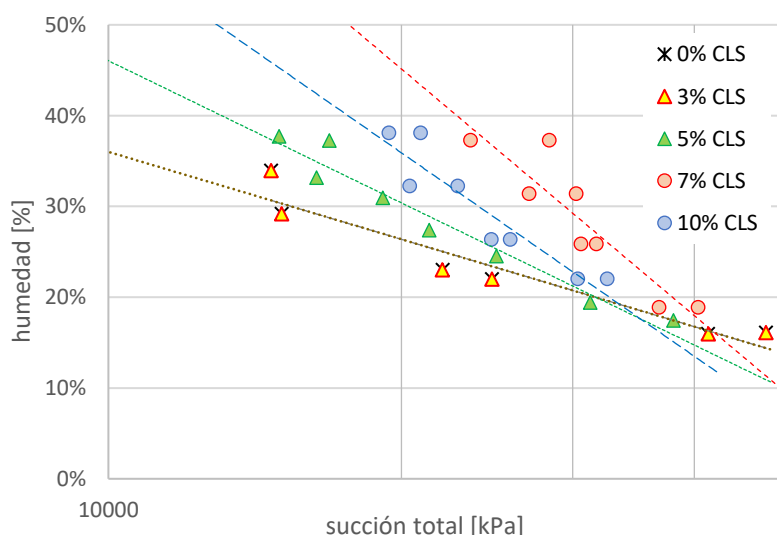
**Fig.5.19-** Presión de hinchamiento obtenida por el método de volumen constante para 10%CLS y 24 horas.

**Tabla 5.6-** parámetros de las curvas de tendencia para CRclay y 10%CLS de la presión de hinchamiento en función de la saturación.

CLS	24 horas		28 días	
	A	B	A	B
0%	-0.0054	1.152	-0.0071	1.7977
10%	-0.0046	0.973		

$w [\%] = A \cdot PH[kPa] + B$

Empleando los resultados obtenidos para la presión total y realizando correlaciones lineales en un gráfico en escala semilogarítmica Erzin y Erol (2005) obtuvieron una correlación entre la humedad y la presión de hinchamiento, entre la humedad y la presión de hinchamiento, y también entre la succión total y la presión de hinchamiento. En nuestro caso los resultados obtenidos para la succión total en función de la humedad se muestran en Fig.5.20. Este gráfico emplea un ajuste diferente al de van Genuchten.



**Fig.5.20-** Curvas de tendencia obtenidas con los datos de succión total para diferentes porcentajes de CLS

**Tabla 5.7-** Parámetros de las líneas de tendencia para cada porcentaje de CLS

$\omega [\%] = A \cdot \ln(ST[kPa]) + B$		
CLS	A	B
0	-0.139	1.6396
3	-0.139	1.6399
5	-0.226	2.5414
7	-0.392	4.3347
10	-0.324	3.5631

Los parámetros de las curvas de tendencia correspondientes a estos datos se encuentran en la Tabla 5.7 para cada porcentaje de CLS obtenidos con PFT. Con los datos presentados en la Fig.5.18 y Fig.5.20 se obtuvieron las ecuaciones que permiten obtener la presión de hinchamiento para CRclay para 24h y 28 días. Y con los datos presentados en la Fig.5.19 y Fig.5.20 para 10%CLS a 24 horas.

$$PH_{24h-CRclay} = 9,25e - 4 * S_T + 145,76 \quad (5.2)$$

$$PH_{28d-CRclay} = 7,04e - 4 * S_T + 201,80 \quad (5.3)$$

$$PH_{24h-10\%CLS} = 2,17e - 3 * S_T + 62,89 \quad (5.4)$$

Debe considerarse que las SWRC corresponden a una densidad seca de 13kN/m<sup>3</sup>.  $S_T$  expresado en MPa y PH expresado en kPa. Para densidades secas diferentes sería necesario realizar series de ensayos Lambe para otras densidades.

#### 5.4. INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE CLS SOBRE LA MICROESTRUCTURA DE CRclay

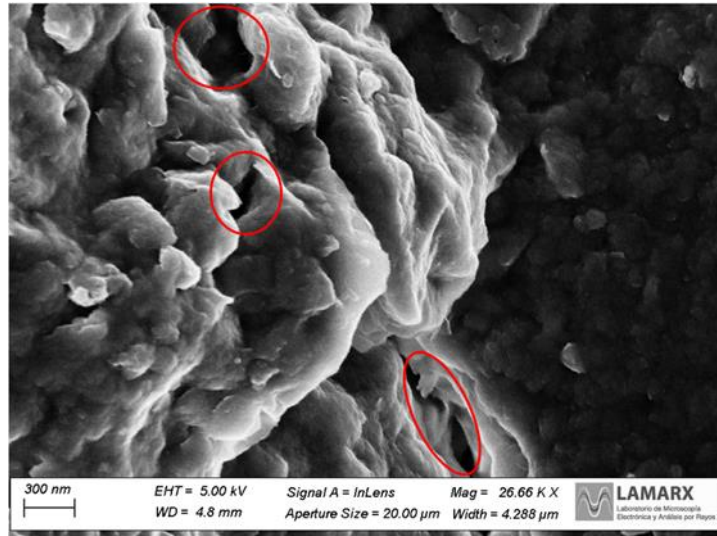
Mediante el análisis de la microestructura, por medio de los resultados obtenidos de FTIR, MIP y BET, potencial zeta, y DRX tanto de las mezclas como de CRclay fue posible comparar los cambios en función del contenido de CLS y del tiempo. También confirmar resultados obtenidos analizando el comportamiento mecánico, químico y físico.

Los datos permitieron analizar las modificaciones en: la intra e interporosidad, el tamaño de las partículas, la superficie específica, las estructuras presentes en el suelo consecuencia de la adición de diferentes porcentajes de CLS.

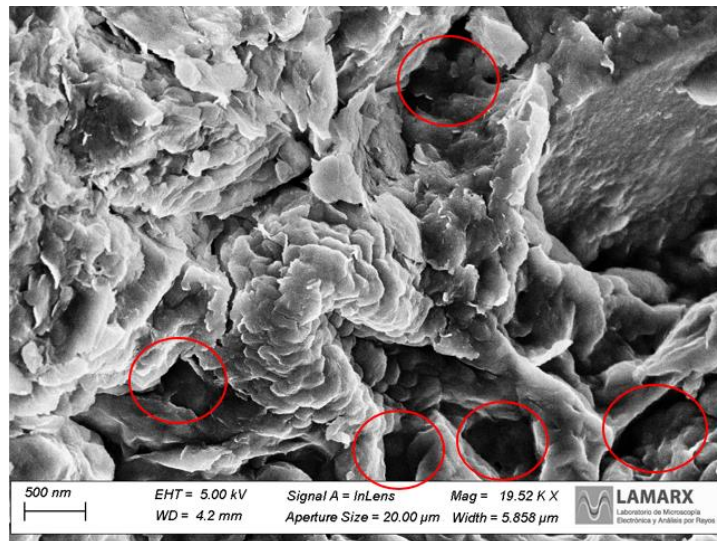
Los intraporos pueden observarse en Fig.5.21 (CRclay-1día) y Fig.5.22 (10%CLS-1día), e interporosidad en Fig.5.23 (CRclay-1día) y Fig.5.24 (10%CLS-1día). Se encuentran marcados ambos grupos de tamaños de poros los cuales muestran un aparente incremento en la interporosidad y en el tamaño del diámetro de poros desarrollados. En la leyenda de cada imagen se adjunta el rango dentro del cual se encuentran los poros para su mejor interpretación. Estos rangos fueron tomados de los gráficos obtenidos de las porosimetrías MIP y verificados de los resultados obtenidos de las porosimetrías BET.

De acuerdo con los resultados obtenidos con BET las partículas en las muestras con mayor contenido de CLS presentan mayor superficie, mientras que el tamaño medio de poros se incrementa. De acuerdo con MIP la intraporosidad disminuye en volumen conservándose el diámetro medio de intraporos, por otro lado aumenta la interporosidad junto con un incremento en el diámetro medio de interporos tanto por efecto del incremento en la edad como por la adición de CLS. El tamaño de las

partículas aumenta, la superficie específica también aumenta, y considerando el hecho de que la superficie específica determinada mediante BET es la primaria, eso demuestra que las partículas se encuentran agrupadas y ese agrupamiento es mayor cuanto mayor es el porcentaje de CLS.



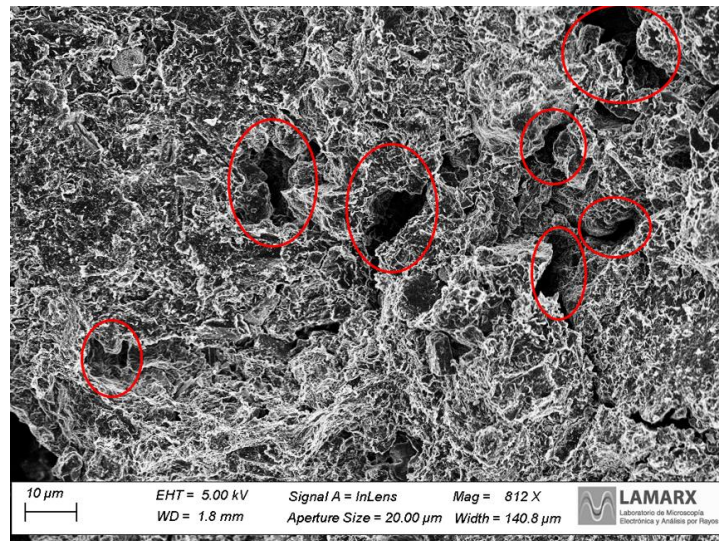
**Fig.5.21-** Intraporosidad en muestra de CRclay-1día (0,1μm a 1 μm).



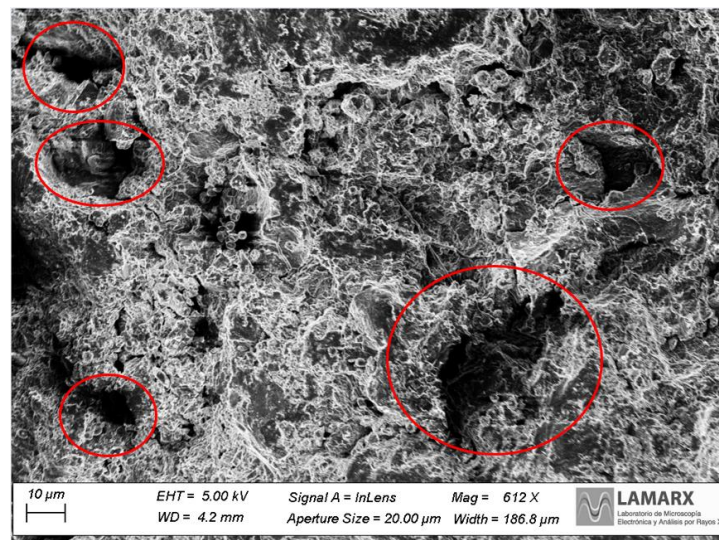
**Fig.5.22-** Intraporosidad en muestra de 10%CLS-1día (0.1μm a 1 μm).

El efecto de la reducción del potencial zeta permite el acercamiento entre las partículas debido a que el desarrollo de la doble capa difusa requiere menor cantidad de capas de moléculas de agua para su desarrollo. Las uniones catiónicas desarrolladas por los cationes que aporta el CLS favorecen la reducción del potencial zeta de acuerdo con los valores determinados para 10%CLS. Debe recordarse que 3%CLS produce un incremento en el potencial zeta, mientras que 5% y 7% CLS producen una muy pequeña reducción. Al ser mayor el radio de las moléculas adsorbidas (moléculas

de agua polarizada-cación Ca+) y menor el potencial zeta se necesitará una menor cantidad de moléculas de agua para desarrollar completamente la doble capa difusa.



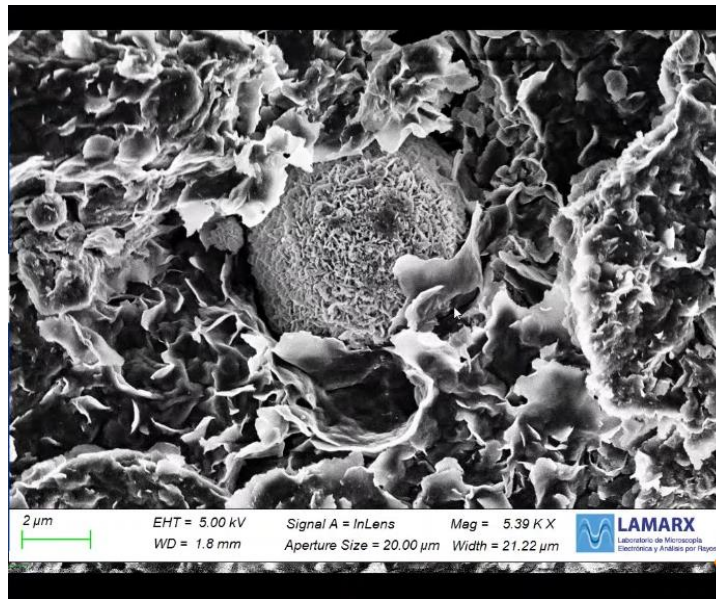
**Fig.5.23-** Interporosidad en muestra de CRclay-1día (8μm a 70 μm)



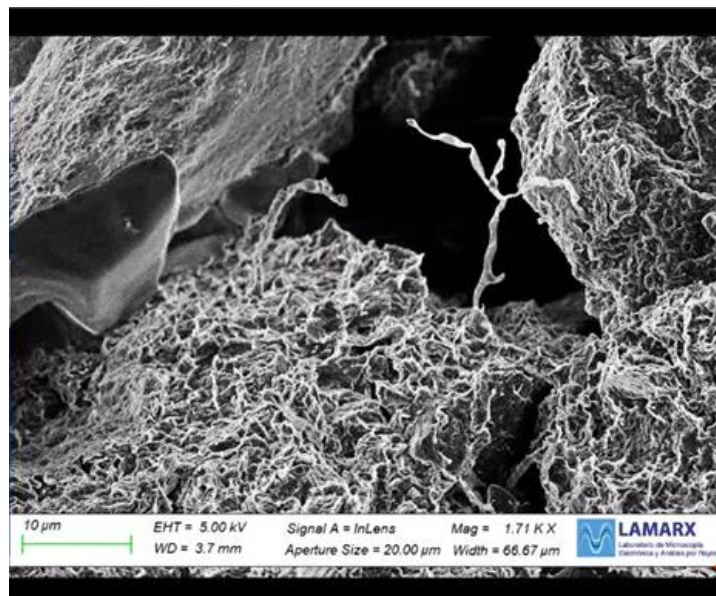
**Fig.5.24-** Interporosidad en muestra de 10%CLS-1día (10μm a 100μm)

También mediante el análisis de la microestructura por medio de las imágenes obtenidas con SEM se identificaron núcleos de magnesio coincidentes con lo encontrado a través del mapeo de elementos (Fig.5.25 y Fig.5.26). Se pudieron observar un mayor número de estructuras longilíneas con el incremento en el contenido de CLS (Fig.5.26 para 3%CLS, Fig.5.27 para 7% y Fig.5.28 para 10%CLS).

Mediante el mapeo de una de estas estructuras se intentaron identificar elementos que no se encontrasen en el mapeo general, el resultado demostró que los elementos coincidían con los presentes en el resto de la muestra. A pesar de ello, con el incremento del contenido de CLS se observa un aparente incremento en la cantidad de formas longilíneas.



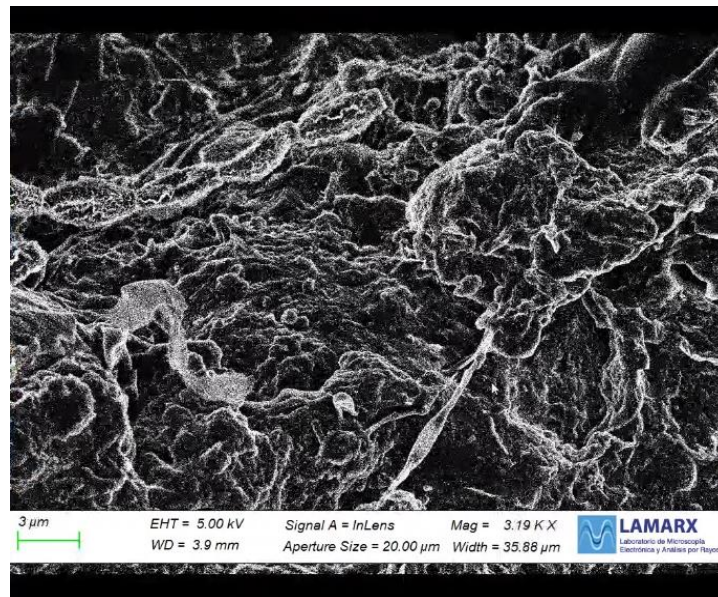
**Fig.5.25-** Estructura de sulfato de calcio de forma esférica (imagen muestra 0%CLS-1día)



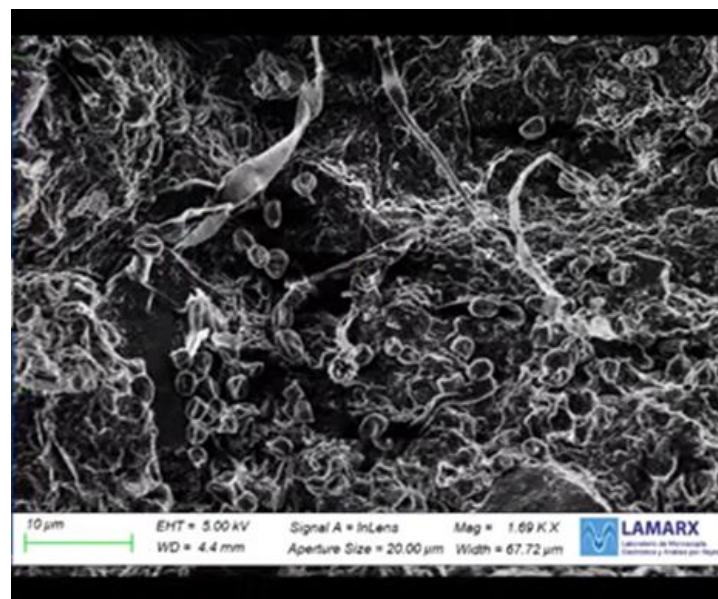
**Fig.5.26-** En la imagen se observa un pequeño grano de limo o arena y una estructura longilínea (imagen muestra 3%CLS-1día)

En los difractogramas no se pudieron encontrar alteraciones significativas en los minerales presentes en la muestra de CRclay. Fueron detectados pequeños redondeos en los picos de las esmectitas y ensanchamiento en las bases los cuales mostrarían la modificación en el tamaño de los granos. Esto fue demostrado tanto por medio de los resultados logrados con la porosimetría BET como MIP. Los pequeños desplazamientos que muestran los picos correspondientes a plagioclasas y

esmectitas muestran cambios en los planos cristalográficos que coinciden con acercamientos entre las partículas por tratarse de desplazamientos hacia la izquierda.



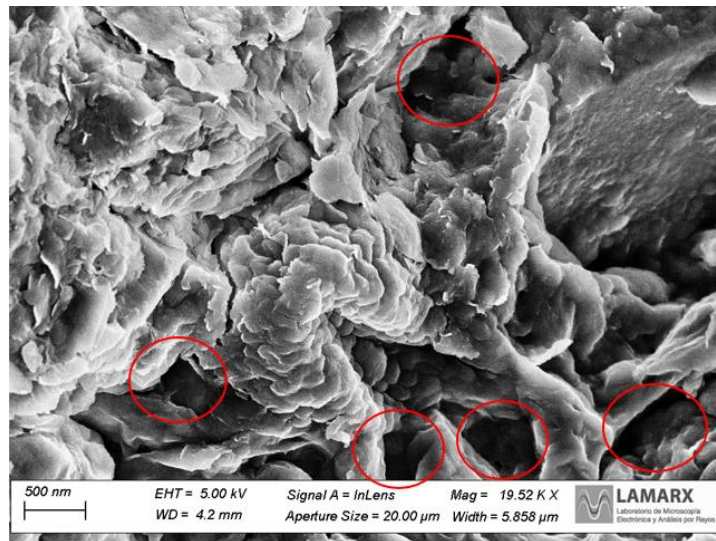
**Fig.5.27-** Estructura longilínea (imagen muestra 7%CLS-1año): suavizado en la estructura general, alta cantidad de estructuras longilíneas y esporas



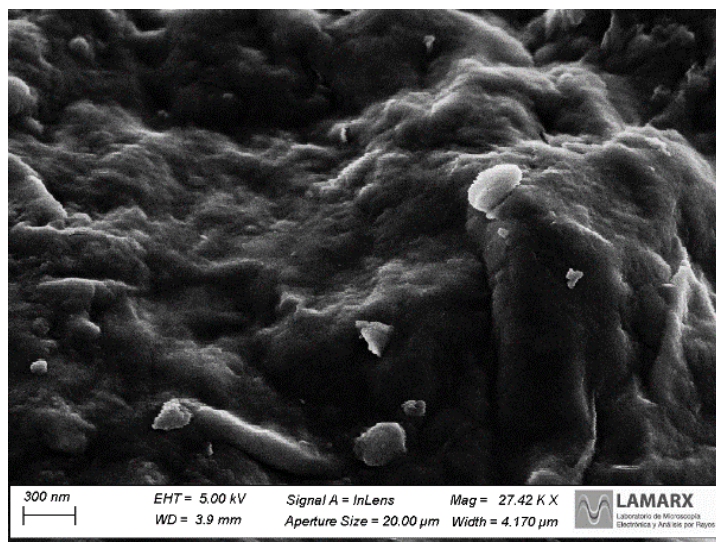
**Fig.5.28-** Incremento aparente en el número de estructuras longilínea (10%CLS-1día) y esporas.

Además de los cambios estructurales producidos por la adición de CLS, el tiempo influye en la forma de la estructura general del suelo compactado: las partículas se acercan entre sí formando grupos de partículas de mayor tamaño y se incrementa la interporosidad. Esto puede observarse mediante la comparación entre la Fig.5.27 correspondiente a la muestra de 3%CLS-1día y Fig.5.28 para

la muestra de 10%CLS-1día. Las formas se presentan suavizadas con el paso del tiempo tal como se observa en Fig.5.29 (10%CLS) y Fig.5.30 (7%CLS).

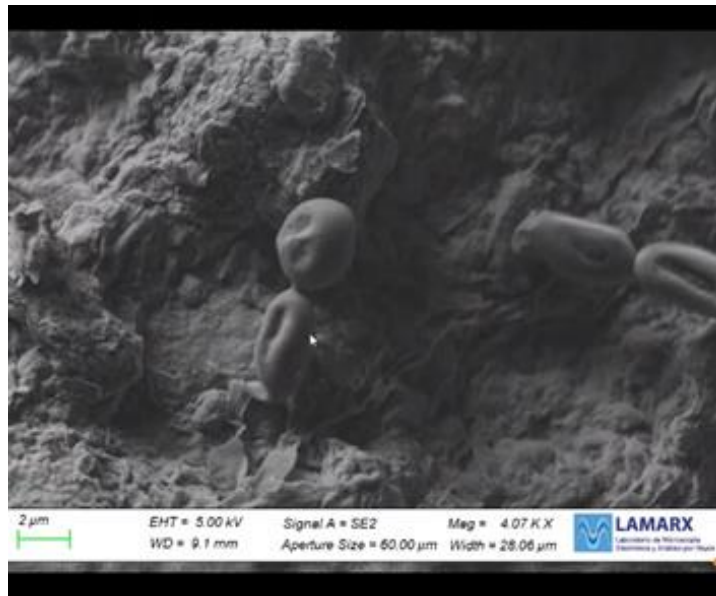


**Fig.5.29.** 10%CLS-1día: interporosidad y partículas agrupadas



**Fig.5.30-** 7%CLS-1año: formas redondeadas con bordes suavizados.

Al realizar el análisis de muestras en función de la edad y con porcentajes altos de CLS fue posible detectar la presencia de dos tipos de esporas relacionadas directamente con la metabolización de CLS *Spora Thinghirensis* S10 (estructuras ovoides con hendidura longitudinal, Fig.5.31) y *Spora Lienomycini* 5C (estructura ovoide con apariencia puntiaguda, Fig.5.32). Estas esporas fueron identificadas en suelos con alto contenido de lignina natural (Nour et al., 2019) y no fueron encontradas en las muestras CRclay. Las muestras en las que se encontraron cadenas de mayor longitud y mayor contenido de esporas fueron aquellas con mayor contenido de CLS.



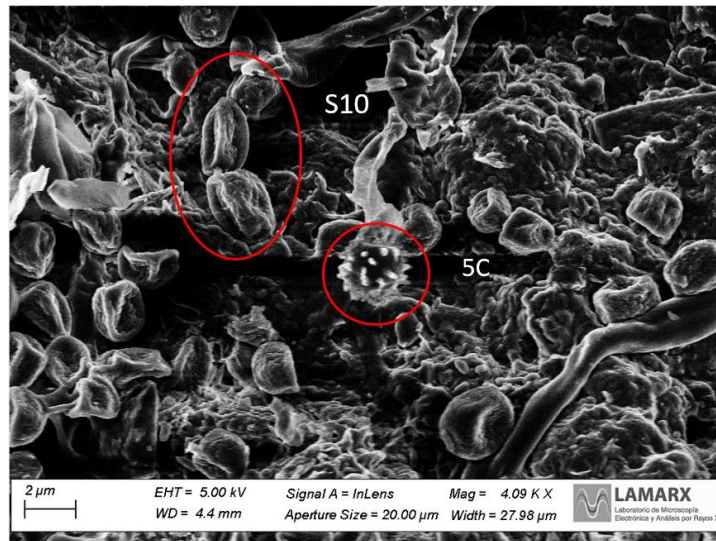
**Fig.5.31-** Espora Thinghirensis S10 en muestra con 10%CLS



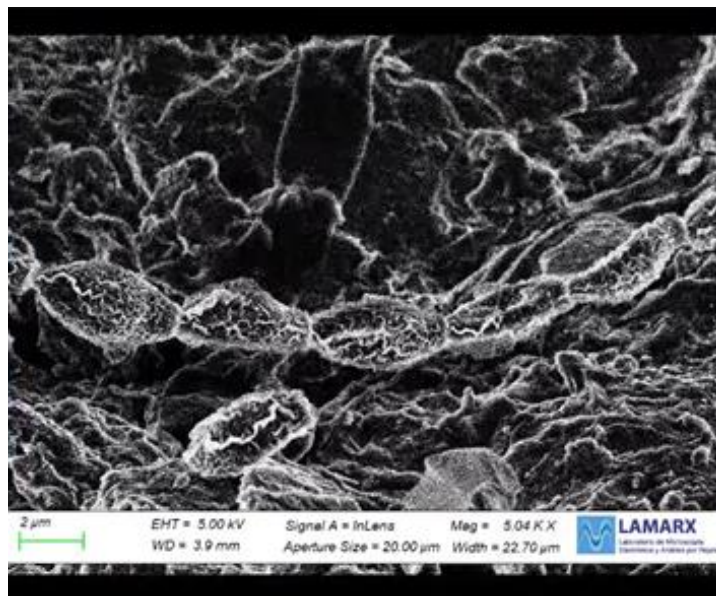
**Fig.5.32-** Imágenes obtenidas por medio del ensayo SEM para una muestra de 10%CLS-1día. En primer plano Espora Spora Lienomycini 5C

La influencia de la edad también se refleja en las esporas las cuales muestran un envejecimiento en su superficie (comparación que surge de comparar la Fig. 5.33 con la Fig.5.34, y la Fig.5.35 con Fig.5.36). Las esporas 5C en su totalidad y las S10 en algunos casos, se destruían (quemaban) cuando el haz de electrones incidía directamente sobre ellas mostrando que su

composición era 100% material orgánico o carbono. Dado que la destrucción se producía en forma casi instantánea no fue posible capturar imágenes un instante antes y después de la destrucción.



**Fig.5.33-** Esporas en muestra de 10%CLS-1día



**Fig.5.34-** Imágenes obtenidas por medio del ensayo SEM para una muestra de 7%CLS-1año

Se presentan las comparaciones para dos diferentes escalas, cercanas a 5X, y a 15X. A pesar de los resultados presentados por Nour (2019) no pudo identificarse el fin que estas esporas cumplen en la metabolización del CLS.

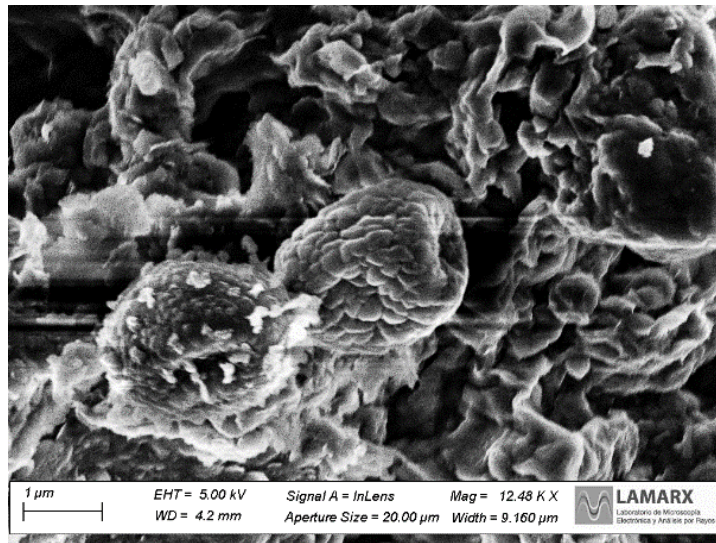


Fig.5.35- 10%CLS-1día. Efecto de envejecimiento de las esporas: muestra joven.

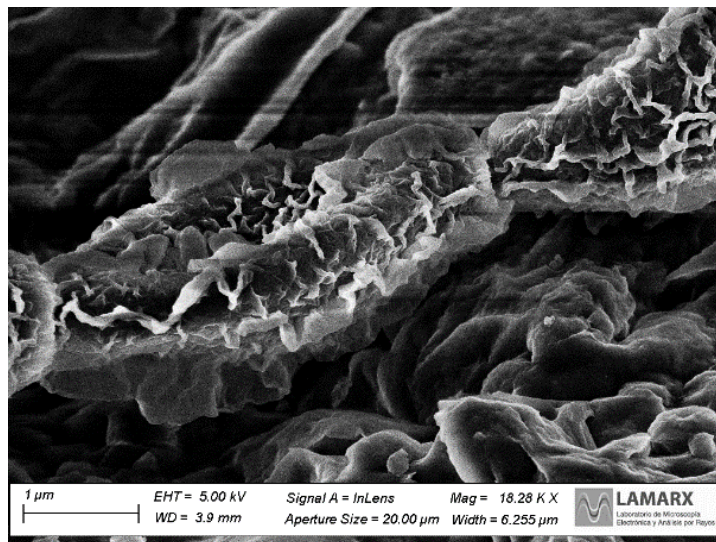


Fig.5.36- 7%CLS-1año. Efecto de envejecimiento en las esporas: muestra envejecida.

### 5.5. INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE CLS A CRclay DESDE EL PUNTO DE VISTA TOXICOLÓGICO

Los suelos expansivos de la zona casi en su totalidad poseen un alto contenido de sales, pH levemente básico, correspondiendo su clasificación a suelos sódico-alcalinos. El agregado de CLS reduce su pH a valores cercanos al neutro y modifica el balance eléctrico. Durante la etapa de consolidación presente en algunos de los ensayos, los lixiviados puros recolectados mostraron ser nocivos tanto para crecimiento como para la germinación de las semillas de Lactuca Sativa.

Valores del orden del 30% de disolución inhiben la germinación y en el orden de 12% inhiben el crecimiento (las semillas germinan pero en el momento de desarrollarse completamente se inhibe

su desarrollo total). Esto muestra que la combinación de las sales del suelo y el CLS en un porcentaje superior al presentado genera un impacto importante en cuanto a la toxicidad para los cultivos.

El empleo de CLS en estado sólido y preparado en disoluciones en peso de agua destilada, sin considerar la interacción con las sales presentes en CRclay también genera un impacto tanto sobre la germinación (preparado en una mezcla de agua destilada y CLS al 5% en volumen) como en la elongación (preparado en una mezcla de agua destilada y CLS al 1,2% en volumen). El empleo de porcentajes mayores a 10% de CLS empleado como aditivo conducirá a valoraciones tóxicas menores a las presentadas, produciendo un mayor efecto tóxico sobre el organismo de control. La alta solubilidad en agua que posee el CLS empleado conduce a efectos adversos sobre la vegetación a pesar de reducir el valor del pH. El aumento de la permeabilidad del suelo tratado favorece el arrastre de los lixiviados por lo que se recomienda proteger la superficie para evitar los movimientos del agua dentro de la masa de suelo. A pesar de éstas recomendaciones, puede observarse que el orden de magnitud de la permeabilidad de las mezclas obtenidas sigue correspondiendo al de un suelo de características poco permeable, coincidente con la permeabilidad de una arcilla. En caso de emplearse con otros suelos con alto contenido de sales sería recomendable realizar ensayos de toxicidad con el mismo organismo de control e inclusive con otros adicionales.

## **5.6. CONCLUSIONES**

Los ensayos mecánicos, hidráulicos, análisis de la microestructura y toxicidad permitieron validar el mecanismo que se desarrolla durante la interacción de CRclay, incluidas las sales presentes, y CLS. Fue posible entender mediante el análisis de los valores obtenidos de potencial Z, pH, sales, cationes, mapeo de elementos, FTIR, ensayos DRX, SEM, BET, MIP, los cambios producidos en la microestructura de las mezclas para diferentes porcentajes. Estos cambios se reflejan en la reducción del potencial de expansión y en la presión de hinchamiento, siendo ambos parámetros importantes en el momento de diseñar y calcular construcciones civiles.

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1. INTRODUCCIÓN**

En esta investigación fue evaluado el empleo de un lignosulfonato de calcio como estabilizante de un suelo con potencial de expansión medio a alto. Para ello se realizó un proceso de selección inicial a partir del cual surgieron un suelo local y un lignosulfonato de calcio. El suelo local fue seleccionado de un grupo de tres suelos, todos ellos caracterizados. El lignosulfonato surgió de un grupo de catorce bioaditivos, los cuales fueron seleccionados por medio de la determinación de los límites de Atterberg a diferentes tiempos de contacto. Los resultados fueron comparados con los obtenidos empleando cal.

Una vez seleccionados el suelo y el aditivo, las propiedades estudiadas y analizadas, todas ellas en función del porcentaje de aditivo y algunas en función de la edad de las muestras se centraron en cinco ejes: 1) La caracterización físico-química de los materiales de estudio y de los diferentes porcentajes de mezclas, 2) el comportamiento mecánico de las mezclas, 3) el comportamiento hidráulico saturado y parcialmente saturado, 4) la caracterización microestructural y 6) la evaluación de la afectación al medio ambiente de bio-aditivo seleccionado.

La caracterización de las mezclas se inició con la determinación de las propiedades índices y físicas (límites de consistencia, granulometría por vía seca y por vía húmeda, granulometría por difracción láser, contracción lineal, actividad, superficie específica), la composición química y la interacción bioaditivo-suelo (capacidad de intercambio catiónico, pH, contenido e identificación de sales, potencial Z, espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier) y la mineralogía (DRX)

El comportamiento mecánico se evaluó a través de ensayos de expansión libre, de presión de hinchamiento por métodos directos e indirectos, ensayo de compresión simple y corte triaxial consolidado no drenado. Los ensayos de compresión simple se centraron en evaluar cuatro porcentajes de bioaditivo y seis edades con el objeto de analizar la evolución de la resistencia y rigidez en función del porcentaje de aditivo y el tiempo de contacto bioaditivo-suelo.

El comportamiento hidráulico de las mezclas se evaluó por medio de ensayos de permeabilidad, la medición de la succión por técnica de papel de filtro e higrómetro de punto de rocío para calibrar la curva de retención de agua de las mezclas.

La caracterización de la microestructura se centró en el estudio del efecto del bio-aditivo en la porosimetría por técnicas de BET y MIP donde mostraron los cambios producidos en el tamaño de poros, superficie específica, volumen de poros, distribución bimodal de la porosidad y se la relacionó con la microscopía de barrido electrónico para validar los resultados.

La evaluación del impacto medioambiental se realizó con un análisis de lixiviados y la toxicología empleando semillas de Lactuca

Todos estos ensayos permitieron analizar los cambios producidos por el lignosulfonato sobre las propiedades mecánicas, hidráulicas, y sobre la microestructura de las muestras. También permitieron entender los mecanismos de estabilización desarrollados por la interacción entre el suelo y el aditivo. El análisis de los lixiviados y el estudio de su toxicidad por otro lado permitieron evaluar el impacto ambiental del aditivo aislado y combinado con las sales del suelo.

## 6.2. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran la factibilidad de emplear estos aditivos como modificadores del potencial de expansión. Las contribuciones que nuestra investigación aporta al conocimiento sobre el empleo de un lignosulfonato como aditivo son las siguientes:

- Los límites líquidos obtenidos muestran una reducción tanto con el incremento en el porcentaje de lignosulfonato como con el incremento de la edad de las muestras. Esta reducción muestra la modificación en la distancia entre las partículas de arcilla. A mayor contenido de lignosulfonato menor distancia entre partículas debido al menor valor del potencial Z. Esto no se cumple para 3% de aditivo, porcentaje al cual el potencial Z es ligeramente mayor. El intercambio catiónico en el que intervienen los iones  $\text{Ca}^{+2}$  aportados por el lignosulfonato, los cuales se enlazan con las moléculas polarizadas de agua produciendo el incremento en el tamaño de las moléculas, reduce la cantidad de capas de agua adsorbida por las partículas laminares de arcilla. De este modo se reduce el volumen de agua necesaria para desarrollar completamente la doble capa difusa y consecuentemente se reduce el cambio en el volumen total.

- Las curvas de compactación muestran una reducción en la densidad seca máxima y un incremento en la humedad óptima. El descenso en la densidad seca máxima se atribuye a la muy baja gravedad específica que posee el lignosulfonato. Mientras la gravedad específica de la arcilla es de 2,7, el lignosulfonato de calcio empleado posee una gravedad específica de 0,51. El incremento en la humedad óptima es atribuible a la solubilidad del lignosulfonato y su alto potencial Z de carga negativa, el cual compite en un primer momento con las partículas de arcilla por la adsorción de moléculas polarizadas de agua.

- El hinchamiento libre que presentan las probetas moldeadas con 10% en peso seco de lignosulfonatos muestran una reducción del 84% para probetas ensayadas un día después de moldeadas y un 83% para probetas ensayadas 9 meses después. La probeta con 3% de aditivo presentó un comportamiento peor al presentado por el suelo sin aditivo, incluyendo una mayor expansión a los 9 meses comparada con la expansión a 1 día. La respuesta se encontraría en que el 3% de lignosulfonato presenta un pequeño incremento en el valor del potencial Z respecto al potencial Z del

suelo sin aditivo. Esto indica una mayor cantidad de moléculas dipolares de agua necesarias para desarrollar completamente la doble capa.

– La presión de hinchamiento determinada empleando cuatro diferentes métodos mostró una tendencia clara a disminuir con el incremento en el porcentaje de lignosulfonato. El 10% de lignosulfonato presentó valores mayores a los del 7% en el método de volumen constante. Esto se debe a que estos ensayos son muy sensibles a pequeños cambios en el tamaño de las probetas. Un error del 1% en la altura de una probeta al moldearla puede producir una variación en la presión de hinchamiento del orden del 45%. La reducción de la presión de hinchamiento comparando probetas con 10% de lignosulfonato respecto a los valores obtenidos para las probetas sin aditivo varió entre el 44% y el 100%. El porcentaje de lignosulfonato que presenta mejor eficiencia es 10%.

– De la superposición de las curvas de presión hinchamiento versus hinchamiento libre se observó que el agregado del lignosulfonato influye sobre el tiempo en el que se desarrollan las curvas de hinchamiento libre. La explicación se encuentra en el proceso mismo desarrollado en cada una de las etapas. La etapa explosiva (inicial) corresponde a la saturación de los interporos, la etapa primaria corresponde a la saturación de los intraporos, y la secundaria al desarrollo de la doble capa difusa. Al producirse un cambio en los valores de la intraporosidad y la interporosidad tanto en volumen como en tamaño característico de poro, cada una de las etapas se modifica. En forma adicional, como la doble capa posee un espesor menor para el 10% de lignosulfonato, la presión de hinchamiento máxima se desarrollará más rápidamente y alcanzando valores menores a los correspondientes a porcentajes de aditivo menores.

– Las pendientes de las curvas de consolidación obtenidas con los métodos del edómetro, hinchamiento restringido, y ASTM son semejantes para el método del edómetro e hinchamiento restringido, y son menores a la obtenida empleando el método ASTM. Cuando mayor es el porcentaje de aditivo la pendiente de las curvas ASTM se acercan a las pendientes de las curvas del edómetro e hinchamiento restringido. El cambio en la porosidad influye sobre la permeabilidad, la cual se encuentra directamente relacionada con las pendientes de las curvas denominadas coeficientes de consolidación. La curva ASTM se obtiene mediante escalones de carga restringidos a un período determinado lo que no asegura el total desarrollo de la consolidación primaria. Esto no ocurre en los otros dos métodos en los que el escalón finaliza cuando se desarrolla completamente la consolidación primaria.

– La resistencia a la compresión simple no confinada fue evaluada en función del tiempo en muestras de hasta un año. Las muestras mostraron ascensos y descensos en las resistencias obtenidas. Se realizó el análisis por medio de dos coeficientes, el de ductilidad y el parámetro de resistencia, ambos analizados por medio de valores absolutos y relativos. La tendencia general muestra

que la resistencia a la compresión simple aumenta con la edad de las probetas y también con el porcentaje de lignosulfonato. El comportamiento hasta el tercer mes es de crecimiento de la resistencia a la compresión simple, le sigue un descenso hasta el noveno mes a partir del cual asciende hasta llegar al año. Este mismo comportamiento lo muestran las probetas sin aditivo, lo cual muestra que no es un comportamiento asociado al aditivo sino al suelo mismo. Esto demuestra que el aditivo no modifica el comportamiento mecánico en función del tiempo sino que sigue la tendencia mostrada por el suelo compactado lo cual podría encontrarse asociado a la redistribución del agua dentro de los poros del suelo en estado no saturado.

- Los ensayos triaxiales para probetas con densidad seca de  $13.3 \text{ kN/m}^3$  de densidad seca mostraron para 100kPa de presión de confinamiento un comportamiento dilatante, y a 200kPa y 400kPa un comportamiento contractivo.

- Las permeabilidades obtenidas mediante ensayos de carga variable disminuyen a lo largo del tiempo, mientras que el incremento en el porcentaje de lignosulfonato produce el aumento de la permeabilidad. Para un mismo porcentaje de aditivo, la reducción a lo largo del tiempo se produce por el proceso mismo de expansión de la probeta por el desarrollo de la doble capa difusa. La probeta cuyo volumen total permanece constante a lo largo del ensayo, pasa por los procesos de saturación de los interporos, luego de los intraporos y por último el desarrollo de la doble capa. El desarrollo de la doble capa inmoviliza moléculas de agua, por esta razón el descenso de la curva de permeabilidad para 3% de aditivo es mayor que para el suelo sin aditivo, y la curva con menor reducción de la permeabilidad en función del tiempo es la correspondiente a 10% de lignosulfonato.

- Las curvas de retención obtenidas por el modelo de van Genuchten y ajustadas por el método de mínimos cuadrados muestran un incremento en  $\lambda$  con el incremento en el porcentaje de lignosulfonato. Las curvas de 0% y 3% son prácticamente iguales. Las curvas de 7% y 10% muestran un valor de  $\lambda$  similar, la diferencia reside en que la curva correspondiente a 10% se encuentra desplazada hacia la izquierda en el gráfico que representa la curva de saturación. El aumento en  $\lambda$  muestra el cambio en el comportamiento de las muestras acercándose al de un material granular dado por el incremento en el tamaño de las partículas. El desplazamiento muestra el aumento en el tamaño de los poros lo cual produce una reducción en el valor de la succión total.

- Las porosimetrías realizadas mediante intrusión/extrusión de mercurio presentan cambios en la distribución bimodal de las arcillas compactadas. Las porosimetrías fueron realizadas para dos edades diferentes de las probetas: 1 día y 1 año. Las curvas de distribución de tamaños de poros para 7% y 10% fueron similares tanto para 1 día como para 1 año. Con el incremento en la edad, todos los porcentajes muestran una reducción en el volumen de los intraporos, y el diámetro característico muestra un pequeño aumento en el tamaño. La interporosidad muestra un aumento en

el volumen total de poros pero un descenso en el diámetro de poros característicos. Por debajo de 3,7nm nos encontramos con dimensiones muy pequeñas, se observa que este volumen se incrementa con el incremento de lignosulfonato. Este tamaño de poros es el espacio entre láminas elementales, el cual no puede ser intruido por mercurio ( $em_f$ ).

- Los ensayos BET mostraron que con el incremento de lignosulfonato las superficies específicas de las probetas aumentaban, el volumen total de poros disminuía, el diámetro de poros promedio y el tamaño de las partículas presentaban un aumento. Las partículas al presentar menor potencial Z, menor espesor de capa difusa, se aproximan entre sí, formando grupos de partículas a los que el ensayo reconoce como nuevas partículas lo cual queda demostrado por los valores decrecientes de superficie específica obtenidos por medio de este ensayo.

- Los ensayos DRX no mostraron redondeo en sus picos que pudieran ser asociados con presentación de amorfismo. Los difractogramas mostraron pequeños desplazamientos en el primer pico correspondiente a la arcilla y en uno de los picos correspondiente a la plagioclasa, ambos podrían encontrarse asociados a cambios en los planos cristalográficos. Pequeños cambios en las intensidades de los picos de la arcilla (pequeña disminución) y de la plagioclasa (pequeño aumento) podrían ser asociados a variaciones en los tamaños de los granos.

- Los ensayos SEM muestran la aparición de dos tipos de esporas asociadas a la metabolización de las ligninas y lignosulfonatos, las esporas S10 y 5C. Estas esporas no fueron reportadas por otros investigadores. Su número se incrementa con el porcentaje de lignosulfonato. Estas esporas muestran envejecimiento al comparar las muestras de 1 día y 1 año. Se presentan en formas aisladas en el caso de bajos porcentajes de lignosulfonato y en cadenas de diferente longitud en el caso de altos porcentajes. Las esporas 5C se desintegran al incidir el haz de electrones lo que demuestra su carácter orgánico, formadas principalmente por carbono. También se observan nuevas estructuras con forma de fibras las cuales al realizarse un mapeo de elementos mostraron la misma constitución que el resto de la muestra. En su estructura general las muestras presentaron cambios en la distribución y tamaños de los poros que coinciden con los resultados obtenidos por medio de los ensayos BET y MIP.

- De los datos de SWRC y PH (obtenida mediante Lambe empleando aro dinamométrico) se obtuvo una correlación entre el grado de saturación, la presión de hinchamiento y la succión total, para muestras sin lignosulfonato y muestras con 10% de lignosulfonato. Esto permite obtener la presión de hinchamiento a partir de la humedad del suelo sobre muestras cuya densidad seca corresponde a 13.3kN/m<sup>3</sup>, en el suelo sin aditivo y para el suelo con 10% de lignosulfonato.

- Los mecanismos de estabilización desarrollados entre el suelo y el lignosulfonato incluyen la adsorción periférica de la molécula formada por el catión-agua en la superficie de la

partícula de arcilla debido a la naturaleza hidrofílica y amorfa del lignosulfonato, la consecuente encapsulación de los minerales de arcilla, el intercambio catiónico (monovalentes por covalentes  $\text{Ca}^{+2}$ ), la reducción de la doble capa difusa por el mayor radio de la molécula catión-agua, la adsorción de moléculas orgánicas entre capas, el desarrollo de fuerzas de van der Waals, interacciones electrostáticas y enlace de hidrógeno (se producen en el volumen de agua fuera de la zona afectada por la doble capa). Todos estos mecanismos solo introducen cambios mecánicos y químicos pero no mineralógicos en el suelo.

- La evaluación del impacto ambiental fue realizada sobre dos tipos de muestras diferentes: lignosulfonato puro y lixiviados. El lignosulfonato se empleó diluido en diferentes porcentajes en peso con agua destilada. Los lixiviados fueron analizados para obtener su contenido de sales y su pH, y diluidos en diferentes porcentajes en volumen con agua destilada. Del análisis de los resultados se demostró que las sales del suelo son diluidas y arrastradas junto con el lignosulfonato incrementándose el pH de los lixiviados. Este hecho ocurre en menor medida con valores bajos de presión de confinamiento.

- Los ensayos de toxicidad realizados empleando semillas de *Lactuca Sativa* mostraron que los lixiviados diluidos entre un 33% y 27% (porcentaje en volumen) en agua destilada impiden la germinación de las semillas, y en una dilución cercana al 14% limita la elongación de las radículas.

- Los ensayos de toxicidad realizados con lignina diluida en agua (porcentaje en peso) con valores entre 4% y 5% impiden la germinación de las semillas. Con porcentajes de dilución entre 1,1% y 1,2% se limita la elongación de las radículas.

- Los resultados muestran que las ligninas son arrastradas dentro de los lixiviados junto con las sales solubles presentes en el suelo. Las sales, la conductividad y el pH del suelo sin aditivo muestran que el suelo puede ser sembrado solamente con cultivos tolerantes, que su clasificación es sódico alcalino, de origen marino. La adición del lignosulfonato no empeora su condición, aunque el empleo de porcentajes muy altos de lignosulfonato en un suelo no marino debería ser evaluado desde el punto de vista de la toxicidad sobre los cultivos.

En resumen, la reducción en el límite líquido tanto con el incremento en el porcentaje de aditivo empleado como en el tiempo, la reducción en el potencial de expansión y la presión de hinchamiento, las modificaciones en el potencial Z, la modificación en las curvas de compactación, la variación tanto con el porcentaje como con el tiempo de la resistencia a la compresión simple no confinada, aumento en la permeabilidad, cambios en la distribución bimodal de poros y en la superficie específica de las partículas, se encuentran asociados directamente a los mecanismos de estabilización físicos desarrollados entre CRclay y CLS. El estudio del impacto ambiental permitió

evaluar el comportamiento de las mezclas y del aditivo actuando aislado y conocer las concentraciones de aditivo disuelto y de lixiviados que inhibían o detenían el crecimiento de un organismo de control seleccionado por sus múltiples beneficios. Todos los resultados muestran que el lignosulfonato de calcio resulta efectivo modificando las propiedades expansivas de la arcilla seleccionada. También indican que el porcentaje más efectivo de aditivo se encuentra entre el 7% y el 10%, valor que debería ser ajustado con más ensayos y con un balance técnico económico de costos. El impacto que produce sobre el medioambiente se encuentra muy por debajo del impacto producido por el empleo de cal o cemento como estabilizantes. Esto es debido a que el diseño de las mezclas suelo-cal se realiza con base en un pH elevado mientras que el pH obtenido mediante el empleo de CLS se reduce de forma significativa en las mezclas suelo-CLS. La estabilidad de las muestras en el tiempo ha sido demostrada. El empleo de porcentajes cercanos a 3% provoca efectos opuestos a los esperados de un estabilizante.

### **6.3. RECOMENDACIONES**

Puede observarse que el empleo del lignosulfonato de calcio resultó efectivo modificando las propiedades expansivas de CRclay. Los resultados obtenidos permitieron analizar las propiedades de las mezclas, determinar el porcentaje de aditivo óptimo, entender los mecanismos de estabilización y evaluar el impacto ambiental. Para que este lignosulfonato de calcio (Norlig®) pueda ser empleado en la estabilización de CRclay sería necesario completar el área del conocimiento con los siguientes estudios:

- Evaluación de la estabilidad de las mezclas a la acción de los rayos UV.
- Evaluación de la estabilidad de las mezclas sometidas a ciclos de congelamiento y deshielo.
- Evaluación de métodos de preparación de las mezclas en campo, definiendo los métodos más efectivos y eficientes.
- Construcción de terraplenes de prueba sometidos al tránsito, monitoreados por un período superior a un año.
- Desarrollo de un modelo predictivo que permita obtener la presión de hinchamiento o la succión total de la mezcla CRclay-10% lignosulfonato obtenida a partir de la densidad seca de la muestra determinada in situ.

### **6.4. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN FUTUROS**

A continuación se presentan algunas recomendaciones que permitirán avanzar en el empleo del lignosulfonato como aditivo.

- Desarrollo de un método similar al de Eades y Grim (1960) que permita obtener el porcentaje de lignosulfonato. Esto favorecería partir de un porcentaje sobre el cual comprobar la presión de hinchamiento por el método de volumen constante y el hinchamiento libre para el porcentaje definido de lignosulfonato.
- Incorporación del estudio del efecto de los rayos UV sobre el lignosulfonato considerando la posibilidad de incorporar un bloqueador contra rayos UV.
- Verificación del comportamiento de las mezclas empleando terraplenes de prueba, monitoreando en el tiempo parámetros como la succión, UCS, lixiviados, y deformaciones más allá del primer año de vida útil.
- Evaluación de las formas más adecuadas de obtener las mezclas, desde la preparación, disposición de los materiales, homogenización, humedecimiento y compactación.
- Considerar el empleo de otros lignosulfonatos de calcio para verificar los resultados sobre el mismo suelo. Dado que el mecanismo desarrollado por el lignosulfonato empleado estuvo relacionado con los iones  $\text{Ca}^{+2}$ , se recomienda seguir los estudios con otros lignosulfonatos con iones polivalentes producto de procesos de obtención similares.
- Verificar la eficacia del mismo lignosulfonato sobre otros suelos expansivos cuyo potencial de expansión sea superior al de CRclay, por ejemplo GAclay y FRclay.
- Estudiar el mismo lignosulfonato polimerizado como estabilizante. Existen un escaso número de publicaciones sobre el empleo de este tipo de aditivos los cuales presentaron resultados positivos. Cabe destacar que los suelos ensayados poseían un menor potencial de expansión. No se hallaron publicaciones con suelos de alto potencial.
- Dado el alto impacto ambiental que producen el empleo de cal o cemento como aditivos, no se considera conveniente estudiar combinaciones de estos aditivos con un lignosulfonato o una lignina. Por más bajo que sea el porcentaje de cal o cemento empleado influyen sobre el pH del suelo.
- Avanzar en el estudio del efecto de las esporas sobre el comportamiento de las mezclas. Las publicaciones encontradas muestran que estas esporas metabolizan las ligninas produciendo polisacáridos pero su efecto no pudo ser entendido ni analizado dentro del alcance de esta tesis.

Este material, residuo producido en enormes cantidades, que año a año se incrementan a nivel mundial por el incremento en el consumo de papel, pasta de papel y sus derivados representa un potencial estabilizante de suelos expansivos. Llevar al terreno los conocimientos adquiridos sería el próximo paso lógico por seguir y así evaluar su comportamiento en campo. Monitorear el

comportamiento in situ incluyendo la exposición al congelamiento y deshielo, humedecimiento y secado, y el comportamiento ante los rayos UV validaría finalmente su empleo como estabilizante.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abduljauwad S., & Al-Sulaimani, G. (1993) Determination of Swell Potential of Al-Qatif Clay. *Geotechnical Testing Journal* 16, no. 4: 469-484. <https://doi.org/10.1520/GTJ10287J>
- Ahmad, S., Khairul, A., Khairul, A., Ayob, K., Norhazilan, Md. (2008) Determination of Plastic limit of soil using modified methods. *SourceOAI. Malaysian Journal of Civil Engineering* 20(2) :295 - 305
- Alazigha, D. P. (2015) Thesis of the Degree of Doctor of Philosophy: The efficacy of lignosulfonate in controlling the swell potential of expansive soil and its stabilization mechanisms. University Wollongong. August 2015. <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=5491&context=theses&httpsredir=1&referer=>
- Alazigha, D. P., Indraratna, B., Vinod, J. S., Ezeajugh, L. E. (2016) The swelling behaviour of lignosulfonate-treated expansive soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 169(3), 182–193. <https://doi.org/10.1680/jgrim.15.00002>
- Alazigha, D. P., Indraratna, B., Vinod, J.S., Heitor, A. (2018a) Mechanisms of stabilization of expansive soil with lignosulfonate admixture. *Transportation Geotechnics*, 14, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.11.001>
- Alazigha, D. P., Vinod, J.S., Indraratna, B., Heitor, A. (2018b) Potential use of lignosulfonate for expansive soil stabilization. *Environment Geotech.* 6(7), 480-488. <https://core.ac.uk/download/pdf/237588438.pdf>
- Alconada Magliano, M., Lanfranco, J. W., Pellegrini, A. E. (2018) Suelo en el paisaje. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. UNLP. EDULP. <https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/861/851/2836-1>
- Alhassan, M. (2008) Permeability of lateritic soil treated with lime and rice husk ash, *Assumption University Journal of Thailand*, 12(2), 115-120. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.562.1064&rep=rep1&type=pdf>
- Ali, F.H., Adnan, A., Choy, C.K. (1992) Use of rice husk ash to enhance lime treatment of soil, *Can. Geotech. J.*, 29(5), 843-852. <https://doi.org/10.1139/t92-091>
- Ali, H. ; Mohamed, M. (2018) The effects of lime content and environmental temperature on the mechanical and hydraulic properties of extremely high plastic clays. *Applied Clay Science*. Volume 161. 2018. Pages 203-210. ISSN 0169-1317. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.012>
- Al-Khanbashi, A. & Abdalla, S.W. (2006) Evaluation of three waterborne polymers as stabilizers for sandy soil. *Geotech. Geol. Eng.* 24(6), 1603-1625. <https://doi.org/10.1007/s10706-005-4895-3>
- Al-Rawas, A. & Goosen, M.F.A. (2006) *Expansive soils: recent advances in characterization and treatment*. Taylor & Francis, London. UK. Edited by Amer Ali-Rawas, Mattheus F.A. Goosen. 1st Edition. 1st Edition <https://doi.org/10.1201/9780203968079>. Pages 544 eBook ISBN 9780429224539. Subjects Earth Sciences, Engineering & Technology.
- Al-Rawas, A.A. (1999) The factors controlling the expansive nature of the soils and rocks of Northern Oman. *Engineering Geology*, 53(3-4), 327-350. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00085-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00085-4)

Al-Rawas, A. A., & McGown, A., (1999) Microstructure of Omani expansive soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(2), 272-290. <https://squ.pure.elsevier.com/en/publications/microstructure-of-omani-expansive-soils>

Al-Taie, M. M., Disfani, R. P., Evans, A., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S. (2017) Determination of Optimum Lime Content for Volcanic Expansive Clays. Pages 1623 – 1630. Ebook. Conference: Proceedings of 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (15th PCSMGE) At: Buenos Aires; Argentina. DOI: 10.3233/978-1-61499-603-3-1623.

Andrini, L., Moreira Toja R., Gauna, M.R., Conconi, M.S., Requejo, G., and Rendtorff, N.M. (2017) Extended and local structural characterization of a natural and 800 °C fired Na-montmorillonite-Patagonian bentonite by XRD and Al/Si XANES. *Appl. Clay Sci.* 137, 233-240. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169131716305749>

Arasan, S., Bagherinia, M., Akbulut, R. K., Zaimoglu, A. S. (2017) Utilization of Polymers to Improve Soft Clayey Soils Using the Deep Mixing Method. *Environmental & Engineering Geoscience*, 23(1), 1–12. doi:10.2113/gseegeosci.23.1.1

Area, C. (2021) Inversiones forestales: la industria del papel está en crecimiento continuo en el mundo y es cada vez más sostenible. *Argentina Forestal*. <https://www.argentinaforestal.com/2021/02/05/inversiones-forestales> (última fecha de acceso 16 de diciembre de 2021).

Argyropoulos, D.S. & Menachem, S.B. (1997) Lignin In: *Advances in Biochemical Engineering. Biotechnology*, 57, 127-158. <https://doi.org/10.12989/gae.2015.8.1.067>

Aro, T. & Fatehi, P. (2017) Production and Application of Lignosulfonates and Sulfonated Lignin. *ChemSusChem*, 10(9), pp. 1861–1877. doi: 10.1002/cssc.201700082. [https://www.researchgate.net/publication/314202012\\_Production\\_and\\_Application\\_of\\_Lignosulfonates\\_and\\_Sulfonated\\_Lignin](https://www.researchgate.net/publication/314202012_Production_and_Application_of_Lignosulfonates_and_Sulfonated_Lignin)

ASCE 88(SM3):53–87 Snethan, D.R., Johnson, L.D., Patrick, D.M. (1977) An evaluation of expedient of methodology for identification of potentially expansive soils. In: *Soils and Pavements Lab, US Army Eng. Water Way Exp. Station, Vicksburg, MS, Report No. FHWARE-77-94, NTIS PB-289-164.*

Ashayeri, I. & Yasrebi, S. (2009) Free-swell and swelling pressure of unsaturated compacted clays; experiments and neural networks modeling. *Geotechnical and Geological Engineering*, 27(1), 137–153. <https://doi.org/10.1007/s10706-008-9219-y>

Asselman, T. & Garnier, G. (2000) Adsorption of model wood polymers and colloids on bentonites. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 168(2), 175-182. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(00\)00430-1](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(00)00430-1)

ASTM D2166/D2166M-16 (2016) Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil.

ASTM D2487-11 (2011) Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). In: *Annual Book of ASTM Standards*, Philadelphia, PA, USA.

ASTM D422-07 (2007) Standard Test Method for Particle-size Analysis of Soils. In: *Annual Book of ASTM Standards*, Philadelphia, PA, USA.

ASTM D427-98 (2008) Standard test method for shrinkage factors of soils by the mercury method. Book of ASTM Standards, Philadelphia, PA, USA (2008).

ASTM D4318-05 (2005) Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

ASTM D4546 – 08 (2008) Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils, American Society for Testing and Materials

ASTM D4546 – red (2008) Standard Test Methods for one-dimensional swell or collapse of soils (Standard + Redline PDF Bundle) In: Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, PA, USA.

ASTM D4609-08 (2008) Standard Guide for Evaluating Effectiveness of Admixtures for Soil Stabilization. In: Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, PA, USA.

ASTM D4829 – 19 (2008) Standard Test Method for Expansion Index of Soils. In: Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, PA, USA (2008)

ASTM D5084 - 03 (2008) Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter

ASTM D5298 – 10 (2008) Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper, American Society for Testing and Materials (2010)

ASTM D6276-19 (2008) Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM D6836 – 02, e1 (2008) Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, and/or Centrifuge, American Society for Testing and Materials (2008)

ASTM D698-12e2 (2008) Test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. Book of ASTM Standards, Philadelphia, PA, USA.

ASTM D854-14 (2008) Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. In: Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, PA, USA (2014).

Asuri, S., Keshavamurthy, P. (2016) Expansive Soil Characterisation: An Appraisal. *INAEL* 1, 29–33 (2016). <https://doi.org/10.1007/s41403-016-0001-9>.

Atahu, M.K., Saathoff, F., Gebissa, A. (2019) Strength and compressibility behaviors of expansive soil treated with coffee husk ash. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 11, Issue 2, pp. 337-348. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.11.004>

Atterberg, A. (1911) Die Plastizität der Tone Internationale Mitteilungen fuer Bodenkunde, pp. 10-43. Atterberg, A. (1911). On the investigation of the physical properties of soil and on the plasticity of clays. *Int. Mitt. für Bodenkunde*, 1, 10–43. [https://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu\\_t4eb158d9\\_001.pdf](https://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu_t4eb158d9_001.pdf)

Attom, M.F. & Al-Sharif, M.M. (1998) Soil stabilization with burned olive waste. *App. clay Sci.* 13(3), 219-230. [https://www.academia.edu/5382342/Soil\\_stabilization\\_with\\_burned\\_olive\\_waste](https://www.academia.edu/5382342/Soil_stabilization_with_burned_olive_waste)

Balasubramaniam, A.S., Lin, D.G., Acharya, S.S.S., Kamruzzaman, A.H.M., Uddin, K. & Bergado, D.T. (1999) Behaviour of soft Bangkok clay treated with additives. *Proceedings of the 11th Asian Regional*

Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, Korea, August, Volume 1, pp. 11-14.

Ballard, G.E.H. & Weeks, W.F. (1963) The human factor in determining the plastic limit of cohesive soil. *Material Research and Standard, ASTM, Vol 3*, pp. 726-729.

Basha, E.A., Hashim, R., Mahmud, H.B., Muntohar, A.S. (2005) Stabilization of clay and residual soils using cement-rice husk ash mixtures. *Constr. Build. Mater.*, 5(1), 448-453.

Basma, A., Al-Homoud, A., Husein, M., Al-Bashabsheh, M. (1996) Swelling-shrinkage behavior of natural expansive clays. *Applied Clay Science*, 11(2-4), 211-227. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(96\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(96)00009-9)

Bekhiti, M., Trouzine, H., Rabehi, M. (2019). Influence of waste tire rubber fibers on swelling behavior, unconfined compressive strength, and ductility of cement stabilized bentonite clay soil. *Construction and Building Materials*, 208, 304-313. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.011>

Bell, F.G., Maud, R.R. (1995) Expansive clays and construction, especially of low-rise structures: A viewpoint from Natal, South Africa. *Environ. Eng. Geosci.*, 1, 41-59. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.l.1.41>

Bellosi, E.S. (1990) Formación Chenque: registro de la transgresión patagónica de la Cuenca del Golfo San Jorge. 11° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 57-60. San Juan.

Bellosi, E.S. (1995) Paleogeografía y cambios ambientales de la Patagonia central durante el Terciario medio. *Boletín de Informaciones Petroleras*, 44: 50-83.

Berlin, A. & Balakshin, M. (2014) Industrial lignins: analysis, properties, and applications. *Bioenergy Research: Advances and Applications*. Elsevier, 315-336. DOI: 10.1016/B978-0-444-59561-4.00018-8

Bhuvaneshwari, S., Robinson, R.G. & Gandhi, S.R. (2014) Behaviour of Lime Treated Cured Expansive Soil Composites. *Indian Geotech J* 44, 278-293. <https://doi.org/10.1007/s40098-013-0081-3>

Bicalho, K.V., Chrystello A.C., Cupertino, K.F., Fleureau, J., Correia, A. (2015) Study of suction-water content calibrations for the Whatman No. 42 filter paper Pages 2071 – 2077 DOI10.3233/978-1-61499-603-3-2071 Ebook from Fundamentals to Applications in Geotechnics.

Biscaye, P.E. (1965) Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geol. Soc. Am. Bull.* 76(7), 803-832. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1965\)76\[803:MASORD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1965)76[803:MASORD]2.0.CO;2)

Bizuallem, T. (2015) Stabilization of Expansive Clay Soil with Sugar Cane Molasses and Cement. A Thesis submitted to the school of graduate studies of Addis Ababa University in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science in Civil Engineering (Road and Transport Engineering) URI: <http://localhost:80/xmlui/handle/123456789/9345>

Blanck, G., Cuisinier, O., Masrouri, F. (2014) Soil treatment with organic non-traditional additives for the improvement of earthworks. *Acta Geotechnica*, Springer Verlag, 2014, 9 (6), pp.1111-1122. DOI : 10.1007/s11440-013-0251-6

Bolander, P. (1999) Laboratory testing of nontraditional additives for stabilization of roads and trail surfaces. *Transportation Research Record*, 2(1652), 24-31. <https://doi.org/10.3141/1652-38>

- Bouhicha, M., Aouissi, F., & Kenai, S. (2005) Performance of composite soil reinforced with barley straw. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 617–621. doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.09.013
- Bowles, J. (1988) *Foundation Analysis and Design*. 4<sup>th</sup> Edition. McGraw Hill International Editions.
- Brandl, H. (1981) Alteration of soil parameters by stabilisation with lime, *Compte rendu du X<sup>e</sup> Congrès Int. De Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations*, Stockholm, June, Volume 3, pp. 587-594. Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Volume 3, Stockholm. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(84\)91866-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(84)91866-7)
- Brazetti R (2002) A comparative study of the performance of the soil stabilizers in secondary unsurfaced roads in Paraguay . The World Bank International Bank for Reconstruction and Development. Soil Stabilization Project BIRF 3685-PA Word Bank Report.(Issue March) <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2035.0485>
- Brooks, R. H. & Corey, A. T. (1964) Hydraulic properties of porous media, *Hydrol. Paper 3*, Colorado State Univ., Fort Collins, CO, USA, 1964. 409, 410.
- Brooks, R. M. (2009) Soil stabilization with fly ash and rice husk ash. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 1(3), 209-217. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.303.978&rep=rep1&type=pdf>
- Brown, S. A. (1961) Chemistry of lignification, *Science* 134(3475), 305-313. <https://doi.org/10.1126/science.134.3475.305>
- Browning, W. C. (1955) Lignosulfonate Stabilized Emulsions in Oil Well Drilling Fluids. *Journal of Petroleum Technology*, 7(06), 9–15. doi:10.2118/393-g
- Buckingham, E. (1907) Studies on the movement of soil moisture. United States. Department of Agriculture. United States. Bureau of Soils. Editorial: Washington, Govt. Print. Off., 1907. Serie: Bulletin (United States. Bureau of Soils), no. 38.
- Bulut R., Lytton R., Wray, W. (2001) Soil Suction Measurements by Filter Paper. October 2001. Conference: Shallow Foundation and Soil Properties Committee Sessions at ASCE Civil Engineering Conference. DOI: 10.1061/40592(270)14.
- Bulut, R. (1996) A re-evaluation of the filter paper method of measuring soil suction. *Electronic Theses and Dissertations*. Texas Tech University. <http://hdl.handle.net/2346/10737>.
- Bulut, R., Leong, C. (2008). Indirect measurement of soil suction. *Geotech. Geol. Eng.* 26:633–644. Springer Science + Business Media B.V. DOI: 10.1007/s10706-008-9197-0
- Burdine, N. (1953) Relative Permeability Calculations from Pore Size Distribution Data. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 198, 71-78. <http://dx.doi.org/10.2118/225-g>
- Bureau of Indian Standards. *Indian Standard Classification and Identification of Soils for General Engineering Purposes*. BIS, New Delhi, 1970, (Rearmed 1987), IS 1498 (6) Classification procedures for expansive soils.
- Calvo Flores, G., Dobado, J. A., Garcia, I., Martinez, M. (2015) *Lignin and Lignans as Renewable Raw Materials: Chemistry Technology and Applications*, 1st ed., Wiley, 2015. ISBN: 978-1-118-59786-6 September 2015, 512 Pages.

Camacho Tauta, J., Reyes Ortiz, O. J., Mayorga Antolínez, C. (2008) Curado natural y acelerado de una arcilla estabilizada con aceite sulfonado. [https://www.researchgate.net/publication/262446747\\_Curado\\_natural\\_y\\_acelerado\\_de\\_una\\_arcilla\\_estabilizada\\_con\\_aceite\\_sulfonado](https://www.researchgate.net/publication/262446747_Curado_natural_y_acelerado_de_una_arcilla_estabilizada_con_aceite_sulfonado) Ingeniería y desarrollo. Número 24 Julio-diciembre, 2008 ISSN: 0122-3461.

Campbell, W.A. & Blackford, J. W. (1984) Fall cone method used to determine the liquid limit of soil. GR-84-11. Bureau of the Interior. Bureau of Reclamation. Division of Research and Laboratory Services Geotechnical Branch.

Canakci, H., Aziz, A., Celik, F. (2015) Soil stabilization of clay with lignin, rice husk powder and ash. Geomechanics and Engineering. Vol.8. Issue 1. <https://doi.org/10.12989/gae.2015.8.1.067>

Carazo, E., Borrego-Sanchez, A., Sánchez-Espejo, R., Garcia-Villen, F., Cerezo, P., Aguzzi, C. & Viseras, C. (2018) Kinetic and thermodynamic assessment on isoniazid/montmorillonite adsorption. Appl. Clay Sci. 165, 82-90.

Cardoso, R., Romero, E., Lima, A., & Ferrari, A. (2006). A Comparative Study of Soil Suction Measurement Using Two Different High-Range Psychrometers. Experimental Unsaturated Soil Mechanics, 79–93. doi:10.1007/3-540-69873-6\_8

Carrow, R. N., Duncan, R. R. (2011) Best Management Practices for Saline and Sodic Turfgrass Soils. Assessment and Reclamation 1st Edition. Copyright Year 2012 ISBN 9781439814741. Published September 12, 2011. By CRC Press 496 Pages 20 Color & 22 B/W Illustrations

Casagrande, A. (1932) Research on the Atterberg Limits of Soil. Public Roads, 13, 121-136.

Casagrande, A. (1932) Structure of Clay and Its Importance in Foundation Engineering. Journal of Boston Society of Civil Engineers, Vol. 19, No. 14, 1932, pp. 168-209.

Casagrande, A. (1958) Notes on the Design of the Liquid Limit Device. Geotechnique, vol. 8, pp. 84-91

Castillo Morales, G. (Editora) (2004) Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas. Estandarización, Inter calibración, resultados y aplicaciones/Gabriela Castillo (ed.). México: IMTA, 2004. Canadá: IDRC, 2004. 189. ISBN 968-5536-33-3. <https://www.idrc.ca/sites/default/files/openebooks/147-7/index.html>.

Cerato, A. & Luttenegger, A. (2002) Determination of Surface Area of Fine-Grained Soils by the Ethylene Glycol Monoethyl Ether (EGME) Method. Geotechnical Testing Journal 25, no. 3 (2002): 315-321. <https://doi.org/10.1520/GTJ11087J>

Ceylan, H., Gopalakrishnan, K. & Kim, S. (2009) Use of bio-oil for pavement subgrade soil stabilization. Proceedings of 2009 Mid-Continent Transportation Research Symposium, InTrans, Iowa State University, Ames, IA, USA.

Ceylan, H., Gopalakrishnan, K., & Kim, S. (2010) Soil stabilizer derived from sustainable energy co-product. Proceedings of the 89th Transportation Research Board Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA, January. [https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1024&context=ccee\\_pubs](https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1024&context=ccee_pubs)

Chandrabhan, V., Ebenso, E. E., Indra Bahadur, M. & Quraishi, A. (2018) An overview on plant extracts as environmentally sustainable and green corrosion inhibitors for metals and alloys in aggressive

corrosive media, *Journal of Molecular Liquids*, Volume 266, Pages 577-590, ISSN 0167-7322, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.06.110>

Chang, I. & Cho, G. C. (2012) Strengthening of Korean residual soil with  $\beta$ -1, 3/1, 6-glucan biopolymer. *Const. Build. Mater*, 30, 30-35. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.030

Chang, S. H., Ryan, M. H. & Gupta, R. K. (1993) The effect of pH, ionic strength, and temperature on the rheology and stability of aqueous clay suspensions. *Rheologica Acta*, 32 (3), 263–269.

Chaston, F. N. (1952) Soil-cement Progress in Australia. *The Indian Concrete Journal* 26 (12) (December 1952) 354–356.

Chavali, R.V.P., Reshmarani, B. (2020) Characterization of expansive soils treated with lignosulfonate. *Geo-Engineering* 11, 17 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40703-020-00124-1>

Chavez-Sifontes, M., Domine, M. (2013) Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en Ciencias e Ingeniería - ISSN: 0718-8706*. *Av. cien. ing.*: 4(4), 15-46 (Octubre/Diciembre, 2013)

Chen, F. H. (1965) The use of piers to prevent the uplifting of lightly loaded structure founded on expansive soil. In: *Concluding proceedings engineering effects of moisture change in soils*, International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils. A&M, Texas, pp 152–171.

Chen, F. H. (1975) *Foundations on Expansive Soils* – Elsevier. ISBN: 9780444413932

Chen, F. H. (1975) *Foundations on Expansive Soils* American Elsevier Publishing Company. Inc .52 Vanderbilt Avenue. New York 10017

Chen, F. H., (1988) *Foundations on Expansive Soils*, 2nd ed. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, the Netherlands, pp 464. ISBN 044460166X, 9780444601667. 295 pp

Chenu, C., & Guérif, J. (1991) Mechanical Strength of Clay Minerals as Influenced by an Adsorbed Polysaccharide. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55(4), 1076. <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500040030x>

Chenu, C., & Guérif, J. (1991) Mechanical Strength of Clay Minerals as Influenced by an Adsorbed Polysaccharide. *Soil Science Society of America Journal*, 55(4), 1076. doi:10.2136/sssaj1991.03615995005500040030x

Chijioke , C., Ikeagwuani, D. & Chimobi, N. (2019) Emerging trends in expansive soil stabilisation: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Volume 11, Issue 2. 2019. Pages 423-440. ISSN 1674-7755. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.013>. <http://www.jrmge.cn/EN/Y2019/V11/I2/423>

Chijioke, C. I., Donald, C. N. (2019) Emerging trends in expansive soil stabilization: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Volume 11, Issue 2. Pages 423-440. ISSN 1674-7755. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.013>.

Chittoori B (2008) *Clay Mineralogy Effects on Long-Term Performance of Chemically Treated Expansive Clays*. PhD dissertation. University of Texas at Arlington, 2008. <https://rc.library.uta.edu/uta-ir/handle/10106/1809>

Chittoori, B. S., Puppala, A. J. (2011) Quantification of Clay Mineralogy. ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. <https://static1.squarespace.com/static/526c7a98e4b023d8f09390ed/t/5f9b38f17d64c040eac6dd9a/1604008184965/Anand+Puppala.pdf>

Chittoori, B., Puppala, A., Wejrungsikul, T., Hoyos, L. (2013) Experimental Studies on Stabilized Clays at Various Leaching Cycles. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139(10), 1665–1675. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000920](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000920)

Choobbasti, A. J., Ghodrat, H., Vahdatirad, M. J., Firouzian, S., Barari, A., Torabi, M., Bagherian, A. (2010) Influence of using rice husk ash in soil stabilization method with lime. Frontiers of Earth Science in China, 4(4), 471-480. <https://doi.org/10.1007/s11707-010-0138-x>

Clark, R. K. (1986) Applications of Water-Soluble Polymers as Shale Stabilizers in Drilling Fluids. Water-Soluble Polymers, 171–181. doi:10.1021/ba-1986-0213.ch010

Coorey, R., Tjoe, A., Jayasena, V. (2014) Gelling Properties of Chia Seed and Flour. Journal of Food Science, 79(5), E859–E866. doi:10.1111/1750-3841.12444

Cortés, C., Villagrán, Y., Mejía, R. (2019) Cómo reducir la huella de carbono del hormigón y no morir en el intento. October 2019. Conference: X Encuentro de Investigadores y Docentes de IngenieríaAt: San Rafael, Mendoza, Argentina. Projects: Concrete with low environmental impact and carbonation resistance. Diseño de Hormigones Sustentables Resistentes a la Carbonatación.

Crawford, R.L. (1981) Lignin Bio Degradation and Transformation, John Wiley and Sons, NewYork, NY, USA, 154 p. <https://doi.org/10.1086/412590>

Das, B. (2012) Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones. 7ma Edición. Editorial Cengage Learning.

Davidson, D.T. & Handy, R.L. (1960) Section 21: Soil Stabilization, Highway Engineering Handbook, (K.B. Wood Ed.), McGraw-Hill, New York, NY, USA.

Delage, P. (2007) Microstructure Features in the Behaviour of Engineered Barriers for Nuclear Waste Disposal. In: Schanz T. (eds) Experimental Unsaturated Soil Mechanics. Springer Proceedings in Physics, vol 112. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/3-540-69873-6\\_2](https://doi.org/10.1007/3-540-69873-6_2) [https://www.researchgate.net/publication/226881442\\_Microstructure\\_Features\\_in\\_the\\_Behaviour\\_of\\_Engineered\\_Barriers\\_for\\_Nuclear\\_Waste\\_Disposal](https://www.researchgate.net/publication/226881442_Microstructure_Features_in_the_Behaviour_of_Engineered_Barriers_for_Nuclear_Waste_Disposal) January 2007.

Delage, P., Howat, M., Cui, Y. J. (1998) The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. Eng Geol 50(1–2):31–48. DOI: 10.1016/S0013-7952(97)00083-5.

Della Vecchia, G., Dieudonné, A., Jommi, C., Charlier, R. (2015) Accounting for evolving pore size distribution in water retention models for compacted clays. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 39(7), 702–723. doi:10.1002/nag.2326

Di Marsico, A., Scrano, L., Labella, R., Rossi, V., Cox, L. & Amato, M. (2018) Mucilage from fruits/seeds of chia (*Salvia Hispánica* L.) improves soil aggregate stability. Plant Soil 425(1-2), 57–69. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-018-3565-1>

Di Matteo, L. (2012) Liquid Limit of Low- to Medium-Plasticity Soils: Comparison between Casagrande Cup and Cone Penetrometer Test. Bulletin of Engineering Geology and Environment, Vol. 71, pp. 79-85. (2012). DOI: 10.1007/s10064-011-0412-5

- Diamond, S. & Kinter, E.B. (1965) Mechanisms of soil-lime stabilization. *Highway Res. Rec.*, 92, 83-102.
- Diefenderfer, Brian. (2002) Moisture Content Determination and Temperature Profile Modeling of Flexible Pavement Structures.
- Du, Y. J., Jiang, N., Liu, S., Horpibulsuk, S., & Arulrajah, A. (2016) Field evaluation of soft highway subgrade soil stabilized with calcium carbide residue. *Soils and Foundations*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.02.012>
- Du, Y. J., Li, S. L. & Hayashi, S. (1999) Swelling-shrinkage properties and soil improvement of compacted expansive soil, Ning-Liang Highway, China, *Eng. Geol.*, 53(1-4), 351-358. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00086-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00086-6).
- Duncan, C. I. (1992) Expansive Clay. In: *Soils and Foundations for Architects and Engineers*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6545-8\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6545-8_11).
- Durner, W. (1994) Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resource. Res.*, 30(2), 211–223, 1994. 409, 410, 413, 422.
- Eades, J. L., & Grim, R. E. (1960) Reaction of Hydrated Lime with Pure Clay Minerals in Soil Stabilization. *HRB Bull.* 262, pp. 51-63,
- Edvardsson, K. (2009) Gravel roads and dust suppression. *Road Materials and Pavement Design*, 10(3), 439–469. <https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690209>
- El Mansouri, N. & Salvadó, J. (2007) Analytical methods for determining functional groups in various technical lignins. *Ind. Crop. Prod.* 26(2), 116-124. Journal ISSN : 0926-6690. DOI10.1016/j.indcrop.2007.02.006
- Elfatih, A. (1984) Comparison of Two Methods for the Measurement of Swelling Pressure. Conference: Fifth International Conference on expansive soil. Adelaide, South Australia.
- Erzin, Y., Erol, O. (2007) Swell pressure prediction by suction methods. *Engineering Geology* 92, 133–145. Erzin, Y., and Erol, O. (2007). Swell pressure prediction by suction methods. *Engineering Geology*, 92(3-4), 133–145. doi:10.1016/j.enggeo.2007.04.002
- Fangsheng Shuai. (1996) Simulation of swelling pressure measurement on expansive soils. Thesis Degree of Philosophy in the Department of Civil Engineering University of Saskatchewan Saskatoon, Canada. 1996.
- Faruk, O. & Sain, M. (2015) Lignin in polymer composites. William Andrew. Page Count: 350 eBook ISBN: 9780323355667 Hardcover ISBN: 9780323355650
- Farzi, M., Pakbaz, M. S. (2019) Mechanical and Hydraulic Properties of Bentonite Clay Stabilized with Cement, Lime, and Mixed Lime-Cement by Dry and Wet Methods After 5 Years of Curing. In: McCartney J., Hoyos L. (eds) *Recent Advancements on Expansive Soils. GeoMEast 2018. Sustainable Civil Infrastructures*. Springer, Cham. Print ISBN 978-3-030-01913-6
- Fenn, P. (1982) Lignin biodegradation and transformation: Wiley Interscience, John Wiley and Sons, New York—Chichester, 1981, 170 pp. DOI:10.1016/0141-0229(82)90047-3 Corpus ID: 83281219
- Ferber, V., Auriol, J., Cui, Y, Magnan, J. (2009). On the swelling potential of compacted high plasticity clays. *Engineering Geology*, 104(3-4), 200–210. doi:10.1016/j.enggeo.2008.10.008

Fernandez, M., Manzanal, D., Piqué, T., Codevilla, M. (2017) Polymer Applications to Control Soil Expansion. Second International Symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics (CPEG2) Faculty of Engineering, University of Leeds, LEEDS, LS2 9JT, UK. September 6-7.

Fernandez, M., Orlandi, S., Codevilla, M., Piqué, T. and Manzanal, D. (2020) Performance of Calcium Lignosulfonate as stabilizer of highly expansive clays. *Transportation Geotechnics*. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100469>

Fernandez, M.T., Orlandi, S., Codevilla, M., Piqué, T.M., Manzanal, D. (2020) Performance of calcium lignosulfonate as a stabilizer of highly expansive clay. *Transportation Geotechnics* (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100469>

Firoozi, A. A., Guney Olgun, C (2017) Fundamentals of soil stabilization. *Geo-Engineering* 8, 26 (2017). <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>

Fisher, L. R., Lark, P. D. (1979) An experimental study of the Washburn equation for liquid flow in very fine capillaries. *Journal of Colloid and Interface Science*. Volume 69, Issue 3. Pages 486-492. ISSN 0021-9797. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(79\)90138-3](https://doi.org/10.1016/0021-9797(79)90138-3).

Fitzmaurice, F. (1958) Manual on stabilized soil construction for housing. Technical Assistance Programme, United Nations, 124 pp Gidig.

Forbes, E., & Chryst, A. (2017) Clays in the Minerals Processing Value Chain , pp. 81 – 110 DOI: <https://doi.org/10.1017/9781316661888.004>. Publisher: Cambridge University Press. Print publication year: 2017

Fredlund, D. G., Rahardjo, H. (1993) Soil mechanics for unsaturated soils. Wiley, New York ISBN: 978-0-471-85008-3 September 1993 544 Pages

Fredlund, D., Xing, A., Fredlund, M., Sidney, L. (1996) The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve July 1996 *Canadian Geotechnical Journal* 33(3):440-448 DOI: 10.1139/t96-065 Project: Saturated/Unsaturated Constitutive Modeling

Fredlund, D.G., Rahardjo, H., Fredlund, M.D. (2012) *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. First published:11 July 2012. Copyright © 2012 John Wiley & Sons, Inc. Print ISBN:9781118133590. Online ISBN:9781118280492 DOI:10.1002/9781118280492

Fredlund, D.G., Xing, A. (1994) Equations for the soil–water characteristic curve. *Can Geotech J* 31(3):521–532 *Canadian Geotechnical Journal*. August 1994. <https://doi.org/10.1139/t94-061>

Fripiat, J. J., Jelli, A., Poncelet, G., & André, J. (1965) Thermodynamic Properties of Adsorbed Water Molecules and Electrical Conduction in Montmorillonites and Silicas. *The Journal of Physical Chemistry*, 69(7), 2185–2197. doi:10.1021/j100891a007

Galvín, A., López-Uceda, A., Cabrera, M., Rosales, J., Ayuso, J. (2020) Stabilization of expansive soils with biomass bottom ashes for an eco-efficient construction. *Environ. Sci. Poll. Res*, 1-14. DOI: 10.1007/s11356-020-08768-3

Garbulewski, K., Zakowicz, S. (1995) Suction as an indicator of soil expansive potential. In: Alonso EE, Delage P (eds) *Proceedings of the first international conference on unsaturated soils*, Paris, vol 2, pp 505–512

Ghadir, P., Ranjbar, N. (2018) Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement, *Construction and Building Materials*, Volume 188, 2018, Pages 361-371, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.207>.

Gharib, M., Saba, H. & Barazesh, A. (2012a) The effect of additives on clay soil properties using cement and lime. *Int. J. Basic Sci. Appl. Res.*, 1(3), 66-78. <https://doi.org/10.17142/ijbas-2012.1.1.11>

Gharib, M., Saba, H. & Barazesh, A. (2012b) An experimental study for identification and comparison of the plastic index and shrinkage properties of clay soils with the addition of cement. *Eur. J. Exp. Biol.*, 2(4), 1034-1038.

Goldberg, S.R., Lebron, I., Seaman, J.C., Suarez, D.L. (2012) Soil colloidal behavior. In: P.M. Huang, Y. Li and M.E. Sumner (eds.) *Handbook of Soil Sciences Properties and Processes* (2nd Edition). CRC Press, Taylor, and Francis Group. Boca Raton, FL. Chapter 15. pp: 15-1 - 15-39.

Goodarzi, A. R, Akbari, H., Salimi, M. (2016) Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume. *Applied Clay Science*. 132–133, 675–684. Volumes 132–133, November 2016, Pages 675-684. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.023>

Gow, A.J., Davidson, D.T., Sheeler, J.B. (1961) Relative effects of chlorides, ligno sulfonates and molasses on properties of a soil-aggregate mix, *Highway Res. Board Bulletin*, No. 282, 66-83.

Greenland, D. & Lindstrom, G. (1961) Role of Polysaccharides in Stabilization of Natural Soil Aggregates. *Nature* 191, 1283–1284.

Habiba Afrin. (2017) A Review on Different Types Soil Stabilization Techniques. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*. Vol. 3, No. 2, 2017, pp. 19-24. doi: 10.11648/j.ijtet.20170302.12

Hampton, M. B., Edil, T. B. (1998) Strength gain of organic groundwith cement-type binders. *Soil improvement for big digs (GSP 81)ASCE*, Reston, VA, 135–148

Hana, H. Adem, Sai, K. Vanapalli. (2015) Review of methods for predicting in situ volume change movement of expansive soil over time. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Volume 7, Issue 1. 2015. Pages 73-86. ISSN 1674-7755, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.11.002>.

Hasan, A., Fatehi, P. (2019) Cationic kraft lignin-acrylamide copolymer as a flocculant for clay suspensions:(2) Charge density effect. *Sep. Purif. Technol.*, 210, 963-972. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.08.067

Hataf, N., Ghadir, P., Ranjbar, N. (2018) Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer. *J. Clean. Prod.* 170, 1493–1500. September 2017 *Journal of Cleaner Production* 170. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.256

Higuchi, T. (2006) Look backover the studies of lignin biochemistry. *J. Wood Sci.*, 52(1), 2-8. <https://doi.org/10.1007/s10086-005-0790-z>

Hillel, D. (2003) Chapter 3 - Particle Sizes, Shapes, and Specific Surface, Editor(s): Daniel Hillel, *Introduction to Environmental Soil Physics*, Academic Press, 2003, Pages 39-51, ISBN 9780123486554, <https://doi.org/10.1016/B978-012348655-4/50004-6>.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123486554500046>

Holtz W., Gibbs H. (1956) Engineering Properties of Expansive Clays. Journal Article. Transactions of the American Society of Civil Engineers. 641-663. V 121. N 1R doi: 10.1061/TACEAT.0007325. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/TACEAT.0007325>.

Holtz, W. G. (1969) Volume Change in Expansive Clay Soils and Control by Lime Treatment. Second International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils, Texas and University, College Station, Texas.

Houston, S.L., Dye, H.B., Zapata, C.E., Walsh, K.D. & Houston, W.N. (2011) Study of expansive soils and residential foundations on expansive soils in Arizona. Journal of performance of constructed facilities, 25 (1), 31-44. [https://www.researchgate.net/publication/267764450\\_Expansive\\_Soils](https://www.researchgate.net/publication/267764450_Expansive_Soils)

Huang, G., & Wang, P. (2017) Effects of preparation conditions on properties of rigid polyurethane foam composites based on liquefied bagasse and jute fiber. Polymer Testing, 60, 266–273. doi:10.1016/j.polymertesting.2017.04.006

Ijaz, N. & Dai, F. (2020) Paper and wood industry waste as a sustainable solution for environmental vulnerabilities of expansive soil: A novel approach. Journal of Environmental Management, 262 (January), 110285. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110285>

Ijaz, N., Dai, F., Meng, L., Rehman, Z., Zhang, H. (2020) Integrating lignosulphonate and hydrated lime for the amelioration of expansive soil: A sustainable waste solution. Journal of Cleaner Production. Volume 254. 119985. ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119985>.

Ikeagwuani, C. C., and Nwonu, D. C. (2019) Resilient Modulus of Lime-Bamboo Ash Stabilized Subgrade Soil with Different Compactive Energy. Geotechnical and Geological Engineering. doi:10.1007/s10706-019-00849-6

Ikizler, S.B., Aytekin, M., Nas, E. (2008) Laboratory study of expanded polystyrene (EPS) geof foam used with expansive soils. Geotext. Geomembr., 26(2), 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2007.05.005>

INTA, Ministerio de Agroindustria (2016) La variabilidad climática al extremo: análisis de precipitaciones en la provincia de Chubut durante el año 2016. [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_precipitaciones\\_chubut\\_2016.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_precipitaciones_chubut_2016.pdf) (última fecha de acceso 16 de diciembre de 2021)

International Lignin Institute (ILI) (2021) About lignin. <https://www.ili-lignin.com/aboutis.php>

IRAM 10501:2007 (2007) Geotecnia. Determinación del límite líquido (LL) y del límite plástico (LP) de una muestra de suelo. Índice de fluidez (IF) e índice de plasticidad (IP) Determination of the liquid limit (LL) and the plastic limit (LP) of a soil sample. Fluency index (IF) and Plasticity index (IP).

IRAM 29114 (2008). Calidad ambiental - Métodos biológicos. Método de ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.). Método en papel. 1ra edición. Publicación: 24/10/2008.

IS: 1498 (1970) (reaffirmed 1987) Indian standard classification and identification of soils for general engineering purposes. BIS, New Delhi.

IS: 2720 (1977) Part 40, Indian standard methods of test for soils: determination of free swell index of soils. BIS, New Delhi.

ISO 10390 (2005) Soil quality – Determination of pH

ISO 6341:1982 (1982) Water quality – Determination of the inhibition of the mobility of *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea).

ISO 8692:1989 (1989) Water quality – Fresh water algal growth inhibition test with *Scenedesmus subspicatus* and *Selenastrum capricornutum*.

Jafer H, Atherton W, Sadique, M, Ruddock, F, Loffill E (2018) Stabilisation of soft soil using binary blending of high calcium fly ash and palm oil fuel ash. *App. Clay Sci*, 152, 323-332. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.030>

James, J., Pandian, P. K., Deepika, K., Manikanda Venkatesh, J., Manikandan, V., & Manikumar, P. (2016) Cement Stabilized Soil Blocks Admixed with Sugarcane Bagasse Ash. *Journal of Engineering*, 2016, 1–9. doi:10.1155/2016/7940239

Jayasree, P. K., Balan, K., Peter, L., Nisha, K. K. (2015) Volume Change Behavior of Expansive Soil Stabilized with Coir Waste. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(6), 04014195. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001153.

Jimenez Salas, J. A. & Justo Alpañez, J. L. (1975) *Geotecnia y Cimientos*. Editorial Rueda. Madrid.

Johnson, L. and Snethen, D. (1978) Prediction of Potential Heave of Swelling Soil. *Geotechnical Testing Journal* 1, no. 3: 117-124. <https://doi.org/10.1520/GTJ10382J>

Jones L. (2018) Expansive Soils. In: Bobrowsky P., Marker B. (eds) *Encyclopedia of Engineering Geology*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-12127-7\\_118-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-12127-7_118-1)

Kalantari, B. (2012) *Foundations on Expansive Soils: A Review*. Maxwell Scientific Organization. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 4(18): 3231-3237, 2012ISSN: 2040-7467

Karlsson, R. (1961) Suggested improvements in the Liquid Limit Test with references to flow properties of remoulded clays, 5th Internat. Cong. Soil Mech. and Found. Eng., Paris, 171. [https://www.issmge.org/uploads/publications/1/40/1961\\_01\\_0029.pdf](https://www.issmge.org/uploads/publications/1/40/1961_01_0029.pdf)

Karol, R. (2003) *Chemical Grouting and Soil Stabilization*. 3rd edition. Marcel Dekker Inc, New York, Basel, USA. ISBN-13: 978-0824748524. ISBN-10: 0824748522

Kassif, G., BenShalom, A. (1971) Experimental Relationship between Swell Pressure and Suction. *Geotechnique* 21(3), 245–255  
[https://www.issmge.org/uploads/publications/1/31/1997\\_01\\_0036.pdf](https://www.issmge.org/uploads/publications/1/31/1997_01_0036.pdf)

Kassiff, G., Livneh, M., Wiseman, G. (1969) *Pavements on expansive clays*. Jerusalem Academic Press, Jerusalem.

Katz, L., Rauch, A., Liljestrand, H., Harmon, J., Shaw, K., Albers, H. (2001) Mechanisms of Soil Stabilization with Liquid Ionic Stabilizer. *Transportation Research Record*. 1757. 50-57. 10.3141/1757-06.

Kayabali, K., & Demir, S. (2011) Measurement of swelling pressure: direct method versus indirect methods. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(3), 354–364. doi:10.1139/t10-074

Kim S, Gopalakrishnan, K. & Ceylan, H. (2012) Moisture susceptibility of subgrade soils stabilized by lignin-based renewable energy coproduct. *Journal of Transportation Engineering*, 138(11), pp. 1283–1290. doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000097.

Kirk, T.K. & Farrell, R.L. (1987) Enzymatic combustion: The microbial degradation of lignin. *Annu. Rev. Microbiol.*, 41, 465-505. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.41.100187.002341>

Kogel-Knabner, I. (2000) Analytical approaches for characterizing soil organic matter. *Org. Geochem.*, 31(7-8), 609-625. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00042-5)

Koohestani, B., Darban, A., Mokhtari, P., Yilmaz, E. & Darezereshki E (2019) Comparison of different natural fiber treatments: a literature review. *Int. J. Environ. Sci. Te.* 16(1), 629-642.

Kosugi, K. (1996) Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, *Water Resour. Res.* 32(9), 2697–2703, 1996. 409, 410, 411, 420

Kozan, G. R. (1955) Summary Review of Lignin and Chrome-lignin Processes for Soil Stabilization, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, USA.

Krishna Rao, S. V., & Nasr, A. M. A. (2011). Laboratory Study on the Relative Performance of Silty-Sand Soils Reinforced with Linen Fiber. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(1), 63–74. doi:10.1007/s10706-011-9449-2

Kumar, T., Raheena, M., Robinson, R., & Thyagaraj, T. (2020) A Rapid Method of Determination of Swell Potential and Swell Pressure of Expansive Soils Using Constant Rate of Strain Apparatus." *Geotechnical Testing Journal*. 43.6(2020): 1368-1378. Web. 4 Jun 2021. <https://doi.org/10.1520/GTJ20180414>

Lambe, T.W. (1960) The character and identification of expansive soils, soil PVC meter. Federal housing administration, technical studies program, FHA 701

Lambe, T.W. (1962) Soil Stabilization, Chapter-4, 'Foundation Engineering', Edited by Leonards (Mc. Graw Hill Book Co. Inc.) 351–437.

Laurichesse, S. & Avérous, L. (2014) Chemical modification of lignins: Towards biobased polymers. *Progress in polymer science*. Volume 39, Issue 7. Pages 1266-1290. ISSN 0079-6700. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.11.004>.

Lekha, B. M., Sarang, G., Shankar, A. U. R. (2015) Effect of Electrolyte Lignin and Fly Ash in Stabilizing Black Cotton Soil. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 2(2), 87–101. doi:10.1007/s40515-015-0020-0

Leonards, G. A. (1950) Description, and identification of soils: The engineering significance of descriptive soil terminology, Purdue University, reimpresso por Dr. Scott M. Merry en la Universidad de Arizona, Agosto 2000.15 pp.

Leong, E.C., Kizza, R., Rah Ardjo, H. (2016) Measurement of soil suction using moist filter paper. *E3S Web of Conferences*, 9, 10012. doi:10.1051/e3sconf/20160910012

Leong, E.-C., Tripathy, S., Rahardjo, H. (2003) Total suction measurement of unsaturated soils with a device using the chilled-mirror dew-point technique. *Géotechnique*, 53(2), 173–182. doi:10.1680/geot.2003.53.2.173 1)

Liet, C. D., Behzad, F., Hadi, K. (2016) Behaviour of Expansive Soils Stabilized with Hydrated Lime and Bagasse Fibres. *Procedia Engineering* volume 143, 2016, Pages 658-665. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.093>

Lin, B., Cerato, A.B. Prediction of expansive soil swelling based on four micro-scale properties. *Bull Eng Geol Environ* 71, 71–78 (2012) <https://doi.org/10.1007/s10064-011-0410-7>

Lloret, A., Villar, M. V., Sanchez, M., Gens, A., Pintado, X., Alonso, E.E. (2003) Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes, *Géotechnique* 53(1):27–40. *Géotechnique* ISSN 0016-8505 | E-ISSN 1751-7656 Volume 53 Issue 1, February 2003, pp. 27-40 <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.1.27>

Lora, J. (2008) *Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources*. Chapter 10 Industrial Commercial Lignins : Sources, Properties and Applications. Pages 225-241 <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045316-3.00010-7>

Low, P. (1961) *Physical Chemistry of Clay-Water Interaction*. Editor(s): A.G. Norman. *Advances in Agronomy*. Academic Press. Volume 13. 1961. Pages 269-327. ISSN 0065-2113. ISBN 9780120007134. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60962-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60962-1).

Lucas, J., Tavares, M., Cardoso, D., Cássaro, F. (2011) Soil-water retention curve by the filter paper method. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 35. 1957-1973. DOI: 10.1590/S0100-06832011000600013.

Luckham, P. & Rossi, S. (1999) The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Adv. Colloid. Interface. Sci.* 82, 43-92. DOI:10.1016/S0001-8686(99)00005-6 Corpus ID: 98728157

Luo, H., Abu-Omar, M.M. (2017) Chemicals from lignin. In: Abraham, M.A. (Ed.), *Encyclopedia of Sustainable Technologies*. Elsevier, pp. 573–585. ISBN: 9780128046777. Copyright © 2017 Elsevier Inc. All rights reserved. Elsevier

Macht, F., Eusterhues, K., Pronk, G., Totsche, K. (2011) Specific surface area of clay minerals: Comparison between atomic force microscopy measurements and bulk-gas (N<sub>2</sub>) and -liquid (EGME) adsorption methods. *Applied Clay Science*. Volume 53, Issue 1. 2011. Pages 20-26. ISSN 0169-1317. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.006>.

Maclean, D. J., & Robinson, P. J. M. (1953) Methods of soil stabilization and their application to the construction of airfield pavements. *Proceedings of the institution of civil engineers*, 2(3), 447–486. Doi:10.1680/ipeds.1953.11560

Mahamedi, A., Khemissa, M. (2015) Stabilization of an expansive overconsolidated clay using hydraulic binders. *HBRC Journal*, Volume 11, Issue 1, April 2015, Pages 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2014.03.001>

Makusa, G. P. (2013) Soil stabilization methods and materials in engineering practice : State of the art review. Retrieved from <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:itu:diva-24093>

Manzanal, D., Orlandi, S., Barria, J. C. (2019) Swell characterization of expansive clays from Comodoro Rivadavia - Argentina. XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges* N. P. López Acosta et al. (Eds.). IOS Press Publisher. 17-20 November 2019. Cancun, México. doi:10.3233/STAL190107.

Manzanal, D., Orlandi, S., Fernandez, M., Pique, T., Laskowski, C., Barria, J.C., Codevila, M., Piqué, T. (2021) Soil-water retention of highly expansive clay stabilized with a bio- polymer. May 2021. Conference: UNSAT2021. At: Brasil. San Pablo. DOI: 10.1051/mateconf/202133701006. Project: Fundaciones sustentables.

Marinho, F. A. M. (2005) Nature of Soil–Water Characteristic Curve for Plastic Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Volume 131 Issue 5 - May 2005. ASCE Library [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:5\(654\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:5(654))

Marshall, T. (1966) Shear strength and elastic properties of lime-soil mixtures. *Highway Research Record* 139, Highway Research Board, Washington, DC, 1–14. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1966/139/139-001.pdf>

Marti, L., Codevilla, M., Piqué, T. & Manzanal, M. (2015) Natural Soil Modified with Polymer for use in landfill systems. From Fundamentals to Applications in Geotechnics: Proceedings of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (15th PCSMGE), Manzanal D. and Sfriso A. Editors. 15-17 November, Buenos Aires, Argentine. Ed. IOS Press. Pages 2228 – 2235. doi: 10.3233/978-1-61499-603-3-2228

Martín, L., Pozo, M. (2018) Bioensayo de germinación de Lactuca Sativa y calidad de agua del área regadía del Río Mendoza. Jornadas de Jóvenes Investigadores AUGM, octubre 2018. Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.

McCallister, L.D. & Petry, T.M. (1992) Leach Tests on Lime-Treated Clay. *Geotechnical Testing Journal*, American Society for Testing Materials, Philadelphia, Pennsylvania, GTJODJ, Vol. 15, No. 2, pages 106-114. <https://doi.org/10.1520/GTJ10232J>

McDougall, J. I. (1986) Field trials of Lignosulphonate Dust palliative. MSP Report No 86-01. Ontario Ministry of Transportation and Communications, Research and Development Branch. Downsview. TRITA-VT FR 07:02 ISSN-1650-867X ISRN-KTH/VT/FR-07/02-SE © Karin Oscarsson, May 2007 <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:11937/FULLTEXT01.pdf>

Mckeen, R. G. (1992) A model for predicting expansive soil behavior. In: Proceedings of the 7th international conference on expansive soils, Dallas, vol 1, pp 1–6

Mehdi, G., Hamidreza, S., Arash, B. (2012) An experimental study for identification and comparison of plastic index and shrinkage properties of clay soils with the addition of cement. *Euro. J. Exp. Bio.*, 2 (4):1034-1038 <https://www.imedpub.com/articles/an-experimental-study-for-identification-and-comparison-of-plastic-index-andshrinkage-properties-of-clay-soils-with-the-addition-o.pdf>

Millington, R.J. & Quirk J. P. (1961) Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.*, 1961,57, 1200-1207. <https://doi.org/10.1039/TF9615701200>  
<https://pubs.rsc.org/en/journals/journal/tf?type=archive&issnprint=0014-7672>

Mitchell J. K., Soga K. (2005) Fundamentals of soil behavior. Wiley, New York, 3rd Edition ISBN: 978-0-471-46302-3 May 2005 592 Pages

Mitchell J. K., Soga, K. (1976) Fundamentals of Soil Behavior. 1st Edition, John Wiley & Sons, Inc. Eggstad.

Mitchell, J. K. (1981) Soil Improvement, State of the Art Report. Proc. 10th. ICSMFE, Stockholm. [https://www.issmge.org/uploads/publications/1/35/1981\\_04\\_0022.pdf](https://www.issmge.org/uploads/publications/1/35/1981_04_0022.pdf)

Mitchell, J. K., & Hooper D. R. (1961) Influence of Time between Mixing and Compaction on Properties of Lime Stabilized Expansive Clay. 40th Annual Meeting of the Highway Research Board .Washington D.C., Bulletin No. 304 pp. 14-31.

Moore, D. M., & Reynolds, R.C. (1997) X-ray diffraction and identification and analysis of clay minerals. 2nd Edition, Oxford University Press, New York. Publication Date - February 1997. ISBN: 9780195087130.

Mousa, F. A., Munjed, M., Al-Sharif, C. (1997) Soil stabilization with burned olive waste. Oil Engineering Department, Jordan University of Science of Technology, Irbid, Jordan. Applied Clay Science 13 1998 219–230. November 1997

Mualem, Y. A. (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resour. Res., 12, 513–522, 1976. 410

Muntohar, A.S. (2002) Utilization of uncontrolled burnt of rice husk ash in soil improvement. Civil Eng. Dimension, 4(2), 100-105.

Muntohar, A.S. (2004) Uses of RHA enhanced lime-stabilized clay soil. International Conference of Geotechnical Engineering, University of Sharjah, UAE, October.

Murat, T., Hasan, S., Aykut, A., Hasan, T. (2014) The effect of magnesium chloride solution on the engineering properties of clay soil with expansive and dispersive characteristics. Applied Clay Science, Volume 101, November 2014, Pages 1-9

Musso, Marcos. (2014) Guidelines to Identify and Quantify Expansive Soils in Civil Infrastructure. 10.1007/978-3-319-09303-1\_42.

Mustafa, D., Bora, C., Soonkie, N. (2017) Stabilization of expansive Belle Fourche shale clay with different chemical additives. Applied Clay Science, Volume 146, 15 September 2017, Pages 56-69. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.05.033>

Muzahim, A. M., Suhail, K., & Jean-Francois, A. (2012) Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. Eng. Geol., 139-140, 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.04.004>

Nagaraj, H., Munnas, M., & Sridharan, A. (2009) Critical Evaluation of Determining Swelling Pressure by Swell-Load Method and Constant Volume Method. Geotechnical Testing Journal 32, no. 4 (2009): 305-314. <https://doi.org/10.1520/GTJ102051>

Nelson, J. D., Miller, D. J. (1992) Expansive Soils, Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering. John Wiley and Sons Inc., New York 1992, 259 pp, ISBN 0 471 51186 2

Nelson, J. D., Miller, D. J. (1993) Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering. Wiley, New York <https://doi.org/10.1002/nag.1610171006>

Nicholls, R. L. & Davidson, D. T. (1958) Polyacids and lignin used with large organic cations for soil stabilization. Proceedings of the Thirty-Seventh Annual Meeting of the Highway Research Board, Washington D.C., January, Volume 37, pp. 517-537.

Noorzad, R., & Ta'negonbadi, B. (2018) Mechanical properties of expansive clay stabilized with lignosulphonate. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 51(4), 483–492. <https://doi.org/10.1144/qjegh2017-050>

Norman, L. (1959) The one-point method of determining the value of the liquid limit of a soil. *Geotechnique*, 9(1), 1-8.

Nour El-Dein, M., Abou-Dobara, M., Abou-Elhmd, N. (2019) Screening and Identification of some APPL (Acid Precipitable Polymeric Lignin) Producing Streptomycetes. *Journal of Agricultural Chemistry and Biotechnology*, 10(6), 119-126. doi: 10.21608/jacb.2019.48253

Olaiz, A. (2017) Evaluation of Testing Methods for Suction-Volume Change of Natural Clay Soils December 2017 Thesis for: MSAdvisor. Evaluation of Testing Methods for Suction-Volume Change of Natural Clay Soils. [https://www.researchgate.net/publication/334747214\\_Evaluation\\_of\\_Testing\\_Methods\\_for\\_Suction-Volume\\_Change\\_of\\_Natural\\_Clay\\_Soils/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/334747214_Evaluation_of_Testing_Methods_for_Suction-Volume_Change_of_Natural_Clay_Soils/figures?lo=1)

Orlandi S., Manzanal D. (2018) Análisis de límites de Atterberg en distintas mezclas suelo expansivo - aditivo con el objeto de identificar posibles estabilizantes. CAMSIG XXIV. Salta.

Orlandi S., Manzanal D. (2019) Caracterización mineralógica y geomecánica de tres suelos locales potencialmente activos. En: Resúmenes VII Jornadas de las Ciencias de la Tierra "Dr. Eduardo Musacchio (Eds. De Sosa Tomas, A. y Casal, G.), 2019. p. 34, Comodoro Rivadavia, Argentina.

Orlandi S., Manzanal, D., Miranda E., Robinson, M. (2019) Using Lignin as stabilizer of swelling soils. XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 17-20 November 2019. Cancun México. <https://doi:10.3233/STAL190295.2291-228>

Orlandi S., Taverna M. E., Villada, Y. A., Piqué, T., Laskowski C., Nicolau V., Estenoz D., Manzanal D. (2021) Additives based on vegetable biomass to improve the stabilization of expansive clay soil. *Journal of Environmental Geotechnics*.

Orlandi, S., Laskowski, C., Ancalao, M., Da Silva, F., Saez, S., Manzanal, D. (2021) Evaluación de los métodos de determinación de la presión de hinchamiento de un suelo expansivo modificado con un bio-producto. CAMSIG 2021. Misiones. Argentina (En revisión)

Orlandi, S., Laskowski, C., Barría, J. C., Fernández, M., Manzanal, D. (2022) Effects of lignin in hydro-mechanical behavior of an expansive clay. *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney 2022* (In revision).

Orlandi, S., Manzanal D. (2018) Análisis de límites de Atterberg en distintas mezclas suelo expansivo-aditivo con el objeto de identificar posibles estabilizantes, CAMSIG XXIV. Congreso Argentino Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Salta

Orlandi, S., Manzanal, D., Ruiz, A., Ávila, M., Graf, V. (2015) A case study on expansive clays on Comodoro Rivadavia city. From Fundamentals to Applications in Geotechnics: *Proceedings of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (15th PCSMGE)*, Manzanal D. and Sfriso A. Editors 15-17 November, Buenos Aires, Argentine. Ed. IOS Press. Pages 2276 – 2283. doi: 10.3233/978-1-61499-603-3-2276.

Osorio, S. (2010) Comparison of Liquid Limit Values Determined Using the Hard and Soft Casagrande Apparatus and the Cone Penetrometer. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 68, pp. 289-296. (2010)

Paredes, J. M. (2002) Asociación de facies y correlación de las sedimentitas de la Formación Chenque (Oligoceno-Mioceno) en los alrededores de Comodoro Rivadavia, Cuenca del Golfo San Jorge, Argentina. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*, 9 (1): 53-64.

- Pedarla, A., Chittoori, S., & Puppala, A. J. (2011) Influence of Mineralogy and Plasticity Index on the Stabilization Effectiveness of Expansive Clays. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2212(1), 91–99. doi:10.3141/2212-10
- Pedarla, A., Puppala, A. J., Hoyos, L. R., Vanapalli, S. K., & Zapata, C. (2012) SWRC Modelling Framework for Evaluating Volume Change Behavior of Expansive Soils. *Unsaturated Soils: Research and Applications*, 221–228. doi:10.1007/978-3-642-31116-1\_30
- Pedarla, A.; Puppala, A.; Hoyos, L.; Chittoori, B. (2016) Evaluation of Swell Behavior of Expansive Clays from Internal Specific Surface and Pore Size Distribution. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Volume 142 Issue 2 - February 2016.
- Pellegrini, A. (2019) *Textura y color del suelo. Apunte de Edafología. Curso de edafología. Departamento de ambiente y recursos naturales. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. U.N.L.P.*
- Pérez, G. N., Garnica A. P., Pola, V. J. C. (2013) Predicción de la curva característica con el modelo de proporcionalidad natural. ISSN 0188-7297. Publicación Técnica No. 361. Sanfandila, Querétaro. 2013. Instituto Mexicano del Transporte.
- Perotti, G., Kijchavengkul, T., Auras, R. & Constantino, V. R. (2017) Nanocomposites Based on Cassava Starch and Chitosan-Modified Clay: Physico Mechanical Properties and Biodegradability in Simulated Compost Soil. *J. Brazil. Chem. Soc*, 28(4), 649-658.
- Perry, J.P. (1977). Lime treatment of dams constructed with dispersive clay soils. *Soil and Water Division, Transactions of the ASAE*, 1093-1099.
- Peterson, L. W., Moldrup, P., Jacobsen, O. H., Rolston, D. E. (1996) Relations between specific surface area and soil physical and chemical properties. *Soil Sci* 161(1):9–21
- Phani Kumar, B.R. & Sharma, R.S. (2004) Effect of flyash on engineering properties of expansive soil. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 130(7), 764-767. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:7\(764\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:7(764))
- Piqué, T., Manzanal, D., Codevilla, M., Orlandi, S. (2019) Polymer Enhanced Soils Mixture for Potential Use as Covers or Liners in Landfill Systems. *Environmental Geotechnics*. Published Online: August 23, 2019. doi: 10.1680/jenge.18.00174.
- Pitthaya, J., Nuttpong, N., Panich, V., Smith, S., Pornkasem, J. (2017) Laboratory investigations on the swelling behavior of composite expansive clays stabilized with shallow and deep clay-cement mixing methods. *Applied Clay Science*, Volume 148, November 2017, Pages 83-94. ISSN 0169-1317. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.08.013>.
- Prabakar, J., & Sridhar, R. (2002) Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. *Construction and Building Materials*, 16(2), 123–131. doi:10.1016/s0950-0618(02)00008-9
- Prakash, K. & Sridharan, A. (2004) Free Swell Ratio and Clay Mineralogy of Fine-Grained Soils. *Geotechnical Testing Journal* 27, no. 2 (2004): 220-225. <https://doi.org/10.1520/GTJ10860>
- Prakash, K., Sridharan, A. (2004) Free swell ratio and clay mineralogy of fine-grained soils. *Geotech Test J ASTM* 27(2):220–225 . <https://doi.org/10.1520/GTJ10860>
- Puppala, A. (2021) Case Studies of Problematic Expansive Soils: Characterization Challenges, Innovation Challenges, Innovative Stabilization Designs, and Novel Paper Published Online in ASCE Journal of

Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Appear in August Issue, 2021 Monitoring Methods Texas A & M University - College Station. Abbett Distinguished Seminar Series. 3. <https://scholarsmine.mst.edu/cii-lectures/3>

Puppala, A. J., Manosuthikij, T., & Chittoori, B. C. S. (2014) Swell and shrinkage strain prediction models for expansive clays. *Engineering Geology*, 168, 1–8. doi:10.1016/j.enggeo.2013.10.017

Puppala, A. J., Pedarla, A., & Bheemasetti, T. (2015) Soil Modification by Admixtures. *Ground Improvement Case Histories*, 291–309. doi:10.1016/b978-0-08-100191-2.00010-1

Puppala, A., Intharasombat, N., Vempati, R. (2005) Experimental studies on ettringite-induced heaving in soils. *J. Geotech. Geoenviron.* 131 (3), 325–337 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:3\(325\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:3(325))

Puppala, A.J., Punthutaecha, K., Vanapalli, S.K. (2006) Soil-Water Characteristic Curves of Stabilized Expansive Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132(6), 736–751

Qamhia I, Tutumluer E, Ozer H, Boler H, Shoup H, & Stolba A (2020) Durability Aspects of Chemically Stabilized Quarry By-Product Applications in Pavement Base and Subbase. *Transportation Research Record*, 2674(6), 339–350. <https://doi.org/10.1177/0361198120919113>

Rahman, M.A. (1987) Effect of cement-rice husk ash mixtures on geotechnical properties of lateritic soils. *Soils Found.*, 27(2), 61-65. [https://doi.org/10.3208/sandf1972.27.2\\_61](https://doi.org/10.3208/sandf1972.27.2_61)

Raman, V. (1967) Identification of expansive soils from the plasticity index and the shrinkage index data. *Indian Eng Calcutta* 11(1):17–22

Ranganatham, B. A. & Satyanarayana, B. (1965) A rational method of predicting swelling Potential for compacted expansive clays. [https://www.issmge.org/uploads/publications/1/39/1965\\_01\\_0021.pdf](https://www.issmge.org/uploads/publications/1/39/1965_01_0021.pdf)

Rauch, A.F., Harmon, J.S., Katz, L.E. & Liljestrang, J.E. (2002) Measured effects of liquid soil stabilizers on the engineering properties of clay. In: *Transportation Research Record 1787*. Transportation Research Board/National Research Council, Washington, DC, pp 33–41

Richter, M., Conti, M., Maccarini, G. (1982) Mejoras en la determinación de cationes intercambiables, acidez intercambiable y capacidad de intercambio catiónico en suelos. *Rev. Fac. Agron*, 3, 145-155. <http://ri.agro.uba.ar/files/download/revista/facultadagronomia/1982richterm.pdf>

Rollings, R. S., Burkes, J. P., & Rollings, M. P. (1999) Sulfate Attack on Cement-Stabilized Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(5), 364–372. doi:10.1061/(asce)1090-0241(1999)125:5(364)

Romero, E., Gens, A., Lloret, A (1999) Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay. *Engineering Geology*. Volume 54, Issues 1–2. Pages 117-127. ISSN 0013-7952. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00067-8](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00067-8). (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795299000678>)

Romero, P. R., Mendoza, A. M. (compiladoras) (2008) Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo: la experiencia en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Impreso en México. 1ra Edición. ISBN:978-968-817-882-9. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/573/cap2.pdf>

SAGyP - Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. SAMLA (Sistema de Apoyo Metodológico de Laboratorios de Análisis de Suelos y Aguas. Versión electrónica. ISBN 987-9184-40-8. (2004)

Sanders, T., & Addo, J. (1993) Effectiveness and environmental impact of road dust suppressants. MPC-94-28 Mountain Plains Consortium Rep. Prepared for U.S. DOT, Colorado State Univ, Ft. Collins, CO. <https://www.ugpti.org/resources/reports/details.php?id=313>

Santamarina, J. C. & Narsilio, G.A. (2008) Clasificación de suelos: fundamento físico, prácticas actuales y recomendaciones. Georgia Institute of Technology. Atlanta. <http://materias.fi.uba.ar/6408/santamarina.pdf>

Santamarina, J. C., Klein, K. A., Wang, Y. H., & Prencke, E. (2002) Specific surface: determination and relevance. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(1), 233–241. doi:10.1139/t01-077

Saride, S., Puppala, A. J. & Chikyala, S. R. (2013) Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays. *Appl. Clay Sci.* 85, 39-45. DOI:10.1016/j.clay.2013.09.008

Sarker, S. L., Herbert, B. E. & Scharlin, R. J. (2000) Injection stabilization of expansive clays using a hydrogen ion exchange chemical. In: *Geo-denver 2000*. ASCE.

Schmitz, R. M., Schroeder, C., Charlier, R. (2004) Chemo-mechanical interactions in clay: a correlation between clay mineralogy and Atterberg limits. *Applied Clay Science* 26, 351–358. 144

Scholen, D. E. (1992) Non-standard stabilizers. Report FHWA-FLP-92-011. FHWA, U.S. Department of Transportation. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/conf/1995/cp6/v2/cp6v2-029.pdf>

Scholen, D. E. (1992) Stabilizer Mechanisms in nonstandard stabilizers, *Proceedings of 6th International conference on low-volume roads*. National Academy Press. Washington, D. C. 252-260.

Schollenber, C. J. & Simon, R. H. (1945) Determination of exchange capacity and exchangeable bases in soil - ammonium acetate method. *Soil Sci.* 59:13-25. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-194501000-00004>

Sciutto, J. C., Césari, O. & Iantanos, N. (2008) Hoja geológica 4569-IV Escalante, escala 1:250000: Programa Nacional de Cartas Nueva unidad litoestratigráfica del grupo Chubut. 95 geológicas de la República Argentina, Secretaría de Minería de la Nación, Dirección Nacional del Servicio Geológico, Boletín 351, 76p. Buenos Aires

Seco, A., Ramírez, F., Miqueleiz, L. & García, B. (2011) Stabilization of expansive soils for use in construction *Appl. Clay Sci*, 51 (3), 348-352. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.12.027>

Seed, H. , Woodward, R. , Lundgren, R. (1963) Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays *Transactions of the American Society of Civil Engineers / Volume 128 Issue 1 - January 1963*. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0008724>.

Seed, H. B. , Woodward, R. J. & Lundgren, R. (1964) Fundamental aspects of Atterberg limits. *Journal of SMFE Div., ASCE*, Nov., pp 75-105

Seed, H. B., Woodward, R. J. Jr. & Lundgren, R. (1962) Prediction of swelling potential for compacted clays. *T. Am. Soc. Civ. Eng.*, 128(1), 1443-1477. *J Soil Mech Found Division. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. /Volume 88 Issue 3 - June 1962* <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000431>

- Sherwood, P. T. & Ryley, M. D. (1970) An Investigation for a Cone-Penetrometer Method for the Determination of the Liquid Limit. *Geotechnique*, Vol. 20, No. 2, pp. 203-208. ISSN 0016-8505 E-ISSN 1751-7656 <https://doi.org/10.1680/geot.1970.20.2.203>
- Sikora, L. J., Stott, D. E. (1997) *Methods for Assessing Soil Quality, Volume 49. Chapter 9: Soil Organic Carbon and Nitrogen*. Book Editor(s): John W. Doran, Alice J. Jones. First published: 01 January 1997 <https://doi.org/10.2136/sssaspeccpub49.c9>. Book Series: SSSA Special Publications.
- Sirivitmaitrie, C., Puppala, A., Saride, S., Hoyos, L. (2011) Combined lime-cement stabilization for longer life of low-volume roads. *Transp Res Rec J Transp Res Board* 2204:140–147. December 2011 *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board* 2204(2204):140-147 DOI: 10.3141/2204-18 [https://www.researchgate.net/publication/273126460\\_Combined\\_Lime-Cement\\_Stabilization\\_for\\_Longer\\_Life\\_of\\_Low-Volume\\_Roads](https://www.researchgate.net/publication/273126460_Combined_Lime-Cement_Stabilization_for_Longer_Life_of_Low-Volume_Roads)
- Sivakumar, V., Glynn, D., Cairns, P., & Black, J.A. (2015) A new method of measuring plastic limit of fine materials. *Géotechnique*. ISSN 0016-8505 | E-ISSN 1751-7656. Volume 59 Issue 10, December 2009, pp. 813-823. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.10.813>
- Sivapullaiah, P. V. & Lakshmi Kantha, H. (2005) Lime-stabilised illite as a liner. *Proceedings of the ICE-Ground Improvement*, 9(1), 39-45. <https://doi.org/10.1680/grim.2005.9.1.39>
- Sivapullaiah, P. V., Sridharan, A. & Bhaskar Raju, K. V. (2000) Role of amount and type of clay in the lime stabilisation of soils. *Proceedings of the ICE, Ground Improvement*, 4(1), 37-45. <https://doi.org/10.1680/grim.2000.4.1.37>
- Sivapullaiah, P., Sitharam, T., Subba Rao, K. (1987) Modified Free Swell Index for Clays. *Geotechnical Testing Journal* 10, no. 2 (1987): 80-85. <https://doi.org/10.1520/GTJ10936J>
- Sivapullaiah, P. & Sridharan, A. (1985) Liquid Limit of Soil Mixtures. *Geotechnical Testing Journal* 8, no. 3 (1985): 111-116. <https://doi.org/10.1520/GTJ10521J>
- Sjöström, E. (1993) *Wood Chemistry: Fundamentals and Applications*. Academic Press. ISBN 978-0-08-092589-9. Copyright © 1993 Elsevier Inc. Imprint Academic Press <https://doi.org/10.1016/C2009-0-03289-9>
- Skempton, A. W. (1944) Notes on compressibility of clays. *Qtrly. Journal of Geological Society, London*, pp 119-135
- Skempton, A.W. (1957) Discussion on the planning and design of the new Hongkong airport. *Proc. Inst. Civil Engineers.*, 7, pp 305-307
- Skempton, D. (1953) Reprinted from *Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech., Zurich, 1953*, 1, 57-61 *The Colloidal "Activity" of Clays L'Activite colloïdale des argiles* by A.W.SKEMPTON, D.SC, A.M.I.C.E., F.G.S., University Reader in Soil Mechanics and Assistant Professor at Imperial College, University of London, England
- Snethen, D. R. (1979) An evaluation of Methodology for prediction and minimization of detrimental volume change of expansive soils in highway subgrade. Vol. I Research Report March 1979. Final Report. Federal Highway Administration. US Army Engineering Waterways Experiments Station.
- Soledad, R., Morao, J., Soledad-Rodríguez, B. (1985) Estudio de las arcillas expansivas. Caso trapichito (study of expansive clay. Case Trapichito). 10.13140/RG.2.1.1116.8802.

Soltani, A., Taheri, A., Khatibi, M. et al. (2017) Swelling Potential of a Stabilized Expansive Soil: A Comparative Experimental Study. *Geotech Geol Eng* 35, 1717–1744. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0204-1>

Soto, M. (2008) Geotecnia en suelos no saturados. *Revista de la Academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales*, ISSN 0370-3908, Vol. 32, Nº. 125, 2008, págs. 471-482

Soundara, B., & Robinson, R. G. (2009) Influence of test method on swelling pressure of compacted clay. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 3(3), 439–444. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2009.03.03.439-444>

Sowers, G .F., Vesic, A. & Grandolfi, M. (1959) Penetration tests for liquid limit. ASTM. STP Vol. 254, pp. 216-224.

Spalletti, L. & Mazzoni, M. (1979) Estratigrafía de la Formación Sarmiento en la Barranca Sur del Lago Colhué Huapi. *Asociación Geológica Argentina, Revista XXXIV (4): 271-281.*

Sridharan, A., Prakash, K. (2000) Classification procedures for expansive soils. *Geotech Eng* 143:235–240. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*. ISSN 1353-2618 | E-ISSN 1751-8563. Volume 143 Issue 4, October 2000, pp. 235-240 <https://doi.org/10.1680/geng.2000.143.4.235>  
[https://www.researchgate.net/publication/344218452\\_Swelling\\_Stress\\_and\\_Suction\\_Correlation\\_of\\_Compacted\\_Heaving\\_Soils](https://www.researchgate.net/publication/344218452_Swelling_Stress_and_Suction_Correlation_of_Compacted_Heaving_Soils)

Sridharan, A., Rao, S. M., & Sivapullaiah, P. (1986) Swelling Pressure of Clays. *Geotechnical Testing Journal*, 9(1), 24–33. <https://doi.org/10.1520/GTJ10608J>

Sridharan, A., Rao, S. M., Murthy, N.S. (1985) Free swell index of soils: a need for redefinition. *Indian Geotech J* 15(2):94–99. Open PDF. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*. ISSN 1353-2618 | E-ISSN 1751-8563. Volume 143 Issue 4, October 2000, pp. 235-240. <https://doi.org/10.1680/geng.2000.143.4.235> Published Online: May 25, 2015

Sridharan, A., Rao, V. G. (1975) Mechanism controlling the liquid limit of clays. *Proceedings of the Istanbul Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Istanbul*, vol. 1, pp. 75–84. [https://www.researchgate.net/publication/291880607\\_MECHANISMS\\_CONTROLLING\\_THE\\_LIQUID\\_LIMIT\\_OF\\_CLAYS](https://www.researchgate.net/publication/291880607_MECHANISMS_CONTROLLING_THE_LIQUID_LIMIT_OF_CLAYS)

Standards Association of Australia. AS 1289.C4.1-1977 Methods of testing soils for engineering purposes - Soil classification tests - Determination of the linear shrinkage of a soil - Standard method.

Starker, C. (2021) CAS Instrumental SRL <https://www.cas-instrumental.com.ar/portfolio-items/mastersizer-3000> (última fecha de acceso 16 de diciembre de 2021).

Stoltz, G., Cuisinier, O., & Masrouri, F. (2012). Applied Clay Science Multi-scale analysis of the swelling and shrinkage of a lime-treated expansive clayey soil. *Applied Clay Science*, 61, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.04.001>

Sun, X., Li, J., & Zhou, A. (2017) Assessment of the impact of climate change on expansive soil movements and site classification. *Australian Geomechanics Journal*, 52(3), 39–50. <http://purl.org/au-research/grants/arc/LP160100649>

Swartzen-Allen, S. L., & Matijevic, E. (1974) Surface and colloid chemistry of clays. *Chemical Reviews*, 74(3), 385–400. doi:10.1021/cr60289a004

- Ta'negonbadi, B., & Noorzad, R. (2017) Stabilization of clayey soil using lignosulfonate. *Transportation Geotechnics*, 12, 45–55. <https://doi.org/10.1016/J.TRGEO.2017.08.004>
- Taha Jawad, I., Raihan Taha, M., Hameed Majeed, Z., & A. Khan, T. (2014) Soil Stabilization Using Lime: Advantages, Disadvantages and Proposing a Potential Alternative. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 8(4), 510–520. doi:10.19026/rjaset.8.1000
- Tang, C., Tang, a., Cui, Y., Delage, P., Schroeder, C. (2011) Investigating the Swelling Pressure of Compacted Crushed-Callovo-Oxfordian Claystone. *Physics and Chemistry of The Earth, Elsevier*, 2011, 36 (17-18), pp.1857-1866. [ff10.1016/j.pce.2011.10.001](https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.10.001)ff. [ffhal-00655750f](https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.10.001)
- Tavakoli, E., He, S., Yu, X., & Hoyos, L. R. (2018) Laboratory Evaluation of a Liquid Ionic Stabilizer for an Expansive Soil in North Texas. *PanAm Unsaturated Soils 2017*. doi:10.1061/9780784481707.020
- Terzaghi, K. & R.B. Peck (1948) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons. Inc., New York
- Teschke, K. & Demers, P. (2021) Industria del papel y de la pasta de papel. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo: Sectores basados en recursos biológicos. (<https://www.insst.es/documents/94886/161971/Cap%C3%ADtulo+72.+Industria+del+papel+y+de+la+pasta+de+papel>).
- Thakur, V. K. S., Sreedeeep, S., & Singh, D. N. (2005) Parameters Affecting Soil–Water Characteristic Curves of Fine-Grained Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(4), 521–524. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:4\(521](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:4(521)
- Theng, B. K. G. (1982) Clay-polymer interactions: summary and perspectives. *Clay. Clay. Miner.* 30(1), 1-10. DOI: 10.1346/CCMN.1982.0300101
- Thevenot, M., Dignac, M. F., & Rumpel, C. (2010) Fate of lignins in soils: A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 42, 1200–1211. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.03.017>
- Thomas, P. J. , Baker, J. C., Zelazny, L.W. (2000) An Expansive Soil Index for Predicting Shrink–Swell Potential. *Soil Science Society of America Journal*, 64(1), 268. doi:10.2136/sssaj2000.641268x
- Tingle, J., and Santoni, R. (2003) Stabilization of Clay Soils with Nontraditional Additives. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1819, 72–84. doi:10.3141/1819b-10
- Tingle, J., Newman, J., Larson, S., Weiss, C., Rushing, J. (2007) Stabilization mechanisms of non-traditional additives. *Transp. Res. Rec.* 1989(1), 59-67. DOI: 10.3141/1989-49
- Tomasini, E., Siracusano G, Maier M (2012) Spectroscopic, morphological, and chemical characterization of historic pigments based on carbon. Paths for the identification of an artistic pigment. *Microchem. J*, 102, 28-37.
- Trevisan, S. J. (1983) Métodos edométricos para estimar la presión de hinchamiento en suelos activos. Descripción comparativa de las trayectorias de tensiones. X Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería en Fundaciones. Vol I, pp 47-73, Bs. As., La Plata.
- Turkoz, M., Savas, H., Acaz, A., Tosun, H. (2014) The effect of magnesium chloride solution on the engineering properties of clay soil with expansive and dispersive characteristics. *Applied Clay Science*, Volume 101, November 2014, Pages 1-9. DOI:10.1016/j.clay.2014.08.007

US EPA (United States Environmental Protection Agency) (2018) Pulp, Paper and Paperboard Effluent Guidelines | Effluent Guidelines | US EPA

Van Genuchten, M.T. (1980) A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

Vanapalli, S., & Lu, L. (2012) A state-of-the art review of 1-D heave prediction methods for expansive soils. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 6(1), 15–41. doi:10.3328/ijge.2012.06.01.15-41

Vardanega, P. J. (2020) Discussion of : Reclaimed Lignin-Stabilized Silty Soil : Undrained Shear Strength , Atterberg Limits , and Microstructure Characteristics, by Tao Zhang , Guojun Cai , and Songyu Liu. 32(3), 1–4. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003064](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003064)

Vaught, R., Brye, K. R., & Miller, D. M. (2006) Relationships among Coefficient of Linear Extensibility and Clay Fractions in Expansive, Stony Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70(6), 1983. doi:10.2136/sssaj2006.0054

Vinod, J S., Mahamud, M. A., & Indraratna, B. (2012) Elastic modules of soils treated with lignosulfonate 2012, 487-492. <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=7372&context=engpapers>

Vishtal, A. & Kraslawski, A. (2011) Challenges in industrial applications of technical lignins. *BioResources* 6(3), 3547-3568. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/challenges-in-industrial-applications-of-technical-lignins/>

Wesley, L. (2010) *Fundamentals of soil mechanics for sedimentary and residual soils*. Wiley, Hoboken, NJ. ISBN 978-0-470-37626-3

Williams, A. A. B. & Pidgeon, J.T. & Day, P.W. (1985) Expansive soils. 27. 367-373, 375.

Wilson, S. (1970) Suggested Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using Harvard Compaction Apparatus. in *Special Procedures for Testing Soil and Rock for Engineering Purposes: Fifth Edition*, (West Conshohocken, PA: ASTM International), 101-103. <https://doi.org/10.1520/STP38484S>

Winterkorn, H. F., Fang, H. Y. (1986) *Soil technology and engineering practices of soils*. Foundation engineering handbook. Galgotia Book Source, New Delhi. Book Title Foundation Engineering Handbook Editors Hsai-Yang Fang Copyright 1991 Publisher Springer US Copyright Holder Van Nostrand Reinhold eBook ISBN 978-1-4615-3928-5. DOI 10.1007/978-1-4615-3928-5 Hardcover ISBN 978-0-412-98891-2 Softcover ISBN 978-1-4613-6752-9 Edition Number 2.

Wood, D. M. (1981) *Cone Penetrometer and Liquid Limit*. Cambridge University Department of Engineering, Report No. CUED/D-SOILS/TR-101-1981, January 1981

Wray, W. (1984) The Principle of Soil Suction and Its Geotechnical Engineering Applications. In: *International Conference on Expansive Soils (5th : 1984 : Adelaide, S. Aust.)*. Fifth International Conference on Expansive Soils 1984: Preprints of Papers. Barton, ACT: Institution of Engineers, Australia, 1984: 114-118. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.827433761410391>

Yang, B., Zhang, Y., Ceylan, H., Kim, S., and Gopalakrishnan, K. (2018) Assessment of soils stabilized with lignin-based byproducts. *Transportation Geotechnics*, 17(October), 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.10.005>

- Yazdandoust, F., Yasrobi, S. (2010) Effect of cyclic wetting and drying on swelling behavior of polymer-stabilized expansive clays. *Applied Clay Science*. Volume 50, Issue 4, December 2010, Pages 461-468. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.09.006>
- Yilmaz, I., Civelekoglu, B. (2009) Gypsum: An additive for stabilization of swelling clay soils. *Applied Clay Science*, Volume 44, Issues 1–2, April 2009, Pages 166-172. <https://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2009.01.020> <https://hdl.handle.net/20.500.12418/10159>
- Yossifova, M., Valčeva, S., Nikolova, S. (2011) Exogenic microbial activity in coals. *Fuel Processing Technology*, Volume 92, Issue 4, 2011, Pages 825-835, ISSN 0378-3820, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.10.010>.
- Yu, C., Liao, R., Zhu, C., Cai, X., and Ma, J. (2018) Test on the Stabilization of Oil-Contaminated Wenzhou Clay by Cement. *Advances in Civil Engineering*. Hindawi Advances in Civil Engineering Volume 2018, Article ID 9675479. <https://doi.org/10.1155/2018/9675479> [https://www.researchgate.net/publication/326375760\\_Test\\_on\\_the\\_Stabilization\\_of\\_Oil-Contaminated\\_Wenzhou\\_Clay\\_by\\_Cement](https://www.researchgate.net/publication/326375760_Test_on_the_Stabilization_of_Oil-Contaminated_Wenzhou_Clay_by_Cement)
- Yusuf, E., Orhan, E. (2007) Swell pressure prediction by suction methods. *Engineering Geology*. Volume 92, Issues 3–4. Pages 133-145. ISSN 0013-7952. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.04.002> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795207000853>
- Zhan, L. T., Chen, P., Ng, C. W. W. (2007) Effect of suction change on water content and total volume of an expansive clay. *Journal of Zhejiang University Science Academy* 8(5), 699–706 (2007) ISSN 1673-565X (Print); ISSN 1862-1775 (Online). <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.475.8981&rep=rep1&type=pdf>
- Zhan, T. L., & Ng, C. W. (2006) Shear strength characteristics of an unsaturated expansive clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(7), 751–763. <http://doi:10.1139/t06-036> DOI: 10.1139/T06-036
- Zhang, T., Liu, H., Zhan H., Ma, C., Cai, G. (2020) Durability of silty soil stabilized with recycled lignin for sustainable engineering materials. *Journal of Cleaner Production*, Vol 248, 2020, 119293, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119293>.
- Zhao, H., Liu, J., Guo, J., Zhao, C. (2015) Reexamination of Lime Stabilization Mechanisms of Expansive Clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Volume 27 Issue 1 - January 2015 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001040](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001040).