



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

## **FÍSICA/QUÍMICA/GEOTECNIA DE LAPONITA: POTENCIALES APLICACIONES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

KATHERINE IGNACIA PARDO OJEDA

PROFESOR GUÍA:  
FELIPE AGUSTÍN OCHOA CORNEJO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

DIEGO ANTONIO MORATA CÉSPEDES  
FRANCK JEAN CHRISTOPHE QUERO

Este trabajo ha sido financiado por CONICYT, Fondecyt de iniciación 11181252.

SANTIAGO DE CHILE

2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE:** Ingeniera Civil con mención en  
Estructuras, Construcción y Geotecnia.  
**POR:** Katherine Ignacia Pardo Ojeda  
**FECHA:** 30 de noviembre de 2020  
**PROFESOR GUÍA:** Felipe Ochoa Cornejo

## **FÍSICA/QUÍMICA/GEOTECNIA DE LAPONITA: POTENCIALES APLICACIONES**

La laponita de grado RD es una nano-arcilla artificial del grupo de las esmectitas, ocupada principalmente como un modificador reológico en la industria y también es utilizado en la explotación de gas y petróleo. Actualmente se ha impulsado su uso en el campo de investigación en el área geotécnica, como por ejemplo, en modelos a escala para simulaciones de arcillas blandas, en técnicas de mejoramiento de suelo y como un aditivo para mejorar fluidos de perforación y cemento, entre otras aplicaciones.

En el presente trabajo de título se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica del estado del arte de la laponita, abarcando la perspectiva físico – química, hidráulica y geotécnica con la finalidad de caracterizar sus propiedades y de esta forma correlacionar su comportamiento a escala micrométrica y macrométrica y/o mecánico. Gracias a esto, se determinó que la laponita es una esmectita con una gran capacidad de adsorción de agua, lo que se traduce en una alta plasticidad. Además, cuando se encuentra en disolución posee propiedades altamente tixotrópicas y se intuye que éstas pueden correlacionarse con la resistencia del corte no drenado. Para lo anterior, este trabajo se apoyó en el estudio de las esmectitas de forma genérica para tener un patrón de referencia, y en la información experimental disponible de distintos tipos de laponita y hectorita.

También, se realizó una batería de ensayos físico - químicos para caracterizar este material y comparar esta información con la disponible en la literatura. Junto con lo anterior, se estudió este material en función del tamaño de partículas, para evaluar su comportamiento en diferentes rangos de tamaño, corroborando su alta pureza y homogeneidad.

Finalmente, se procesaron datos experimentales geotécnicos de pre - factibilidad disponibles, realizados tanto en especímenes de laponita pura como en mezclas en seco de arena de Ottawa con 1% de laponita. En los especímenes de laponita se determinó su alta; superficie específica, plasticidad, impermeabilidad, compresibilidad y expansibilidad y como estos fenómenos se correlacionan entre sí. De los resultados de especímenes mezclados se obtuvieron indicios positivos de una mejora en el desempeño mecánico de la arena de Ottawa al incorporar laponita, los cuales deben ser confirmados mediante análisis experimentales adicionales.

*“Para Virginia y Patricio, mis primeros maestros de vida, los amo.”*

## Agradecimientos

De todas las etapas que he vivido, nunca me había sentido protagonista y con la facultad de poder agradecerle a las siguientes personas cuánto han hecho por mi de forma pública. Es aquí donde quiero plasmar mi infinita gratitud a todos quienes han sido fundamentales en mi existencia, en mi desarrollo como persona y como profesional.

Si bien el orden no siempre es importante, quisiera partir por mi madre, Virginia, quien me ha todo y mucho más. Ella ha limpiado todas las heridas de mis caídas, que no fueron pocas. Me enseñó a mirar hacia adelante con optimismo y a contemplar con sabiduría la frustración, sentimiento que no conocía hasta que pisé esta escuela. Mamá, ¿De dónde crees que aprendí esa capacidad de dar? ¿Pude aprenderlo sola teniéndote a ti de ejemplo?, gracias por la paciencia, por todos los sacrificios que has hecho por nosotros. Mi inspiración, mi padre, el hombre más importante de mi vida. Tengo mucho de ti, aunque no tanto como quisiera ya que eres excepcional. Siempre me has inculcado la ambición y la disciplina. Valores que están fuertemente arraigados en mí y por los cuales he avanzado mucho más que personas con más talento. Nunca me has subestimado, siempre me has aleonado y me has motivado a atreverme a lo que sea que se me cruce en la cabeza. El Universo es infinito, pero el amor de Virginia y Patricio es mucho más grande. Gracias por su amor incondicional y por su herencia en la sed del conocimiento. Mi compañera de viaje, Antonia. Hemos sido un equipo desde que comenzamos nuestra vida universitaria, nos turnábamos para dormir, cuando las noches nos parecían demasiado cortas. Hermana, eres una mujer brillante y gracias a ti soy más persona y menos bot. Te amo hermana pase lo pase, estoy aquí para ti.

No todos tienen un ángel de la guardia, yo tengo a alguien mejor, tengo a la Mosty. Quien me cuida y me regalona a distancia. Siempre atenta a mis necesidades, a mis penas, a mis triunfos. Sé que siempre dices que la vida no te dió hijos, sino que sobrinas, yo te amo como si fueras mi madre. También dices que los amigos los que eliges y la familia es lo que te toca, soy una afortunada de que seas mi tía. Mi familia es pequeña, pero está llena de mujeres fuertes, es por esto que no puedo dejar de mencionar a mi tía Vero y a mis primas Fernanda y Valentina, y a mi pequeña Jesús.

Si bien la familia nos acompaña desde el principio, en el camino aparecen otros maestros, que nos abren la mente y nos hacen descubrir el mundo. Quiero agradecerle al profesor Felipe Ochoa, por confiar innumerables veces en mí en sus proyectos, incluyendo este trabajo. Muchas gracias profesor por las oportunidades, por la motivación, por creer en mí cuando ni yo he tenido la confianza en mi misma, por hablarme de suelos, ciencia y de lo importante que es aprender en todos los aspectos de la vida. Gracias por las incontables horas que le dedicó a este trabajo. Este trabajo no habría sido lo mismo sin el apoyo y el trabajo del profesor Franck Quero y el profesor Diego Morata. Agradezco de sobremanera su tiempo, la paciencia, su gran disposición a explicarme temas que estaban fuera de mi formación, la buena disposición para facilitarme recursos de sus respectivos departamentos. Fue una grata experiencia conocerlos y trabajar con ustedes.

No puedo terminar sin mencionar a quienes te alegran la mañana, la tarde, la noche e incluso la madrugada. Mis amigos, querido Team  $\pi\eta\tilde{g}A$ , sin ustedes yo no estaría escribiendo estas líneas. Gracias a Alejandro por acompañarme y enseñarme lo que es la resiliencia, por retarme cuando había que hacerlo, por hacerme reír y por las maratones de cálculo con exceso de comida. Gracias a mi amiga Constanza, por tu cariño, por ayudarme cuando mi orgullo no me permitía hacerlo, tú eras capaz de oler mi desesperación, gracias por mostrarme cómo pedir ayuda y por cuidarme. A mi amigo Luis, Lupi, por tu calidez, tu calidad como persona y por supuesto los memes. A mi amiga Ángela, siempre apañadora, tan presente en el estudio como en el carrete, siempre se puede contar contigo. A mi amigo David, siempre me he sentido valorada y respetada por ti, nuestras conversaciones noñas siempre han sido serotonina, eres un grande por dentro y por fuera. A mi amigo Gonzalo, por sacarme de la rutina, por nuestras conversaciones, por nuestra confianza. Amigos míos los adoro y les deseo lo mejor. Matías, no es sólo mi amigo, es mi amor, mi colega, mi compañero, algunas veces mi copiloto y otras el piloto. Te doy las gracias infinitas por tu paciencia, por tu amor y tu apoyo. En algún momento esto se veía demasiado lejano, y tú me has enseñado a disfrutar incluso de lo incierto y además me has enseñado que siempre hay tiempo para una cerveza. Cumpló esta etapa feliz contigo de la mano.

Junto a estas maravillosas personas no puedo dejar de agradecer a todos quienes fueron parte de mi vida en estos años, que no fueron pocos. De seguro no puedo nombrarlos a todos, pero quedan con mucho cariño en mi corazón. Gracias a mi geopecera, José, Miguel, Belén, Diego, Susana, Alondra y Meili, por las palabras de ánimo, por ser generosos y compartir su conocimiento, por ser tan humanos, extrañaré su compañía en el café y las tardes de internet. A mis amigas que me han acompañado en la vida, mostrándome la diversidad del mundo, Gaby, Barby, Joshe, Ara y Katy. Sé que ya no nos vemos como antes, pero la vida no sería igual sin saber que ustedes están en mi mundo. Me siento muy orgullosa de ustedes, las quiero mucho.

Por último, gracias al proyecto Fondecyt de iniciación 11181252, financiado por CONICYT.

## Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivos generales .....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Metodología .....	2
1.3.1 Revisión Bibliográfica .....	2
1.3.2 Caracterización físico – química de la laponita .....	3
1.3.3 Caracterización geotécnica en muestras de laponita, arena limpia y mezclada en seco ( <i>dry mix</i> ).....	3
1.4 Organización de la tesis.....	3
CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Introducción a la laponita .....	5
2.1.1 ¿Qué es la laponita?.....	5
2.1.2 Usos de la laponita .....	5
2.1.3 Grados de laponita .....	6
2.1.4 Composición química .....	6
2.1.5 Síntesis de laponita .....	7
2.1.6 Propiedades del fabricante .....	10
2.2 Caracterización físico–química y geotécnica de laponita .....	10
2.2.1 Espectroscopía de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) .....	10
2.2.2 Difracción de rayos X (XRD).....	11
2.2.3 Análisis termogravimétrico (TGA) .....	12
2.2.4 Superficie específica.....	13
2.2.5 Límite de Atterberg .....	16
2.2.6 Granulometría partículas en suspensión.....	16
2.3 Comportamiento de soluciones de laponita.....	17
2.3.1 Consolidación e hinchamiento de la laponita .....	17
2.3.2 Interacción de la arcilla con el agua.....	19
2.3.3 Capacidad de intercambio de cationes CEC y agua adsorbida.....	23
2.3.4 Introducción al comportamiento de fluido.....	23
2.3.5 Efectos modificantes de suspensiones coloidales .....	25
2.3.6 Estados en suspensiones coloidales .....	27
2.4 Propiedades reológicas.....	29
2.4.1 Viscosidad .....	30

2.4.2	Transición solución – gel/vidrio .....	34
2.4.3	Recuperación después del corte .....	36
2.5	Propiedades geotécnicas del gel .....	37
2.5.1	Esfuerzo de corte .....	37
2.5.2	Consolidación .....	40
2.5.3	Conductividad hidráulica.....	42
2.6	Estudio de microestructuras de suelo con laponita .....	43
2.6.1	Permeación y <i>dry mix</i> .....	43
2.6.2	Medición de conductividad hidráulica .....	44
2.6.3	Resistencia al corte cíclico.....	45
2.7	Potenciales aplicaciones de la laponita en la ingeniería civil .....	46
2.7.1	Mitigación de la licuefacción .....	46
2.7.2	Modelos a escala.....	47
2.7.3	Mejoramiento al cemento .....	47
2.7.4	Excavaciones .....	47
2.7.5	Fabricación de ladrillos .....	48
2.7.6	Ahorro de agua en la minería: Uso de agua de mar .....	48
CAPÍTULO 3: PROGRAMA EXPERIMENTAL FÍSICO - QUÍMICO .....		49
3.1	Descripción de los materiales .....	49
3.2	Equipos utilizados .....	49
3.2.1	Granulometría.....	49
3.2.2	Humedad.....	49
3.2.3	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) .....	50
3.2.4	Análisis Termogravimétrico (TGA) .....	52
3.2.5	Difracción de Rayos X en polvo (XRD) .....	52
3.2.6	Microscopio electrónico de barrido (SEM) acoplado con espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS).....	54
3.2.7	Medición de Superficie Específica .....	55
3.3	Metodología de los ensayos .....	57
3.3.1	Granulometría.....	57
3.3.2	Humedad.....	58
3.3.3	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) .....	58
3.3.4	Análisis termogravimétrico (TGA) .....	59
3.3.5	Difracción de rayos X en polvo (XRD) .....	60
3.3.6	Microscopio electrónico de barrido acoplado con espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (SEM/EDS) .....	60

3.3.7	Medición de superficie específica .....	60
CAPÍTULO 4: PROGRAMA EXPERIMENTAL GEOTÉCNICO .....		61
4.1	Descripción de los materiales .....	61
4.2	Equipos utilizados .....	61
4.2.1	Granulometría.....	61
4.2.2	Límites de Atterberg .....	61
4.2.3	Ángulo en reposo .....	61
4.2.4	Índice de vacío máximo y mínimo.....	61
4.2.5	Hinchamiento.....	61
4.2.6	Compresión edométrica.....	62
4.2.7	Corte Directo .....	62
4.2.8	Microscopio electrónico de barrido (SEM) .....	62
4.3	Metodología del ensayo .....	62
4.3.1	Preparación de probetas .....	62
4.3.2	Ensayos.....	62
CAPÍTULO 5: RESULTADOS CARACTERIZACIÓN FÍSICO – QUÍMICA .....		67
5.1	Granulometría.....	67
5.2	Humedad .....	68
5.3	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) .....	69
5.4	Análisis termogravimétrico (TGA) .....	70
5.5	Difracción de rayos X en polvo (XRD).....	71
5.6	Microscopio electrónico de barrido (SEM) acoplada con espectroscopía de rayos X de energía dispersiva .....	72
5.6.1	Microscopía electrónica de barrido .....	72
5.6.2	Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS).....	76
5.7	Medición superficie específica (BET) .....	79
CAPÍTULO 6: RESULTADOS CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.....		80
6.1	Granulometría.....	80
6.1.1	Laponita RD .....	80
6.1.2	Mezcla de arena limpia con laponita.....	80
6.2	Límites de Atterberg.....	81
6.3	Ángulo en reposo.....	82
6.4	Índice de vacío máximo y mínimo .....	83
6.4.1	Laponita RD .....	83
6.4.2	Arena limpia.....	84
6.4.3	DM 1%, 3%, 5% y 10%.....	84

6.5	Hinchamiento.....	85
6.5.1	Hinchamiento libre.....	85
6.5.2	Presión de hinchamiento.....	86
6.6	Compresión edométrica.....	86
6.6.1	Laponita RD.....	87
6.6.2	Arena limpia.....	90
6.6.3	DM 1% laponita.....	92
6.7	Corte directo.....	94
6.7.1	Laponita.....	94
6.7.2	Arena limpia.....	97
6.7.3	DM1%.....	99
6.8	Microscopio electrónico de barrido (SEM).....	101
6.8.1	Arena limpia.....	101
6.8.2	DM1%.....	102
6.8.3	DM3%.....	102
CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES.....		104
7.1	Comparación del análisis físico – químico con la bibliografía.....	104
7.2	Efecto del tamaño de partículas y el contenido de agua.....	105
7.3	Capacidad de adsorción de agua de la laponita.....	106
7.3.1	Límites de Atterberg.....	106
7.3.2	Hinchamiento y presión de hinchamiento.....	107
7.4	Propiedades geotécnicas de la laponita asociados a fenómenos físico – químicos.....	108
7.4.1	Superficie específica.....	108
7.4.2	Teoría de doble capa en la consolidación.....	109
7.4.3	Teoría de doble capa en el hinchamiento.....	110
7.4.4	Conductividad hidráulica de la laponita.....	112
7.5	Relación entre las propiedades reológicas y las propiedades geotécnicas de la laponita.....	113
7.5.1	Relación entre la viscosidad y la resistencia al corte no drenado.....	113
7.5.2	Tixotropía.....	114
7.5.3	Resistencia a diferentes profundidades.....	115
7.6	Especímenes permeados versus mezclado en seco.....	115
7.7	Desempeño de arena mezcladas en seco con 1% de laponita.....	116
7.7.1	Comparación de curvas granulométricas.....	116
7.7.2	Ángulo en reposo.....	118



7.7.3	Índice de vacío máximo y mínimo.....	118
7.7.4	Compresión edométrica.....	120
7.7.5	Corte Directo .....	121
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		123
8.1	Conclusiones .....	123
8.2	Recomendaciones para trabajos futuros.....	126
CAPÍTULO 9: BIBLIOGRAFÍA.....		127
CAPÍTULO 10: Anexos .....		A
10.1	Granulometría.....	A
10.2	Humedad .....	C
10.3	Espectroscopía de Infrarrojos por Transformada de Fourier (FT-IR).....	E
10.4	Análisis Termogravimétrico (TGA) .....	G
10.4.1	Temperatura versus masa.....	G
10.4.2	Tiempo versus masa .....	I
10.4.3	Temperatura versus primera derivada.....	K
10.4.4	Tiempo versus primera derivada .....	M
10.4.5	Promedio primera derivada .....	O
10.5	SEM.....	P
10.5.1	EDS.....	P
10.6	Dispositivo permeámetro .....	R

## Índice de Tablas

Tabla 2-1: Grados de Laponita (BYK Additives & Instruments, (2014)).	6
Tabla 2-2: Propiedades de laponita RD informada por el fabricante (BYK Additives & Instruments, (2013)).	10
Tabla 2-3: Asignación de <i>peak</i> a enlace según la literatura Grill, (2009), Mishra et al., (2008) <sup>o</sup> , Pálková et al., (2010)* y Xiong et al., (2019).#	11
Tabla 2-4: Asignación de plano cristalino según Qi et al., (1996).	12
Tabla 2-5: Asignación de plano cristalino según Xiong et al., (2019).	12
Tabla 2-6: Etapas de deshidratación (El Howayek, (2011)).	13
Tabla 2-7: Superficies específicas obtenidas por el método BET reportadas por diferentes autores.	14
Tabla 2-8: Parámetros de celdas unitarias de Laponita (Laurini et al., (2017)).	14
Tabla 2-9: Pesos moleculares de los elementos presentes en la celda de laponita.	15
Tabla 2-10: Límites de Atterberg disponibles en la bibliografía.	16
Tabla 2-11: Contenido de agua con laponita compactada a 10 MPa (Al-Mukhtar et al., (1999)).	17
Tabla 2-12: CEC en distintas arcillas (Giese & Oss, (2002); Terzaghi et al., (1981)).	23
Tabla 2-13: Diferencia entre los estados vidrio y gel.	27
Tabla 2-14: $S_{u,peak,MV}$ para muestras al 4%, 4.25% y 4.5%.	37
Tabla 2-15: $S_{u,peak,MV}$ para muestras al 4%, 4.25% y 4.5% a distancia de 25 y 87.5 mm.	39
Tabla 2-16: Parámetros de compresibilidad (Wallace & Rutheford, (2015)).	41
Tabla 2-17: Rangos de $c_v$ para distintos tipos de arcilla (Amarasinghe et al., (2011); Carter & Bentley, (1991)).	41
Tabla 2-18: Resumen de trabajos realizados para atenuación de la licuefacción.	46
Tabla 4-1: Cantidad de muestra para el ensayo de granulometría de laponita, arena limpia de Ottawa CS y arena con distintas cantidades de laponita.	62
Tabla 4-2: Distancias del transductor de desplazamiento para los distintos casos de hinchamiento libre.	64
Tabla 5-1: Parámetros de granulometría de laponita RD, diámetro asociada a un 60%, 30% y 10% de porcentaje que pasa, coeficiente de curvatura $C_c$ y de uniformidad $C_u$ y contenido de finos CF.	67
Tabla 5-2: Pérdida de humedad de la laponita antes de primer quiebre.	68
Tabla 5-3: Pérdida de humedad de la laponita después del primer quiebre.	68
Tabla 5-3: Pérdida de humedad de la laponita después segundo quiebre.	69
Tabla 5-4: Pérdida de humedad total de la laponita a 105°C.	69
Tabla 5-5: Asignación de <i>peaks</i> de acuerdo con el tipo de enlace para cada espécimen de laponita.	70
Tabla 5-6: Etapas de deshidratación para espécimen LF de laponita.	71
Tabla 5-7: Etapas de deshidratación para espécimen LM de laponita.	71
Tabla 5-8: Etapas de deshidratación para espécimen LG de laponita.	71
Tabla 5-9: Etapas de deshidratación para espécimen LB de laponita.	71
Tabla 5-10: Valor $d$ de <i>peaks</i> en nanómetros y asignación de índice de Miller de acuerdo con dos autores	72
Tabla 5-11: Concentración de oxígeno O, sodio Na, magnesio Mg, aluminio Al y silicio Si en laponita fina LF, mediana LM, gruesa LG y bruta LB.	77

Tabla 5-12: Parámetros de adsorción y desorción para la determinación de la superficie específica, según técnica BET. ....	79
Tabla 6-1: Tamaño característico para 60%, 30% y 10% de laponita que pasa, coeficientes de curvatura $C_c$ , uniformidad $C_u$ y contenido de finos CF. ....	81
Tabla 6-2: Determinación de límite líquido LL de laponita. ....	81
Tabla 6-3: Determinación de límite plástico LP. ....	82
Tabla 6-4: Ángulo en reposo para espécimen de laponita RD, arena limpia CS, y arena con 1% de laponita mezclada en seco. ....	82
Tabla 6-5: Determinación de $e_{min}$ , para la laponita RD con método Harvard. ....	83
Tabla 6-6: Determinación de $e_{min}$ , para la laponita RD con método del tubo. ....	83
Tabla 6-7: Determinación de $e_{max}$ , para la laponita RD con método del tubo. ....	83
Tabla 6-8: Determinación de $e_{max}$ , para la laponita RD con método del tubo. ....	83
Tabla 6-9: Índices máximos y mínimos de arena limpia ....	84
Tabla 6-10: $e_{max}$ , $e_{min}$ , de arena mezclada con diferentes contenidos de laponita en seco (con guion los elementos sin información). ....	85
Tabla 6-11: Condiciones de muestras para la compresión. ....	87
Tabla 6-12: Parámetros de compresión para la laponita RD con cambios de carga cada 1 hora. ....	88
Tabla 6-13: Parámetros de compresión para la laponita RD con escenarios de cargas de 12 horas. ....	90
Tabla 6-14: Parámetros de compresión para la arena limpia CS, con escenarios de carga de 6 y 3 horas. ....	92
Tabla 6-15: Parámetros de compresión para DM 1% para escenarios de cargas de 6 horas. ....	94
Tabla 6-16: Valores corte directo muestra laponita RD con 1 hora de compresión. ....	96
Tabla 6-17: Parámetros de resistencia al corte de laponita RD. ....	96
Tabla 6-18: Valores corte directo muestra laponita comprimida durante 24 horas. ....	97
Tabla 6-19: Parámetros de resistencia laponita RD comprimidas durante 24 horas. ....	97
Tabla 6-20: Valores corte directo muestra arena limpia con compresión de 1 hora. ....	99
Tabla 6-21: Parámetros de resistencia arena limpia con compresión de 1 hora. ....	99
Tabla 6-22: Valores corte directo DM1% con 1 hora de compresión. ....	101
Tabla 6-23: Parámetros de resistencia DM1% con 1 hora de compresión. ....	101
Tabla 7-1: Promedio y desviación estándar de los resultados de Límite de Atterberg de todos los autores. ....	106
Tabla 7-2: Constantes utilizadas en el método de cálculo de Tripathy & Schanz, (2007). ....	109
Tabla 7-3: Parámetros utilizados para el cálculo de la Figura 7-4. ....	109
Tabla 7-4: Parámetros modificados de la Tabla 7-2 para el cálculo de trayectoria de laponita. ....	110
Tabla 7-5: Parámetros utilizados para el cálculo de la presión de hinchamiento para la bentonita Komine & Ogata, (1996). ....	111
Tabla 7-6: Parámetros utilizados para el cálculo de la presión de hinchamiento para la laponita. ....	112
Tabla 7-7: Ángulo en reposo promedio. ....	118
Tabla 7-8: Ángulo en reposo de arena de Jumunjin (Kim et al., (2018)). ....	118
Tabla 7-9: Resumen de $e_{min}$ , y $e_{max}$ . ....	119
Tabla 7-10: Parámetros compresión la laponita RD. ....	121
Tabla 7-11: Parámetros compresión de la arena con mezcla de laponita. ....	121

Tabla 7-13: Resumen de parámetros resistentes de todos los especímenes.....	121
Tabla 7-14: Ángulo de fricción interna arena de Jumunjin Kim et al., (2018). .....	122
Tabla 10-1: Granulometría 1 laponita RD.....	A
Tabla 10-2: Granulometría 2 laponita RD.....	A
Tabla 10-3: Granulometría 3 laponita RD.....	B
Tabla 10-4: Granulometría 4 laponita RD.....	B
Tabla 10-5: Granulometría 5 laponita RD.....	C
Tabla 10-6: Espectro EDS laponita fina LF. ....	P
Tabla 10-7: Espectro EDS laponita mediana LM. ....	Q
Tabla 10-8: Espectro EDS laponita grande LG.....	Q
Tabla 10-9: Espectro EDS laponita bruta LB. ....	Q

## Índice de Figuras

Figura 2-1: Forma, dimensiones y estructura de una partícula de laponita (Figura obtenida con software VESTA).....	5
Figura 2-2: (a) Celdas unitarias de laponita dispuesta en un disco de laponita; (b) Elementos químicos de la partícula de laponita. ....	7
Figura 2-3: Cargas eléctricas presentes en la partícula de laponita. ....	7
Figura 2-4: Proceso de síntesis de laponita. ....	8
Figura 2-5: Mezcla de sales en solución acuosa con agitación constante y temperatura de ebullición.....	8
Figura 2-6: Resumen de los procesos involucrados al mezclar de sales en solución acuosa. ....	8
Figura 2-7: Esquema representando el funcionamiento autoclave utilizado para aplicar el tratamiento hidrotérmico. ....	9
Figura 2-8: (a) Esquema del proceso de centrifugado de la suspensión de laponita y (b) Esquema del proceso de filtrado de la suspensión a través de un filtro de torta o <i>filter cake</i> . ....	9
Figura 2-9: Espectro de infrarrojos de laponita obtenidos por varios autores (Mishra et al., (2008); Pálková et al., (2010); Xiong et al., (2019)). ....	11
Figura 2-10: XRD laponita según El Howayek, (2011); Qi et al., (1996); Xiong et al., (2019). ....	12
Figura 2-11: Análisis termogravimétrico (El Howayek, (2011), Guimarães et al., (2007)). ....	13
Figura 2-12: (I) Dimensiones de una celda de laponita en el plano b-c, (II) Dimensiones de una celda laponita en el plano b-a. (Figura obtenida en software VESTA). ....	14
Figura 2-13: Superficie específica versus número de zonas inaccesibles entre capas (Meunier, (2005)). ....	15
Figura 2-14: Límites de Atterberg disponibles en la bibliografía en la carta de plasticidad. ....	16
Figura 2-15: Distribución de tamaño de partículas en dispersión de 0.2% concentración de laponita en agua (Xiong et al., (2019)). ....	17
Figura 2-16: (a) Resultados edométricos de muestras saturadas y no saturadas con humedad relativa de 11% y 98%, (b) Índice de compresión ( $C_c$ ) y de hinchamiento ( $C_s$ ) de distinta humedad relativa (Al-Mukhtar et al., (1999)). ....	18
Figura 2-17: Curvas edométricas de la laponita y hectorita de acuerdo al trabajo de Al-Mukhtar et al., (1999) (a) Índice de vacío y esfuerzo vertical con una humedad relativa al 98%, (b) Índice de vacío y esfuerzo vertical con una humedad relativa al 32%.....	18
Figura 2-18: Desarrollo del hinchamiento cristalino interno de montmorillonita sódica de acuerdo al número de moléculas de agua (en negro ión de intercambio y en blanco las moléculas de agua) (Madsen & Müller-Vonmoos, (1989)). ....	19
Figura 2-19: (a) Interacción entre la molécula de agua con la estructura TOT y (b) Interacción de la molécula de agua con el catión de intercambio. ....	20
Figura 2-20: (a) Dos partículas de arcillas cargadas negativamente con una nube de iones con $C_1$ concentración de cationes y $C_2$ concentración de aniones (Madsen & Müller-Vonmoos, (1989)); (b) Superficie potencial en dos partículas paralelas de arcilla (Sridharan & Jayadeva, (1982)). ....	21
Figura 2-21: (a) Concentración de iones en relación a la distancia (Santamarina et al., (2001)); (b) Superficie potencial versus la distancia (Santamarina et al., (2001)). ....	21

Figura 2-22: Diferentes escenarios de las partículas de arcilla (Shang et al., (2018)).	22
Figura 2-23: Esquema del modelo numérico (Shang et al., (2018)).	23
Figura 2-24: Evolución temporal de deformación angular producto de un esfuerzo de corte (Fuente et al., (2010)).	23
Figura 2-25: Curvas de consistencia de cuatro tipos de fluido.	24
Figura 2-26: Respuesta dinámica del esfuerzo de corte y deformación durante pruebas oscilatorias (El Howayek, (2011)).	25
Figura 2-27: (a) Influencia del pH en la capacidad de intercambio catiónico de laponita XLG (Thompson & Butterworth, (1992)); (b) Módulo de almacenamiento versus frecuencia angular con un 2% de concentración de laponita (Mourchid et al., (1995)); (c) Módulo de almacenamiento $G'$ versus tiempo a diferentes temperaturas (Ramsay, (1986)) y (d) Módulo de almacenamiento versus el tiempo a distintas concentraciones de laponita (Ramsay, (1986)).	26
Figura 2-28: Diagrama de fases laponita (Tanaka et al., (2004)).	28
Figura 2-29: (a) Vidrio repulsivo “ <i>Wigner</i> ”, (b) Vidrio atractivo y (c) Gel atractivo “ <i>House of cards</i> ” (Tanaka et al., (2004)).	28
Figura 2-30: Factor de forma versus vector de dispersión para un gel y un vidrio (Tanaka et al., (2004)).	29
Figura 2-31: (a) Reómetro Anton Paar Physica MCR 301 y (b) Sistema placa – placa, diámetro 50 mm, con un ángulo de cono 1° y una truncación de 46 $\mu\text{m}$ (El Howayek, (2011)).	29
Figura 2-32: Curva de flujo para suspensión de 3% de laponita (a) 15 min y (b) 6 horas de envejecimiento (El Howayek, (2011)).	30
Figura 2-33: Viscosidad aparente versus tiempo para suspensión de laponita a un 3%, a 23°C, 0.1 a 1 Hertz Y. Huang & Wang, (2016) y curva de El Howayek, (2011).	30
Figura 2-34: Viscosidad versus tiempo de envejecimiento para concentraciones de 2.75%, 3% y 3.25% de suspensiones de laponita (El Howayek, (2011)).	31
Figura 2-35: Viscosidad versus tiempo de envejecimiento de suspensión de laponita testado a 25°C y a 35°C (El Howayek, (2011)).	31
Figura 2-36: Viscosidad versus tiempo de envejecimiento para una suspensión al 3% con diferentes concentraciones de NaCl (El Howayek, (2011)).	32
Figura 2-37: Ejemplo de curva de viscosidad versus tiempo de envejecimiento para suspensión de laponita con 5% RD 4% RDS (Shen, (2014)).	33
Figura 2-38: (a) Viscosidad en el tiempo para suspensiones con distintas combinaciones de concentraciones de RD Y RDS; (b) Viscosidad en el tiempo para suspensiones con distintas combinaciones de concentraciones de RD Y SPP (Shen, (2014)). En el cuadro rojo se indica la concentración ideal para cada aditivo.	33
Figura 2-39: Módulo cruzado versus tiempo de envejecimiento para 3% y 3.25% de suspensión de laponita (El Howayek, (2011)).	34
Figura 2-40: Módulos $G'$ y $G''$ para 3% de suspensión a distintos tiempos de envejecimiento (a) 1 hora, (b) 2 horas, (c) 4 horas y (d) 12 horas de haber sido mezclado (El Howayek, (2011)).	35
Figura 2-41: Módulos $G'$ y $G''$ versus la deformación de corte desde las 2 horas hasta 12 días, para suspensión de laponita al 3% (El Howayek, (2011)).	35
Figura 2-42: Módulo cruzado versus deformación de corte para una suspensión al 3% a diferentes presiones (El Howayek, (2011)).	36
Figura 2-43: (a) Recuperación del esfuerzo después de 3 días; (b) Recuperación del esfuerzo después de 12 días, (El Howayek, (2011)).	36

Figura 2-44: Tixotropía medida a través de ensayo de veleta (Wallace & Rutheford, (2015)).	37
Figura 2-45: Corte no drenado versus la rotación de la veleta 4%, 4.25% y 4.5% (Wallace & Rutheford, (2015)).	38
Figura 2-46: $S_{u,peak,MV}$ medido 7 días después de la hidratación versus índice de vacío (Wallace & Rutheford, (2015)).	39
Figura 2-47: Efecto del tiempo de demora en la resistencia del corte no drenado para una mezcla de 4.5%, luego de 7 días de consolidación de peso propio (Wallace & Rutheford, (2015)).	40
Figura 2-48: Curva $e - \sigma_v'$ para muestras de 4%, 4.25% y 4.5% (Wallace & Rutheford, (2015)).	40
Figura 2-49: $c_v$ versus esfuerzo efectivo montmorillonita sódica (Amarasinghe et al., (2011)).	41
Figura 2-50: $e$ versus $k$ para permeámetro de pared rígida para 4%, 4.25% y 4.5% (Wallace & Rutheford, (2015)).	42
Figura 2-51: Permeabilidad de minerales de sodio en agua (Mesri & Olson, (1971); Wallace & Rutheford, (2015)).	43
Figura 2-52: Esquemización de la microestructura de DM en compuestos de arena con laponita (a) antes de humectar la muestra y (b) con el agua desionizada (El Howayek, (2011)).	44
Figura 2-53: Esquemización de la microestructura de arena permeada (a) antes y (b) después de la permeación (El Howayek, (2011)).	44
Figura 2-54: (a) Conductividad hidráulica versus tiempo de envejecimiento para muestras <i>dry mix</i> y permeada (El Howayek, (2011)); (b) Conductividad hidráulica medida en la misma muestra en 5 oportunidades (El Howayek, (2011)).	45
Figura 2-55: (a) Resultados de la resistencia cíclica (CSR) versus el número de ciclos en que se logra la licuación para distintos estudios con laponita, ST: Sin tratamiento, CT: Con tratamiento (Rodríguez, (2019)); (b) CSR versus número de ciclos en que se logra la licuación (Y. Huang & Wang, (2016)).	46
Figura 2-56: (a) Comparación de Termograma de pérdida de masa del fluido de perforación con y sin laponita con el aumento de la temperatura (b) Influencia en la viscosidad del fluido de perforación al adicionar laponita (Huang et al., (2019)).	48
Figura 3-1: Equipos utilizadas en el proceso de tamizaje (a) Agitador con tamices, (b) Compresor de aire.	49
Figura 3-2: (a) Horno de secado al vacío, (b) Balanza de precisión y analítica.	50
Figura 3-3: Esquema de funcionamiento del equipo de FTIR para la identificación de un material.	50
Figura 3-4: Esquemización de la medición en modo ATR.	51
Figura 3-5: Equipo para medición de FTIR.	51
Figura 3-6: Equipo análisis termogravimétrico.	52
Figura 3-7: Difracción de rayos x en polvo, (a) haz de rayos x que incide sobre un polvo, (b) intensidades y posiciones de los haces difractados se registran en un círculo, (c) Patrón de difracción de una sustancia.	53
Figura 3-8: Esquema de un microscopio electrónico de barrido equipado con sistemas de detección de electrones y de rayos X.	54
Figura 3-9: Fotografía del equipo SEM.	55
Figura 3-10: Esquema de proceso de adsorción (azul) y desorción (rojo) de $N_2$ .	56
Figura 3-11: Fotografía de muestras cubiertas con papel aluminio.	58

Figura 3-12: Muestras de laponita guardadas en desecadora con humedad controlada.	59
Figura 3-13: Muestra de laponita en el equipo termogravimétrico.	60
Figura 5-1: Curva granulométrica de cinco muestras de laponita RD.	67
Figura 5-2: (a) Humedad promedio en laponita fina LF, mediana LM, gruesa LG y bruta LB; (b) Humedad promedio de todos los especímenes de marcando las tasas de decrecimiento de humedad de todos los especímenes.	68
Figura 5-3: Absorbancia versus número de onda (FTIR) para los especímenes de laponita fina LF, mediana LM, gruesa LG y bruta LB.	69
Figura 5-4: (a) Pérdidas de masa promedios versus temperatura en laponita fina LF, mediana LM, gruesa LG y bruta LB; (b) Pérdidas de masa promedios versus tiempo en laponita fina LF, mediana LM, gruesa LG y bruta LB.	70
Figura 5-5: (a) Ángulo de difracción $2\theta$ versus intensidad (XRD) de laponita bruta LB natural y seca; (b) Ángulo de difracción $2\theta$ versus intensidad (XRD) de laponita LF, LM, LG y LB con humedad natural.	72
Figura 5-6: Laponita bruta LB (a) mag x70, (b) mag x400, (c) mag x1500 y (d) mag x2400.	73
Figura 5-7: Laponita fina LF (a) mag x70, (b) mag x400, (c) mag x800 y (d) mag x2400. En rojo se observan las partículas más pequeñas perceptibles con el microscopio.	74
Figura 5-8: Laponita media LM (a) mag x70, (b) mag x400, (c) mag x800 y (d) mag x2400. En rojos se aprecian las partículas finas en la superficie de partículas de mayor tamaño.	75
Figura 5-9: Laponita grande LG (a) mag x70, (b) mag x400, (c) mag x800 y (d) mag x1500. Las flechas rojas señalan las partículas finas que quedan sobre la superficie de las partículas de mayor tamaño.	76
Figura 5-10: Relación de concentraciones entre los elementos (a) Si – O, (b) Si – Na, (c) Na – O, (d) Mg – O, (e) Si – Mg, (f) Si – Al y (g) Mg – Al medido en la laponita en los especímenes LF, LM, LG y LB.	78
Figura 5-11: (a) Regresión lineal, para la obtención parámetros BET, (b) Proceso de adsorción/desorción de nitrógeno $N_2$ .	79
Figura 5-12: Curvas de variación del volumen de acuerdo al tamaño de poro en los procesos de (a) desorción de $N_2$ , (b) adsorción de $N_2$ para la determinación del radio de poro promedio.	79
Figura 6-1: Granulometría laponita RD del capítulo 5 con otras disponibles de ensayos de laboratorio.	80
Figura 6-2: Granulometrías en los especímenes (a) Arena limpia, (b) DM1%, (c) DM1.64% y (d) DM3%.	81
Figura 6-3: Límite de líquido versus número de golpes.	82
Figura 6-4: Ángulo en reposo promedio para los diferentes especímenes.	82
Figura 6-5: (a) Índices máximos y mínimos de laponita RD y arena limpia, (b) Índice de vacío máximo y mínimo de la arena limpia.	84
Figura 6-6: (a) Deformación de hinchamiento versus tiempo, hinchamiento libre laponita RD, (b) Deformación de hinchamiento versus tiempo, hinchamiento libre laponita RD en escala logarítmica.	85
Figura 6-7: (a) Deformación de hinchamiento versus tiempo (observación) de laponita RD, (b) Deformación de hinchamiento versus tiempo en escala logarítmica (observación) de laponita RD.	86
Figura 6-8: Presión de hinchamiento laponita RD versus tiempo.	86



Figura 6-9: (a) Compresión carga , (b) Compresión descarga, (c) Índice de vacío versus esfuerzo efectivo vertical (escala logarítmica), (d) Índice de vacío versus esfuerzo efectivo vertical (lineal), (e) Índice de vacío normalizado versus esfuerzo efectivo vertical (escala logarítmica) y (f) Índice de vacío normalizado versus esfuerzo efectivo vertical (lineal), laponita RD (1 hora).....	88
Figura 6-10: (a) Escenario completo de cargas y descargas, (b) Primera compresión carga/descarga, (c) Segunda compresión carga/descarga, (d) Índice de vacío versus esfuerzo efectivo vertical (escala logarítmica), (e) Índice de vacío versus esfuerzo efectivo vertical (lineal), (f) Índice de vacío normalizado versus esfuerzo efectivo vertical (escala logarítmica) y (g) Índice de vacío normalizado versus esfuerzo efectivo vertical (lineal), laponita RD (12 horas).....	90
Figura 6-11: (a) Escenario completo de cargas y descargas, (b) Primera compresión carga/descarga, (c) Segunda compresión carga/descarga, (d) Índice de vacío versus esfuerzo efectivo vertical (escala logarítmica), (e) Índice de vacío versus esfuerzo efectivo vertical (lineal), (f) Índice de vacío normalizado versus esfuerzo efectivo vertical (escala logarítmica) y (g) Índice de vacío normalizado versus esfuerzo efectivo vertical (lineal), arena limpia de Ottawa (6 horas).....	92
Figura 6-12: (a) Primera compresión carga/descarga , (b) Segunda compresión carga/descarga, (c) Índice de vacío versus esfuerzo efectivo vertical (escala logarítmica), (d) Índice de vacío versus esfuerzo efectivo vertical (lineal), (e) Índice de vacío normalizado versus esfuerzo efectivo vertical (escala logarítmica) y (f) Índice de vacío normalizado versus esfuerzo efectivo vertical (lineal), DM 1% (6 horas)-.....	93
Figura 6-13: (a) Índice de vacío versus tiempo, (b) índice de vacío normalizado versus tiempo, (c) Esfuerzo de corte $\tau$ versus deformación horizontal $\delta H$ y (d) Deformación vertical $\delta v$ versus deformación horizontal $\delta H$ ; muestras de laponita comprimidas durante 1 hora a 50, 100, 200 y 300 kPa. ....	95
Figura 6-14: Parámetros de resistencia al corte de laponita RD con 1 hora de compresión. ....	95
Figura 6-15: (a) Índice de vacío versus tiempo, (b) índice de vacío normalizado versus tiempo, (c) Esfuerzo de corte $\tau$ versus deformación horizontal $\delta H$ y (d) Parámetros de resistencia al corte de laponita RD; comprimidas durante 24 horas a 100, 200 y 300 kPa. ....	97
Figura 6-16: (a) Índice de vacío versus tiempo, (b) índice de vacío normalizado versus tiempo, (c) Esfuerzo de corte $\tau$ versus deformación horizontal $\delta H$ y (d) Deformación vertical $\delta v$ versus deformación horizontal $\delta H$ ; muestras de arena limpia comprimidas durante 1 hora a 50, 100, 200 y 300 kPa. ....	98
Figura 6-17: Parámetros de resistencia al corte de arena limpia con 1 hora de compresión. ....	99
Figura 6-18: (a) Índice de vacío versus tiempo, (b) índice de vacío normalizado versus tiempo, (c) Esfuerzo de corte $\tau$ versus deformación horizontal $\delta H$ y (d) Deformación vertical $\delta v$ versus deformación horizontal $\delta H$ ; muestras de arena DM1%consolidadas durante 1 hora a 50, 100, 200 y 300 kPa. ....	100
Figura 6-19: Parámetros de resistencia al corte de DM1% con 1 hora de compresión. ....	101
Figura 6-20: Imágenes obtenidas del SEM de (a) Arena limpia (x200), (b) Arena limpia (x20.000).....	102
Figura 6-21: Imágenes obtenidas del SEM de (a) DM1% (x200), (b) DM1% (x20.000).....	102

Figura 6-22: Imágenes obtenidas del SEM de (a) DM3% (x200), (b) DM3% (x20.000)	103
Figura 7-1: (a) Comparación de absorbancia versus número de onda de laponita de diferentes autores, (b) Comparación de intensidad versus ángulo de difracción $2\theta$ de diferentes autores.	104
Figura 7-2: Comparación de temperatura versus pérdida de masa de laponita de diferentes autores.	105
Figura 7-3: (a) Comparación de hinchamiento libre de pruebas edométricas versus observaciones (b) Hinchamiento libre de la bentonita (X. Li et al., (2019); X. Y. Li & Xu, (2019); Kolay & Ramesh, (2016), C. El Mohtar, (2008)) en comparación con el hinchamiento libre de laponita medido en edómetro y observaciones.	107
Figura 7-4: Gráfico presión vertical versus índice de vacíos para una bentonita alemana con datos empíricos y experimentales (Tripathy & Schanz, (2007)).	109
Figura 7-5: Datos de consolidación de Wallace & Rutheford, (2015) y calculados de forma teórica.	110
Figura 7-6: Proceso físico detrás del método de cálculo de Komine & Ogata, (1996).	111
Figura 7-7: Presión de hinchamiento de la bentonita Komine & Ogata, (1996).	111
Figura 7-8: (a) Cálculo de presión de hinchamiento para las muestras de laponita realizadas en este estudio, (b) Cálculo de presión de hinchamiento a diferentes concentraciones de iones para las muestras realizadas en este estudio.	112
Figura 7-9: Conductividad hidráulica de la montmorillonita y la laponita Mesri & Olson, (1971); Wallace & Rutheford, (2015).	113
Figura 7-10: Distribución de velocidad de un lodo o suspensión de arcilla Vallejo & Scovazzo, (2003).	113
Figura 7-11: (a) Viscosidad versus diferentes concentraciones a 10 minutos, 100 minutos y 200 minutos (El Howayek, (2011)); (b) Esfuerzo al corte no drenado versus diferentes concentraciones a 7 y 14 días (Wallace & Rutheford, (2015)).	115
Figura 7-12: Perfil del dispositivo o permeámetro creado en este trabajo.	116
Figura 7-13: (a) Comparación de curva granulométricas de este estudio; (b) Comparación de curva granulométricas mezcla seca.	116
Figura 7-14: (a) Laponita atrapada por fracción, (b) Relación coeficiente de curvatura $C_c$ y porcentaje de laponita en especímenes <i>Dry Mix</i> .	117
Figura 7-15: Comparación entre curva granulométrica obtenidas en este trabajo versus Xiong et al., (2019).	117
Figura 7-16: (a) Variación teórica del ángulo de fricción interna con distinto contenido de finos versus índice de vacíos; (b) Contribución del tamaño de partícula, (c) Variación teórica de $e_{max}$ y $e_{min}$ para la bentonita; Kim et al., (2018).	119
Figura 7-17: Variación teórica de $e_{max}$ y $e_{min}$ para la bentonita Kim et al., (2018).	120
Figura 7-18: (a) Comparación entre Laponita RD distintos tiempos de consolidación; (b) Comparación entre arenas con y sin Laponita RD.	120
Figura 7-19: (a) Comparación entre Laponita RD distintos tiempos de consolidación normalizado; (b) Comparación entre arenas con y sin Laponita RD normalizado.	121
Figura 7-20: Valor del ángulo de fricción interna $\phi$ para todos los especímenes.	122
Figura 10-1: Humedad laponita fina LF.	C
Figura 10-2: Humedad laponita mediana LM.	D
Figura 10-3: Humedad laponita grande LG.	D
Figura 10-4: Humedad laponita bruta LB.	E
Figura 10-5: FTIR laponita fina, LF.	E

Figura 10-6: FTIR laponita mediana, LM.....	F
Figura 10-7: FTIR laponita gruesa, LG.....	F
Figura 10-8: FTIR laponita gruesa, LG.....	G
Figura 10-9: Pérdida de masa versus temperatura en laponita fina LF. ....	G
Figura 10-10: Pérdida de masa versus temperatura en laponita mediana LM.....	H
Figura 10-11: Pérdida de masa versus temperatura en laponita grande LG.....	H
Figura 10-12: Pérdida de masa versus temperatura en laponita bruta LB. ....	I
Figura 10-13: Pérdida de masa versus tiempo en laponita fina LF. ....	I
Figura 10-14: Pérdida de masa versus tiempo en laponita mediana LM. ....	J
Figura 10-15: Pérdida de masa versus tiempo en laponita grande LG. ....	J
Figura 10-16: Pérdida de masa versus tiempo en laponita bruta LB. ....	K
Figura 10-17: Primera derivada versus temperatura en laponita fina LF. ....	K
Figura 10-18: Primera derivada versus temperatura en laponita mediana LM.....	L
Figura 10-19: Primera derivada versus temperatura en laponita grande LG. ....	L
Figura 10-20: Primera derivada versus temperatura en laponita bruta LB.....	M
Figura 10-21: Primera derivada versus tiempo en laponita fina LF.....	M
Figura 10-22: Primera derivada versus tiempo en laponita media LM. ....	N
Figura 10-23: Primera derivada versus tiempo en laponita gruesa LG. ....	N
Figura 10-24: Primera derivada versus tiempo en laponita bruta LB. ....	O
Figura 10-25: Promedio primera derivada versus tiempo en laponita fina LF, laponita mediana LM, laponita gruesa LG y laponita bruta LB. ....	O
Figura 10-26: Promedio primera derivada versus temperatura en laponita fina LF, laponita mediana LM, laponita gruesa LG y laponita bruta LB. ....	P
Figura 10-27: Partes del dispositivo permeámetro. ....	R
Figura 10-28: Perfil del “ <i>Bushing</i> ”.....	R
Figura 10-29: “ <i>Bushing</i> ” en planta y en elevación. ....	S
Figura 10-30: Molde en planta. ....	S
Figura 10-31: Molde en elevación en 3D.....	T
Figura 10-32: Dimensiones del molde.....	T
Figura 10-33: Base de <i>plexiglass</i> superior/inferior vista en planta.....	U
Figura 10-34: Base de <i>plexiglass</i> superior/inferior vista en elevación.....	U

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación

La laponita es una nano-arcilla artificial. Es ocupada principalmente como un modificador reológico en sistemas acuosos (BYK Additives & Instruments, (2014)). Esta propiedad es aprovechada en la manufactura de cosméticos, productos químicos e industriales. En este Trabajo de Título se presenta una revisión bibliográfica exhaustiva de las propiedades de laponita reportadas por otros autores, como también, un programa experimental de caracterización físico – química y un procesamiento de datos en relación con laboratorio de ensayos geotécnicos.

En la actualidad se conocen diversas aplicaciones de las arcillas en ingeniería civil, como por ejemplo la bentonita. La bentonita es una arcilla natural que se utiliza en diversas técnicas constructivas; como excavaciones, contención de muros y en obras tales como túneles, presas de relaves, taludes, etc. Con esta arcilla, también se han desarrollado técnicas de mejoramiento de suelo; como el *jet grouting* y técnicas relacionadas al fenómeno de licuefacción de suelos granulares (C. S. El Mohtar, (2008)). Si bien la tecnología de la bentonita cubre un amplio espectro, también tiene limitaciones en cuanto a su activación reológica. Son estas limitaciones las que presentan una oportunidad para la laponita, un material sintético y puro (El Howayek, (2011)).

Si bien la bentonita es la principal inspiración en cuanto a sus aplicaciones en ingeniería, las bondades de la laponita permiten indagar en muchísimas más aplicaciones. Un ejemplo de esto es que se utiliza laponita para realizar modelos a escala, simulando arcillas muy blandas submarinas para la extracción de petróleo o gas. Otra aplicación experimental es el estudio de las deformaciones producto de fundaciones superficiales o profundas, es decir, el estudio de las deformaciones en el suelo producto de la interacción suelo – estructura (Iskander, (2018)). También se ha estudiado que las características químicas de la laponita permiten mejorar las propiedades del cemento y los fluidos de perforación en excavaciones.

El campo de aplicación de este material puede ser aún más ambicioso de lo ya expuesto ya que es una nanotecnología en vías de desarrollo. No es posible determinar el desempeño de este material y sus limitaciones si no se conoce de forma profunda su comportamiento físico, químico y geotécnico. El ampliar los conocimientos sobre este material puede traer beneficios no sólo en la investigación, sino que también en las diversas ramas de la ingeniería civil y en la industria.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivos generales**

1. Realizar una revisión bibliográfica completa de las propiedades físicas, químicas y geotécnicas de la laponita en polvo y suspensiones de laponita. Además de investigar sus potenciales usos en la ingeniería civil.
2. Estudiar las características físico, química y geotécnicas de la laponita RD y correlacionar esta información con su comportamiento macroscópico.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

1. Revisión bibliográfica completa de todas las propiedades y aplicaciones que se han hecho hasta la fecha sobre la laponita en el rubro de la ingeniería civil. Definir el estado del arte hasta la fecha de este material.
2. Realizar la caracterización física – química de la laponita a través de ensayos en laboratorio, para conocer la estructura molecular, composición química, superficie específica, contenido de humedad y morfología por tamaño de partícula.
3. Procesamiento de datos de laboratorio de diferentes ensayos geotécnicos sobre la laponita y sobre arena de Ottawa mezclada con laponita a 1% en masa de arena.
4. Correlacionar y analizar el comportamiento de las partículas de laponita con el comportamiento macroscópico en diferentes condiciones de humedad, mezcla con otro suelo, solución, sobrecarga, etc.

## **1.3 Metodología**

La metodología de este trabajo es dual, existe una revisión bibliográfica exhaustiva de la laponita y un programa en relación con actividades experimentales de laboratorio.

### **1.3.1 Revisión Bibliográfica**

Revisión de estudios reportados en la laponita, de caracterización físico - química, propiedades reológicas, propiedades geotécnicas del gel y aplicaciones en la ingeniería civil.

### 1.3.2 Caracterización físico – química de la laponita

A continuación, se presenta el plan experimental de la caracterización físico – química:

- Humedad
- Espectroscopía de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR)
- Análisis termogravimétrico (TGA)
- Difracción de rayos X (XRD)
- Microscopio electrónico de barrido (SEM)
- Medición de superficie específica a través de la técnica BET<sup>1</sup>

### 1.3.3 Caracterización geotécnica en muestras de laponita, arena limpia y mezclada en seco (*dry mix*)

- Granulometría en laponita y *dry mix*
- Ángulo en reposo en laponita, *dry mix* y arena limpia
- $e_{max}$ ,  $e_{min}$  en laponita y *dry mix*
- Hinchamiento en la laponita
- Compresión en laponita y *dry mix*
- Corte directo en laponita y *dry mix*
- Límites de Atterberg en laponita
- Microscopía en laponita, *dry mix* y arena limpia

## 1.4 Organización de la tesis

Este Trabajo de Título está organizado en diez capítulos:

- Capítulo 1: Describe la motivación, los objetivos y la distribución de este Trabajo de Título.
- Capítulo 2: Presenta una completa revisión bibliográfica, del estado del arte de la laponita RD.
- Capítulo 3: Define el programa experimental de la caracterización físico -química, se presentan los materiales, los equipos y las metodologías de laboratorio.
- Capítulo 4: Define el programa experimental de la caracterización geotécnica, se presentan los materiales, los equipos y las metodologías de laboratorio.
- Capítulo 5: Reporta los resultados de los ensayos del programa experimental físico – químico.

---

<sup>1</sup> Brunauer–Emmett–Teller

- Capítulo 6: Reporta los resultados del procesamiento de datos de los ensayos del programa geotécnico.
- Capítulo 7: Discute y se analiza los resultados obtenidos tanto en el Capítulo 5 como el Capítulo 6 en conjunto con la revisión bibliográfica Capítulo 2.
- Capítulo 8: Presenta las principales conclusiones de los resultados obtenidos además de entregar recomendaciones o nuevas propuestas de estudio.
- Capítulo 9: Presenta la bibliografía consultada para la realización de este Trabajo de Título.
- Capítulo 10: Presenta los gráficos y tablas anexos más al detalle de los estudios.

## CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Introducción a la laponita

#### 2.1.1 ¿Qué es la laponita?

La laponita es una arcilla artificial, y su producción está basada en la hectorita, que es una arcilla natural del grupo de las esmectitas. La laponita es insoluble en agua, y al hidratarse se hincha hasta 400% de su tamaño (BYK Additives & Instruments, (2013)).

Como se observa en la Figura 2-1, la partícula de laponita posee forma de disco, con 25 nm de diámetro y 0.92 nm de alto. En condiciones normales, es decir a 25°C y a presión atmosférica, la laponita se encuentra en pequeños conglomerados de partículas de laponita.

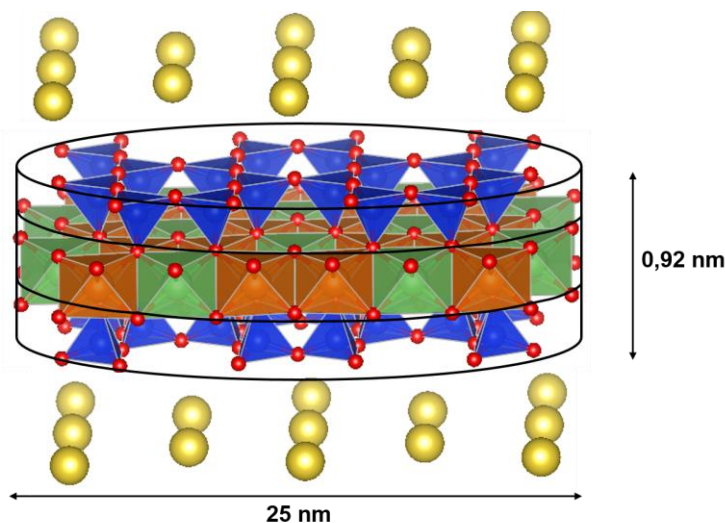


Figura 2-1: Forma, dimensiones y estructura de una partícula de laponita (Figura obtenida con software VESTA).

#### 2.1.2 Usos de la laponita

La laponita forma dispersiones coloidales incoloras, que pueden modificar reológicamente sustancias químicas. Desde concentraciones del 2% en masa de agua, produce geles altamente tixotrópicos (BYK Additives & Instruments, (2013)).

La laponita se usa como aditivo en productos de cuidado personal, papeles y polímeros, recubrimientos superficiales, productos de construcción y productos de limpieza. Otras áreas de aplicación consideran agricultura y horticultura, cerámicas, esmaltes, explotación de gas y petróleo (BYK Additives & Instruments, (2014)).



### 2.1.3 Grados de laponita

Como se reporta en la Tabla 2-1, la laponita se fabrica con diferentes grados de dispersión, lo que le otorga su alta versatilidad. El grado de laponita determina las propiedades reológicas de la mezcla. Se define “Gel” cuando la dispersión coloidal es de alta viscosidad y “Sol” cuando es de baja viscosidad. Los productos más usados son: Laponita RD / RDS, Laponita XLS / XLG, Laponita D / DF / DS y Laponita S / JS. En este estudio se trabajó con Laponita RD.

Tabla 2-1: Grados de Laponita (BYK Additives & Instruments, (2014)).

Grado de Laponita	Tipo de gel	Características
RD	Formación de gel	Uso general
RDS	Formación de gel temporal	Uso general
S482	Formación de gel permanente	Muy alto grado de estabilidad de sol.
SL25	Formación de gel permanente	Modificación orgánica para un rendimiento extra en sistemas “difíciles”.
EP	Formación de gel	Modificación orgánica para un rendimiento extra en sistemas “difíciles”.
SJ	Formación de gel temporal	Alto grado de estabilidad de sol.
XLG	Formación de gel	Alta pureza, bajo contenido de metales pesados bajos y bajo contenido microbiológico.
XLS	Formación de gel temporal	Alta pureza, bajo contenido de metales pesados bajos y bajo contenido microbiológico.
XL21	Formación de gel	Alta pureza, bajo contenido de metales pesados bajos y bajo contenido microbiológico.
D	Formación de gel	Optimizado para una rápida dispersión en solución de sorbitol.

### 2.1.4 Composición química

Las arcillas son estructuras cristalinas, su unidad fundamental - o celda unitaria - está compuesta por capas. En el caso de la laponita o de las esmectitas en general, estas capas se disponen en una distribución TOT<sup>2</sup> (K. Jlassi et al., (2017)), es decir, en capas de tetraedros de silicio y octaedros de magnesio (Mg) y litio (Li). Cabe mencionar que una partícula de laponita tiene aproximadamente 2000 celdas unitarias (BYK Additives & Instruments, (2014)) (Ver Figura 2-2 (a)).

La fórmula química de las celdas unitarias de laponita es  $\text{Na}_{0.7}^{+0.7} [\text{Si}_8\text{Mg}_{5.5}\text{Li}_{0.3}\text{O}_{20}(\text{OH})_4]^{-0.7}$  y poseen una composición química de SiO<sub>2</sub> (59.5%), MgO (27.5%), Li<sub>2</sub>O (0.8%), Na<sub>2</sub>O (2.8%), y pérdida por ignición de 8.2% (BYK Additives & Instruments, (2013)) En la Figura 2-2 (b) se desglosa los elementos químicos presentes en la laponita.

<sup>2</sup> TOT: tetraedro, octaedro, tetraedro

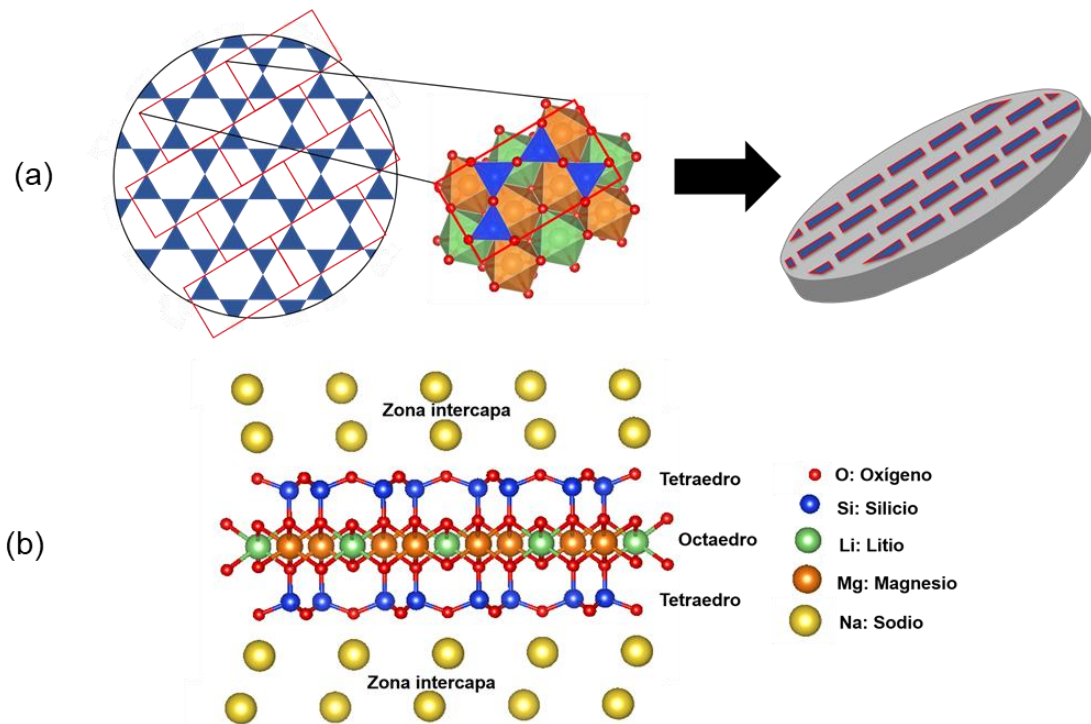


Figura 2-2: (a) Celdas unitarias de laponita dispuesta en un disco de laponita; (b) Elementos químicos de la partícula de laponita.

Dado el equilibrio de cargas eléctricas tanto en la superficie basal como en el manto del disco de laponita, es que la en las bases posee una carga negativa de 50-55 mmol. 100 g<sup>-1</sup> y en los bordes una carga positiva de 4-5 mmol. 100g<sup>-1</sup> (BYK Additives & Instruments, (2014)) (Ver Figura 2-3). Esta diferencia de carga en la superficie de la partícula es lo que caracteriza el comportamiento de las esmectitas al gelificarse.

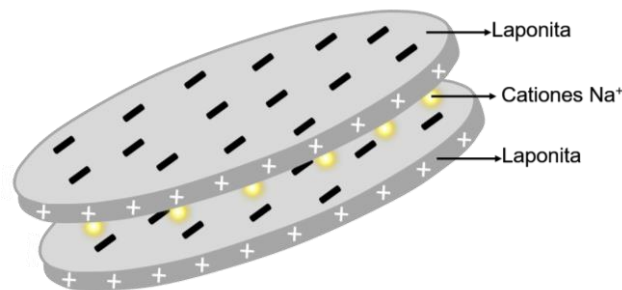


Figura 2-3: Cargas eléctricas presentes en la partícula de laponita.

### 2.1.5 Síntesis de laponita

Diversos autores han reportado sobre de la síntesis de hectorita artificial o laponita por tratamiento hidrotérmico, pero fue Neumann y sus colegas quienes patentaron las técnicas que son utilizadas por la industria hoy en día (Zhou et al., (2010)). El proceso de elaboración de este material define sus propiedades físico, químicas y reológicas. De acuerdo a BYK Additives & Instruments, (2014); Neumann, (1971) la síntesis de laponita requiere los procesos señalados en la Figura 2-4.

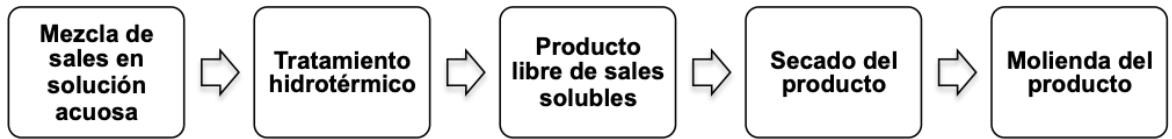


Figura 2-4: Proceso de síntesis de laponita.

### 2.1.5.1 Mezcla de sales en solución acuosa

Se disuelven por separado las sales fluoruro de litio, LiF; cloruro de magnesio,  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ; silicato de sodio,  $Na_2SiO_3$  y carbonato de calcio,  $NaCO_3$  en agua destilada. También pueden utilizarse las sales alternativas indicadas por Neumann, (1971). Las soluciones obtenidas se mezclan de forma secuencial en un nuevo recipiente, siempre con agitación y a temperatura de ebullición, durante 20 horas como mínimo (Ver Figura 2-5).

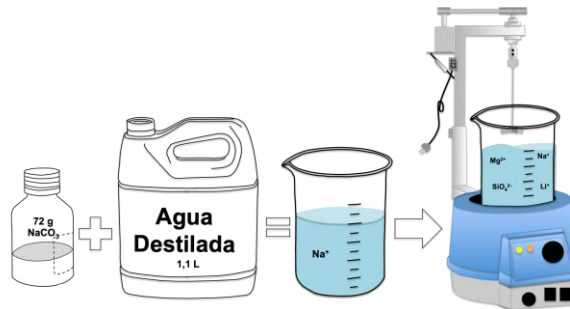


Figura 2-5: Mezcla de sales en solución acuosa con agitación constante y temperatura de ebullición.

La finalidad de esta etapa es que ocurra la precipitación, al unirse los iones  $Mg^{2+}$ ,  $SiO_4^{2-}$ ,  $Na^+$  y  $Li^+$  disgregados. La precipitación consiste en la formación de un sólido a través de un proceso de saturación, dada la mezcla de sales en un medio acuoso. Los iones presentes en la solución se unen por afinidad eléctrica, por lo que el resultado es la cristalización parcial de esos elementos. Para el caso de la laponita, ocurre un precipitado amorfo (BYK Additives & Instruments, (2014)), esto quiere decir, que la velocidad de orientación de los iones es menor en comparación a la velocidad de agregación. La Figura 2-6, presenta un resumen de los procesos involucrados en esta etapa.



Figura 2-6: Resumen de los procesos involucrados al mezclar de sales en solución acuosa.

### 2.1.5.2 Tratamiento hidrotérmico

A la solución obtenida se le realiza un tratamiento hidrotérmico, es decir, se aplican temperaturas entre 125 - 300°C con presiones entre 10 a 50 bares en un autoclave (Theo

et al., (1999), Torii & Iwasaki, (1987)). El periodo de este tratamiento dura entre 10 a 20 horas, o hasta que el sistema alcance el equilibrio, es decir, cuando la masa del producto sólido en la solución se mantenga constante (Neumann, (1971)) (Ver Figura 2-7).

Este proceso tiene como objetivo mejorar la disolución de los componentes más estables del sistema y así hacer reaccionar especies poco solubles. Es en esta etapa que se forman los iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ), los cuales definen el carácter básico de este material.

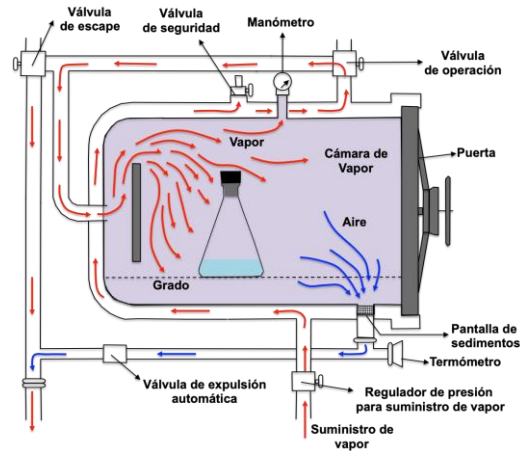


Figura 2-7: Esquema representando el funcionamiento autoclave utilizado para aplicar el tratamiento hidrotérmico.

### 2.1.5.3 Obtener producto libre de sales solubles

Después del tratamiento hidrotérmico, se obtiene el producto sólido (calculado como peso seco libre de sales solubles) en una cantidad de 1 – 8 % en peso. El exceso de sal se elimina mediante lavado repetitivo con agua destilada caliente y centrifugación del sobredrenante, verificando la ausencia de aniones. El producto se filtra en una membrana y se lava pasando agua a través de una torta de filtración (Ver Figura 2-8) (Neumann, (1971)).



Figura 2-8: (a) Esquema del proceso de centrifugado de la suspensión de laponita y (b) Esquema del proceso de filtrado de la suspensión a través de un filtro de torta o *filter cake*.

#### 2.1.5.4 Secado del producto

Después de haber lavado y filtrado el producto, se procede a secarlo en un horno a temperaturas entre 110°C a 250°C (a veces hasta 550°C). Este secado del producto es el que desarrollará las propiedades reológicas características (Neumann, (1971)).

#### 2.1.5.5 Molienda del producto

Finalmente se obtienen los granos secos de laponita, los cuales se muelen hasta obtener un polvo fino blanco. Este proceso se puede realizar con molinos de bola, cuchillo y rodillo, dependiendo del equipo que se utilice será la superficie específica del particulado. Neumann reporta superficies específicas experimentales en un rango de 237 a 550 m<sup>2</sup>/g (Neumann, (1971)).

#### 2.1.6 Propiedades del fabricante

La Tabla 2-2 presenta las propiedades del fabricante Byk Additives & Instruments de la laponita RD.

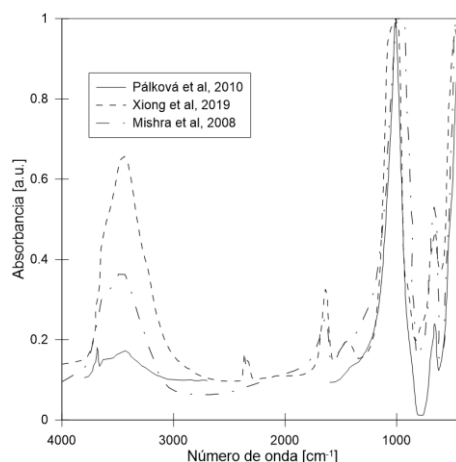
Tabla 2-2: Propiedades de laponita RD informada por el fabricante (BYK Additives & Instruments, (2013)).

Densidad bruta [kg/m <sup>3</sup> ]	1000
Superficie específica [m <sup>2</sup> /g]	370
Superficie específica teórica [m <sup>2</sup> /g]	900
pH (2% suspensión)	9.8
Esfuerzo gel [g min] QA Test Code: ELP-L-1H	22
Análisis de tamaño QA Test Code: ELP-L-6A	2% max > 250 micrones
Humedad [%] QA Test Code: ELP-L-5A	10
Gravedad específica, G <sub>s</sub> [-]	2.53 – 2.57

## 2.2 Caracterización físico-química y geotécnica de laponita

### 2.2.1 Espectroscopía de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR)

La Figura 2-9 presenta varios espectros FTIR reportados por distintos autores para laponita RD de la absorbancia en función del número de onda. En estos estudios no se especifica si las muestras han sido secadas previamente o no.



**Figura 2-9: Espectro de infrarrojos de laponita obtenidos por varios autores (Mishra et al., (2008); Pálková et al., (2010); Xiong et al., (2019)).**

La Tabla 2-3 presenta las asignaciones de enlaces a los *peaks*, de acuerdo con el número de onda y el tipo de vibración de los enlaces reportados por los autores consultados.

**Tabla 2-3: Asignación de *peak* a enlace según la literatura Grill, (2009), Mishra et al., (2008)<sup>°</sup>, Pálková et al., (2010)<sup>°</sup> y Xiong et al., (2019).<sup>#</sup>**

N° de onda [cm <sup>-1</sup> ]	Tipo vibración	Asignación
3684 <sup>*</sup>	Estiramiento ( $\nu$ )	Mg <sub>3</sub> OH
3706 <sup>*</sup>	Estiramiento ( $\nu$ )	Mg <sub>2</sub> LiOH
3450 <sup>*</sup> 3458 <sup>°</sup> 3443 <sup>#</sup>	Estiramiento ( $\nu$ )	O - H
1013 <sup>*</sup> 1009 <sup>°</sup> 1000 <sup>#</sup>	Estiramiento ( $\nu$ )	Si - O
1646 <sup>°</sup> 1635 <sup>#</sup>	Flexión ( $\delta$ )	O - H
661 <sup>*</sup> 652 <sup>#</sup>	Flexión ( $\delta$ )	Mg <sub>3</sub> OH Mg <sub>3</sub> LiOH
466 <sup>*</sup> 450 <sup>*</sup> 450 <sup>°</sup> 460 <sup>#</sup>	-	Si - O - Mg Si - O - Si

## 2.2.2 Difracción de rayos X (XRD)

La Figura 2-10 presenta tres difractogramas de rayos X, obtenidos por los autores Qi et al., (1996), El Howayek, (2011) y Xiong et al., (2019). Se presenta la intensidad de la radiación difractada en función del ángulo de difracción ( $2\theta$ ). Los resultados reportados por El Howayek, (2011) fueron obtenidos a través de un difractómetro usando una fuente de rayos X de cobalto, en los resultados de Qi et al., (1996) no se reporta el tipo de fuente usada y Xiong et al., (2019) usó una fuente de cobre Cu K $\alpha$ .

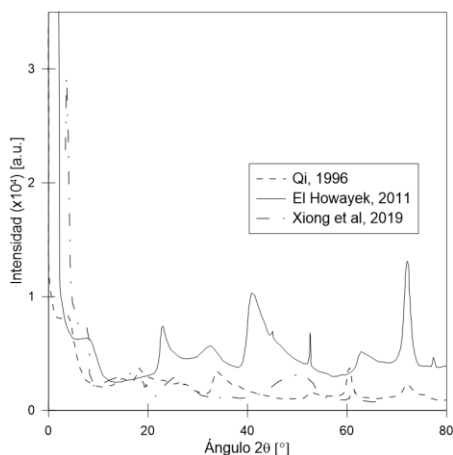


Figura 2-10: XRD laponita según El Howayek, (2011); Qi et al., (1996); Xiong et al., (2019).

En las Tabla 2-4 y Tabla 2-5, se presenta la asignación de plano cristalino de los trabajos de Qi et al., (1996); Xiong et al., (2019). Las asignaciones de la Tabla 2-5, correspondieron a la reflexión común del mineral de un silicato en capas 2:1, en particular la reflexión 060, es característica para identificar a una esmectita. La laponita no tiene reflejos aparentes de impurezas, por lo que Xiong et al., (2019) concluyó que la laponita tiene una baja cristalinidad pero una pureza muy alta.

Tabla 2-4: Asignación de plano cristalino según Qi et al., (1996).

2θ [°]	Índice de Miller
6	(001)
19,5	(02,11)
28,2	005
61	(060)

Tabla 2-5: Asignación de plano cristalino según Xiong et al., (2019).

2θ [°]	Índice de Miller
7.37	001
19,64	110
34.75	200
61.08	060

### 2.2.3 Análisis termogravimétrico (TGA)

La Figura 2-11 presenta los resultados de TGA obtenidos por El Howayek, (2011) y de Guimarães et al., (2007). Cabe mencionar que éstos se realizaron desde 25°C a 1000°C, el primero con una tasa de incremento de temperatura de 20°C min<sup>-1</sup> y el segundo con una tasa de incremento de 10°C min<sup>-1</sup>.

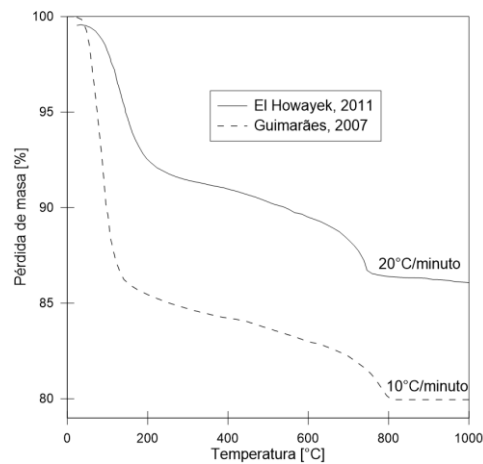


Figura 2-11: Análisis termogravimétrico (El Howayek, (2011), Guimarães et al., (2007)).

La Tabla 2-6 presenta los tres escenarios propuestos por El Howayek, (2011) para interpretar los termogramas obtenidos, es decir, la deshidratación primaria, la deshidratación secundaria y la deshidroxilación con sus respectivos rangos de temperatura y el porcentaje de pérdida de agua. Estos rangos discrepan con los de Guimarães et al., (2007) ya que el segundo y tercer escenario ocurren a temperaturas más bajas.

Tabla 2-6: Etapas de deshidratación (El Howayek, (2011)).

Deshidratación	Temperatura	Pérdida de agua
Agua en las superficies externas "Primera deshidratación"	25°C – 360°C	8.17%
Agua entre capas "Segunda deshidratación"	360°C – 570°C	1.42%
Agua estructural – grupos OH "deshidroxilación"	> 570°C	3.84%

## 2.2.4 Superficie específica

En la siguiente sección se presentan los valores medidos de superficie específica de la laponita por diferentes autores y metodologías, y además se presenta el cálculo de la superficie específica teórica reportado por dos autores diferentes.

### 2.2.4.1 Superficie específica por el método de Brunauer – Emmett – Teller (BET)

En la Tabla 2-7 se reportan valores de las superficies específicas de laponita RD medidas por diferentes autores. La principal diferencia entre estos resultados es que El Howayek, (2011) realizó el ensayo con vapor de agua, mientras que el resto de los autores con gas nitrógeno N<sub>2</sub>. En esta metodología se debe considerar que la laponita es susceptible a la humedad.



Tabla 2-7: Superficies específicas obtenidas por el método BET reportadas por diferentes autores.

Autor	SSA [m <sup>2</sup> /g]	Adsorción
BYK Additives & Instruments, (2013)	370	N <sub>2</sub>
Herrera, (2003)	370	N <sub>2</sub>
Qi et al., (1996)	372	N <sub>2</sub>
El Howayek, (2011)	473	Vapor de agua

## 2.2.4.2 Cálculo teórico

### 2.2.4.2.1 Cálculo por celda unitaria

La superficie específica de las arcillas se pueden calcular con la ecuación (I) (Meunier, (2005)).

$$S_o = \frac{2 \cdot a \cdot b}{PM/N_A} \quad (I)$$

en donde; S<sub>o</sub> es la superficie específica de la arcilla; a y b son parámetros de dimensiones que se obtienen según la geometría de la arcilla; N<sub>A</sub> es el número de Avogadro (6,022·10<sup>23</sup>) y PM el peso molecular de la celda de laponita.

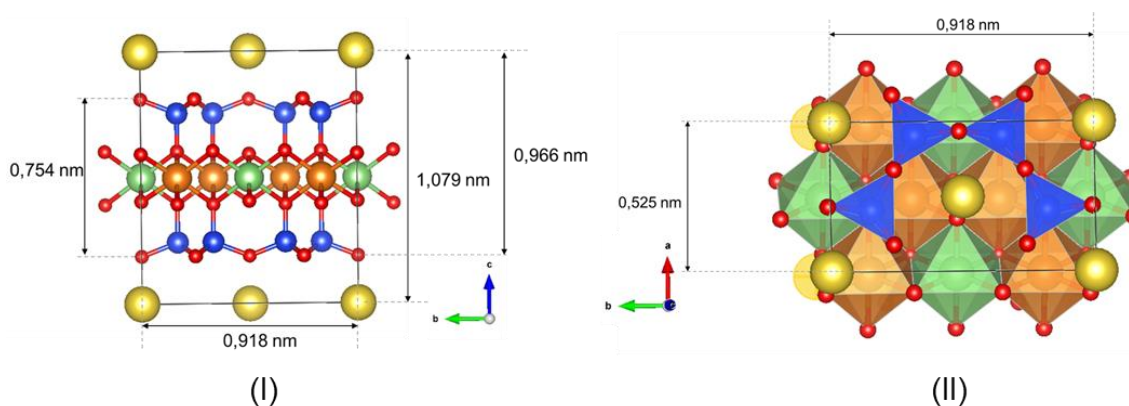


Figura 2-12: (I) Dimensiones de una celda de laponita en el plano b-c, (II) Dimensiones de una celda laponita en el plano b-a. (Figura obtenida en software VESTA).

Los parámetros a y b dependen de la geometría de la celda unitaria. Para esto se debe conocer la disposición de los elementos químicos en el espacio (Ver Figura 2-12). En la Tabla 2-8, se presentan los parámetros de la celda unitaria de la laponita, simulado en un modelo optimizado computacionalmente por Laurini et al., (2017).

Tabla 2-8: Parámetros de celdas unitarias de Laponita (Laurini et al., (2017)).

Geometría celda unitaria	Grupo espacial	a [Å]	b [Å]	c [Å]	α [Å]	β [Å]	γ [Å]
Monoclínico	C2/m	5,25	9,18	16,4	90	99	90

De acuerdo con la Tabla 2-9, se tiene que el peso molecular de una celda de laponita es 764,11 g/mol y al ocupar la ecuación de superficie específica, se obtiene un valor de 759,66 m<sup>2</sup>/g.

Tabla 2-9: Pesos moleculares de los elementos presentes en la celda de laponita.

Elemento	PM [g/mol]	n [-]	Total [g/mol]
Na	23	0,7	16,1
Si	28,03	8	224,24
Mg	24,3	5,5	133,65
Li	6,94	0,3	2,082
O	16	24	384
H	1,01	4	4,04
		<b>PM total</b>	764,11

El resultado anterior considera la partícula de laponita aislada, es decir, sin considerar el efecto de las fuerzas iónicas con otra partícula. Es importante mencionar esto último ya que la superficie específica medida a través de técnicas de adsorción y desorción dependen de los espacios vacíos que existen entre las partículas. Al existir una fuerte influencia de la fuerza iónica, mayor será el espacio inaccesible entre las partículas, por ende, menor la superficie específica tal como se presenta en la Figura 2-13.

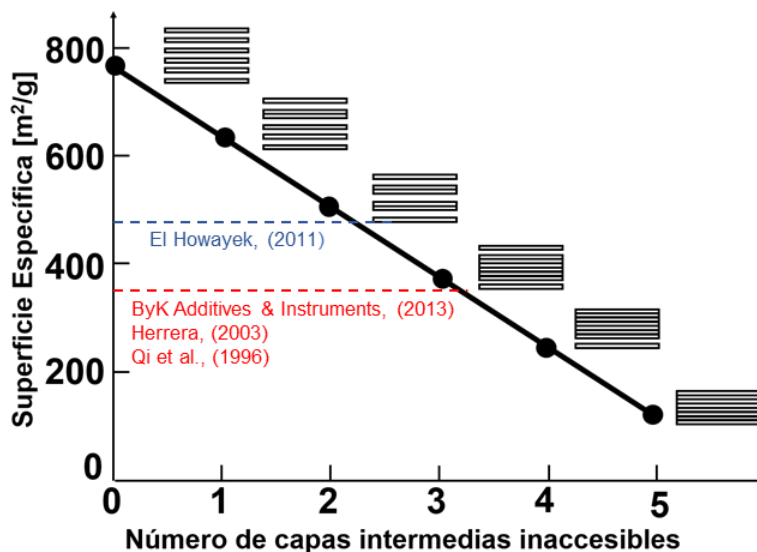


Figura 2-13: Superficie específica versus número de zonas inaccesibles entre capas (Meunier, (2005)).

#### 2.2.4.2.2 Cálculo por forma de partícula

De acuerdo a Santamarina et al., (2001) la fórmula para calcular la superficie específica de una esmectita tipo montmorillonita es de acuerdo a la ecuación (II). En donde,  $S_s$  corresponde a la superficie específica,  $t$  el espesor de la partícula de laponita,  $\rho_w$  es la densidad del agua y  $G_s$  es la gravedad específica de la laponita.

$$S_s = \frac{2}{t \cdot \rho_w \cdot G_s} \quad (II)$$

Dado que la gravedad específica de la laponita es 2.53 - 2.57, el espesor de la laponita 0.92 nm y la densidad del agua 1 g/cm<sup>3</sup>, la superficie específica de la laponita es 859.25 - 845.88 m<sup>2</sup>/g. Este cálculo considera a la partícula de laponita aislada.

### 2.2.5 Límite de Atterberg

En la Tabla 2-10 y Figura 2-14 se presentan los límites de Atterberg de la laponita de acuerdo con tres diferentes autores. En todos los casos se concluye que la laponita es una arcilla de alta plasticidad.

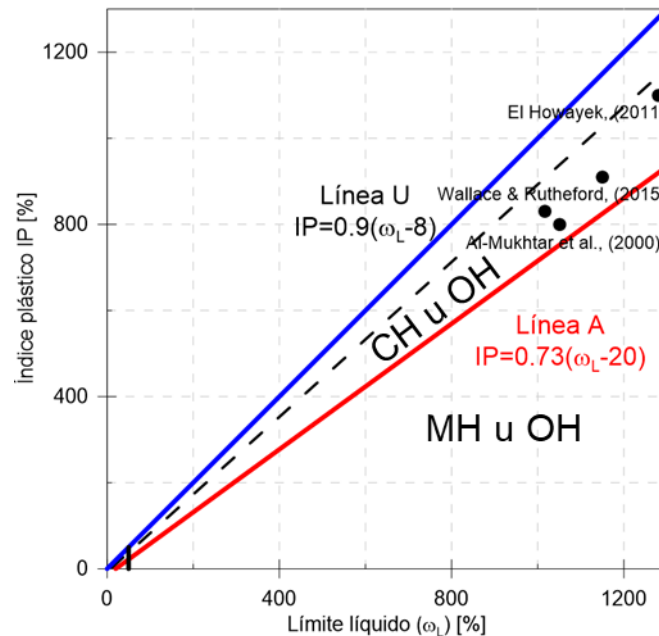


Figura 2-14: Límites de Atterberg disponibles en la bibliografía en la carta de plasticidad.

Tabla 2-10: Límites de Atterberg disponibles en la bibliografía.

Autor	Límite líquido [%]	Límite plástico [%]	Índice de plasticidad [%]
Wallace & Rutheford, (2015)	1150	240	910
Al-Mukhtar et al., (2000)	1050	250	800
El Howayek, (2011)	1280	180	1100

### 2.2.6 Granulometría partículas en suspensión

En la Figura 2-15, se presenta la distribución de tamaños de una dispersión de laponita a un 0.2% de concentración en agua. Los tamaños de las partículas varían de 6 a 67 μm. Entre los tamaños de 5 a 9 μm se encuentra el 99.3% del porcentaje de volumen acumulado con un tamaño de partícula promedio de 6.6 μm (Xiong et al., (2019)).

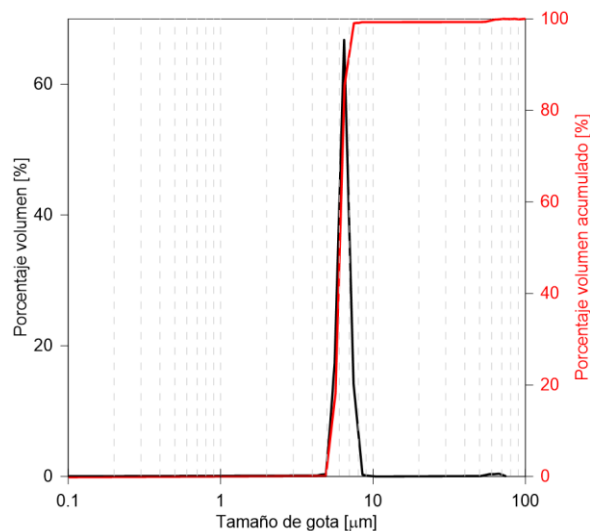


Figura 2-15: Distribución de tamaño de partículas en dispersión de 0.2% concentración de laponita en agua (Xiong et al., (2019)).

## 2.3 Comportamiento de soluciones de laponita

### 2.3.1 Consolidación e hinchamiento de la laponita

El comportamiento de las arcillas depende en gran medida del estado de tensional durante los procesos de saturación como de desaturación. Las propiedades fisicoquímicas, la capacidad de intercambio de cationes (CEC), la naturaleza de los cationes, el aspecto textural de la partícula y el historial de carga, influyen en el comportamiento reológico de las arcillas no saturadas (Al-Mukhtar et al., (1999)).

El comportamiento de un suelo no saturado está influenciado por las interacciones suelo-agua en todos los niveles de disposición, desde el nivel de las capas elementales hasta las partículas (asociación de capas) y los agregados (asociación de partículas) (Al-Mukhtar et al., (1999)). Al-Mukhtar et al., (1999) estudió el desarrollo de la consolidación de muestras de laponita con distinto contenido de humedad y en muestras saturadas. Este contenido de humedad es incorporado a través de vapor de agua, en la Tabla 2-11 se presenta el contenido de agua asociada a la humedad relativa en muestras compactadas con una presión de 10 MPa.

Tabla 2-11: Contenido de agua con laponita compactada a 10 MPa (Al-Mukhtar et al., (1999)).

Humedad relativa [%]	Índice de vacío [-]	$\omega$ [%] (con cambio de volumen permitido)	$\omega$ [%] (con cambio de volumen restringido)
11	1.21	6.1	5.5
32	1.22	8.9	10.8
66	1.27	20.1	20.8
76	1.30	24.8	26.8
86	1.36	32.1	31.7
98	1.51	49.4	42.3

En la Figura 2-16 (a) se presenta la curva edométrica de la laponita. Este ensayo se realiza inyectado aire con diferentes humedades relativas. En las curvas se observa que a medida que mayor es el contenido de agua mayores son los índices de vacíos y las deformaciones.

En la Figura 2-16 (b) se presenta que el índice de compresión varía entre 0.3 a 2.1 para diferentes humedades relativas. Cuando la muestra alcanza un 98% de humedad relativa, posee un comportamiento similar a una arcilla natural, considerando que el índice de compresión  $C_c$  varía entre de 0.1 a 0.8 (Budhu, (2011)). El índice de hinchamiento no alcanza a ser 0.1 con un 98% de humedad relativa y un 0.7 en una muestra saturada.

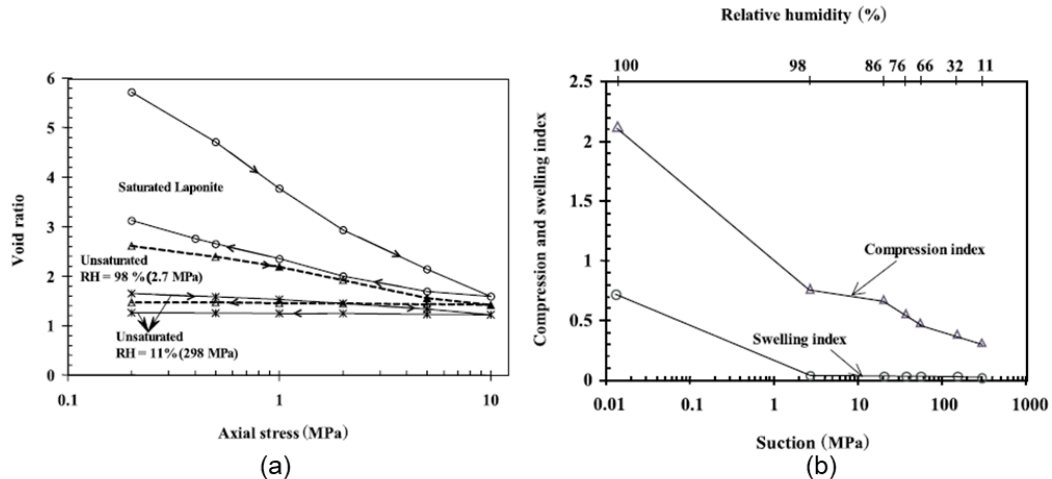


Figura 2-16: (a) Resultados edométricos de muestras saturadas y no saturadas con humedad relativa de 11% y 98%, (b) Índice de compresión ( $C_c$ ) y de hinchamiento ( $C_s$ ) de distinta humedad relativa (Al-Mukhtar et al., (1999)).

En comparación con arcillas naturales, como la hectorita, la laponita posee una capacidad de adsorción mucho mayor y esto se ve reflejado en los índices de vacíos que se presentan en la Figura 2-17 en las curvas edométricas. Cabe mencionar que la forma de las curvas de deformación en ambos especímenes es similar.

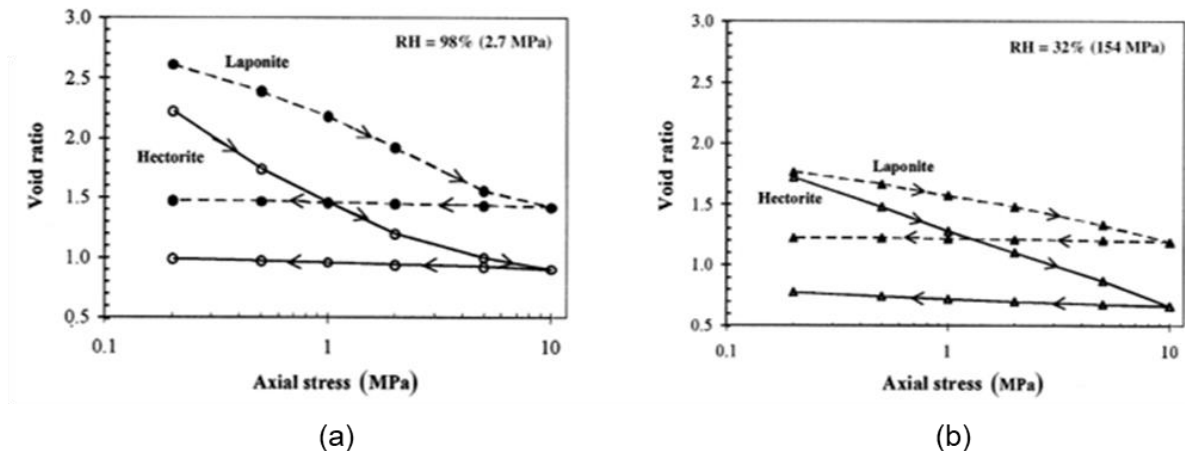


Figura 2-17: Curvas edométricas de la laponita y hectorita de acuerdo al trabajo de Al-Mukhtar et al., (1999) (a) índice de vacío y esfuerzo vertical con una humedad relativa al 98%, (b) índice de vacío y esfuerzo vertical con una humedad relativa al 32%.

### 2.3.2 Interacción de la arcilla con el agua

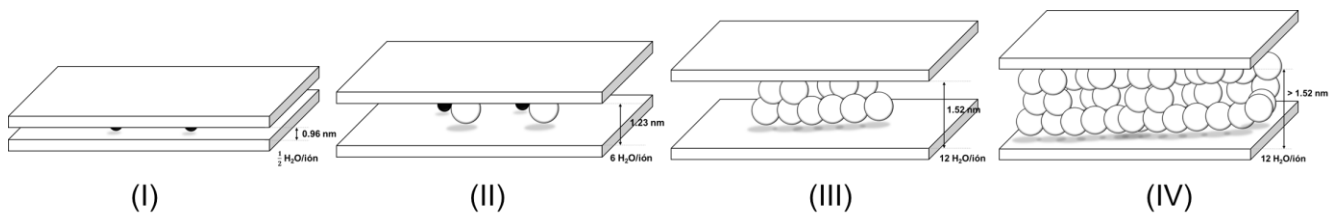
Las esmectitas pueden adsorber agua entre las capas TOT, tetraedro – octaedro – tetraedro. Este fenómeno es el que produce el hinchamiento en las esmectitas. Los parámetros que controlan este fenómeno es la densidad de carga eléctrica en la superficie de la arcilla, los iones presentes entre las capas TOT y la concentración y tipo de electrolitos en el agua.

Se reconocen dos mecanismos de hinchamiento; por hidratación de los cationes intercambiables de la arcilla (sodio  $\text{Na}^+$  para el caso de la laponita) y el hinchamiento osmótico, producido por gradientes de concentración de iones entre las superficies arcillosas y el espacio entre ellas (Savage, (2005)).

#### 2.3.2.1 Hinchamiento cristalino interno

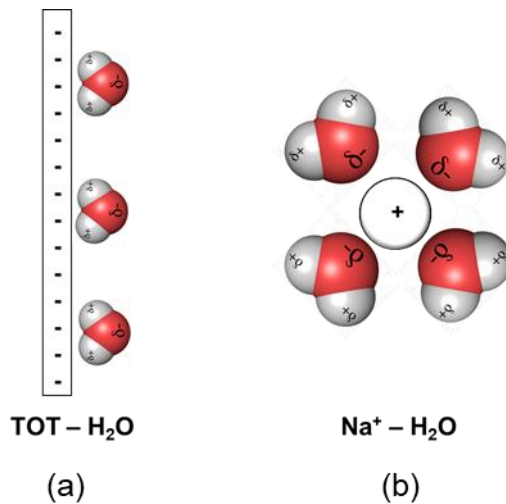
Madsen & Müller-Vonmoos, (1989) estudiaron en la montmorillonita seca la hidratación de cationes entre las capas TOT. Los cationes intercambiables entre capas se encuentran en la superficie de las capas o en los agujeros hexagonales de las láminas tetraédricas. En estado seco, las capas de montmorillonita se encuentran a una distancia de 0.96 a 1 nm (Figura 2-18 (I)). Las capas basales cargadas negativamente se mantienen intensamente atraídas por los cationes de capa intermedia y por la atracción de van der Waals a esta pequeña distancia.

Los cationes se hidratan al contacto con el agua y se ordenan entre las capas TOT. Esto conduce a un ensanchamiento del espacio entre las capas (Ver Figura 2-18 (II)(III)(IV)). La energía de hidratación es significativamente mayor que la unión entre las capas de montmorillonita en estado seco (Madsen & Müller-Vonmoos, (1989)).



**Figura 2-18: Desarrollo del hinchamiento cristalino interno de montmorillonita sódica de acuerdo al número de moléculas de agua (en negro ión de intercambio y en blanco las moléculas de agua) (Madsen & Müller-Vonmoos, (1989)).**

La Figura 2-19 ilustra las interacciones de la molécula de agua con los iones de intercambio y las láminas de arcilla. El momento dipolar de la molécula de agua tiene un gran protagonismo en el fenómeno de hinchamiento. Al ingresar al espacio entre capas de la arcilla, se hidratan los cationes y de esta forma se debilita la interacción electrostática entre las superficies basales de las capas de arcilla y dichos cationes. El agua estructural de las arcillas está más o menos ordenada en la estructura de las esmectitas y tiene menos movilidad que las que se encuentran en los poros (Madsen & Müller-Vonmoos, (1989)).



**Figura 2-19: (a) Interacción entre la molécula de agua con la estructura TOT y (b) Interacción de la molécula de agua con el catión de intercambio.**

Una técnica adecuada para conocer la distancia entre las capas TOT es la adsorción y desorción de vapor de agua. Dubinin, (1975) trabajó con bentonita de Wyoming, con un 75% de montmorillonita de sodio. Para esto secó una muestra con vacío a una temperatura de 100° - 120°C, luego le aplicó presión de vapor de agua de forma gradual a una temperatura de 20°C y con estas condiciones midió el aumento de masa debido a la adsorción de agua.

La presión de hinchamiento dado este fenómeno puede calcularse a partir de la isoterma de adsorción de vapor de agua. Para la bentonita, esta presión es de hasta 400 MPa para la formación de la primera capa de agua, hasta 110 MPa para la segunda capa y hasta 27 MPa para la tercera y cuarta capa (Dubinin, (1975)). Cabe mencionar que las presiones de sobrecarga necesarias para evitar el hinchamiento cristalino interno son tan altas que los ingenieros generalmente no tratan este tipo de problema (Madsen & Müller-Vonmoos, (1989)).

### 2.3.2.2 Hinchamiento osmótico

El hinchamiento osmótico se basa en la teoría de repulsión entre las capas eléctricas, dada una considerable concentración de iones cercanas a las partículas de arcilla. A diferencia del hinchamiento cristalino interno, que actúa a pequeñas distancias (hasta 1 nm), el hinchamiento osmótico actúa a distancias mucho mayores, por ende a presiones de hinchamiento menores que no superan los 2 MPa (Madsen & Müller-Vonmoos, (1989)).

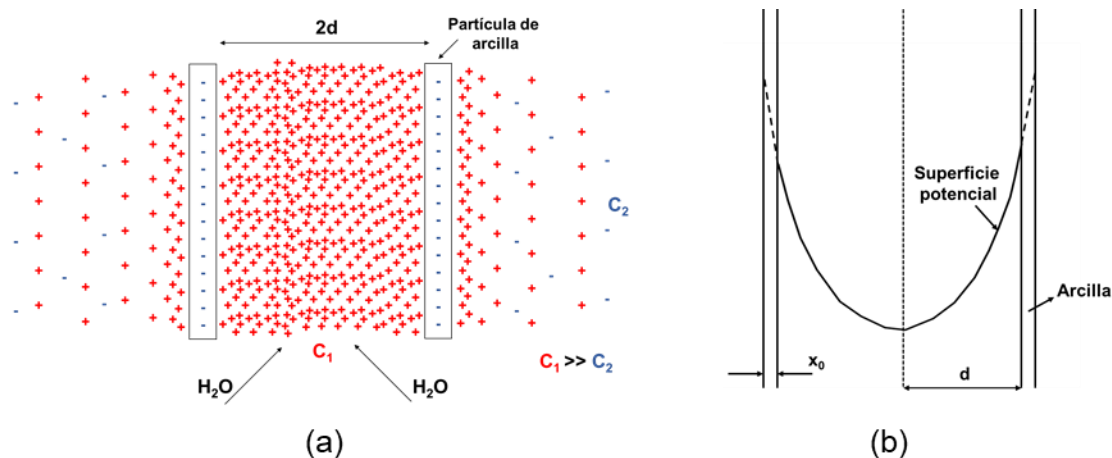


Figura 2-20: (a) Dos partículas de arcillas cargadas negativamente con una nube de iones con  $C_1$  concentración de cationes y  $C_2$  concentración de aniones (Madsen & Müller-Vonmoos, (1989)); (b) Superficie potencial en dos partículas paralelas de arcilla (Sridharan & Jayadeva, (1982)).

La Figura 2-20 y Figura 2-21 presentan que la concentración de cationes cerca de la superficie de las partículas de arcilla es extremadamente alta y en la medida que avanza hacia el centro de las dos partículas disminuye exponencialmente, lo contrario ocurre con los aniones. La superficie de arcilla cargada negativamente y la nube de iones conforman la doble capa eléctrica difusa. Cuando dos de estos campos potenciales negativos se superponen, se repelen entre sí y ocurre el hinchamiento. La hinchazón continúa hasta que se alcanza el equilibrio, es decir, hasta que las concentraciones de iones en todo el sistema lleguen a un estado de equilibrio. (Madsen & Müller-Vonmoos, (1989)).

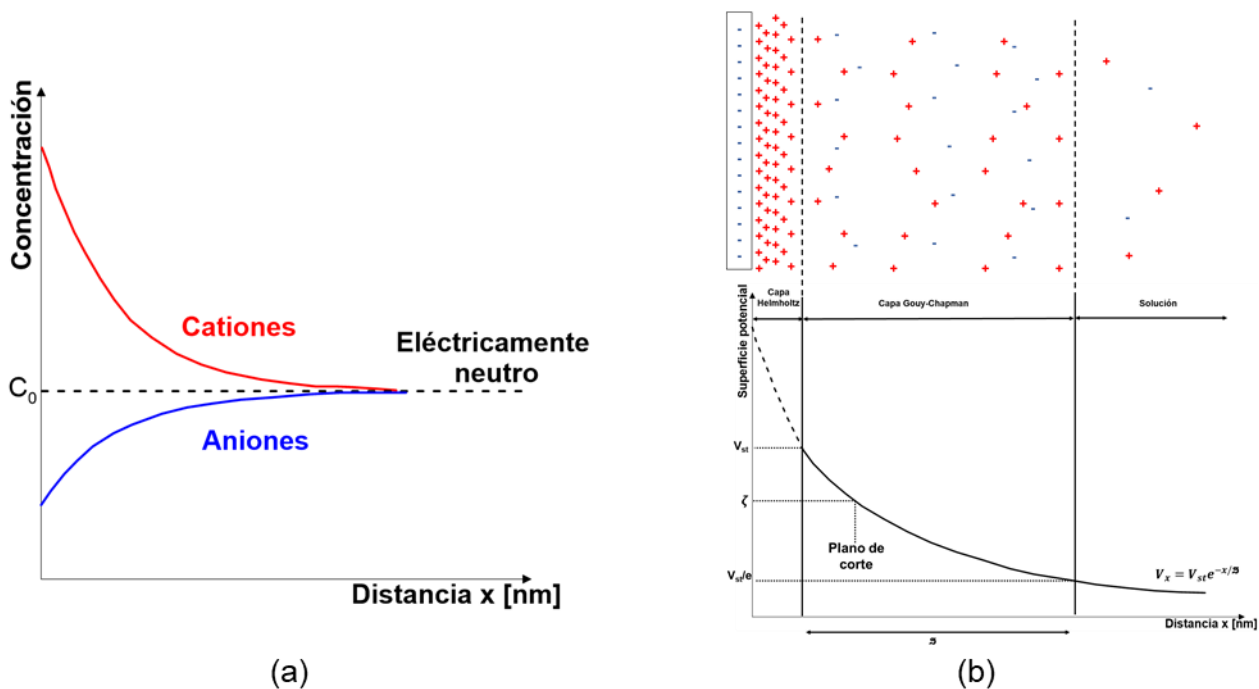


Figura 2-21: (a) Concentración de iones en relación a la distancia (Santamarina et al., (2001)); (b) Superficie potencial versus la distancia (Santamarina et al., (2001)).



El hinchamiento osmótico depende en gran medida de la concentración de electrolitos y la valencia de los iones de intercambio (Sridharan & Jayadeva, (1982)), tal como se presenta en la ecuación (III).

$$P_s = 2 \cdot n \cdot k \cdot T \cdot (\cosh(u) - 1) \quad (III)$$

donde;  $P_s$  es la presión asociada a la repulsión,  $n$  es la concentración de iones lejos de la superficie de la arcilla,  $k$  es la constante de Boltzmann,  $T$  es la temperatura y  $u$  es el potencial eléctrico en el plano a medio camino entre las capas (calculado usando la ley de distribución de Boltzmann).

Cuando las partículas de arcilla se acercan entre sí y cuando ocurre la consolidación, una serie de fuerzas interpartículas de largo y corto alcance influyen en su disposición e interacción geométrica. Las partículas permanecerán dispersas a menos que sean juntadas por una fuerza externa igual a la fuerza repulsiva. Por ejemplo, se requiere una presión de 500 kPa para llevar dos partículas de montmorillonita de sodio orientadas cara a cara, en una concentración de electrolito de 0.01 M, a una distancia de 4 nm entre sí (Terzaghi et al., (1981)).

La teoría de doble capa funciona bajo dos supuestos; que las partículas de arcilla se encuentran de forma paralela y que no tienen contacto entre sí. En la realidad las partículas pueden encontrarse en una disposición arbitraria (Ver Figura 2-22). En la teoría de doble capa se hace este supuesto para simplificar los cálculos de presión de repulsión.

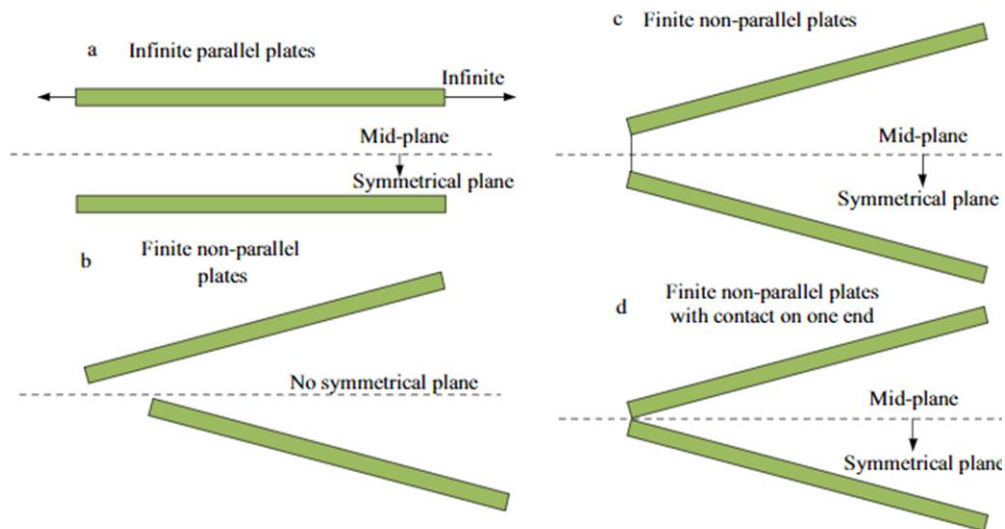


Figura 2-22: Diferentes escenarios de las partículas de arcilla (Shang et al., (2018)).

Los estudios de Shang et al., (2018)) revelaron que también existen otros factores que influyen en la presión repulsiva de dos partículas de arcillas. Entre estas se encuentran; la distancia mínima entre las dos partículas ( $D$ ), el ángulo que forman las dos partículas entre sí ( $\theta$ ) y el largo de las partículas de arcilla ( $L$ ). En este modelamiento matemático aún no se considera la excentricidad de las partículas ni el contacto (Ver Figura 2-23).

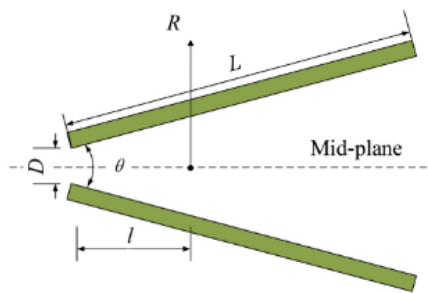


Figura 2-23: Esquema del modelo numérico (Shang et al., (2018)).

### 2.3.3 Capacidad de intercambio de cationes CEC<sup>3</sup> y agua adsorbida

Como se estudió anteriormente, es la presencia de iones la que controla los mecanismos de hinchamiento y de adsorción de agua en las arcillas. Para cuantificar este efecto se utiliza la capacidad de intercambio de cationes, que depende principalmente de las concentraciones relativas en el agua y también de la electrovalencia del catión de intercambio. La capacidad de intercambio de cationes es una medida de la carga negativa neta en las partículas de suelo (Terzaghi et al., (1981)). La Tabla 2-12 presenta los valores de CEC para diferentes arcillas.

Tabla 2-12: CEC en distintas arcillas (Giese & Oss, (2002); Terzaghi et al., (1981)).

Mineral	CEC [meq/g]
Kaolinita	0.03 – 0.1
Ilita	0.2 – 0.3
Montmorillonita	0.8 – 1.2
Laponita RD <sup>*</sup>	1.15

### 2.3.4 Introducción al comportamiento de fluido

Las suspensiones de arcillas tienden a comportarse como un fluido. Los fluidos son sustancias que se deforman al quedar sometidos a esfuerzos tangenciales por pequeños que sean (Mery, (1972)) (Ver Figura 2-24). Las suspensiones de bajas concentraciones se pueden modelar como un fluido viscoelástico, mientras que a altas concentraciones como un plástico de Bingham.

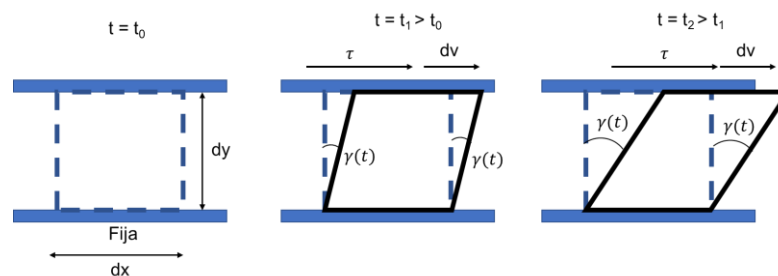


Figura 2-24: Evolución temporal de deformación angular producto de un esfuerzo de corte (Fuente et al., (2010)).

<sup>3</sup> CEC: Cation exchange capacity

Se ha comprobado que muchos fluidos verifican que la tensión tangencial  $\tau$  es proporcional a la velocidad de distorsión. Es decir, se cumple la relación de Newton - Navier (ecuación (IV)).

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (IV)$$

donde;  $\eta$  es la viscosidad dinámica del fluido,  $\dot{\gamma}$  la tasa de corte y  $\tau$  el esfuerzo de corte.

Los fluidos con viscosidad constante en el tiempo se llaman fluidos Newtonianos, mientras que los que tienen viscosidad variable, se reconocen como no Newtoniano (Mery, (1972)). Los fluidos no Newtonianos pueden ser pseudoplásticos, plástico de Bingham o dilatante (Ver Figura 2-25).

Las arcillas se comportan como un fluido Newtoniano en los primeros minutos de introducirlas en solución. Cabe mencionar que a altas concentraciones se comporta como un plástico de Bingham, mientras que a bajas concentraciones como un fluido pseudoplástico (Shen, (2014)).

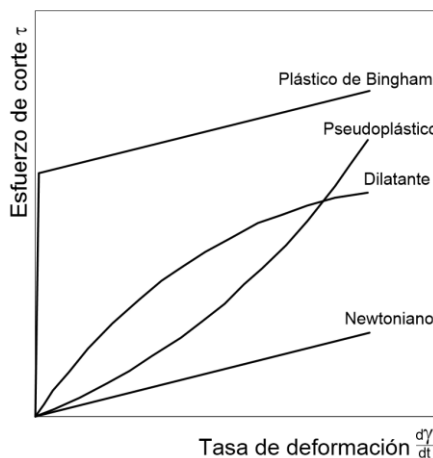


Figura 2-25: Curvas de consistencia de cuatro tipos de fluido.

Para estudiar la reología de un fluido, se utilizan las pruebas de barrido de amplitud (*Amplitude Sweep*, AS), en donde se aplica una tensión sinusoidal constante ( $\gamma = \gamma_0 \cdot G' \cdot \sin(\omega \cdot t)$ ) y se mide el esfuerzo de corte resultante. Para la mayoría de los materiales se desplazan en un ángulo  $\delta$  con la deformación aplicada. De acuerdo con el valor que tome este ángulo, será el comportamiento que exprese la solución (Ver Figura 2-26):

- Si  $\delta = 0^\circ$ , se encuentra en fase con la deformación, se comporta como un sólido.
- Si  $\delta = 90^\circ$ , se encuentra completamente desfazado con la deformación, se comporta como un fluido Newtoniano.
- Si  $\delta$  está entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , se encuentra desfazado con la deformación, se expresa un comportamiento viscoelástico, el que puede con la ecuación (V).

$$\tau = \gamma_0 \cdot (G' \cdot \sin(\omega \cdot t) + G'' \cdot \cos(\omega \cdot t)) \quad (V)$$

En las soluciones que poseen un comportamiento viscoelástico, la componente elástica queda definida por el módulo de almacenamiento  $G'$  (cantidad de energía almacenada) y la componente viscosa queda determinada por  $G''$ , el módulo de pérdida (cantidad de energía disipada). Cuando el módulo de almacenamiento  $G'$  es mayor que el módulo de pérdida  $G''$  y el ángulo de fase  $\delta$  es muy cercano a cero, el material se comporta como un sólido y su respuesta es esencialmente elástica. Sin embargo, para el caso contrario el material muestra un comportamiento viscoso y líquido (El Howayek, (2011)).

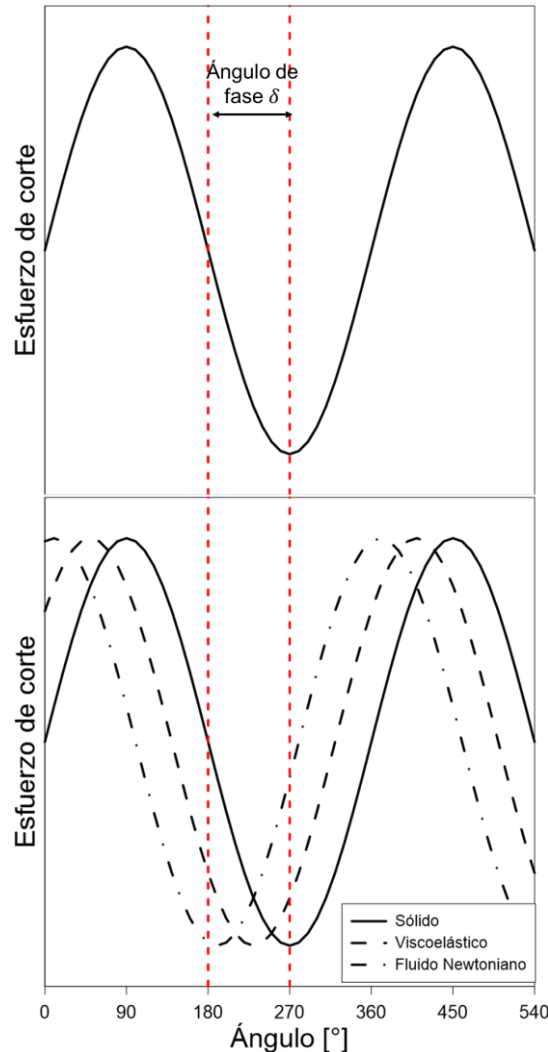
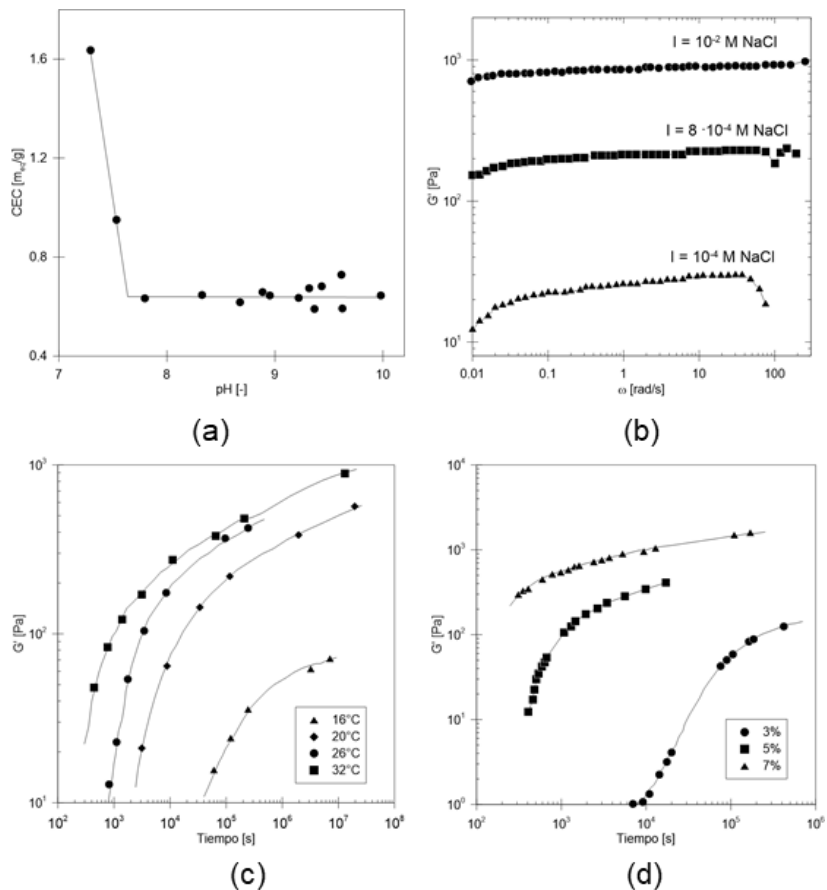


Figura 2-26: Respuesta dinámica del esfuerzo de corte y deformación durante pruebas oscilatorias (El Howayek, (2011)).

### 2.3.5 Efectos modificantes de suspensiones coloidales

De los estudios realizados en las suspensiones de laponita se han identificado distintos agentes que modifican sus propiedades reológicas. Entre ellos se puede mencionar: el pH, la fuerza iónica, la temperatura y la concentración de arcilla.



**Figura 2-27: (a) Influencia del pH en la capacidad de intercambio catiónico de laponita XLG (Thompson & Butterworth, (1992)); (b) Módulo de almacenamiento versus frecuencia angular con un 2% de concentración de laponita (Mourchid et al., (1995)); (c) Módulo de almacenamiento  $G'$  versus tiempo a diferentes temperaturas (Ramsay, (1986)) y (d) Módulo de almacenamiento versus el tiempo a distintas concentraciones de laponita (Ramsay, (1986)).**

Se conoce que la laponita RD posee un pH de 9.8 cuando se dispersa en un 2% (BYK Additives & Instruments, (2013)). En el estudio de Thompson & Butterworth, (1992) se analizó el efecto que posee la variación del pH en suspensiones de laponita y como la disminución de éste por debajo del rango experimental aceptado ( $< 9$ ) provoca la desestabilización química de las partículas de laponita. Esto se refleja en la Figura 2-27 (a), en la medida que disminuye el pH aumenta el CEC.

En el trabajo de Mourchid et al., (1995) (Ver Figura 2-27 (b)), se estudió el comportamiento del módulo de almacenamiento  $G'$  en suspensiones de laponita al 2% con diferentes concentraciones de sal. A medida que aumenta la concentración de sal, aumenta el módulo de almacenamiento y con esto se acentúa el comportamiento elástico del gel, por sobre el comportamiento viscoelástico lineal.

Ramsay, (1986) estudió el efecto de la temperatura en las suspensiones de laponita en el tiempo. En la Figura 2-27 (c) se observa que, a mayores temperaturas en la solución, mayor es el módulo de almacenamiento  $G'$ . La tasa de gelificación en todas las muestras es considerablemente mayor a tiempos tempranos y llegado a cierto punto  $G'$  disminuye. Esta observación se evidencia en el cambio de pendiente que desarrollan las curvas. También se observa que, a menores temperaturas, más tardía es la gelificación.

Además de la temperatura, Ramsay, (1986) estudió el efecto de la concentración de laponita a 3%, 5% y 7% a 25°C. En la Figura 2-27 (d) se observa que a mayor concentración de laponita, mayor es el módulo de almacenamiento  $G'$ . La tasa de gelificación es considerablemente mayor a tiempos tempranos en las muestras bajo el 5% de concentración y a tiempos tardíos esta tasa disminuye. También se observa que a mayores concentraciones no se presenta un quiebre tan abrupto como en concentraciones más bajas ya que presenta una tasa de gelificación relativamente constante.

### 2.3.6 Estados en suspensiones coloidales

Existen dos estados en los que se puede encontrar una suspensión coloidal no ergódica<sup>4</sup>, vidrio o gel. La similitud que guardan estos estados es que es muy complejo identificarlos entre sí experimentalmente. Las diferencias que poseen estos dos estados se presentan en la Tabla 2-13 (Tanaka et al., (2004)).

Tabla 2-13: Diferencia entre los estados vidrio y gel.

Vidrio	Gel
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estructura homogénea.</li> <li>• La elasticidad es producto del efecto de “enjaulamiento” de partículas.</li> <li>• La cinética de solidificación se denomina “envejecimiento” (aging).</li> <li>• La escala de longitud entre partículas (<math>\bar{l}</math>) es del orden del tamaño de los coloides.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estructura no homogénea, posee una organización estructural jerárquica.</li> <li>• La elasticidad es producto de una red percolada mecánicamente y es algo menor que la del vidrio.</li> <li>• La cinética de solidificación se denomina gelificación.</li> <li>• El largo de la unidad fundamental (<math>\xi</math>) de la red es mucho mayor que el tamaño de los coloides.</li> </ul>

Tanaka et al., (2004) propuso un diagrama de fase general para las suspensiones de laponita (Ver Figura 2-28). En él se presentan tanto las transiciones de vidrio a gel, como transiciones de un estado ergódico (líquido y solución) a uno no ergódico (vidrio y gel) con sus respectivos límites de concentración de la laponita y de sales.

De la Figura 2-28 se observa que bajo  $10^{-4}$  M, la solución se comporta como un vidrio repulsivo. Cuando la concentración iónica está entre  $10^{-4}$  y  $10^{-3}$  M, se encuentra en estado de vidrio atractivo. Es también en este tramo en que se presenta el cambio de fase entre vidrio y gel, en donde las fuerzas atractivas comienzan a ganar protagonismo. Cuando la concentración de iones es cercana a  $10^{-3}$  M, se encuentra la frontera entre el líquido y la solución. Sobre  $10^{-2}$  M existe fuerza iónica muy alta, el sistema se vuelve inestable y se separa en fases.

<sup>4</sup> Solución no ergódica: Su proceso de formación es aleatorio o estocástico, no es determinístico.

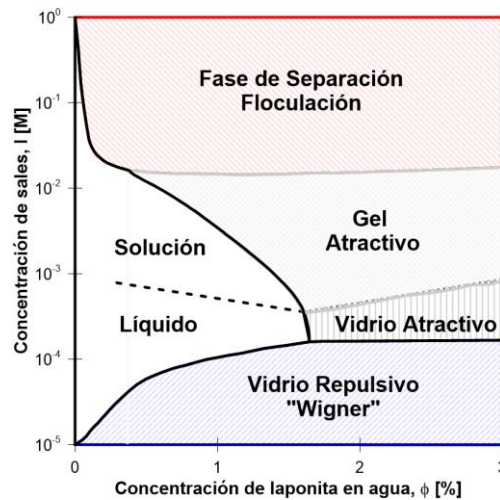


Figura 2-28: Diagrama de fases laponita (Tanaka et al., (2004)).

La Figura 2-29 presenta un esquema de la disposición de las partículas de laponita en las diferentes fases. En (a) se presenta un vidrio repulsivo o “Wigner” y, en este estado dominan las repulsiones electroestáticas. En (b) se esquematiza un vidrio atractivo, que, si bien las interacciones atractivas afectan la distancia espacial entre las partículas, las interacciones repulsivas tienen un rol predominante. Finalmente, en (c) se esquematiza un gel atractivo en donde las interacciones son dominadas por fuerzas de Van der Waals. Esta configuración es la conocida como casa de naipes o “house of cards” (Tanaka et al., (2004)).

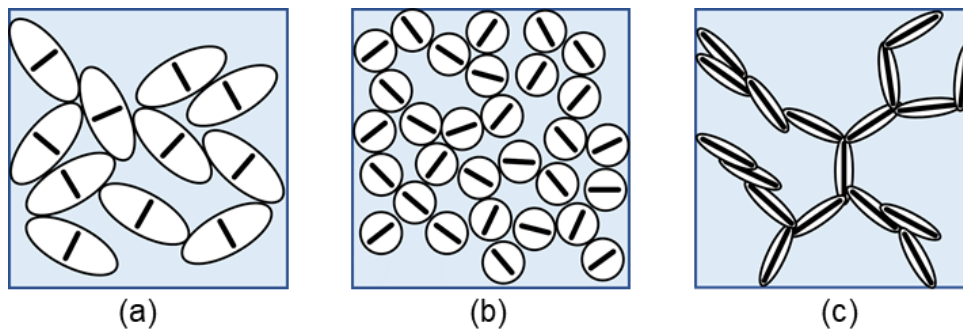


Figura 2-29: (a) Vidrio repulsivo “Wigner”, (b) Vidrio atractivo y (c) Gel atractivo “House of cards” (Tanaka et al., (2004)).

La principal diferencia que existe entre estas dos fases radica en el tipo de estructura que forman sus partículas. Con pruebas de dispersión de rayos X de ángulo pequeño (*Small-angle scattering*) se pudo determinar el factor de estructura estática,  $S(q)$ . La expresión de  $S(q)$  sirve como huella digital para distinguir el gel del vidrio. En la Figura 2-30 se observa que los geles exhiben un *peak* con valores de  $q^5$  mayores a los vidrios, dada la corta distancia entre sus partículas. En los geles, el valor *peak* puede fluctuar entre las distancias  $d$  y  $h$  dependiendo de la estabilidad del gel. Contra más inestable es un gel, menor es su valor de  $q$ .

<sup>5</sup>  $q$ : vector de dispersión, depende del ángulo de incidencia ( $\theta$ ) y de la longitud de onda de la radiación ( $\lambda$ ).

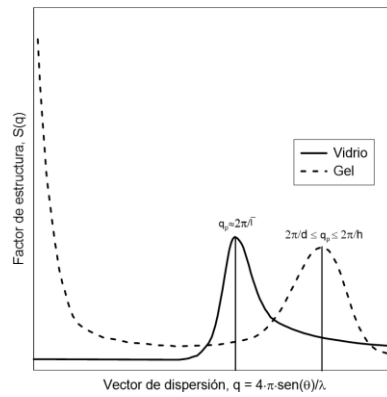


Figura 2-30: Factor de forma versus vector de dispersión para un gel y un vidrio (Tanaka et al., (2004)).

## 2.4 Propiedades reológicas

Las propiedades reológicas de la laponita han sido ampliamente estudiadas por El Howayek, (2011) y Shen, (2014). Los experimentos realizados se llevaron a cabo con soluciones con agua desionizada, a una concentración de 3% de laponita a una temperatura de 25°C. Para las pruebas de barrido de amplitud (AS) se utilizó un reómetro (Physica MCR 301, ver Figura 2-31) con un sistema placa – placa.

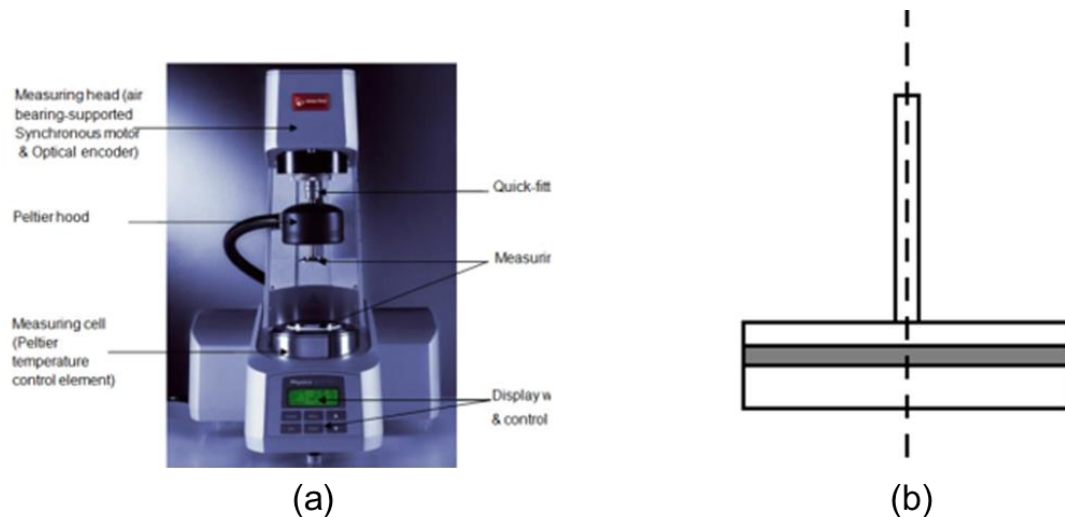


Figura 2-31: (a) Reómetro Anton Paar Physica MCR 301 y (b) Sistema placa – placa, diámetro 50 mm, con un ángulo de cono 1° y una truncación de 46 μm (El Howayek, (2011)).

Para los ensayos se varió la amplitud de deformación por corte entre 0,1 y 200%. La frecuencia oscilatoria seleccionada fue de 1 Hertz para prevenir los efectos de inercia. Además, este valor es capaz de simular la frecuencia típica de los terremotos. Para prevenir efectos de inercia se deben considerar frecuencias bajo 10 Hertz (Shen, (2014)).



## 2.4.1 Viscosidad

### 2.4.1.1 Efecto del tiempo

Tanto en la Figura 2-32 como la Figura 2-33 se presenta el comportamiento de la viscosidad en distintos escenarios de tiempo. A los 15 minutos (Figura 2-32 (a)) la viscosidad no supera el valor de 4 mPa·s y presenta un comportamiento lineal al igual que el esfuerzo de corte, es decir, presenta comportamiento Newtoniano. En cambio, a las 6 horas (Figura 2-32 (b)) disminuye la viscosidad a medida que aumenta la frecuencia de razón de corte, junto con ello, aumenta el esfuerzo de corte.

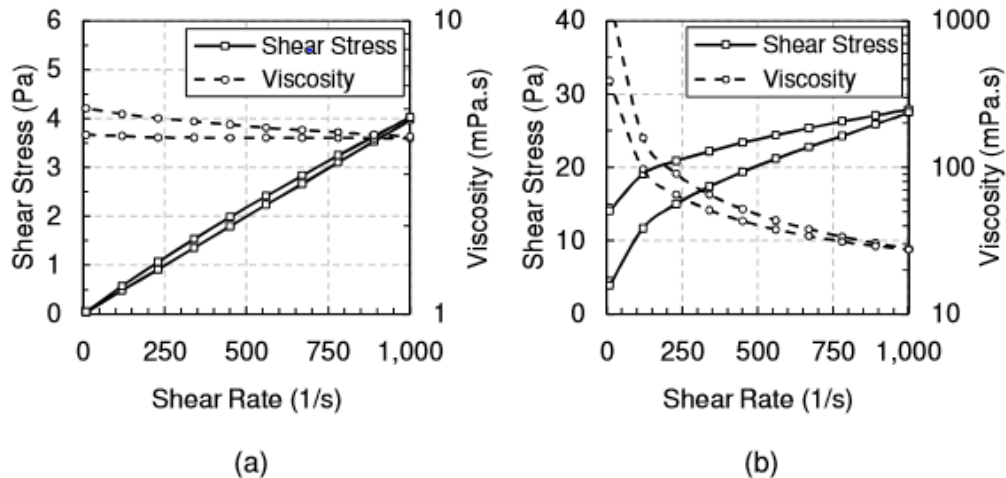


Figura 2-32: Curva de flujo para suspensión de 3% de laponita (a) 15 min y (b) 6 horas de envejecimiento(El Howayek, (2011)).

La Figura 2-33 acopla el trabajo de El Howayek, (2011) y de Y. Huang & Wang, (2016) de suspensiones de laponita en condiciones similares. Se observa la evolución de la viscosidad en función del tiempo. Antes de los 20 minutos el incremento de la laponita es lineal, es decir, se comporta como un fluido Newtoniano. Transcurrido dicho tiempo, el aumento de la viscosidad sigue un comportamiento exponencial, es decir, se desarrolla la tixotropía en la laponita.

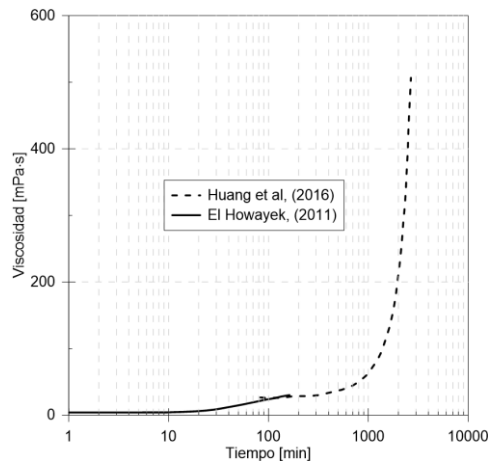


Figura 2-33: Viscosidad aparente versus tiempo para suspensión de laponita a un 3%, a 23°C, 0.1 a 1 Hertz Y. Huang & Wang, (2016) y curva de El Howayek, (2011).

### 2.4.1.2 Efecto de la concentración

La Figura 2-34 presenta la viscosidad de la solución de laponita a concentraciones de 2.75%, 3% y 3.25%. El comportamiento de las curvas es creciente y exponencial en el tiempo, a medida que la suspensión posee mayor concentración mayor es la viscosidad y las curvas se desplazan hacia valores de viscosidad mayores y tiempos de envejecimientos más cortos.

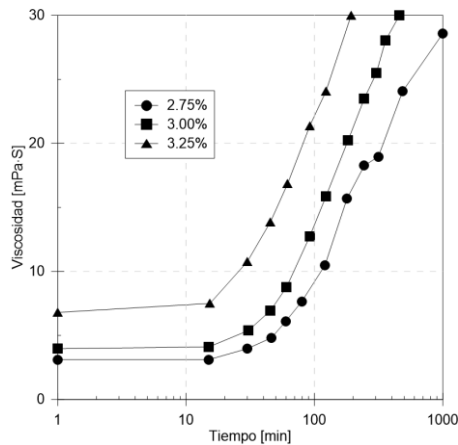


Figura 2-34: Viscosidad versus tiempo de envejecimiento para concentraciones de 2.75%, 3% y 3.25% de suspensiones de laponita (El Howayek, (2011)).

### 2.4.1.3 Efecto de la temperatura

El efecto de la temperatura en la viscosidad a una concentración de un 3% se presenta en la Figura 2-35. En ella se observa que a una mayor temperatura se desarrolla una menor viscosidad, lo que se condice con lo presentado en la Figura 2-27 (c).

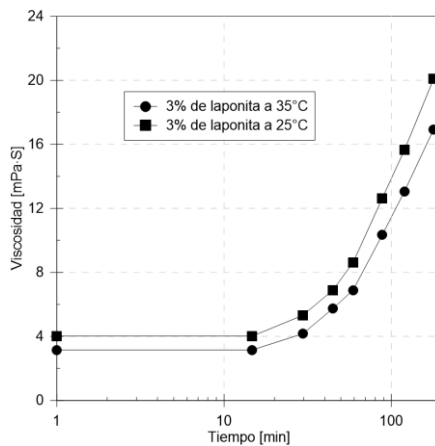


Figura 2-35: Viscosidad versus tiempo de envejecimiento de suspensión de laponita testado a 25°C y a 35°C (El Howayek, (2011)).

#### 2.4.1.4 Efecto de la fuerza iónica

El Howayek, (2011) realizó pruebas reológicas y de floculación para evaluar la validez del diagrama de fase de la Figura 2-28. Para las pruebas reológicas se prepararon suspensiones de laponita al 3% con concentraciones de sal (NaCl) de 0 M,  $10^{-4}$  M,  $10^{-3}$  M y  $10^{-2}$  M. Para las pruebas de floculación se prepararon suspensiones con concentraciones de  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$  y 1 M de NaCl (Ver Figura 2-36).

La viscosidad aumenta en relación con el incremento de la fuerza iónica de la solución. Esto es el resultado del debilitamiento de la doble capa asociado al aumento de la fuerza iónica. Este fenómeno hace que la estructura evolucione del vidrio repulsivo a un gel atractivo. Cabe mencionar que el agua sin iones posee una concentración de electrolitos de  $10^{-4}$  M (Wallace & Rutheford, (2015)).

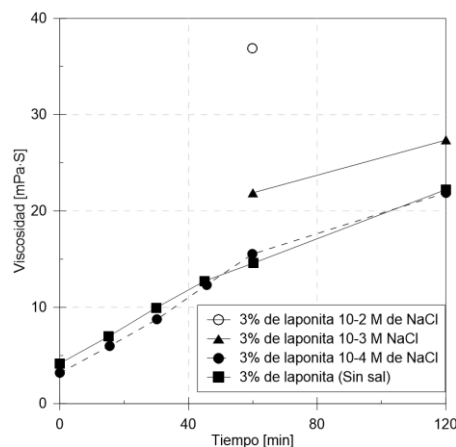


Figura 2-36: Viscosidad versus tiempo de envejecimiento para una suspensión al 3% con diferentes concentraciones de NaCl (El Howayek, (2011)).

En las pruebas de floculación se estudió la sedimentación a 30 segundos, 7 minutos, 15 minutos y 1 hora. Con la solución de NaCl  $10^{-2}$  M, la gelificación ocurrió inmediatamente, y las burbujas de aire quedan atrapadas dentro de la estructura del gel. Este comportamiento es similar para el resto de las soluciones, las partículas floculan y se produce la sedimentación. El proceso es más rápido en el caso de 1 M, ya que una mayor fuerza iónica provoca un debilitamiento acentuado de la doble capa, lo que promueve la formación de flóculos más grandes, que sedimentan rápidamente (El Howayek, (2011)).

#### 2.4.1.5 Adición de modificadores

Existen diversos modificadores reológicos para agregar a las suspensiones de laponita, entre ellos se reconocen; sal, laponita RDS, pirofosfato de sodio SPP, polímeros solubles en agua, bacterias, ente otros.

La finalidad de modificar la reología de una suspensión es debilitar o fortalecer la estructura inicial del gel. Para esto se definen tres escenarios reológicos los que se caracterizan con las ventanas de tiempo  $t_1$  y  $t_2$  y con las viscosidades  $\eta_0$ ,  $\eta_n$  y  $\eta_f$ . En donde;  $t_1$  es el tiempo en que la suspensión cambia su comportamiento de Newtoniano a

no Newtoniano,  $t_2$  es el tiempo en el que la viscosidad alcanza un valor estable,  $\eta_0$  es de valor de la viscosidad medida en el tiempo cero,  $\eta_n$  es el valor de la viscosidad medida en correspondencia con  $t_1$  y  $\eta_f$  es el valor promedio de la viscosidad más allá de  $t_2$ .

El primer escenario, define el comportamiento de un fluido Newtoniano; en el segundo escenario, la viscosidad aumenta bruscamente, reflejando la transición de solución a gel. Finalmente, en la tercera etapa, la viscosidad alcanza una meseta y no parece aumentar con el tiempo. La Figura 2-37 presenta un ejemplo del desarrollo de la viscosidad en el tiempo (“curva S”) de una suspensión con laponita RD y RDS (Shen, (2014)).

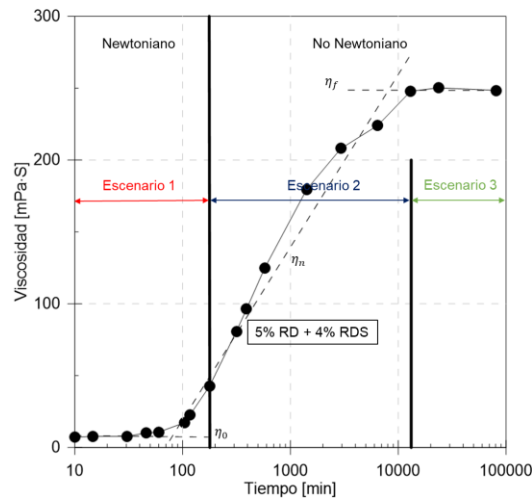


Figura 2-37: Ejemplo de curva de viscosidad versus tiempo de envejecimiento para suspensión de laponita con 5% RD 4% RDS (Shen, (2014)).

Shen, (2014) experimentó con distintas combinaciones de concentraciones de laponita RD, RDS y pirofosfato de sodio SPP, para encontrar la combinación óptima para mitigar la licuefacción en suelos granulares. En la Figura 2-38, se presenta que la combinación óptima es 5% de RD + 4% de RDS y 9% de RD + 7% de SPP.

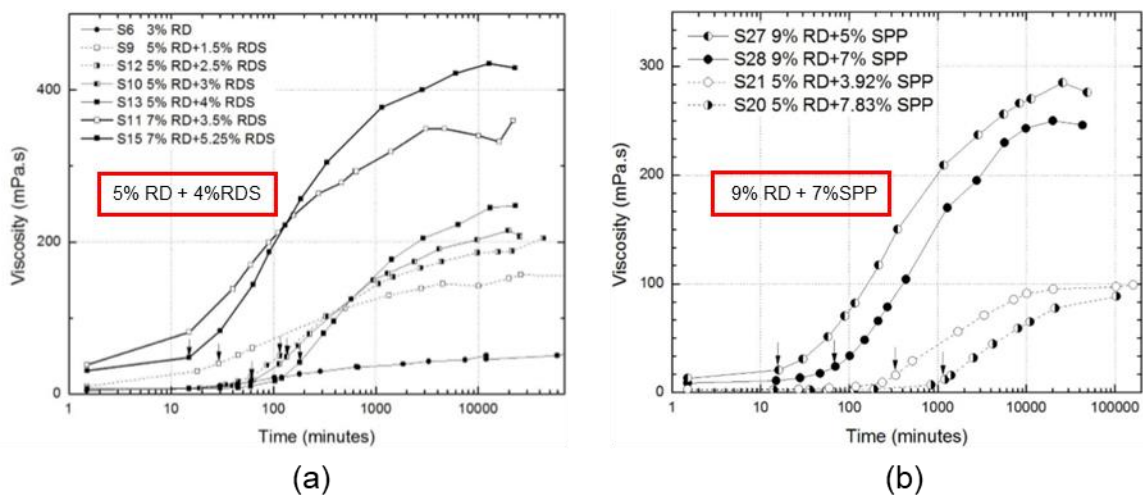


Figura 2-38: (a) Viscosidad en el tiempo para suspensiones con distintas combinaciones de concentraciones de RD Y RDS; (b) Viscosidad en el tiempo para suspensiones con distintas combinaciones de concentraciones de RD Y SPP (Shen, (2014)). En el cuadro rojo se indica la concentración ideal para cada aditivo.

## 2.4.2 Transición solución – gel/vidrio

En un material viscoelástico se acoplan los efectos elástico ( $G'$ ) y viscoso ( $G''$ ). Cuando se cumple que  $G' > G''$ , entonces el material tiene un comportamiento predominantemente elástico. En caso contrario, el comportamiento es viscoelástico. Cuando  $G' = G''$  se habla de una transición de solución a gel o de líquido a vidrio, esta situación se denomina módulo cruzado (El Howayek, (2011)).

### 2.4.2.1 Efecto de la concentración

La Figura 2-39 presenta la evolución del módulo cruzado, cuando aumenta la concentración de laponita, menor es el tiempo requerido para que ocurra la transición de sol – gel. A los 250 minutos el módulo cruzado confluye a un punto.

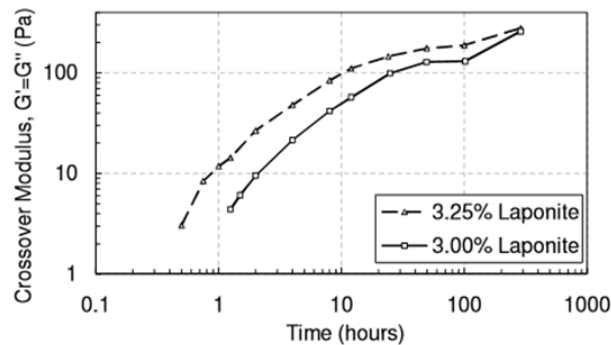


Figura 2-39: Módulo cruzado versus tiempo de envejecimiento para 3% y 3.25% de suspensión de laponita (El Howayek, (2011)).

### 2.4.2.2 Efecto del tiempo

La Figura 2-40 presenta la evolución tanto del módulo de almacenamiento  $G'$ , viscoso  $G''$  y el ángulo de desfase  $\delta$  en diferentes tiempos. En (a), 1 hora luego de haber sido mezclada, las curvas de  $G'$  y  $G''$  no alcanzan a cruzarse por lo que no se da el módulo cruzado. Además, el ángulo de desfase disminuye de  $75^\circ$  a  $60^\circ$ , es decir, la suspensión tiene la tendencia de comportarse como un fluido Newtoniano inicialmente y luego va variando su viscosidad.

En (b), luego de dos horas, ocurre el cruce de los módulos  $G'$  y  $G''$  además  $G' > G''$ , lo que da instancia a la gelificación. El ángulo de desfase disminuye de  $75^\circ$  a  $30^\circ$ , manteniéndose relativamente constante. Esto significa que el gel comienza a rigidizarse. En (c), luego de 4 horas, es efectivo el cruce de los módulos tal como en el caso anterior, con la diferencia que el módulo  $G'$  tiene una mayor magnitud. El módulo  $G''$  es algo menor y expresa un pequeño *peak*, además el ángulo de desfase alcanza un valor de  $5^\circ$ . En (d), luego de 12 horas, se acentúa lo observado en la parte (c), el ángulo de desfase prácticamente es 0, es decir, se comporta prácticamente como un material elástico.

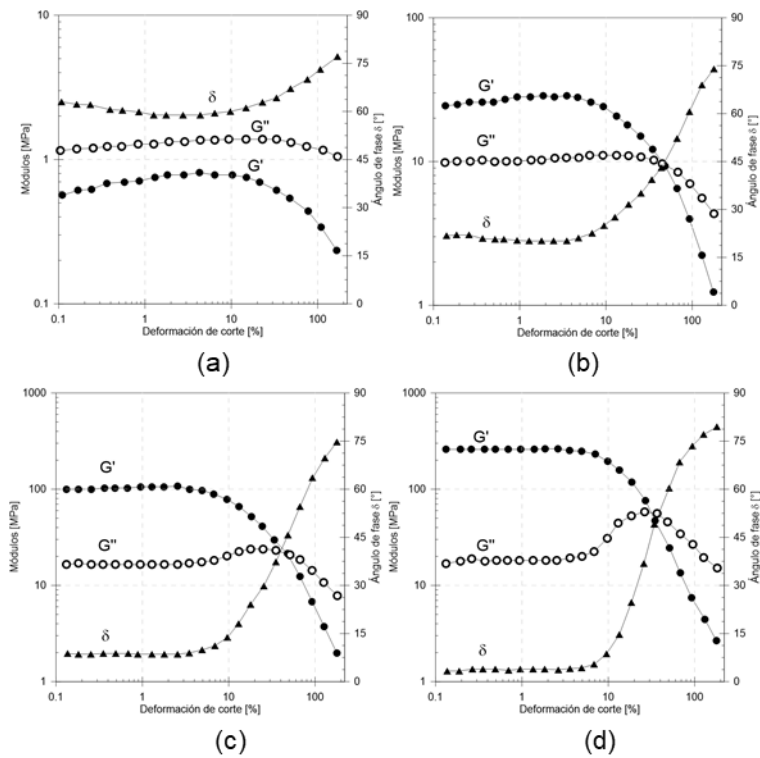


Figura 2-40: Módulos  $G'$  y  $G''$  para 3% de suspensión a distintos tiempos de envejecimiento (a) 1 hora, (b) 2 horas, (c) 4 horas y (d) 12 horas de haber sido mezclado (El Howayek, (2011)).

La Figura 2-41 presenta cómo el módulo cruzado aumenta con el tiempo de envejecimiento. Transcurrido el *peak*, el módulo cruzado disminuye. Esto sugiere que la estructura del gel se vuelve más frágil según El Howayek, (2011). Los tiempos de envejecimiento oscilan entre 2 horas y 12 días.

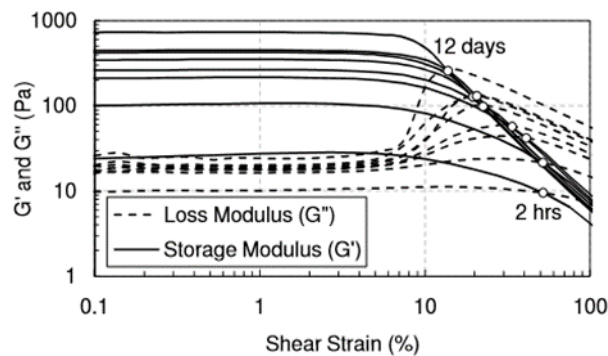


Figura 2-41: Módulos  $G'$  y  $G''$  versus la deformación de corte desde las 2 horas hasta 12 días, para suspensión de laponita al 3% (El Howayek, (2011)).

### 2.4.2.3 Efecto de la presión de almacenamiento

El Howayek, (2011) estudió el efecto de la presión de almacenamiento en las suspensiones de laponita. Su objetivo fue explorar en qué medida la presión intersticial que actúa en el medio (así como en el equipo triaxial durante las pruebas cíclicas) podría afectar el desarrollo de la estructura del gel y su respuesta al corte.

Para el estudio se prepararon dos suspensiones de laponita al 3% y se almacenaron a presión atmosférica y a 200 kPa, luego de nueve días se realizaron las pruebas reológicas. En la Figura 2-42 se interpreta que la presión de almacenamiento no influye en el desarrollo del módulo cruzado.

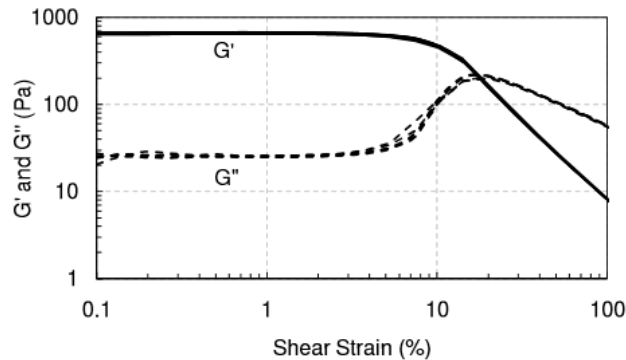


Figura 2-42: Módulo cruzado versus deformación de corte para una suspensión al 3% a diferentes presiones (El Howayek, (2011)).

### 2.4.3 Recuperación después del corte

La Figura 2-43 presenta la evolución del módulo de almacenamiento después de 5 y 10 minutos de aplicado corte. No se realizaron pruebas reológicas con períodos de descanso más extensos debido a la evaporación. El primer corte se aplicó después de 3 y 12 días luego de mezclada la solución.

A los 12 días se desarrolló un  $G'$  casi el doble del valor que a los 3 días. En (a) se observa que después de los 5 minutos de aplicado el corte se recupera alrededor de un 64% de  $G'$  y luego de los 10 minutos alrededor de un 79% de  $G'$ . En (b) se observa que después de los 5 minutos de aplicado el corte se recupera alrededor de un 47% de  $G'$  y luego de los 10 minutos alrededor de un 51% del  $G'$ . Estas observaciones sugieren que las suspensiones de laponita exhiben propiedades de "autocuración". Mientras más antiguas sean las suspensiones, más tardan en recuperarse en comparación con las más jóvenes (El Howayek, (2011)).

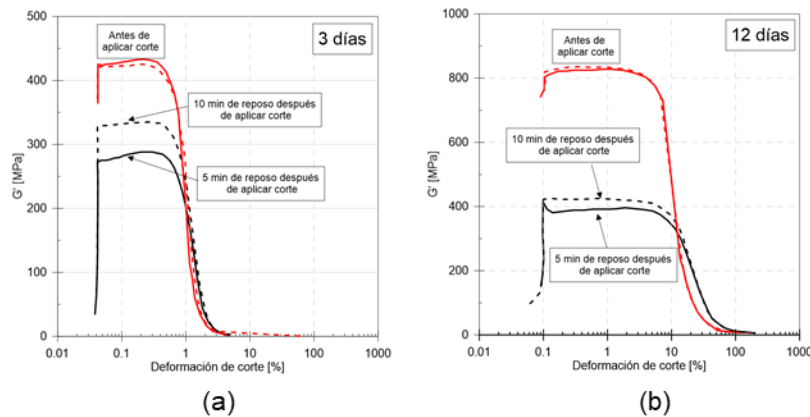


Figura 2-43: (a) Recuperación del esfuerzo después de 3 días; (b) Recuperación del esfuerzo después de 12 días, (El Howayek, (2011)).

## 2.5 Propiedades geotécnicas del gel

Wallace & Rutheford, (2015) realizaron pruebas para medir la resistencia al corte no drenado, la consolidación y la conductividad hidráulica en una suspensión de laponita.

### 2.5.1 Esfuerzo de corte

A través del ensayo de corte de veleta, se estudió el aumento de la resistencia al corte; en función del tiempo (tixotropía), a diferentes concentraciones de laponita y a distintas profundidades.

#### 2.5.1.1 Resistencia al corte en el tiempo (tixotropía)

Para el estudio de la tixotropía, se aplicó torque a una tasa constante de 90°/min. Las suspensiones se mezclaron en concentraciones de 4%, 4.25% y 4.5%. La mezcla se dejó reposar de 6 a 336 horas para que se consolidara con su peso propio, cuidando las condiciones de evaporación. Las pruebas se realizaron a 25 mm debajo de la superficie del gel.

En la Figura 2-44 y en la Tabla 2-14 se presentan el desarrollo de la resistencia del corte no drenado en función del tiempo para las diferentes muestras. Se evidencia un aumento en la resistencia máxima al corte no drenado ( $S_{u,peak,MV}$ ) en la medida que aumenta el tiempo en las diferentes muestras. Esto se puede correlacionar con la tixotropía de las suspensiones de laponita.

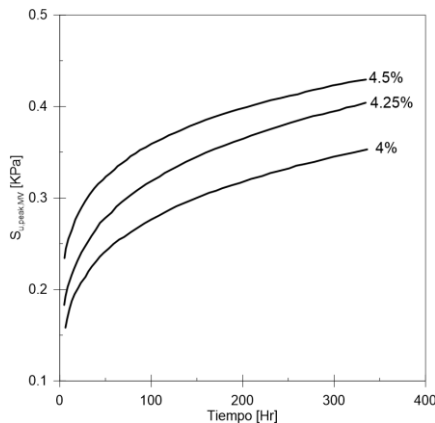


Figura 2-44: Tixotropía medida a través de ensayo de veleta (Wallace & Rutheford, (2015)).

Tabla 2-14:  $S_{u,peak,MV}$  para muestras al 4%, 4.25% y 4.5%.

Concentración [%]	$S_{u,peak,MV}$ (7 días) [kPa]	$S_{u,peak,MV}$ (14 días) [kPa]
4	0.3	0.36
4.25	0.34	0.4
4.5	0.4	0.42

Los resultados obtenidos por Wallace & Rutheford, (2015) se comparan con las relaciones encontradas experimentalmente en arcillas naturales por Bjrrum, (1972),  $S_u = 0.22\sigma_p'$ . Este valor se obtuvo mediante ensayos en arcillas naturales normalmente consolidadas y no se considera la plasticidad como parámetro de calibración. Considerando que el gel posee un peso unitario de 10 – 10.1 kN/m<sup>3</sup> y que no hay sobrecarga, a los 25 mm, la laponita no cumpliría con la expresión planteada.



La Figura 2-45 presenta los resultados de la resistencia al corte no drenado versus el ángulo de rotación, antes y después de la resistencia al corte no drenado máximo, en mezclas con concentraciones de 4%, 4.25% y 4.5%. La resistencia máxima ocurre entre 3.5° y 4.5° para todas las muestras.

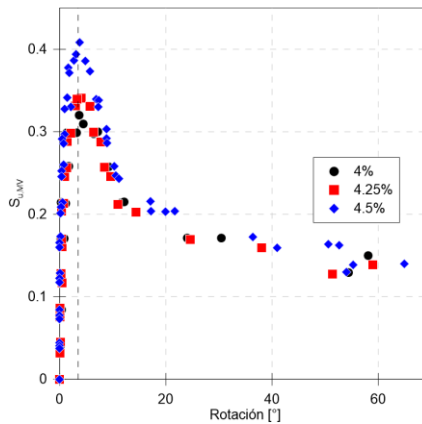


Figura 2-45: Corte no drenado versus la rotación de la veleta 4%, 4.25% y 4.5% (Wallace & Rutheford, (2015)).

Los valores obtenidos para la laponita son comparables con los obtenidos por otros autores en arcillas naturales; como por ejemplo, Roy & Leblanc, (1988) midieron 3° y 4° en la arcilla de Saint – Alban y Biscontin & Pestana, (2001) midieron 3° y 5° en el suelo de San Francisco.

### 2.5.1.2 Resistencia al corte a diferentes concentraciones

De la Figura 2-44 y Figura 2-45, se rescata que la resistencia del corte no drenado máximo aumenta en función de la concentración de laponita en la suspensión. Este resultado conversa con lo reportado en los estudios reológicos, ya que a medida que aumenta la concentración de laponita, aumenta la viscosidad de la suspensión.

### 2.5.1.3 Resistencia al corte con muestras consolidadas

La Figura 2-46 presenta un gráfico  $S_{u,MV}$  en función del índice de vacío en muestras con distintas concentraciones de laponita, con consolidación por peso propio y con sobrecarga. La sobrecarga se aplicó gracias al uso de papel filtro, una piedra porosa y pesos, en condiciones controladas de evaporación. Las sobrecargas se aplicaron un mínimo de 24 horas antes de analizar la muestra.

Se midió el contenido de agua en la zona donde se midió la resistencia al corte para *back* calcular la relación de vacíos ( $e$ ). Estos resultados muestran que la resistencia al corte aumentó debido a la consolidación producto de la sobrecarga aplicada. Esto se evidencia también con la disminución del índice de vacíos inicial.

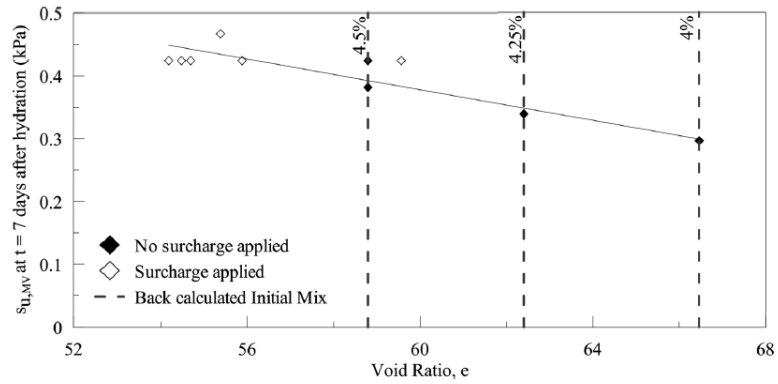


Figura 2-46:  $S_{u,peak,MV}$  medido 7 días después de la hidratación versus índice de vacío (Wallace & Rutheford, (2015)).

### 2.5.1.4 Resistencia al corte a diferentes profundidades

Para estudiar el efecto de la profundidad en la resistencia al corte, se realizaron ensayos a 25 mm y 87.5 mm por debajo de la superficie del gel. Las medidas se realizaron después de 7 días. En la Tabla 2-15 se explicita el valor de  $S_u$  medido a 25 mm y a 87.5 mm para mezclas de 4%, 4.25% y 4.5%. El resultado no presenta variación de acuerdo a la profundidad

Este resultado se le puede atribuir a que el proceso de formación de gel es dominante ya que la consolidación primaria por peso propio no ha finalizado. Evidencia de esto se presenta en la siguiente sección, en donde el valor de  $c_v$  es de 0.008 a 0.017  $m^2/año$ , por lo que el tiempo de la consolidación primaria es de aproximadamente 1.4 a 3 años para muestras de 145 mm de altura.

Tabla 2-15:  $S_{u,peak,MV}$  para muestras al 4%, 4.25% y 4.5% a distancia de 25 y 87.5 mm.

Concentración [%]	$S_{u,peak,MV}$ (7 días) [kPa]
4	0.3
4.25	0.34
4.5	0.38

### 2.5.1.5 Comparación de resistencia al corte con arcillas naturales

La Figura 2-47 presenta la resistencia al corte no drenado de diferentes arcillas, normalizadas por los resultados obtenidos con la veleta estándar. En la suspensión de laponita se genera un exceso de presión de poros durante la inserción de la veleta y se disipa durante el tiempo de retardo. Este fenómeno es comparable al de los suelos naturales. La relación  $S_{u,medido}/S_{u0}$  es más alta en la laponita que en los suelos naturales debido al aumento de resistencia que ocurre simultáneamente a la consolidación por peso propio, que a los 7 días de mezcla aún no se encuentra concluida.

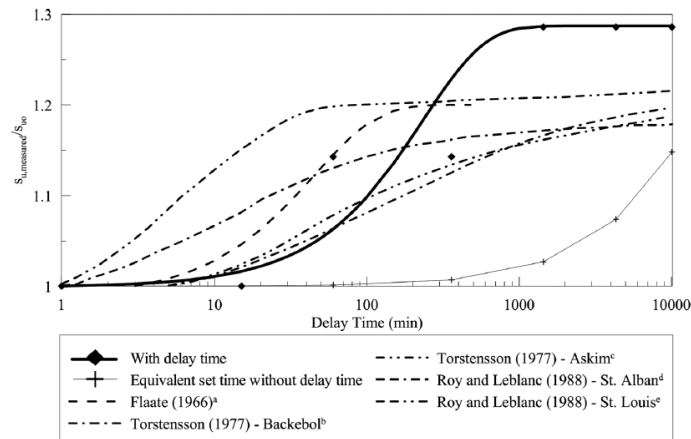


Figura 2-47: Efecto del tiempo de demora en la resistencia del corte no drenado para una mezcla de 4.5%, luego de 7 días de consolidación de peso propio (Wallace & Rutheford, (2015)).

### 2.5.2 Consolidación

Wallace & Rutheford, (2015) determinaron los parámetros de compresibilidad para mezclas con concentraciones de 4% y 4.5% de laponita, con pruebas de carga incremental (IL). Las mezclas se consolidaron por propio peso durante 7 días y los incrementos de carga fueron lo suficientemente largos como para poder construir las curvas  $e - \sigma_v'$  (Ver Figura 2-48).

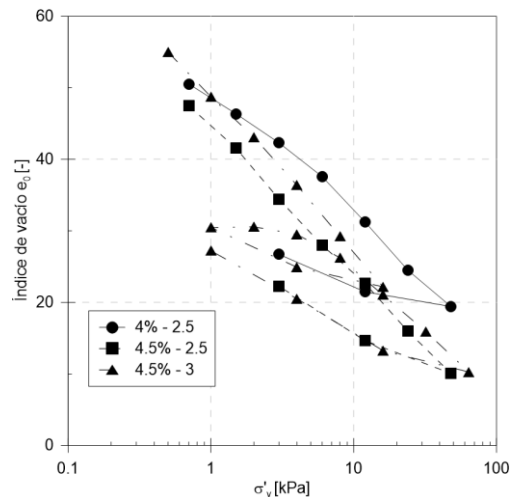


Figura 2-48: Curva  $e - \sigma_v'$  para muestras de 4%, 4.25% y 4.5% (Wallace & Rutheford, (2015)).

La Tabla 2-16 recopila parámetros de compresibilidad de las muestras estudiadas, donde se observan que los valores de  $c_v$  para las suspensiones de concentración de 4.5% son muy similares. Las diferencias pueden explicarse con los distintos índices de vacíos iniciales, o a los efectos de pre - consolidación, o bien, por la diferencia de incremento de carga dado por las de secciones de los anillos del equipo.

Los valores  $C_c$ ,  $C_s$  y  $C_\alpha$  son más bajos en la muestra 4.0-IL-2.5 en comparación con la muestra 4.5-IL-2.5, en cambio, el valor de  $c_v$  para la muestra 4.0-IL-2.5 es casi el doble del valor de la muestra 4.5-IL-2.5.

**Tabla 2-16: Parámetros de compresibilidad (Wallace & Rutheford, (2015)).**

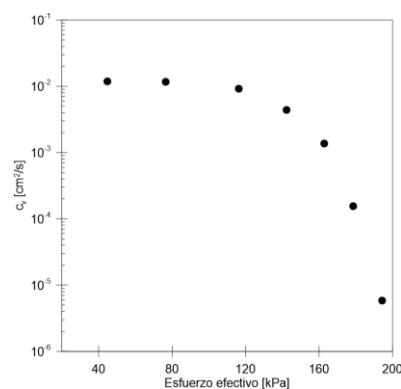
Parámetro	4-IL-2.5	4.5-IL-2.5	4.5-IL-3
$e_0$ [-]	67	56.5	55.5
$c_v$ (compresión) [m <sup>2</sup> /año]	0.017	0.008	0.01
$c_v$ (re - compresión) [m <sup>2</sup> /año]	-	-	0.02
$C_c$	16.6	20.4	20.6
$C_r$	-	-	9.4
$C_s$	6.3	10.1	8.1
$C_\alpha$	0.536	0.703	0.736
$C_r/C_c$	-	-	0.4
$C_\alpha/C_c$	0.04	0.034	0.033

La Tabla 2-17 presenta valores de  $c_v$  de diferentes arcillas naturales. La laponita posee valores particularmente bajos de  $c_v$ , muy similares a la montmorillonita sódica. Esto se puede atribuir a que el límite líquido de la laponita (Ver Tabla 2-10) es mucho más alto que el de una arcilla natural, incluso al de la montmorillonita sódica (LL=626%; LP=36; IP=590, Amarasinghe et al., (2011)).

La Figura 2-49 presenta el efecto que ejerce la carga aplicada en una montmorillonita sódica. A medida que el esfuerzo efectivo aumenta, el valor de  $c_v$  disminuye. Esto se corroboró también en la laponita al aplicársele diferentes cargas incrementales.

**Tabla 2-17: Rangos de  $c_v$  para distintos tipos de arcilla (Amarasinghe et al., (2011); Carter & Bentley, (1991)).**

Arcilla	$C_v$ [m <sup>2</sup> /año]
Arcilla Boston clay (CL)	12 ± 6
Limo orgánico (OH)	0.6 - 3
Glacial lake clays (CL)	2 - 2.7
Chicago silty clay (CL)	2.7
Swedish medium sensitive clays (CL-CH)	
1. Laboratorio	0.1 - 0.2
2. Terreno	0.2 - 1
San Francisco Bay mud (CL)	0.6 - 1.2
Mexico City clay (MH)	0.3 - 0.5
Na-Montmorillonita	0.016 - 3.15



**Figura 2-49:  $c_v$  versus esfuerzo efectivo montmorillonita sódica (Amarasinghe et al., (2011)).**

En arcillas naturales, se reporta que el valor del índice de compresión ( $C_c$ ) es entre 0.1 y 0.8 (Budhu, (2011)). También se ha reportado un valor de 0.884 para la montmorillonita sódica (Amarasinghe et al., (2011)). Dado lo anterior, todas las muestras de suspensiones de laponita poseen un  $C_c$  mucho mayor en comparación con las arcillas naturales. El coeficiente de re-compresión ( $C_r$ ) también está fuera de rango ya que las arcillas naturales poseen un valor entre 0.015 a 0.35 (Budhu, (2011)).

Si se analiza  $C_c$  con las correlaciones obtenidas por Terzaghi y Peck en 1967, ( $C_c = 0.009 \cdot (LL - 10)$ ), en función del límite líquido de la laponita, se puede comprobar que

los valores obtenidos experimentalmente de  $C_c$  para la suspensión de laponita están dentro del orden de magnitud esperado por la expresión.

Para arcillas naturales la razón  $C_\alpha/C_c$  está entre 0.03 a 0.08 (Budhu, (2011); Terzaghi et al., (1981)). Dicho esto, estos valores en las suspensiones de laponita se encuentran dentro de este rango. Finalmente, los parámetros de consolidación primaria y de compresión secundaria de la laponita son comparables con los de una arcilla natural.

### 2.5.3 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica de la laponita se determinó usando un permeámetro “*Falling head*” con un molde de pared rígida y con los datos de deformación versus tiempo de la prueba de consolidación de carga incremental descrito anteriormente. La mezcla se consolidó 7 días por peso propio y sobrecarga para obtener un rango de índice de vacíos más bajos. Los resultados se muestran en la Figura 2-50.

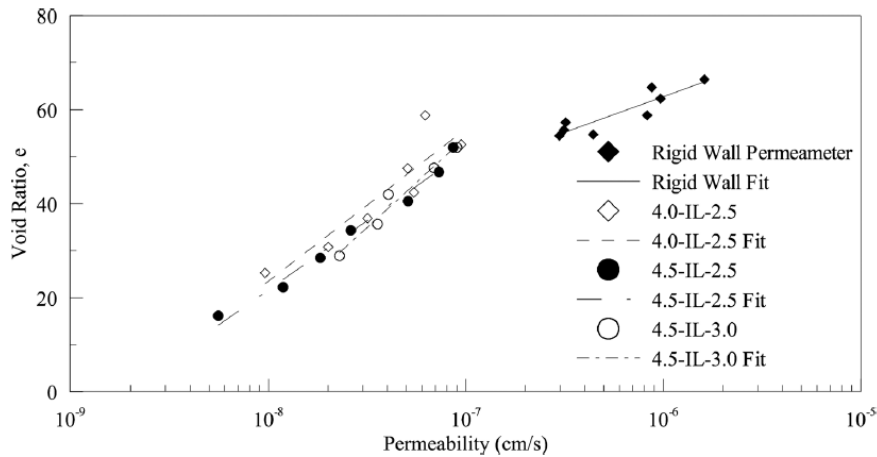


Figura 2-50:  $e$  versus  $k$  para permeámetro de pared rígida para 4%, 4.25% y 4.5% (Wallace & Rutheford, (2015)).

Los valores de la permeabilidad variaron de  $3 \cdot 10^{-7}$  cm/s a  $1.6 \cdot 10^{-6}$  cm/s y presentan una tendencia decreciente con relación al índice de vacíos. De acuerdo con la clasificación de las permeabilidades de Casagrande & Fandum, (1940), la laponita está dentro del rango prácticamente impermeable.

La Figura 2-51 reporta la permeabilidad versus índice de vacío de diferentes arcillas. Se puede extrapolar que la laponita se comporta más bien como una montmorillonita, pero con mayores índices de vacíos. Los altos índices de vacíos pueden atribuirse al alto límite líquido que posee la laponita, que al encontrarse saturada predomina el efecto repulsivo de la doble capa, manteniendo a las partículas lo suficientemente separadas para alcanzar índices de vacío sobre 50.

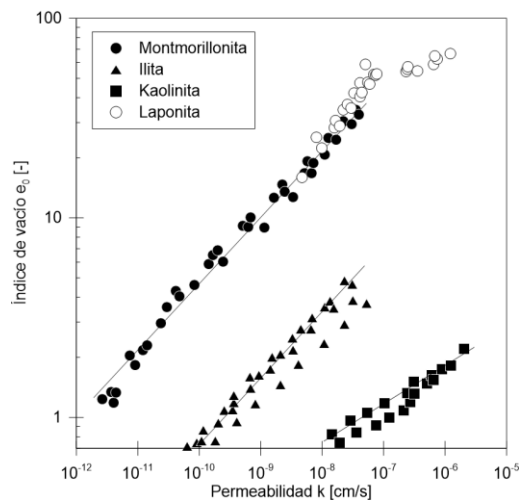


Figura 2-51: Permeabilidad de minerales de sodio en agua (Mesri & Olson, (1971); Wallace & Rutheford, (2015)).

## 2.6 Estudio de microestructuras de suelo con laponita

El Howayek, (2011) estudió la microestructura de probetas de arena Ottawa con laponita, permeadas y mezcladas en seco. Junto con lo anterior, estudió la conductividad hidráulica de ambos especímenes, para respaldar las observaciones obtenidas a través de Cryo – SEM. Luego, Ochoa, (2015) midió la resistencia cíclica al corte en cada espécimen, para evaluar el desempeño de la laponita como atenuante ante la licuefacción.

### 2.6.1 Permeación y *dry mix*

La preparación de las probetas es diferente dependiendo si esta se va a permear o si se mezclará en seco. Ambos especímenes poseen aproximadamente la misma cantidad de laponita. En la permeación se tiene un 3% de concentración en masa de agua y en *dry mix* alrededor de 1% en masa de arena. Las imágenes obtenidas de los especímenes se obtuvieron a través de un Cryo – SEM.

En los especímenes *dry mix* (Ver Figura 2-52), se observaron espacios vacíos en los poros y regiones con alta concentración de laponita. La laponita se une a las partículas de arena por dos razones, cuando está en seco. Se cree que es porque la laponita no puede flotar en el vacío debido a las fuerzas gravitacionales y por las cargas electrostáticas desarrolladas durante el proceso de mezcla en seco, que causan atracción entre la laponita y la arena.

Cuando se hidrata el espécimen, ocurre la gelificación en las zonas de contacto y superficie. Esto conducirá a diferencias en la concentración del gel de laponita, que será mayor cerca de los contactos y las superficies; y menor en el centro de los poros.

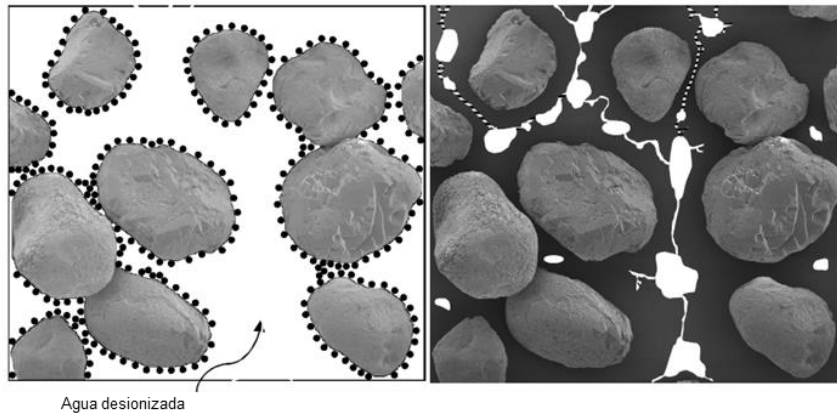


Figura 2-52: Esquemización de la microestructura de DM en compuestos de arena con laponita (a) antes de humectar la muestra y (b) con el agua desionizada (El Howayek, (2011)).

Los especímenes permeados (Ver Figura 2-53) poseen los espacios intersticiales completamente cubiertos por la suspensión de laponita. La suspensión es menos concentrada y se encuentra uniformemente distribuida entre los espacios de las partículas de arena, sin dejar vacíos.

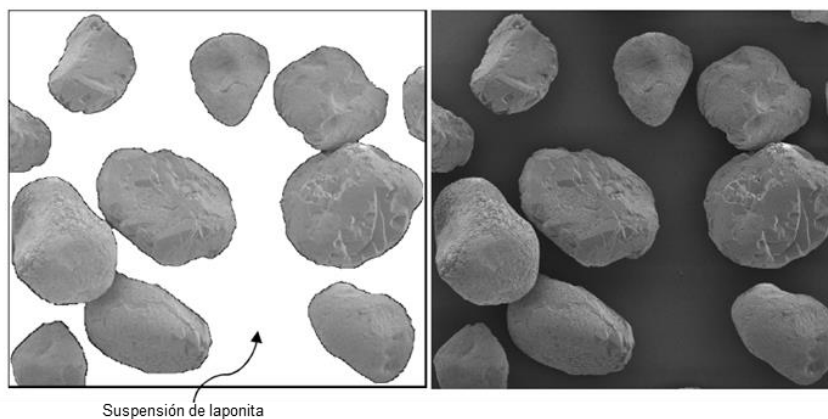


Figura 2-53: Esquemización de la microestructura de arena permeada (a) antes y (b) después de la permeación (El Howayek, (2011)).

## 2.6.2 Medición de conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica de los especímenes se midió utilizando un permeámetro “*Falling head*” con molde de pared rígida. Se realizaron mediciones a la arena Ottawa como línea base, espécimen *dry mix* (1% peso de arena) y espécimen permeado con laponita (3% masa de agua). Para ello se tomaron las precauciones de evitar la licuefacción y la obstrucción de las piedras dada la presencia de laponita.

La Figura 2-54 (a) presenta que tanto las curvas de los especímenes permeados como los de *dry mix* se disponen bajo la curva de permeabilidad de la arena limpia. Esto se debe a la presencia de la laponita en la matriz de arena que cubre los espacios entre las partículas. Junto con lo anterior, las mezclas permeadas son aproximadamente un orden de magnitud menor que la muestras *dry mix*.

El análisis del flujo de agua dentro de los especímenes es diferente de acuerdo con la preparación de la probeta. Cuando se hidrata el espécimen *dry mix*, ocurre la gelificación en las zonas de contacto y en la superficie de las partículas de arena. Esto conducirá a diferencias en la concentración del gel, esta será mayor cerca de los contactos y las superficies; y menor en el centro de los poros. Esto dista de cómo fluye el agua en un espécimen permeado, ya que la homogeneidad en la concentración del gel no permite que el agua fluya con facilidad.

En la medida que transcurre el tiempo, los especímenes *dry mix* se vuelven más impermeables dado que se desarrollan las propiedades reológicas de la suspensión. Entre las 20 y 30 horas se muestra un gran salto de la conductividad hidráulica, esto podría asociarse al cambio de fase. En cambio, las suspensiones permeadas ya se encuentran en fase gel. Las muestras permeadas presentan una conductividad hidráulica mucho menor que las *dry mix* dada esta situación.

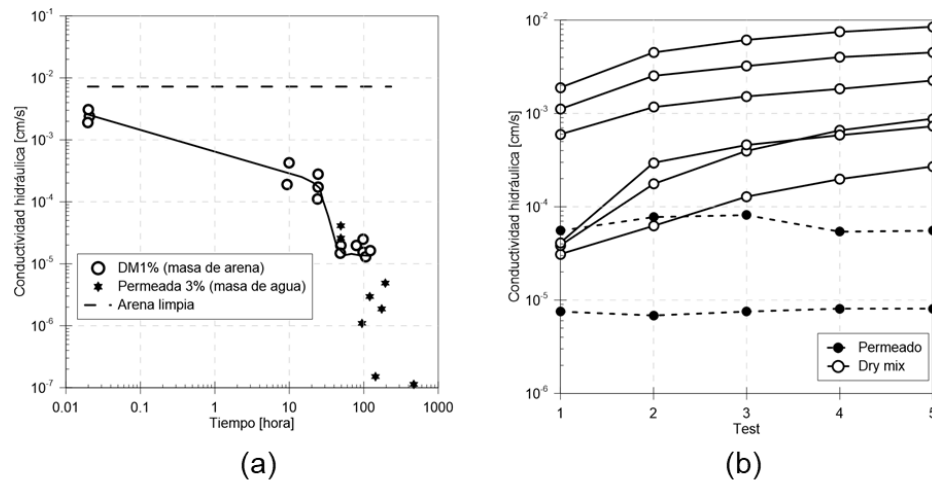


Figura 2-54: (a) Conductividad hidráulica versus tiempo de envejecimiento para muestras *dry mix* y permeada (El Howayek, (2011)); (b) Conductividad hidráulica medida en la misma muestra en 5 oportunidades (El Howayek, (2011)).

La Figura 2-54 (b) ilustra la evolución de los especímenes permeados y *dry mix* al realizarse ensayos de permeabilidad repetidamente. Para los especímenes permeados se observa que la conductividad hidráulica se mantiene casi constante. En cambio, en los especímenes *dry mix*, la conductividad hidráulica aumenta en la medida que se realizan las pruebas. Esto se debe a que se rompen las barreras entre los huecos, creando canales preferenciales de flujo que aumentan la conductividad hidráulica del sistema en la medida que se sigue permeando el agua.

### 2.6.3 Resistencia al corte cíclico

Además de los ensayos de permeabilidad en los especímenes permeados y *dry mix* se estudió la resistencia cíclica al corte (Ochoa, (2015)). La mayor resistencia se obtuvo en especímenes *dry mix*. Este resultado se podría explicar por la unión proporcionada por el gel de laponita en las regiones de alta concentración, es decir, en la superficie y en los contactos de las partículas de arena.



Los antecedentes de los ensayos de conductividad hidráulica y las imágenes del *cryo*-SEM, entregan la intuición que la presencia de zonas pobres en laponita en los especímenes *dry mix*, pueden representar un plano de debilidad en donde la licuación es más propensa a ocurrir. Sin embargo, esto no ocurre y se le puede atribuir al efecto que tiene la concentración en las suspensiones de laponita en la resistencia al corte, a medida que mayor es la concentración de la laponita mayor es la resistencia al corte.

## 2.7 Potenciales aplicaciones de la laponita en la ingeniería civil

### 2.7.1 Mitigación de la licuefacción

La atenuación a la licuefacción en suelos granulares a través de la adición de finos plásticos ha sido estudiado ampliamente por diferentes autores. En esta revisión se presentará el trabajo de cuatro autores distintos, con cuatro suelos y metodologías experimentales diferentes. Los aspectos principales se resumen en la Tabla 2-18.

La Figura 2-55 presenta las mejoras de diferentes suelos ante una sollicitación de corte cíclico. De estos resultados se puede concluir que el uso de laponita puede ser un potencial mejoramiento de suelo como atenuante de la licuefacción, tal como lo es la bentonita, pero mucho más eficiente y sin necesidad de requerir activadores reológicos.

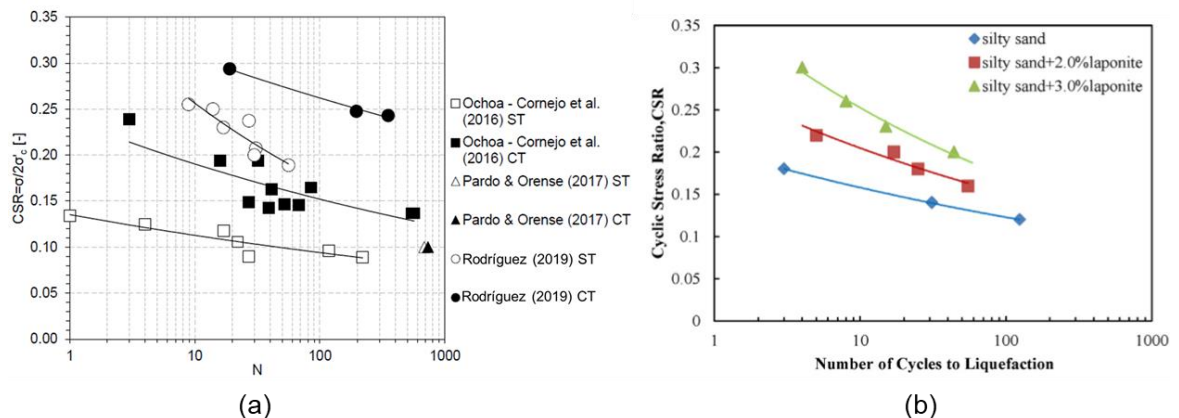


Figura 2-55: (a) Resultados de la resistencia cíclica (CSR) versus el número de ciclos en que se logra la licuación para distintos estudios con laponita, ST: Sin tratamiento, CT: Con tratamiento (Rodríguez, (2019)); (b) CSR versus número de ciclos en que se logra la licuación (Y. Huang & Wang, (2016)).

Tabla 2-18: Resumen de trabajos realizados para atenuación de la licuefacción.

Autor/es	Tipo de suelo	Ensayo	Concentración
Ochoa, (2015)	Arena de Ottawa	Triaxial cíclico no drenado	1% masa de arena
Y. Huang & Wang, (2016)	Arena limosa de Shangai	Triaxial cíclico no drenado	2% y 3% masa de arena
Pardo Tobar & Orense, (2017)	Arena Mercer	Corte simple cíclico	1% masa de arena
Rodríguez, (2019)	Arena de relave "El Torito"	Triaxial cíclico no drenado	1% masa de arena

### **2.7.2 Modelos a escala**

Los deslizamientos de tierra submarinos pueden representar un peligro significativo para las instalaciones submarinas, tuberías y cables, e incluso para las poblaciones costeras cercanas a través de la generación de tsunamis. Es por esta razón que se debe estudiar la estabilidad de estas estructuras. Gidley & Grozic, (2008) y Yang et al., (2018) modelaron este problema en softwares de elementos finitos y en modelos a escala. En los modelos a escala, el suelo de fundación se simuló con laponita RD, ya que al ser un suelo transparente es más sencillo estudiar las deformaciones o el mecanismo de penetración de los gases desde la base.

Además de la modelación de suelos submarinos, la laponita se puede usar para modelar un suelo blando de fundación. En particular, para estudiar la interacción suelo estructura en el caso de fundaciones superficiales o profundas y para estudiar el comportamiento hidráulico, ya sea saturado o no saturado de un suelo blando (Iskander, (2018)).

### **2.7.3 Mejoramiento al cemento**

La segregación en las suspensiones de cemento tiene un impacto perjudicial en el desempeño de aislamiento térmico a lo largo de una probeta de hormigón. Es por esto que Elkatatny, (2019) propuso a la laponita RD como aditivo conglomerante para reducir la segregación en el hormigón y tener muestras más homogéneas en términos de densidad a lo largo de la probeta. Para corroborar las mejoras, en este estudio se realizaron tomografías computarizadas (TC), pruebas de permeabilidad y de resistencia a la compresión.

### **2.7.4 Excavaciones**

En excavaciones profundas, las altas temperaturas son un gran problema para el desempeño de fluidos de perforación. Huang et al., (2019) probó que la adición de laponita mejora significativamente el desempeño de los fluidos de perforación a altas temperaturas ya que se supera el problema de la degradación de los polímeros presentes (Figura 2-56 (a)) y la disminución de la viscosidad (Figura 2-56 (b)).

Otro problema que surge con los fluidos de perforación es cuando éstos son a base de agua ya que producen efectos colaterales en materiales rocosos porosos. Las principales complicaciones pueden ser: sedimentación, absorción de agua y atascamiento de la tubería de perforación. Para solucionar estos problemas, Liu et al., (2017) demostró que la laponita puede actuar como un aditivo multifuncional, el cual se puede controlar reológicamente y puede permearse en nano-grietas; y con esto disminuir su adherencia a la tubería de perforación.

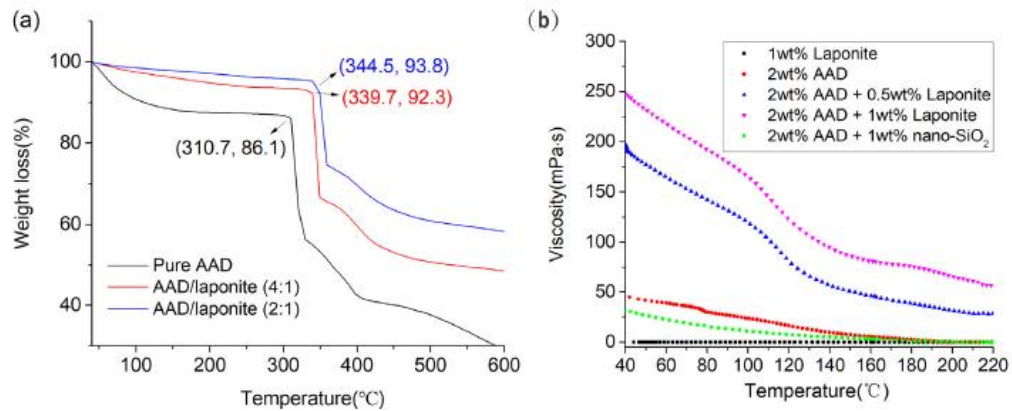


Figura 2-56: (a) Comparación de Termograma de pérdida de masa del fluido de perforación con y sin laponita con el aumento de la temperatura (b) Influencia en la viscosidad del fluido de perforación al adicionar laponita (Huang et al., (2019)).

## 2.7.5 Fabricación de ladrillos

Las propiedades de la laponita también se han puesto a prueba en ramas arquitectónicas de la restauración. Scalisi, (2014); Scalisi & Sposito, (2017) estudiaron cómo la laponita mejora la resistencia en ladrillos de adobe. Para ello se comparó el desempeño de ladrillos de adobe versus ladrillos de adobe con laponita, obteniéndose una mejora de un 30% tanto en la compresión mecánica como en la resistencia a la flexión.

## 2.7.6 Ahorro de agua en la minería: Uso de agua de mar

Dada la importante demanda que tiene el cobre, junto con otros minerales metálicos, es que se han estudiado y optimizado las metodologías de reciclaje del agua. Junto con lo anterior, se ha evaluado la utilización de agua de mar con ayuda de desalinizadoras como innovación en los procesos mineros. La inminente sequía que ha azotado estos últimos años al planeta es un nuevo desafío en la ingeniería, que ha cambiado el paradigma del uso del agua.

La floculación es una etapa en la cual se separa el sulfuro de cobre (material hidrofóbico) de los sólidos sin sulfuros o relaves (hidrofílicos). La bentonita realiza esta labor, dada su gran superficie específica que le otorga gran capacidad de adsorción. Junto con lo anterior, se ha estudiado lo beneficioso que es su uso en agua de mar (en condiciones de pH controladas) (Y. Li et al., (2019)) por sobre el agua dulce.

La adsorción es un método efectivo y económico para tratar metales pesados y contaminantes orgánicos en aguas residuales y entrega efluentes de alta calidad (Y. Li et al., (2019)). Esto podría significar la independización de una planta desalinizadora para realizar este proceso minero, ya que los altos contenidos de sales resultan beneficiosos para los procesos (Y. Li et al., (2019)). Dados los antecedentes anteriores, se sugiere que la laponita puede suplir a la bentonita en este proceso, ya que sus propiedades físico – químicas la caracterizan como un material apto para este proceso, dada su alta superficie específica y pureza.

## CAPÍTULO 3: PROGRAMA EXPERIMENTAL FÍSICO - QUÍMICO

### 3.1 Descripción de los materiales

Para la caracterización físico – química se utilizó únicamente laponita RD, adquirida en la empresa ByK Additives & Instruments. Las propiedades de fábrica de este material se presentan en la Tabla 2-2.

### 3.2 Equipos utilizados

#### 3.2.1 Granulometría

La distribución granulométrica de la laponita en seco se determinó en el Laboratorio de Granulometría del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Para tamizar la muestra se utilizó un tamizador marca Tyler Ro Tap modelo RX-29 (Figura 3-1 (a)). Para limpiar las cribas se utilizó un compresor de aire de 50 L y 2,5 HP (Figura 3-1 (b)), modelo Qualitas USA y para pesar lo retenido en cada malla se utilizó una balanza con una precisión de  $d = 0,01$  g, marca Satorius, modelo TE 412.



(a)



(b)

Figura 3-1: Equipos utilizadas en el proceso de tamizaje (a) Agitador con tamices, (b) Compresor de aire.

#### 3.2.2 Humedad

Para la medición de humedad se ocuparon dos equipos del Laboratorio de Materiales Funcionales a Nanoescala ubicado en el Departamento de Ingeniería Química, Biotecnología y Materiales de la Universidad de Chile. Los equipos se presentan en la Figura 3-2, los cuales corresponden a un horno de secado al vacío, marca LabTech modelo LVO2051p y una balanza de precisión y analítica marca Kern modelo ABT 120-5DNM respectivamente.



(a)



(b)

Figura 3-2: (a) Horno de secado al vacío, (b) Balanza de precisión y analítica.

### 3.2.3 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopía de infrarrojos por Transformada de Fourier (FTIR), es utilizada principalmente para identificar materiales desconocidos, estudiar su calidad, consistencia y determinar la cantidad de elementos químicos que se encuentran presentes en una mezcla (Thermo Scientific, (2013)).

La técnica consiste en irradiar al material con una luz infrarroja, la cual posee un rango conocido de número de onda (rango medio entre  $400$  y  $4000\text{ cm}^{-1}$ ). Dependiendo de las propiedades del material, será cómo interactúa la luz en presencia de éste. Es decir, una parte de la luz emitida puede ser absorbida por el material y el resto transmitida. Este fenómeno es único para cada material. El equipo emite luz infrarroja a través de una fuente, ésta llega a un prisma o divisor de haz y la difracta en dos haces ópticos. Un haz se refleja en un espejo plano y fijo, y el otro en un espejo plano y móvil. Estos haces se vuelven a combinar cuando se encuentran en el divisor de haz, en una señal denominada interferograma. Esta señal no puede interpretarse por sí sola, debe decodificarse a través de la transformada de Fourier (Ver Figura 3-3).

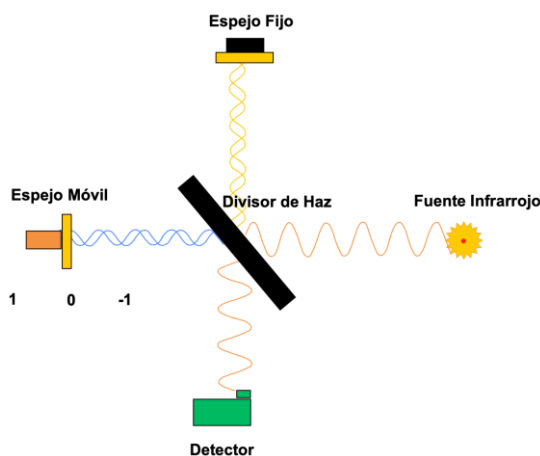


Figura 3-3: Esquema de funcionamiento del equipo de FTIR para la identificación de un material.

El equipo de FTIR puede medir en cuatro modalidades; transmisión, reflexión total atenuada, reflexión especular y reflectancia difusa. La elección del modo queda definido por el operador según el tipo de muestra. Para el caso de la laponita en forma de polvo es más adecuado utilizar la modalidad reflexión total atenuada (ATR) (Ver Figura 3-4). En esta modalidad se ocupa un prisma con alto índice de refracción. De esta manera el material transmisor de infrarrojos puede reflejarse totalmente de forma interna, creando una onda evanescente que se extiende más allá de la superficie del cristal hasta la muestra que está en contacto.

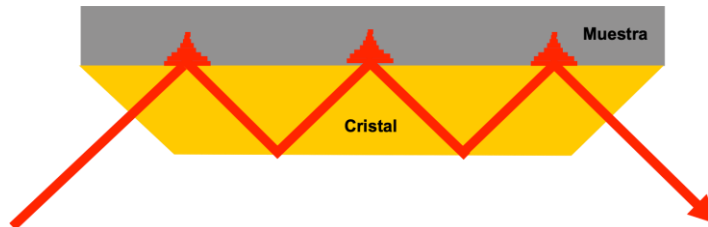


Figura 3-4: Esquemmatización de la medición en modo ATR.

Los datos pueden presentarse en absorbancia o transmitancia. Con ayuda de la ley de Beer – Lambert se puede expresar la absorbancia, relacionando la intensidad de la luz entrante en el cristal con el saliente con las expresiones (VI) y (VII).

$$A = -\log_{10} \frac{I_1}{I_0} \quad (\text{VI})$$

$$A = \log_{10} \frac{1}{T} \quad (\text{VII})$$

donde;  $I_0$  y  $I_1$  corresponden a la intensidad de la luz entrante y saliente respectivamente,  $A$  corresponde a la absorbancia y  $T$  a la transmitancia. Al obtener los datos, con el software (OMNIC) se les realizan dos correcciones, por línea base y una normalización.

Las mediciones se realizaron en el Laboratorio de Caracterización de Materiales del Departamento de Ingeniería Química, Biotecnología y Materiales de la Universidad de Chile. El equipo (Figura 3-5) corresponde a la marca TermoFischer Scientific Modelo Nicolet iS10.



Figura 3-5: Equipo para medición de FTIR.

### 3.2.4 Análisis Termogravimétrico (TGA)

En el análisis termogravimétrico se registra continuamente la masa de una muestra colocada en una atmósfera controlada. Las variables que se controlan es la temperatura y la tasa de incremento de temperatura en función del tiempo. La representación de la masa o del porcentaje de masa en función del tiempo se denomina termograma o curva de descomposición térmica (Skoog & Crouch, (2008)).

Un análisis termogravimétrico es usado principalmente para caracterizar el estado de hidratación de algunos materiales y para estudiar su estabilidad térmica a altas temperaturas (El Howayek, (2011)). El equipo que lo realiza consiste en; una microbalanza altamente sensible (termobalanza), un horno, un sistema de gas de purga para proporcionar una atmósfera inerte/reactiva, un sistema computarizado para el control del instrumento, la adquisición y el procesamiento de datos.

Las mediciones termogravimétricas se realizaron en el Laboratorio de Caracterización de los Materiales del Departamento de Ingeniería Química, Biotecnología y Materiales de la Universidad de Chile. El equipo se presenta en la Figura 3-6 y corresponde a la marca TA modelo Q50.



Figura 3-6: Equipo análisis termogravimétrico.

### 3.2.5 Difracción de Rayos X en polvo (XRD)

La estructura cristalina de una sustancia se determina usando la difracción de rayos X. El uso de esta técnica es significativa sólo cuando la longitud de onda de la radiación es muy similar a las dimensiones del objeto que se irradia (Tilley, (2004)b). Es decir, para poder aprovechar esta técnica de forma completa se debe trabajar con moléculas con tamaños de orden de magnitud similar a la longitud de onda de la radiación.

La teoría tras esta técnica consiste en irradiar una muestra con rayos X y dependiendo de las características de ésta, será cómo se difractará la señal. Cada sustancia posee un patrón de difracción característico y único. Al registrar las posiciones de los haces difractados, se traza la red recíproca de un cristal. Las intensidades de los haces son en

función de la disposición de los átomos en el espacio y de algunas otras propiedades atómicas, especialmente el número atómico. Por lo tanto, si se registran las posiciones y las intensidades de los haces difractados, es posible deducir la disposición de los átomos en el cristal y su naturaleza química (Tilley, (2004)a).

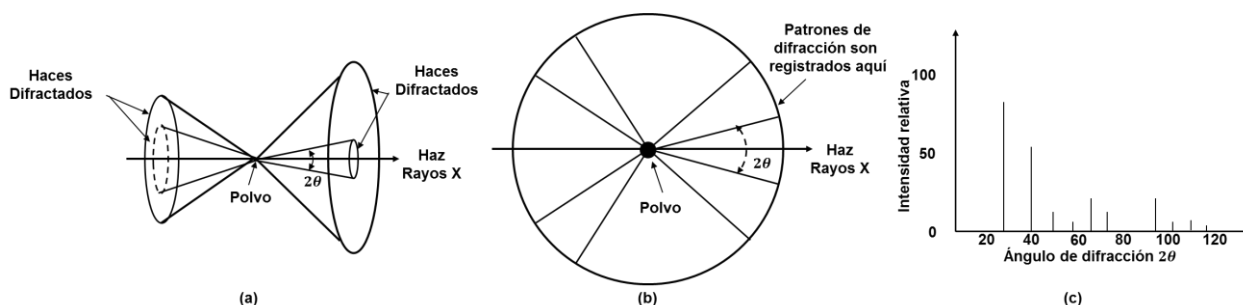
La posición de los haces difractados viene dada por la ley de Bragg.

$$\lambda = 2 \cdot d_{hkl} \cdot \sin (\theta) \quad \text{(VIII)}$$

donde;  $d_{hkl}$  es la separación de los planos de átomos que son responsables de la difracción,  $\lambda$  es la longitud de onda de los rayos X y  $\theta$  es la mitad del ángulo entre el haz de rayos X difractado y refractado.

Esta técnica permite medir en dos modalidades; en cristal unitario y en polvo. En este trabajo las mediciones se realizarán con muestras en polvo debido a la dificultad que se presenta en separar un cristal único en una muestra de laponita. Otro inconveniente es que cualquier alteración que tenga dicho cristal puede provocar una considerable variación en los resultados.

Cuando la muestra se mide en modalidad polvo, su patrón de difracción da lugar a una serie de conos en lugar de puntos, porque cada plano en el cristal puede tener cualquier orientación (Figura 3-7 (a)). Las posiciones e intensidades de los haces difractados se registran a lo largo de una franja estrecha (Figura 3-7 (b)), y los haces difractados a menudo son líneas (Figura 3-7 (c)). Se encuentra que la posición de un haz difractado depende sólo del espacio  $d_{hkl}$  y la longitud de onda de los rayos X, estos parámetros se relacionan con la Ley de Bragg (Ecuación VIII).



**Figura 3-7: Difracción de rayos x en polvo, (a) haz de rayos x que incide sobre un polvo, (b) intensidades y posiciones de los haces difractados se registran en un círculo, (c) Patrón de difracción de una sustancia.**

Las mediciones de difracción de rayos X se realizaron en el Laboratorio de Cristalografía y Difracción de Rayos X del Departamento de Física de la Universidad de Chile. El ánodo del tubo de Rayos X que utiliza es de cobre (Cu), con longitud de onda (Cu K) de 1,5406 Å.



### 3.2.6 Microscopio electrónico de barrido (SEM) acoplado con espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS)

La resolución de la microscopía clásica está limitada por los efectos de difracción respecto a la longitud de onda de la luz (0.2 micrómetros). Es por esto que la microscopía electrónica de barrido proporciona una solución para observar las partículas de pequeña escala, en un rango entre los 3 y 20 nanómetros. Esta técnica produce imágenes de la morfología externa de una sustancia, similares a las que se ven con el ojo humano (Skoog & Crouch, (2008)). La Figura 3-8 presenta un esquema del equipo de un microscopio electrónico de barrido o SEM.

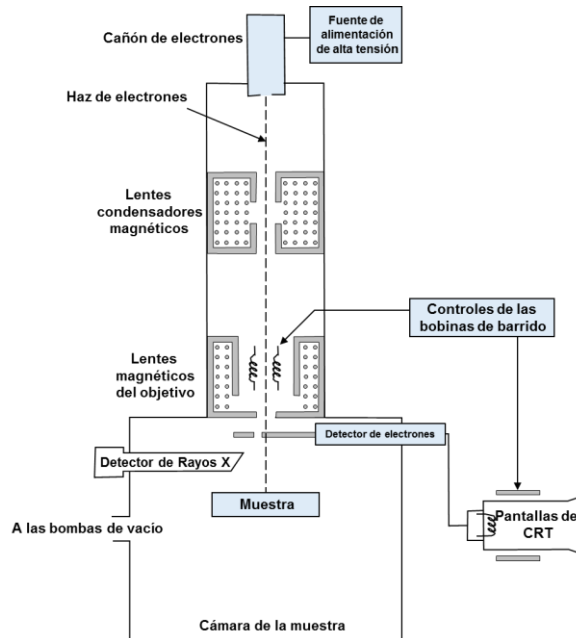


Figura 3-8: Esquema de un microscopio electrónico de barrido equipado con sistemas de detección de electrones y de rayos X.

Para obtener una imagen por microscopía electrónica de barrido, se enfoca un haz de electrones muy fino sobre la superficie de la muestra sólida. Con instrumentos análogos, el haz de electrones recorre la muestra en un barrido de trama mediante bobinas de barrido. El patrón de barrido de trama resultantes es similar al que se usa en el tubo de rayos catódicos de un televisor (CTR), en el cual el haz de electrones barre la superficie en línea recta en la dirección x; luego vuelve a la posición inicial y se desplaza hacia abajo en la dirección y. Este proceso se repite hasta que el área desea de la superficie ha sido escaneada exitosamente (Skoog & Crouch, (2008)).

Además de conocer la morfología de una superficie, con el microscopio también se puede analizar la composición química de la sustancia en estudio. Los analizadores de microsonda de electrones son instrumentos hechos específicamente para el análisis de rayos X. Con la microsonda de electrones se estimula la emisión de rayos X de la superficie de la muestra al enfocar el haz fino de electrones en ella y se produce la emisión de rayos X. Esta emisión es detectada y analizada con un espectrómetro dispersivo de longitud de onda o de energía (Skoog & Crouch, (2008)).

En este estudio, estos análisis se realizaron en el Laboratorio de Microscopía Electrónica y Microanálisis del Departamento de Geología de la Universidad de Chile (Ver Figura 3-9).

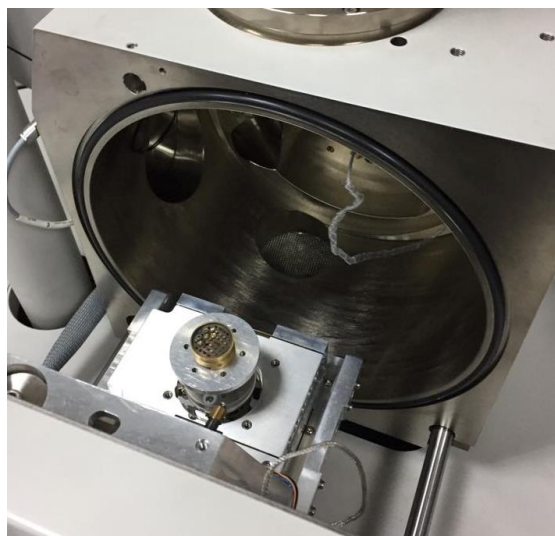


Figura 3-9: Fotografía del equipo SEM.

### 3.2.7 Medición de Superficie Específica

La superficie específica es compleja de medir en una nanopartícula, ya que existe dificultad de acceder a los espacios intersticiales. Es por esto que se debe elegir una técnica que trabaje a escala molecular, tal como lo hace la metodología de Brunauer – Emmett – Teller o BET que se emplea para medir superficie específica de arcillas y otras sustancias.

La metodología BET consiste en inyectar nitrógeno gaseoso,  $N_2$ , a diferentes presiones. El área de la sección transversal de la molécula de nitrógeno ( $N_2$ ) es de aproximadamente  $16.2 \text{ \AA}^2$ , la que es suficientemente pequeña para penetrar los poros de la laponita tal como se muestra en la Figura 3-10. A continuación, se describirá su método de cálculo luego de obtenida la isoterma:

- La arcilla es desgasificada, pesada en un tubo de muestra y enfriado a 77 K.
- El gas ( $N_2$ ) es introducido y adsorbido.
- Se utilizan relaciones progresivas de  $P/P_0$  del nitrógeno (en los métodos volumétricos). Para las arcillas se usan razones 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 y 0.25.
- Transductores miden los cambios de presión y permiten el cálculo de los volúmenes de gas.

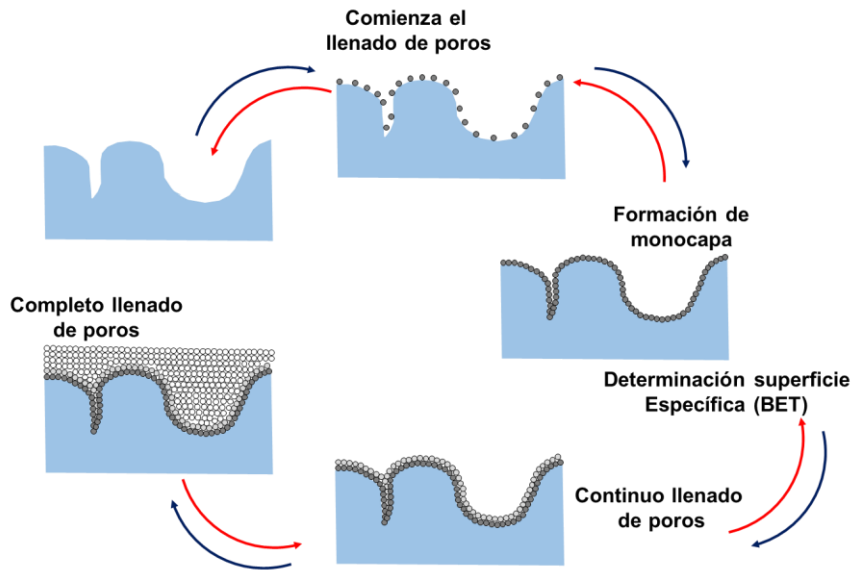


Figura 3-10: Esquema de proceso de adsorción (azul) y desorción (rojo) de  $N_2$ .

Preliminarmente, para calcular la superficie específica se tienen las siguientes expresiones:

$$\frac{P}{V_a \cdot (P_o - P)} = \frac{1}{V_m \cdot C} + \frac{C - 1}{V_m \cdot C} \cdot \frac{P}{P_o} \quad (IX)$$

$$C = \frac{m}{n} + 1 \quad (X)$$

$$V_m = \frac{1}{C \cdot n} \quad (XI)$$

$$SSA = \frac{v_m \cdot n_A \cdot A_{N_2}}{PM_{N_2}} \quad (XII)$$

en donde;  $P$  [Pa] es la presión parcial de vapor de gas absorbido en equilibrio con la superficie a 77 K,  $P_o$  [Pa] es la presión saturada de gas adsorbido,  $V_m$  [ml] es el volumen de gas absorbido a condiciones estándares (273.15 K y presión atmosférica) para producir una aparente monocapa sobre la superficie de la muestra,  $V_a$  [ml] el volumen de gas absorbido a temperatura y presión estándar,  $C$  [-] es una constante adimensional que está relacionado con la entalpía de absorción del gas absorbido en la muestra de arcilla,  $m$  es la pendiente del arreglo lineal,  $n$  es la intersección de recta de arreglo lineal,  $n_A$  es el número de Avogadro y  $A_{N_2}$  [m<sup>2</sup>] es el área de la molécula de  $N_2$ .

La medición de la superficie específica de la laponita se realizó en el Laboratorio de Catálisis y Energía del Departamento de Ingeniería Química, Biotecnología y Materiales de la Universidad de Chile, marca Quata Chrome, modelo Nova 1000e.

### 3.3 Metodología de los ensayos

#### 3.3.1 Granulometría

El análisis granulométrico se realizará según lo indicado en la norma ASTM D422 ASTM INTERNATIONAL, (2007). Se desea conocer la distribución de tamaño de las partículas de laponita en polvo, con el principal objetivo de poder estudiar, su morfología, composición y cristalinidad por tamaño. Cabe mencionar que este análisis debe hacerse en seco ya que la laponita es una arcilla expansiva. Se definen las siguientes ecuaciones:

$$R_i = \frac{P_{ri}}{P_t} \cdot 100 \quad (\text{XIII})$$

$$P_i = 100 - \sum_{j=1}^i R_j \quad (\text{XIV})$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (\text{XV})$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad (\text{XVI})$$

en donde;  $P_{ri}$  es el peso retenido por la malla  $i$ ,  $P_t$  es el peso total de la muestra,  $R_i$  es el porcentaje de suelo retenido en la malla  $i$ ,  $C_u$  es el coeficiente de uniformidad y  $C_c$  es el coeficiente de curvatura. La metodología empleada para la determinación de la curva granulométrica de la laponita es la siguiente:

1. Se eligieron ocho mallas para tamizar, entre ellas la N° 100 (0.15 mm), N° 140 (0.106 mm), N° 170 (0.09 mm), N° 230 (0.063 mm), N° 270 (0.053 mm), N° 325 (0.045 mm) y la N°450 (0.032 mm) según la ASTM.
2. Se tomó una muestra de 20 gramos de laponita y se vertieron dentro del conjunto de tamices, evitando la suspensión de ésta.
3. Se sella la conexión de los tamices con cinta adhesiva *masking tape*, para que el polvo en suspensión no escape hacia el ambiente.
4. Se colocó el juego de tamices en el tamizador y se agita durante una hora.
5. Transcurrida la hora de agitación, se deja reposar los tamices 15 minutos para que sedimenten las partículas en suspensión.
6. Se pesa lo retenido en cada malla en una balanza con dos decimales de precisión (0,01g de error).
7. Se definen la siguiente simbología para los diferentes rangos de tamaños.

8. Se tamiza la muestra, los rangos de tamaño de interés son los siguientes:

**LB:** Laponita en Bruto, sin tamizar.

**LF:** Laponita fina, bajo la malla N° 200, según ASTM < 0,074 mm.

**LM:** Laponita media, entre la malla N°140 y N°200, según ASTM entre 0,074 - 0,105.

**LG:** Laponita grande, queda sobre la malla N°140, según ASTM >0,105 mm.

### 3.3.2 Humedad

Se detalla la metodología usada para la medición de pérdida de humedad de la laponita:

1. Se utilizan muestras tamizadas de tamaño **LB**, **LF**, **LM** y **LG**.
2. Se colocan 5 g de cada muestra en una cápsula de Petri, se cubre con papel aluminio y se perfora su superficie para que el agua pueda escapar. Se deben medir tres muestras por tamaño ( $\sigma, \mu$ ) (Ver Figura 3-11).
3. Se colocan las muestras en el horno bajo vacío (Figura 3-2 (a)) a una temperatura de 105°C por 15 minutos.
4. Transcurrido dicho tiempo, se cambia la condición de vacío a presión atmosférica de forma gradual para no provocar suspensión del material dentro del horno.
5. Se mide el peso de la muestra en una balanza de alta precisión (Figura 3-2 (b)). Se debe controlar el peso de las muestras cada 15 minutos, hasta que se cumpla un tiempo acumulado de 165 minutos.



Figura 3-11: Fotografía de muestras cubiertas con papel aluminio.

### 3.3.3 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Se detalla la metodología usada para las mediciones de espectroscopía de infrarrojos:

1. Se utilizan muestras tamizadas de tamaño **LB**, **LF**, **LM** y **LG**.

2. Se seca la muestra 300 minutos en un horno a 105°C. Este paso es requisito debido a que el agua es infrarrojo activo, por lo que puede ser detectada por el equipo interfiriendo en el resultado de la medición.
3. La muestra seca se coloca en una desecadora con vacío y silica gel para controlar la humedad.
4. Se deja enfriar la muestra en la desecadora (Ver Figura 3-12).
5. Se coloca la muestra en el equipo de medición FT-IR (Figura 3-5) y se mide en modo ATR en el software OMNIC.
6. Se tomaron tres medidas por tipo de muestra para poder generar datos estadísticos ( $\sigma, \mu$ ).
7. Se realizaron correcciones con el software del equipo de los espectros obtenidos, por línea base y normalización.

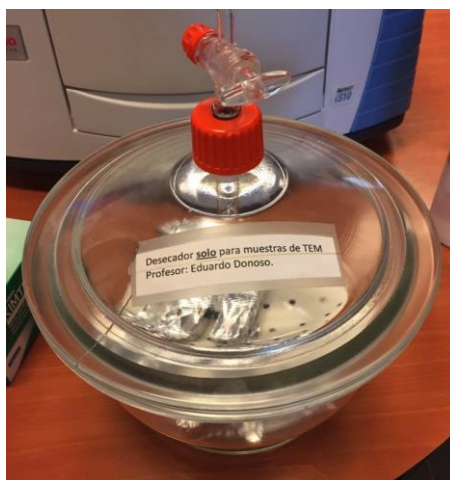


Figura 3-12: Muestras de laponita guardadas en desecadora con humedad controlada.

### 3.3.4 Análisis termogravimétrico (TGA)

Se detallará la metodología usada para las mediciones de termogravimetría:

1. Se utilizan muestras tamizadas de tamaño **LB**, **LF**, **LM** y **LG**.
2. Se coloca 10 mg de cada una de las muestras en el equipo termogravimétrico tal como se muestra en la Figura 3-13.
3. Se le aplica un barrido de temperatura desde temperatura ambiente hasta 800 °C, a una tasa de aumento de 10°C por minuto.
4. Se tomaron tres medidas por tipo de muestra para poder generar datos estadísticos ( $\sigma, \mu$ ).



Figura 3-13: Muestra de laponita en el equipo termogravimétrico.

### 3.3.5 Difracción de rayos X en polvo (XRD)

Se detallará la metodología usada para las mediciones de difracción de rayos x:

1. Se utilizan muestras tamizadas de tamaño **LB**, **LF**, **LM** y **LG**.
2. Se realiza una medición para cada tamaño, además de las muestras en bruto con humedad natural y secada en horno a una temperatura de 105°C durante 300 minutos.

### 3.3.6 Microscopio electrónico de barrido acoplado con espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (SEM/EDS)

Se detallará la metodología usada para las mediciones realizadas en el SEM y el EDS:

1. Se utilizan muestras tamizadas de tamaño **LB**, **LF**, **LM** y **LG**.
2. Se deposita cada muestra en un *tab* o placa recubierto de carbono y se metaliza con oro para lograr una mejor definición.
3. Se obtienen imágenes de cada tamaño definido a magnificaciones de x70, x400, x800, x1500 y x2400.
4. Para el análisis químico (EDS), se escogen las partículas que posean planos perpendiculares a la incidencia del rayo de disparo.

### 3.3.7 Medición de superficie específica

Sólo se realizó la medición de superficie específica y el tamaño de poro promedio de la laponita en bruto **LB**, en una muestra de aproximadamente 1 cc, equivalente a 0.2784 g, el análisis tuvo una duración de 317.5 min. La temperatura del baño es de 0° C y la temperatura del gas de escape es de 300° C.

## **CAPÍTULO 4: PROGRAMA EXPERIMENTAL GEOTÉCNICO**

### **4.1 Descripción de los materiales**

El programa de ensayos geotécnicos se realizó con arena limpia de Ottawa (C778) y mezclas de arena de Ottawa con laponita a un 1% de concentración en porcentaje de masa de arena. La arena de Ottawa es una arena de sílice limpia y uniforme ( $C_u = 1.48$ ) con distribución de tamaño de partícula en el rango de fino a medio (100 a 600  $\mu\text{m}$ ) y posee entre 2 a 5% de contenido de finos y  $D_{50} = 0.4$  mm. Las partículas de arena de Ottawa tienen una forma redondeada a sub redondeada, color gris suave y gravedad específica ( $G_s$ ) de 2.65. Las relaciones de vacío máximas y mínimas son  $e_{\text{max}} = 0.480$  y  $e_{\text{min}} = 0.783$  (C. S. El Mohtar, (2008); Ochoa, (2015)).

### **4.2 Equipos utilizados**

#### **4.2.1 Granulometría**

Se utilizó un equipo similar al descrito en la sección 3.2.1.

#### **4.2.2 Límites de Atterberg**

Para realizar este ensayo, para límite líquido se utilizó el equipo o cuchara de Casagrande normada de acuerdo con ASTM D4318.

#### **4.2.3 Ángulo en reposo**

Se utilizaron los dispositivos requeridos para el ensayo del ángulo en reposo según la ASTM C1444.

#### **4.2.4 Índice de vacío máximo y mínimo**

Para el cálculo del índice de vacío máximo ( $e_{\text{max}}$ ) y mínimo ( $e_{\text{min}}$ ) se utilizarán los dispositivos requeridos por la norma ASTM D4254 y para el método de compactación en miniatura de Harvard.

#### **4.2.5 Hinchamiento**

Tanto para hinchamiento libre como para la presión de hinchamiento de la laponita RD, se utilizó un edómetro con un sistema de adquisición electrónico. Este equipo cumple con lo establecido en la norma ASTM D4546 – 14.



#### 4.2.6 Compresión edométrica

La compresión se llevó a cabo con un edómetro con sistema de adquisición electrónico. El equipo cumple con las exigencias de la norma ASTM D2435.

#### 4.2.7 Corte Directo

La realización de corte directo se llevó a cabo, en una caja de corte directo con un sistema de adquisición electrónico, con probeta cilíndrica de aproximadamente 60 mm de diámetro. El equipo cumple con las exigencias de la norma ASTM D3080.

#### 4.2.8 Microscopio electrónico de barrido (SEM)

Equipo similar al de la sección 3.2.6.

### 4.3 Metodología del ensayo

#### 4.3.1 Preparación de probetas

Las pruebas se llevaron a cabo en especímenes de arena limpia y *dry mix*. Las mezclas en seco se prepararon colocando arena y laponita en las proporciones deseadas, desde 1% al 10% de laponita en masa de arena seca (de acuerdo con el ensayo realizado) en un recipiente de plástico sellado. Posteriormente, el recipiente con el material mezclado se agitó manualmente durante 20 minutos. Las probetas se armaron depositando esta muestra con pluviación<sup>6</sup>, intentando alcanzar aproximadamente un 20% de densidad relativa.

#### 4.3.2 Ensayos

##### 4.3.2.1 Granulometría

La metodología empleada similar a la de la sección 3.3.1, con la diferencia que la cantidad de muestra es la presentada en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Cantidad de muestra para el ensayo de granulometría de laponita, arena limpia de Ottawa CS y arena con distintas cantidades de laponita.

Espécimen	Cantidad de muestra [g]
CS	100 - 300
DM 1%	100 - 400
DM 1.64%	150 - 250
DM 3%	100 - 700
Laponita RD	15 - 60

<sup>6</sup> Depositación con mínima energía.

#### 4.3.2.2 Límites de Atterberg

Tanto para límite líquido como para límite plástico se utilizó la metodología planteada en la norma ASTM D4318. El límite líquido (LL) se obtiene como la humedad, similar a la fórmula (XVII). El límite plástico (LP) se calcula con el material excedente del límite líquido con la metodología de los bastones. Luego su humedad se obtiene a través de la fórmula (XVII). El índice plástico se utiliza la fórmula (XVIII).

$$IP = LL - LP \quad (XVII)$$

#### 4.3.2.3 Ángulo en reposo

El ángulo en reposo se determinó según la norma ASTM C1444, para muestras de laponita RD, arena limpia CS y arena limpia con 1% de laponita, DM 1% con la fórmula XVIII.

$$\text{Ángulo en reposo} = \tan^{-1}\left(\frac{2 \cdot H}{D_A - d}\right) \quad (XVIII)$$

donde; H [cm] es la altura del cono, d [cm] es el diámetro interno del cono,  $D_A$  [cm] es el promedio, al 0.254 cm más cercano de las tres determinaciones de prueba.

#### 4.3.2.4 Índice de vacío máximo y mínimo

Para el cálculo del índice de vacío máximo ( $e_{max}$ ) y mínimo ( $e_{min}$ ) de la laponita se utilizarán dos técnicas, el método del tubo según la norma ASTM D4254 y el método de compactación en miniatura de Harvard con las fórmulas XIX, XX y XXI.

$$\rho_{dmin,max} = \frac{M_s}{V} \quad (XIX)$$

$$\rho_{dmin,max} = 9.807 \cdot \rho_{dmin,max} \quad (XX)$$

$$e_{max,min} = \frac{\rho_w \cdot G_s}{\rho_{min,max}} - 1 \quad (XXI)$$

donde;  $\rho_{dmin,max}$  [g/cm<sup>3</sup>] es el mínimo/máximo índice de densidad,  $\rho_w$  [g/cm<sup>3</sup>] es la densidad de agua a 20°C,  $M_s$  [g] es la masa del suelo seco, V [cm<sup>3</sup>] es el volumen del molde,  $G_s$  [-] es la gravedad específica del suelo y  $e_{max,min}$  es el Índice de vacío máximo y mínimo.

Se medirá el índice de vacío máximo y mínimo para muestras de laponita RD, arena limpia mezclada con 1%, 3%, 5% y 10% de laponita.

### 4.3.2.5 Hinchamiento

Tanto para el hinchamiento libre como para la presión de hinchamiento de la laponita RD, se utilizará la norma ASTM D4546 – 14 y con las fórmulas XXII, XXIII y XXIV.

$$h_1 = h - \Delta h_1 \quad (\text{XXII})$$

$$h_2 = h_1 + \Delta h_2 \quad (\text{XXIII})$$

$$\epsilon_s = \frac{100 \cdot \Delta h_2}{h_1} \quad (\text{XXIV})$$

donde;  $h$  [mm] es la altura inicial de la muestra,  $\Delta h_1$  [mm] es la compresión de la muestra después de la aplicación de tensión e inmediatamente antes de la humectación,  $h_1$  [mm] es la altura de la muestra inmediatamente antes de la humectación,  $\Delta h_2$  [mm] es el cambio en la altura de la muestra: hinchazón o colapso causado por la humectación,  $h_2$  [mm] es la altura final de la muestra después de la humectación.

Para los ensayos de hinchamiento se utilizó muestras de aproximadamente 20 g de laponita, con porcentajes de humedad entre 21 y 32 %. En la Tabla 4-2 se presentan distintos casos para la medición de hinchamiento libre, desde totalmente libre, es decir sin fricción hasta desplazamiento completamente friccional en donde, el indicador de dial y transductor de desplazamiento (DCDT) es colocado a distintas distancias del origen.

Tabla 4-2: Distancias del transductor de desplazamiento para los distintos casos de hinchamiento libre.

Caso	DCDT inicial [mm]
Totalmente libre	0
Poca fricción	0.003
Fricción media	0.7
Desplazamiento friccional	15

Para los ensayos de presión de hinchamiento se utilizó una muestra de aproximadamente 40 g a una densidad de aproximadamente 10 kN/m<sup>3</sup> y se realizaron pruebas con entrada de agua bidireccional y unidireccional.

### 4.3.2.6 Compresión edométrica

La compresión se llevó a cabo de acuerdo con la norma ASTM D2435, a las muestras de arena limpia, laponita RD y a las mezclas de arena con laponita con 1% de laponita RD. Se tienen las siguientes expresiones:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{sat}}{1 + \omega} \quad (\text{XXV})$$

$$V_s = \frac{\gamma_d \cdot V_0}{G_s \cdot \gamma_w} \quad (\text{XXVI})$$

$$H_s = \frac{V_s}{A} \quad (\text{XXVII})$$

$$e_i = \frac{H_i - H_s}{H_s} \quad (\text{XXVIII})$$

donde;  $\gamma_d$  [kN/m<sup>3</sup>] es el peso unitario del suelo seco,  $\gamma_{sat}$  [kN/m<sup>3</sup>] es el peso húmedo de la muestra,  $\gamma_w$  [kN/m<sup>3</sup>] es el peso unitario del agua,  $\omega$  [%] es el contenido de humedad,  $V_0$  [cm<sup>3</sup>] es el volumen de la probeta,  $G_s$  [-] es la gravedad específica del suelo,  $H_s$  [cm] es la altura de los sólidos,  $A$  [cm<sup>2</sup>] es el área transversal de la muestra,  $e_i$  [-] es el Índice de vacío en la etapa  $i$  y  $H_i$  [m] es la altura en la etapa  $i$ .

Para el cálculo de deformaciones, se tienen las siguientes expresiones:

$$\Delta H = d - d_0 - d_a \quad (\text{XXIX})$$

$$H_i = H_0 - \Delta H \quad (\text{XXX})$$

$$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (\text{XXXI})$$

$$C_c/C_r = \frac{e_i - e_0}{\log\left(\frac{\sigma_1'}{\sigma_0'}\right)} \quad (\text{XXXII})$$

donde;  $\Delta H$  [cm] es el cambio de altura en la muestra,  $d$  [cm] es la deformación de la muestra,  $d_0$  [cm] es la deformación inicial de la muestra,  $d_a$  [cm] es la corrección por deformación del aparato,  $H_0$  [m] es la altura inicial de la muestra de suelo,  $H_i$  [m] es la altura de la muestra en la etapa  $i$ ,  $\epsilon$  [-] es la deformación vertical de la muestra,  $C_c/C_r$  [-] es el Índice de compresibilidad del suelo normalmente consolidado o pre-consolidado,  $\sigma_i'$  [kPa] es el esfuerzo vertical efectivo en la etapa  $i$  y  $\sigma_0'$  [kPa] es el esfuerzo de consolidación.

Se realizarán pruebas en cuatro especímenes diferentes, en laponita pura con pasos de carga y descarga de 12 horas y 1 hora, en arena limpia de Ottawa con pasos de carga y descarga de 6 horas y arena mezcla en seco a 1% de concentración en peso de arena con escenarios de carga y descargas de 6 horas. Los incrementos de carga y descargas se realizan en un rango de 5 kPa a 600 kPa, este incremento es gradual y por lo general la nueva carga dobla la carga anterior. Cabe mencionar que no se saturarán las muestras.

#### 4.3.2.7 Corte directo

Para el procesamiento de los datos del corte directo se consideró las siguientes expresiones:

$$\tau = \frac{F_H}{A_{efec}} \quad (XXXIII)$$

$$\sigma_v = \frac{F_v}{A_{efec}} \quad (XXXIV)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (XXXV)$$

donde;  $F_H$  [kN] es la fuerza horizontal,  $F_v$  [kN] es la fuerza vertical,  $A_{efec}$  [m<sup>2</sup>] es el área efectiva del plano de falla,  $\epsilon$  [-] es la deformación axial de la muestra,  $\Delta H$  [cm] es el cambio de altura en la muestra,  $H_0$  [m] es la altura inicial de la muestra de suelo,  $H_i$  [m] es la altura de la muestra en la etapa  $i$ .

El corte directo se realizará en especímenes de laponita comprimidas 1 y 24 horas y muestras de arena limpia y *dry mix* con 1% de laponita comprimidas 1 hora antes de aplicar el corte.

## CAPÍTULO 5: RESULTADOS CARACTERIZACIÓN FÍSICO – QUÍMICA

### 5.1 Granulometría

La Figura 5-1 presenta el resultado de la granulometría de la laponita RD. Se observa que un porcentaje importante queda retenido en la malla 140 (0,105 mm) y además aproximadamente un 50 % de la muestra pasa a través de la malla 200 (0,075 mm). Dada la observación anterior, se analizarán tres rangos de tamaño de partícula que caracterizan los quiebres en la curva granulométrica, es decir:

**LF:** Laponita fina, bajo la malla 200 (< 0,075mm).

**LM:** Laponita mediana, entre malla 200 y malla 140 (0,075 - 0,105 mm).

**LG:** Laponita grande, sobre la malla 140 (> 0,105 mm).

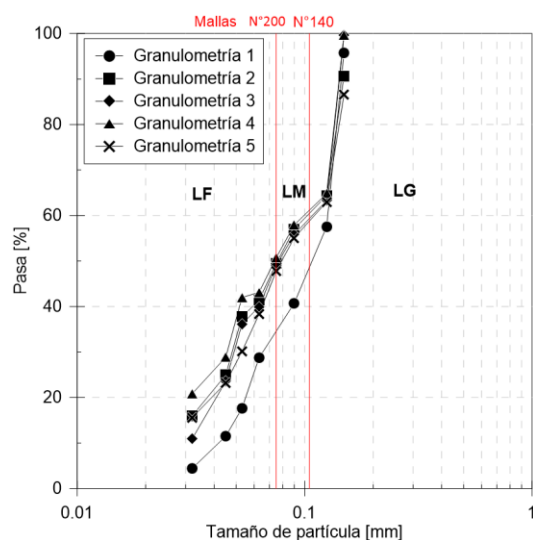


Figura 5-1: Curva granulométrica de cinco muestras de laponita RD.

En la Tabla 5-1 se presentan los parámetros de granulometría para las cinco muestras de laponita RD. Además, se puede mencionar que hubo un promedio de pérdida en forma de polvo en suspensión de un 0.62% ( $\pm 0.86\%$ ).

Tabla 5-1: Parámetros de granulometría de laponita RD, diámetro asociada a un 60%, 30% y 10% de porcentaje que pasa, coeficiente de curvatura  $C_c$  y de uniformidad  $C_u$  y contenido de finos CF.

Granulometría	$D_{60}$ [mm]	$D_{30}$ [mm]	$D_{10}$ [mm]	$C_c$ [-]	$C_u$ [-]	CF [%]
1	0,127	0,066	0,042	0,812	1,920	-
2	0,104	0,048	0,075	0,297	2,162	49,47
3	0,109	0,049	0,075	0,294	2,229	49,07
4	0,101	0,046	0,075	0,277	2,199	50,73
5	0,112	0,053	0,075	0,333	2,115	47,82

## 5.2 Humedad

En la Figura 5-2 se presenta el promedio de pérdida de humedad de la laponita RD para los distintos tamaños de estudio en un barrido de tiempo de 165 minutos. Los detalles de cada medición se encuentran en la sección de Anexos en la sección 10.2.

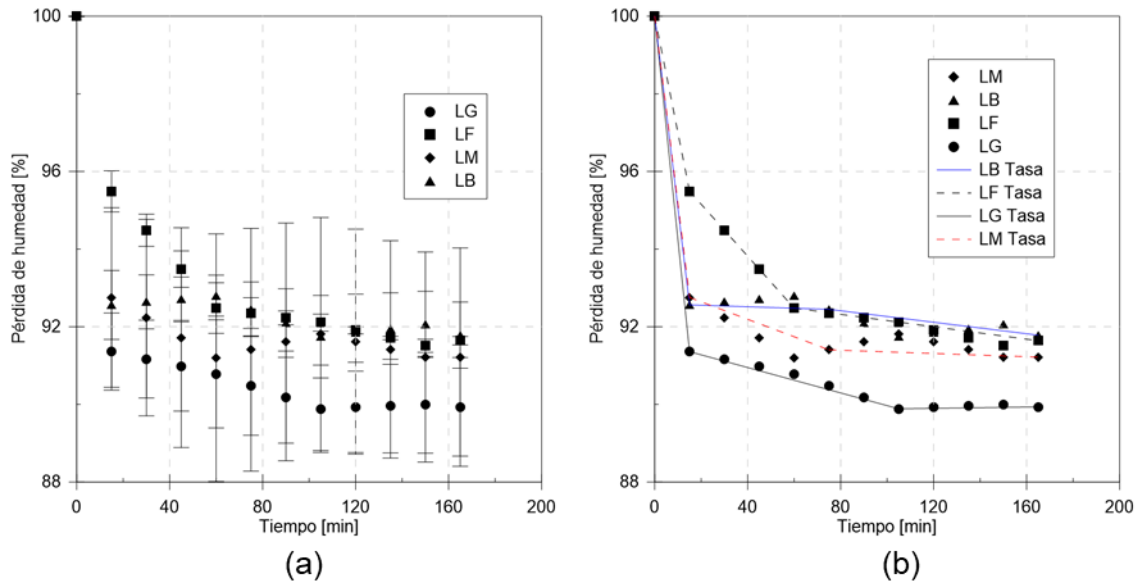


Figura 5-2: (a) Humedad promedio en laponita fina LF, mediana LM, gruesa LG y bruta LB: (b) Humedad promedio de todos los especímenes de marcando las tasas de decrecimiento de humedad de todos los especímenes.

En la Tabla 5-2 se presenta la pérdida de humedad de las muestras de laponita antes de los 15 minutos de exposición a 105°C. Cuanto menor es el tamaño de partícula menor es la tasa de pérdida de humedad esto se traduce en una menor pérdida de humedad en esta primera etapa. En el caso de la laponita bruta, la pérdida de humedad es cercana a la humedad del tamaño mediano.

Tabla 5-2: Pérdida de humedad de la laponita antes de primer quiebre.

Muestra	Tiempo [min]	Tasa [%/min]	Pérdida [%]
LF	15	-0,30	4,51
LM	15	-0,48	7,25
LG	15	-0,58	8,64
LB	15	-0,50	7,44

Tabla 5-3: Pérdida de humedad de la laponita después del primer quiebre.

Muestra	Tiempo [min]	Tasa [%/min]	Pérdida [%]
LF	60	-0,07	3,01
LM	75	-0,02	1,35
LG	105	-0,02	1,47
LB	75	0,00	0,11

En la Tabla 5-3 se presenta la humedad perdida después del primer quiebre. En este escenario se observa un comportamiento errático de la pérdida de humedad, ya que la laponita fina es la que posee una mayor tasa de pérdida, lo que se traduce en una mayor pérdida de humedad final. Tanto la laponita mediana y la gruesa presentan una pérdida que es al menos la mitad de la fina en este escenario. En la Tabla 5-4 se presenta la tasa de pérdida de humedad después del segundo quiebre. En este escenario la tasa de pérdida es prácticamente nula. La pérdida de humedad total se presenta en la Tabla 5-5,

en donde la laponita grande posee la mayor pérdida y la bruta la menor pérdida. El comportamiento de la laponita fina es similar al de la bruta.

Tabla 5-4: Pérdida de humedad de la laponita después segundo quiebre.

Muestra	Tiempo [min]	Tasa [%/min]	Pérdida [%]
LF	165	-0,01	0,84
LM	165	0,00	0,19
LG	165	0,00	-0,05
LB	165	-0,01	0,67

Tabla 5-5: Pérdida de humedad total de la laponita a 105°C.

Muestra	Pérdida total [%]
LF	8,36
LM	8,78
LG	10,06
LB	8,22

### 5.3 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

La Figura 5-3 presenta el resultado promedio de las curvas FTIR de las tres mediciones (Anexos sección 10.3) obtenidas por muestra.

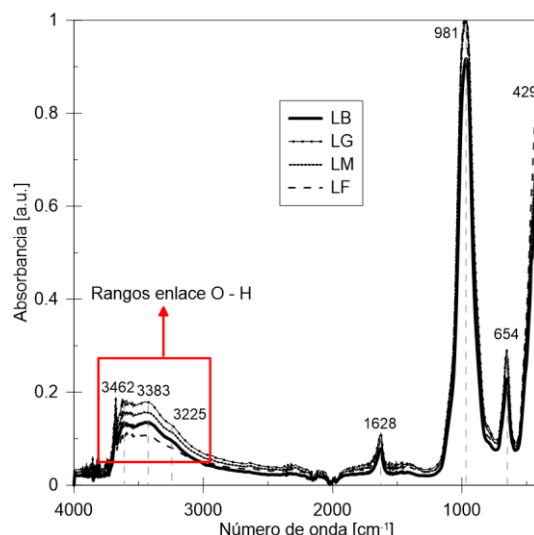


Figura 5-3: Absorbancia versus número de onda (FTIR) para los especímenes de laponita fina LF, mediana LM, gruesa LG y bruta LB.

El primer *peak* de absorción se observa en un rango de número de onda de 417 a 433  $\text{cm}^{-1}$ . Este valor está asociado a los enlaces de tipo Si – O – Mg o Si – O – Si de acuerdo con Grill, (2009); Mishra et al., (2008); Pálková et al., (2010); Xiong et al., (2019).. El segundo *peak* está posicionado entre 652 y 654  $\text{cm}^{-1}$ , de acuerdo a algunos autores, corresponde a movimientos vibracionales del enlace Mg – O o bien a Li – O (Pálková et al., (2010)). El tercer *peak* se ubica en un rango de número de onda de 968 y 981  $\text{cm}^{-1}$  y según Grill, (2009) corresponde a movimientos vibracionales del enlace Si – O. Este *peak* es el que presenta mayor intensidad en el espectro, con una absorbancia relativa próxima a 1. Esto concuerda con que Si y O son los dos elementos más abundantes en este tipo de minerales. El cuarto *peak* se presenta en un rango de número de onda de 1620 a 1640  $\text{cm}^{-1}$ , según Mishra et al., (2008). Este podría estar asociado a movimientos vibracionales del enlace O – H.



Desde 2000 a 3000  $\text{cm}^{-1}$  se omite la asignación de *peaks* ya que este rango corresponde al del agua. El agua es infrarrojo positivo debido a que es un dipolo, esto dificulta las interpretaciones. Finalmente se analizan los últimos tres *peaks*, los cuales rondan el número de onda 3000. Estos *peaks* son asignados a los enlaces O – H según Pálková et al., (2010).

Tabla 5-6: Asignación de *peaks* de acuerdo con el tipo de enlace para cada espécimen de laponita.

Asignación	LF		LM		LG		LB	
	N° onda [ $\text{cm}^{-1}$ ]	Abs. [a.u.]	N° onda [ $\text{cm}^{-1}$ ]	Abs. [a.u.]	N° onda [ $\text{cm}^{-1}$ ]	Abs. [a.u.]	N° onda [ $\text{cm}^{-1}$ ]	Abs. [a.u.]
	429	0,77	431	0,67	433	0,66	417	0,79
Mg – O Li – O	654	0,27	654	0,28	653	0,29	652	0,23
Si – O	981	1,00	973	1,00	969	1,00	968	0,92
	1627	0,08	1628	0,10	1628	0,11	1629	0,08
O – H	3225	0,08	3226	0,11	3232	0,13	3235	0,10
	3383	0,10	3425	0,16	3425	0,18	3424	0,14
	3462	0,11	3587	0,16	3604	0,18	3620	0,14

#### 5.4 Análisis termogravimétrico (TGA)

En la Figura 5-4, se presenta el resumen del análisis por tamaño de la pérdida de masa de la laponita. En los Anexos (sección 10.4) se presentan en detalle cada medición realizada. En este estudio, se trabajó con las curvas promedio de dichas mediciones. En la Figura 5-4 (a) se presenta la variación de la masa en un barrido de temperatura mientras que en la Figura 5-4 (b) se presenta la variación de la masa en un barrido de tiempo de todos los tamaños en estudio.

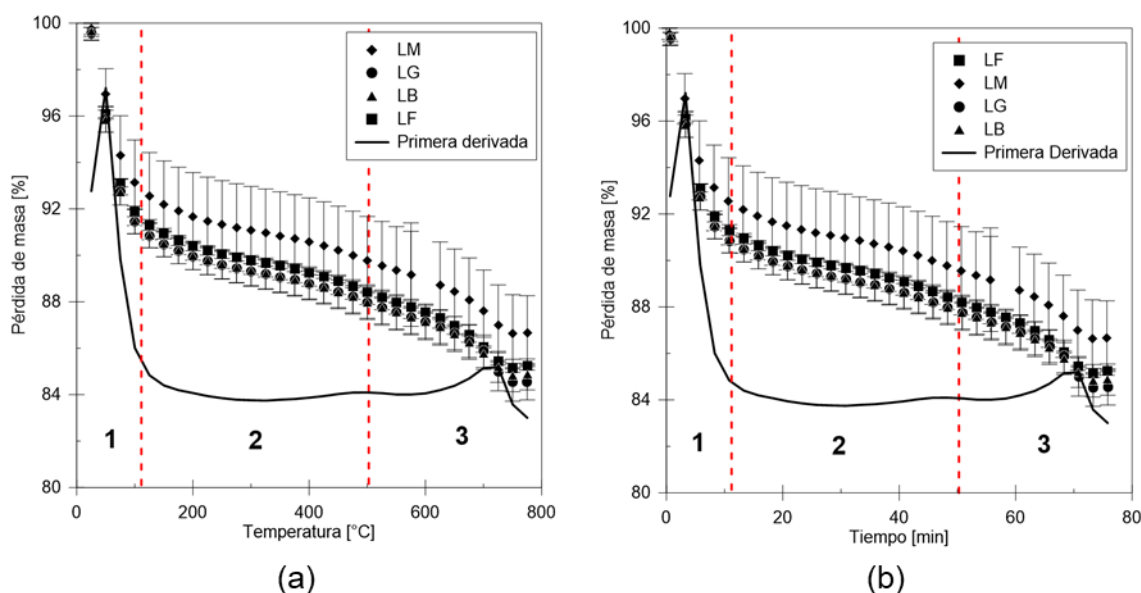


Figura 5-4: (a) Pérdidas de masa promedios versus temperatura en laponita fina LF, mediana LM, gruesa LG y bruta LB; (b) Pérdidas de masa promedios versus tiempo en laponita fina LF, mediana LM, gruesa LG y bruta LB.

De la Tabla 5-7 a la Tabla 5-10 , se observa que para cada tamaño de laponita RD la primera deshidratación ocurre hasta aproximadamente los 11 minutos, y conlleva una pérdida de humedad hasta los 9,06%. La temperatura de la segunda deshidratación está en un rango entre 101,3°C a 535,5°C y está asociada a una pérdida de humedad entre 2,91% a 3,42%. Para el caso de LG esta etapa ocurre a los 8,5 minutos y en el resto de las muestras a los 11 minutos aproximadamente. Finalmente, la tercera deshidratación se puede dar entre 504,7 °C a 535,5°C, transcurridos los 53,5 minutos y tiene asociada una pérdida de humedad entre 2,88% a 3,42%.

**Tabla 5-7: Etapas de deshidratación para espécimen LF de laponita.**

Deshidratación	T [°C]	Tiempo [min]	Pérdida [%]
1	25 – 106.7	0 – 10.9	8.46
2	106.7 – 512.7	10.9 – 55.6	3.15
3	> 512.7	> 55.6	3.18

**Tabla 5-8: Etapas de deshidratación para espécimen LM de laponita.**

Deshidratación	T [°C]	Tiempo [min]	Pérdida [%]
1	25 – 126.8	0 – 10.9	7.52
2	126.8 – 527.5	10.9 – 60.6	2,91
3	> 527.5	> 60.6	2.98

**Tabla 5-9: Etapas de deshidratación para espécimen LG de laponita.**

Deshidratación	T [°C]	Tiempo [min]	Pérdida [%]
1	25 – 101.3	0 – 8.5	8.63
2	101.3 – 504.7	8.5 – 53.5	3.42
3	> 504.7	> 53.5	3.42

**Tabla 5-10: Etapas de deshidratación para espécimen LB de laponita.**

Deshidratación	T [°C]	Tiempo [min]	Pérdida [%]
1	25 – 116.1	0 - 11	9.06
2	116.1 – 535.5	11 – 57.4	3.32
3	> 535.5	> 57.4	2.88

## 5.5 Difracción de rayos X en polvo (XRD)

En la Figura 5-5 (a) se observa que el único *peak* de difracción que se ve afectado por el secado es el posicionado a  $2\theta = 6,2^\circ$  ó 001 en índices de Miller Qi et al., (1996). Este *peak* posiblemente corresponda a las estructuras asociadas con los enlaces O – H, que al momento del secado (105°C) pudieron haber llegado a la segunda deshidratación donde el material comienza a degradarse.

En la Figura 5-5 (b), se observa que para todos los rangos de tamaño la curva es similar excepto en el ángulo  $2\theta = 6,2^\circ$  ó 001. Tal como se mencionó antes, este ángulo se podría asociar al agua estructural presente en la laponita.

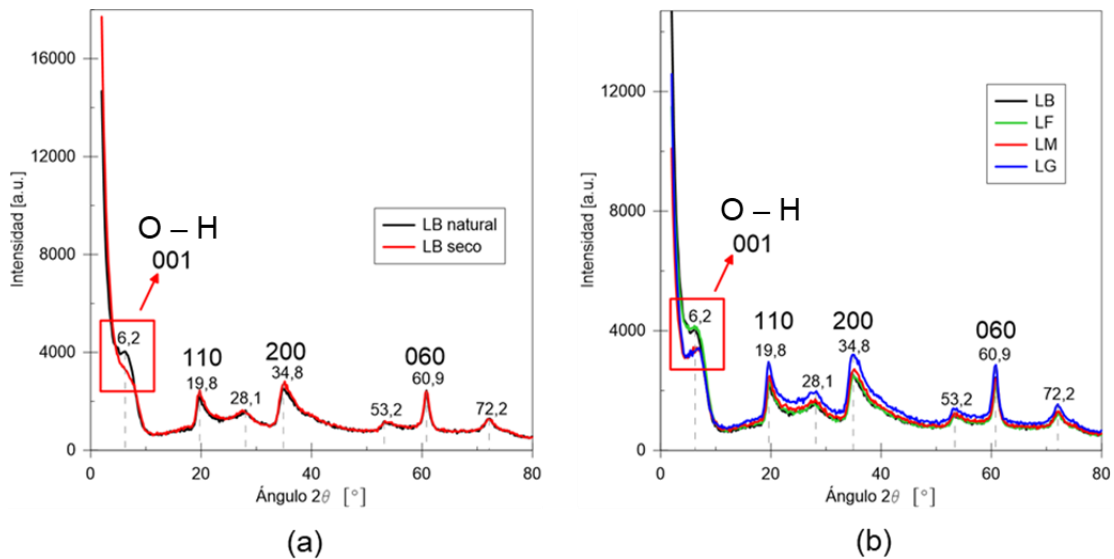


Figura 5-5: (a) Ángulo de difracción  $2\theta$  versus intensidad (XRD) de laponita bruta LB natural y seca; (b) Ángulo de difracción  $2\theta$  versus intensidad (XRD) de laponita LF, LM, LG y LB con humedad natural.

En la Tabla 5-11 se resumen los ángulos  $2\theta$  con su respectivo *peak*. Además, se calcula la distancia interplanar  $d$  obtenida con la ecuación (VIII). También se asigna el plano cristalino de acuerdo al trabajo de Qi et al., (1996) y de Xiong et al., (2019) de la Tabla 2-4.

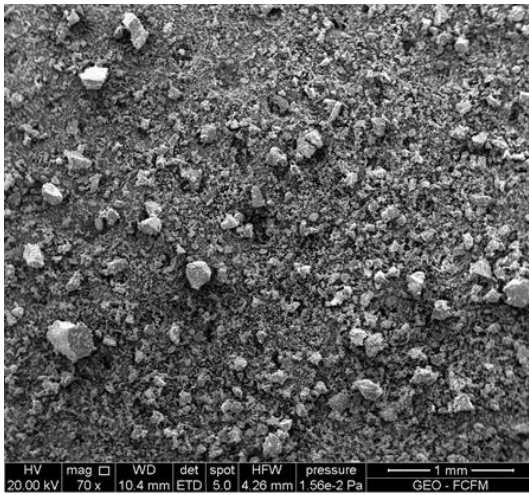
Tabla 5-11: Valor  $d$  de *peaks* en nanómetros y asignación de índice de Miller de acuerdo con dos autores

$2\theta$ [°]	$d$ [nm]	Índice de Miller (Xiong et al., (2019))	Índice de Miller (Qi et al., (1996))
6,2	0,003	(001)	(001)
19,8	0,036	(110)	(02,11)
28,1	0,077	-	005
34,8	0,076	(200)	-
60,9	0,064	(060)	(060)

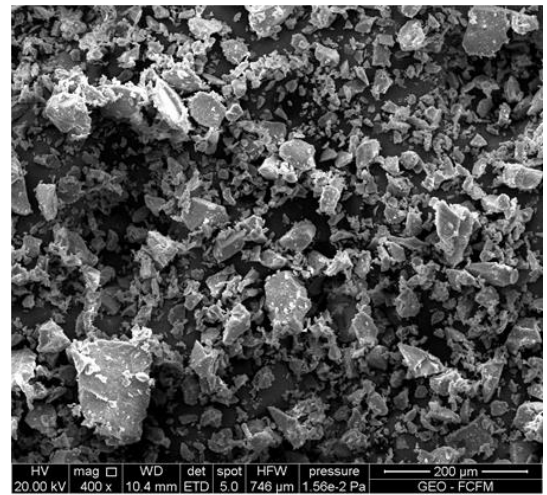
## 5.6 Microscopio electrónico de barrido (SEM) acoplada con espectroscopía de rayos X de energía dispersiva

### 5.6.1 Microscopía electrónica de barrido

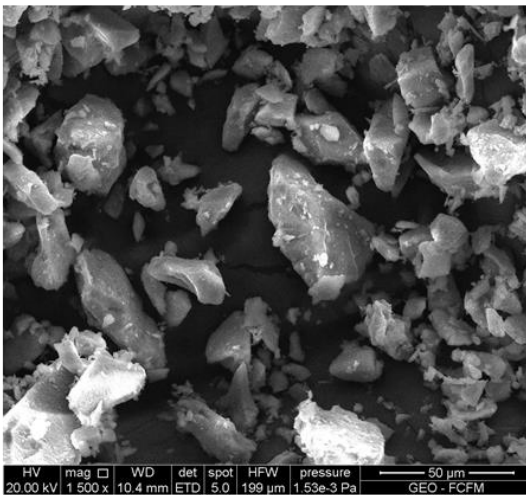
La Figura 5-6 presenta fotografías de la laponita bruta LB, con magnificaciones de (a) x70, (b) x400, (c) x1500 y (d) x2400. En (a) se observa que la distribución de tamaños va desde el tamaño 0.4 mm hasta tamaños imperceptibles al ojo humano, las partículas más grandes corresponden a conglomerados de laponita. En (b) se observa que las partículas más finas se adhieren a las partículas más grandes. En (c) y en (d), se observa que las partículas más pequeñas son más bien planas, similares a un trozo de papel. A grandes rasgos se aprecia que las partículas son principalmente finas, tal como lo indica la granulometría.



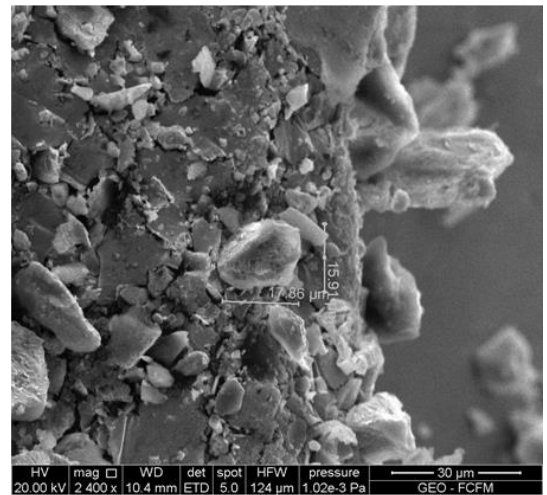
(a)



(b)



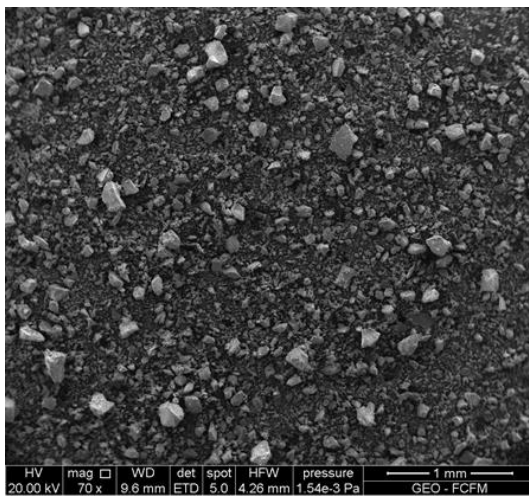
(c)



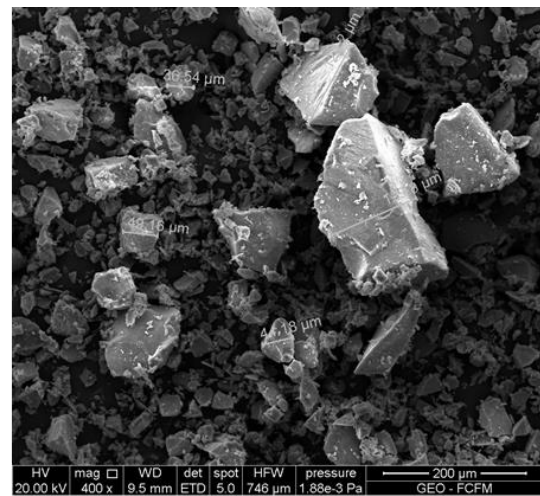
(d)

**Figura 5-6: Laponita bruta LB (a) mag x70, (b) mag x400, (c) mag x1500 y (d) mag x2400.**

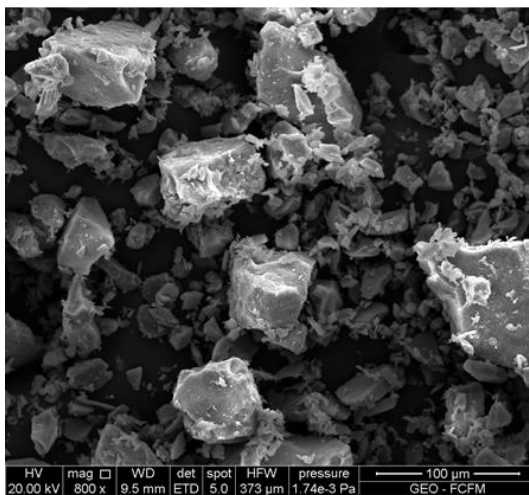
La Figura 5-7 presenta las fotografías de la fracción más fina, LF, con magnificaciones de (a) x70, (b) x400, (c) x800 y (d) x2400. En esta fracción las partículas poseen tamaños bajo la malla 200, es decir, bajo  $75 \mu\text{m}$ . En (a) se observa que la distribución granulométrica de tamaños es bastante irregular, dado que no se definieron rangos de tamaños inferiores a  $75 \mu\text{m}$ . En (b) se observa que las partículas de mayor tamaño no superan los  $75 \mu\text{m}$ . Las partículas más pequeñas no son visibles, pero son gran parte de la masa de esta muestra. En (c) y (d) las partículas más finas son planas, similares a un trozo de papel, en cambio las partículas más grandes poseen dimensiones regulares en sus tres dimensiones.



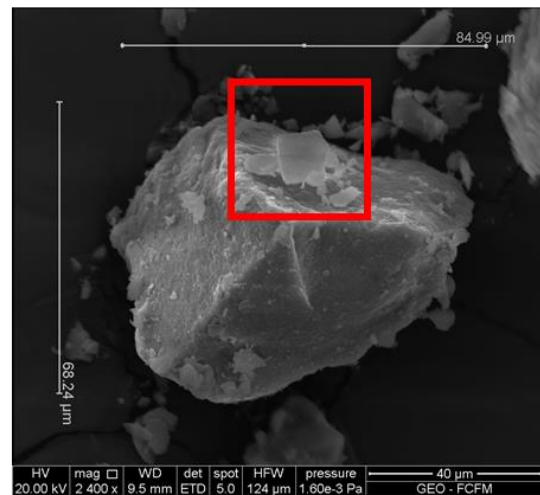
(a)



(b)



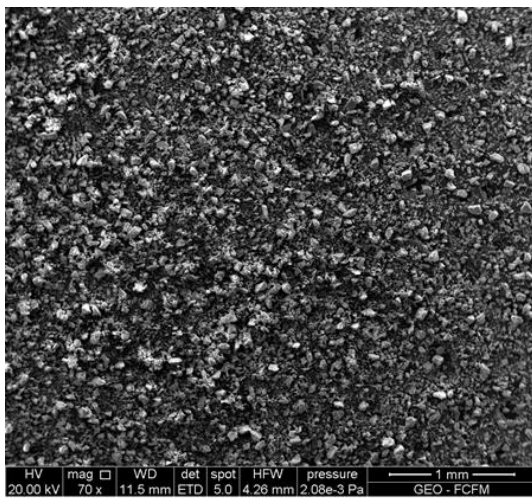
(c)



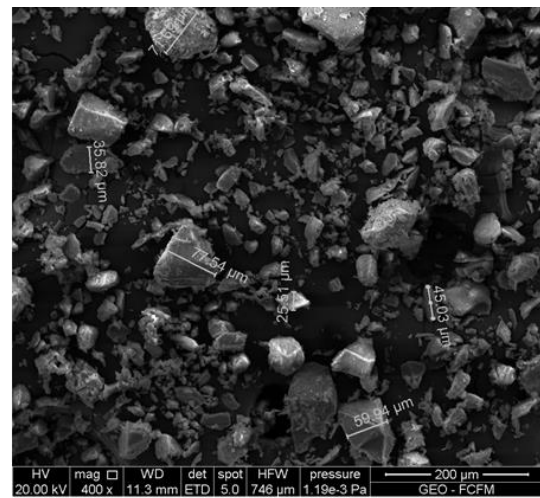
(d)

Figura 5-7: Laponita fina LF (a) mag x70, (b) mag x400, (c) mag x800 y (d) mag x2400. En rojo se observan las partículas más pequeñas perceptibles con el microscopio.

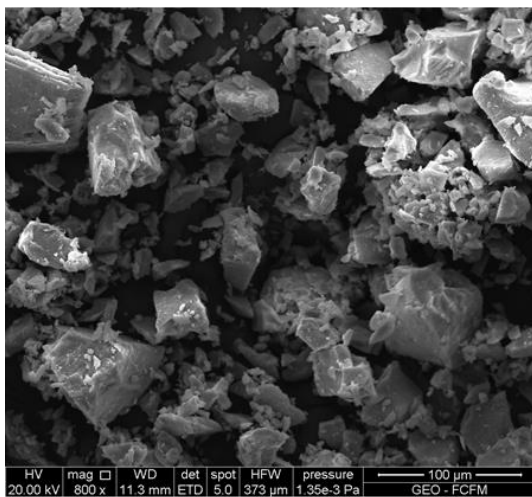
La Figura 5-8 presenta las fotografías de la fracción mediana, LM, las partículas están entre la malla 200 y la malla 140, es decir, poseen tamaños entre  $75 \mu\text{m}$  y  $105 \mu\text{m}$  con magnificaciones de (a) x70, (b) x400, (c) x800 y (d) x2400. En (a) se observa que la distribución granulométrica de tamaños es más regular que en comparación con el caso anterior, es decir, hay mayor de concentración de partículas con tamaños similares. En (b) se observa que las partículas más grandes tienen tamaños superiores a  $75 \mu\text{m}$  pero no mayores a  $105 \mu\text{m}$ . Existen partículas bajo la malla 200 pero en una pequeña concentración. En (d) se observa que las partículas más finas son planas al igual que en la sección más fina.



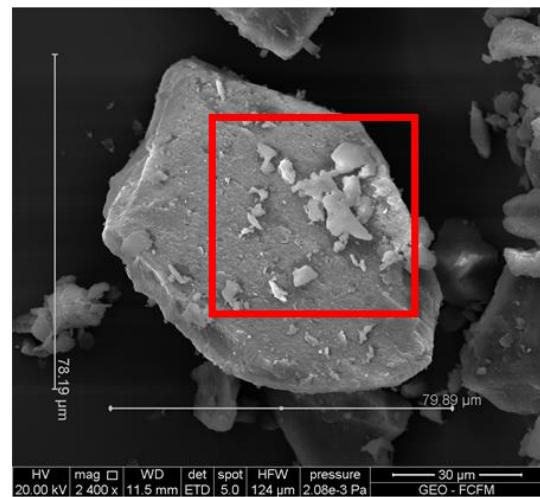
(a)



(b)



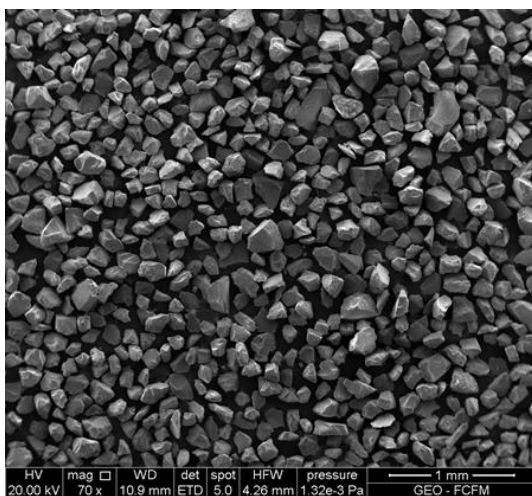
(c)



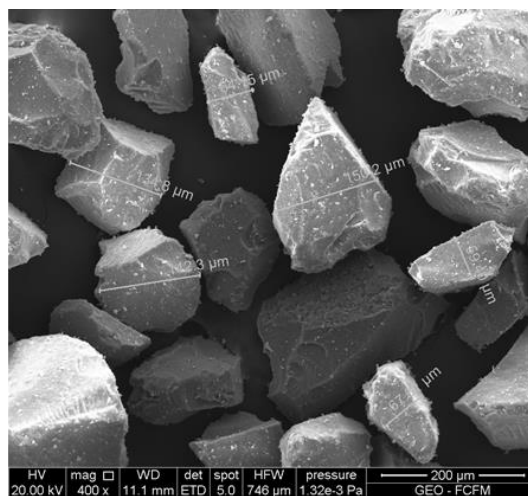
(d)

**Figura 5-8: Laponita media LM (a) mag x70, (b) mag x400, (c) mag x800 y (d) mag x2400. En rojos de aprecian las partículas finas en la superficie de partículas de mayor tamaño.**

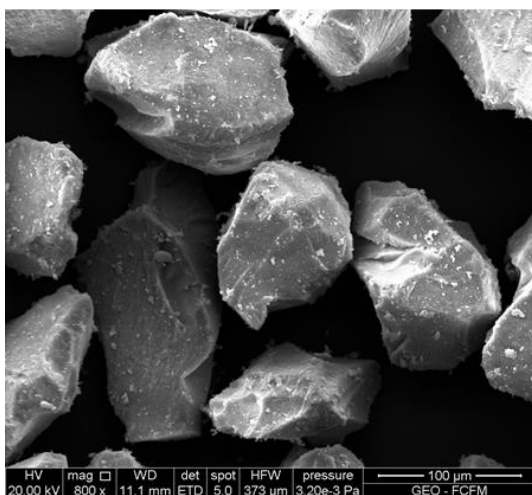
La Figura 5-9 presenta las fotografías de la fracción más gruesa, LG, las partículas están sobre la malla 140, es decir, poseen tamaños superiores a  $105 \mu\text{m}$ , con magnificaciones de (a) x70, (b) x400, (c) x800 y (d) x1500. En (a) se observa una distribución granulométrica de tamaños más regular que las fracciones anteriores. En (b) se observa que las partículas de mayor tamaño tienen son superiores a  $105 \mu\text{m}$ . Existen partículas bajo la malla 200 pero en una pequeña concentración sobre la superficie de las partículas. En (d) se observa que las partículas más finas son planas al igual que en las fracciones anteriores.



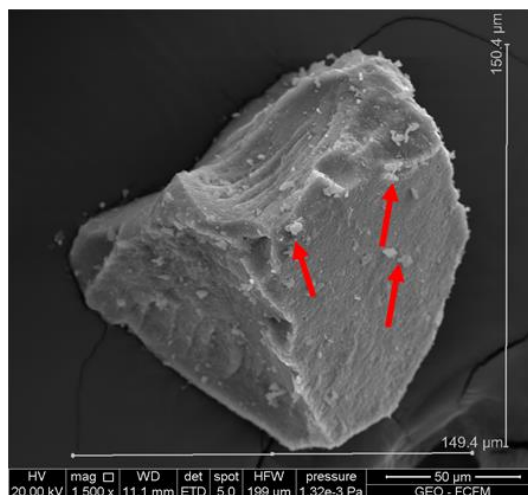
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5-9: Laponita grande LG (a) mag x70, (b) mag x400, (c) mag x800 y (d) mag x1500. Las flechas rojas señalan las partículas finas que quedan sobre la superficie de las partículas de mayor tamaño.

### 5.6.2 Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS)

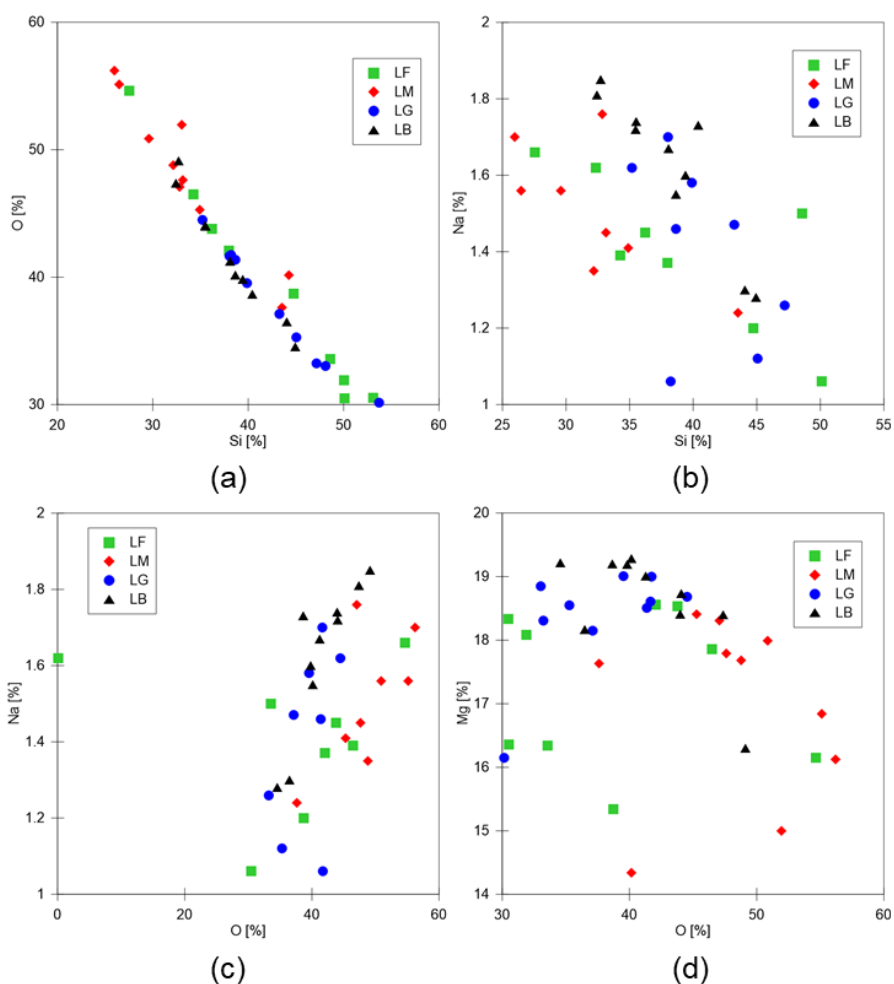
Con ayuda de la espectroscopía de rayos X de energía dispersiva se identificaron los elementos químicos presentes en la laponita. En mayor porcentaje se encuentra el oxígeno (O) y el silicio (Si) y en menores cantidades el magnesio (Mg) y el sodio (Na). En los espectros también aparecieron concentraciones de aluminio (Al). Esto se le atribuye a que efectivamente posea este elemento en su estructura o que la muestra posea algún grado de contaminación al manipularla o del proceso de síntesis.

La Tabla 5-12 presenta un promedio de las concentraciones de los 10 espectros realizados para cada tamaño, con su respectiva desviación estándar (DS). Cabe mencionar que algunos elementos de la laponita no aparecen, como hidrógeno (H) y litio (Li), esto es debido a las restricciones del equipo.

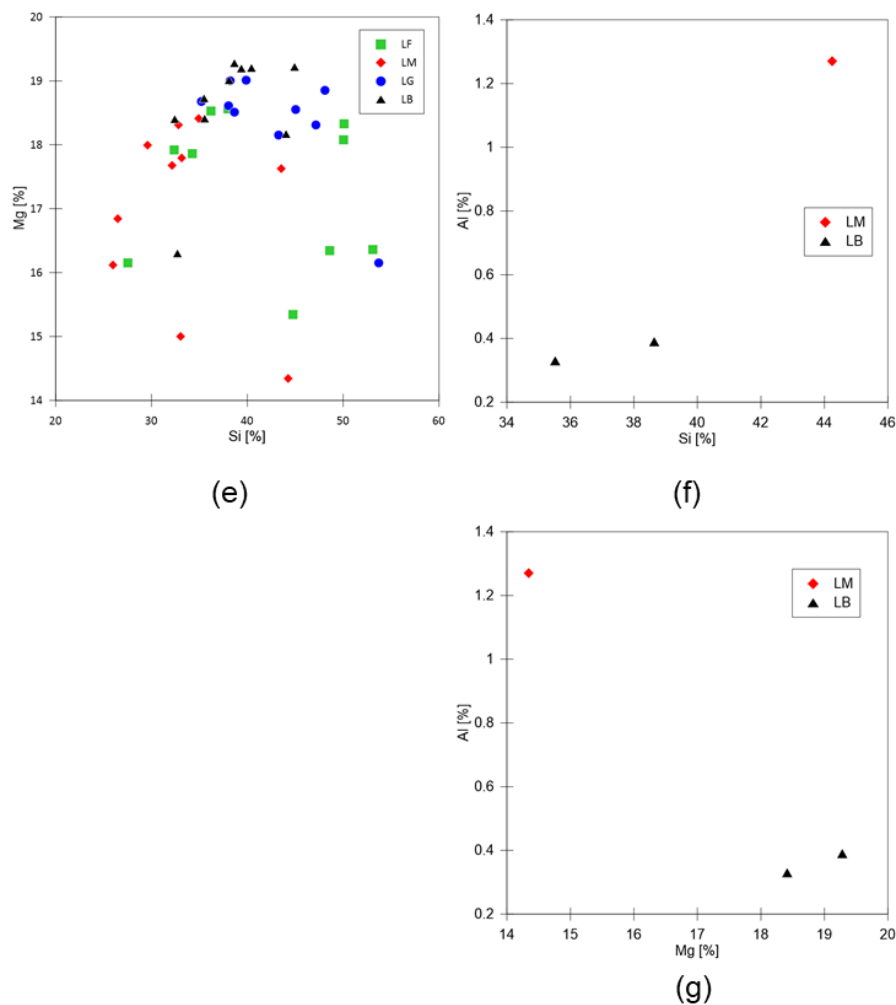
Tabla 5-12: Concentración de oxígeno O, sodio Na, magnesio Mg, aluminio Al y silicio Si en laponita fina LF, mediana LM, gruesa LG y bruta LB.

Tipo	O		Na		Mg		Al		Si	
	Promedio [%]	DS [%]	Promedio [%]	DS [%]	Promedio [%]	DS [%]	Promedio [%]	DS [%]	Promedio [%]	DS [%]
LF	35,23	14,64	1,41	0,19	17,35	1,11	-	-	41,50	8,90
LM	48,07	5,97	1,50	0,18	17,01	1,42	1,27	-	33,59	6,16
LG	37,77	4,71	1,41	0,24	18,38	0,83	-	-	42,73	5,76
LB	41,54	4,61	1,63	0,20	18,59	0,90	0,36	0,04	38,17	4,27

La Figura 5-10 presenta las concentraciones individuales obtenidas de los espectros, es decir, las relaciones (a) Si – O, (b) Si – Na, (c) Na – O, (d) Mg – O, (e) Mg – Si, (f) Si – Al y (g) Al – Mg. Se incorpora el aluminio al análisis dado que este elemento suele encontrarse en la estructura de algunas esmectitas.







**Figura 5-10: Relación de concentraciones entre los elementos (a) Si – O , (b) Si – Na, (c) Na – O, (d) Mg – O, (e) Si – Mg, (f) Si – Al y (g) Mg – Al medido en la laponita en los especímenes LF, LM, LG y LB.**

Tanto en el tamaño LF y LG las concentraciones de oxígeno (O) y silicio (Si) son más constantes no así las concentraciones para LM, en donde alcanza un 48.97% para O y un 33.59% para Si. Es en este caso donde se reporta la mayor concentración de O y la menor concentración de Si.

Otra observación es que tanto en LM como en LB se presenta el elemento aluminio (Al) aunque en una muy pequeña cantidad. Esto podría corresponder a un tipo de contaminación ya que, en la fórmula empírica de la laponita no se encuentra presente este elemento, aunque es bastante común en la estructura de silicatos típicos como la montmorillonita.

## 5.7 Medición superficie específica (BET)

En la Figura 5-11 se presentan los resultados de la adsorción/desorción de nitrógeno ( $N_2$ ) y la variación el volumen versus la presión. En la Tabla 5-13 se resumen los parámetros obtenidos en la regresión lineal para poder calcular la superficie específica de la laponita.

Tabla 5-13: Parámetros de adsorción y desorción para la determinación de la superficie específica, según técnica BET.

Pendiente, m	10,575
Intersección, n	$5,81 \cdot 10^{-2}$
Coefficiente de correlación r	0,999986
Constante C	186,091
Superficie específica [ $m^2/g$ ]	322,007

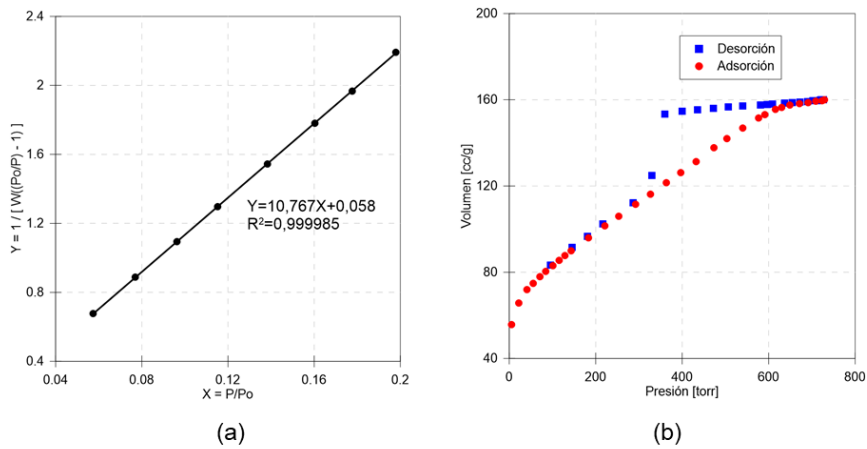


Figura 5-11: (a) Regresión lineal, para la obtención parámetros BET, (b) Proceso de adsorción/desorción de nitrógeno  $N_2$ .

Finalmente, la superficie específica medida a través de la técnica BET es de  $322 \text{ m}^2/g$ . Además de la superficie específica se midió el tamaño de poro promedio de las partículas de laponita, el cual es de  $15.374 \text{ \AA}$ . En la Figura 5-12 se presentan los gráficos en el proceso de adsorción y desorción.

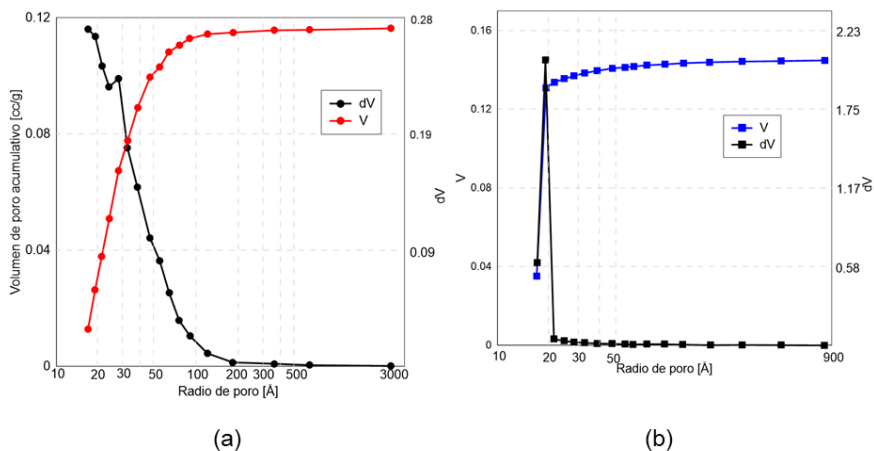


Figura 5-12: Curvas de variación del volumen de acuerdo al tamaño de poro en los procesos de (a) desorción de  $N_2$ , (b) adsorción de  $N_2$  para la determinación del radio de poro promedio.

# CAPÍTULO 6: RESULTADOS CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

## 6.1 Granulometría

### 6.1.1 Laponita RD

La Figura 6-1 presenta la granulometría de nueve muestras de Laponita RD, incluyendo las realizadas en el Capítulo 5.

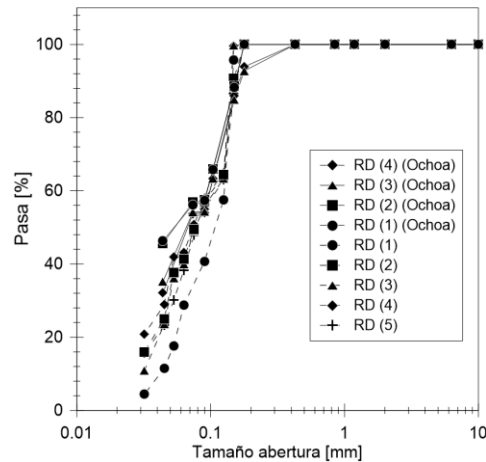
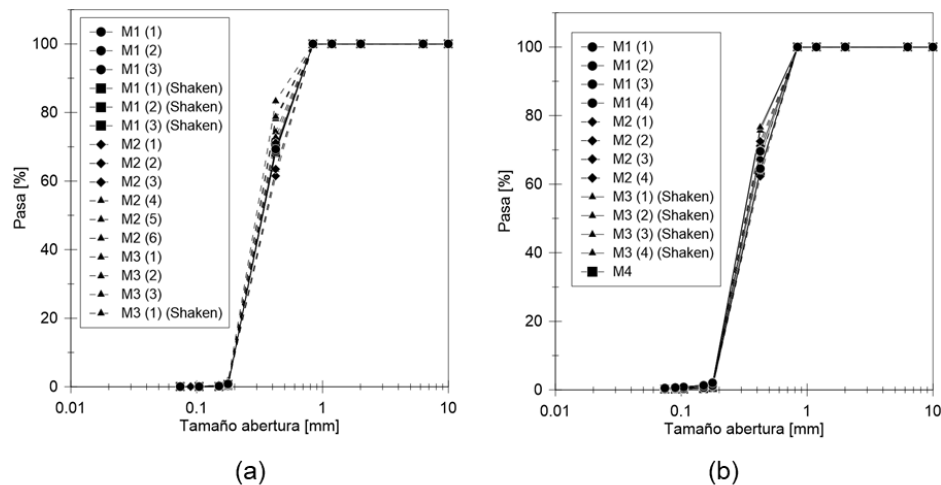


Figura 6-1: Granulometría laponita RD del capítulo 5 con otras disponibles de ensayos de laboratorio.

### 6.1.2 Mezcla de arena limpia con laponita

La Figura 6-2 (a) presenta la granulometría de 16 muestras de arena limpia de Ottawa. La Figura 6-2 (b) presenta la granulometría de 13 muestras de arena limpia de Ottawa con 1% de laponita mezclada en seco. La Figura 6-2 (c) presenta la granulometría de seis muestras de arena limpia de Ottawa con 1.64% de laponita mezclada en seco. La Figura 6-2 (d) presenta la granulometría de seis muestras de arena limpia de Ottawa con 3% de laponita mezclada en seco.



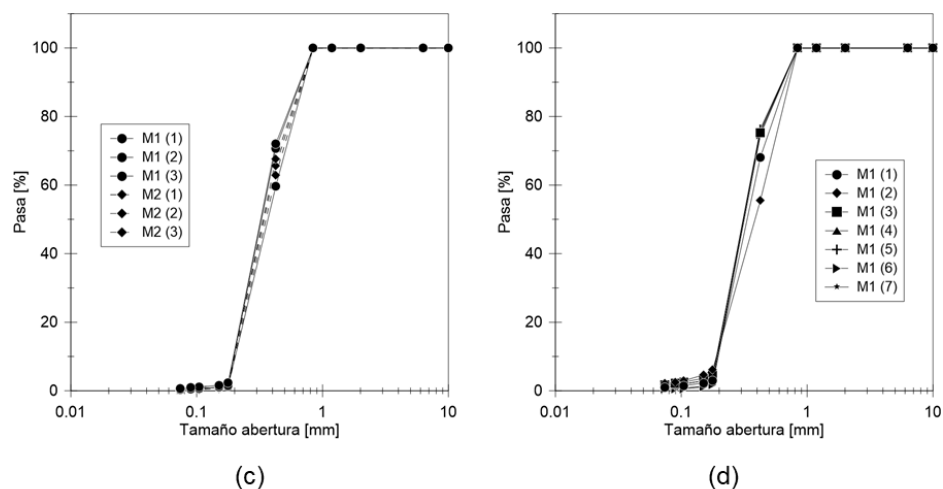


Figura 6-2: Granulometría en los especímenes (a) Arena limpia, (b) DM1%, (c) DM1.64% y (d) DM3%.

La Tabla 6-1 presenta los coeficientes de curvatura y uniformidad asociados a las curvas granulométricas estudiadas, además del contenido de finos

Tabla 6-1: Tamaño característico para 60%, 30% y 10% de laponita que pasa, coeficientes de curvatura  $C_c$ , uniformidad  $C_u$  y contenido de finos CF.

Especie	$D_{60}$ [mm]	$D_{30}$ [mm]	$D_{10}$ [mm]	$C_u$ [-]	$C_c$ [-]	CF [%]
CS	0,38	0,26	0,2	1,9	0,89	0
Laponita RD	0,08	0,075	0,075	1,1	0,94	56,2
DM 1%	0,38	0,27	0,2	1,9	0,96	0,3
DM 1.64%	0,39	0,27	0,2	2,0	0,93	0,5
DM 3%	0,38	0,25	0,19	2,0	0,87	1,6

## 6.2 Límites de Atterberg

En la Tabla 6-2 y la

Tabla 6-3 se determina el límite líquido y el límite plástico respectivamente para la laponita (El límite líquido se grafica en la Figura 6-3). De acuerdo con estos valores de plasticidad y en conjunto con los resultados de la granulometría, se confirma que la laponita es una arcilla de alta plasticidad, que posee un límite líquido de 1017%, un límite plástico de 187% y un índice de plasticidad de 829 %

Tabla 6-2: Determinación de límite líquido LL de laponita.

N° de Puntos	1	2	3	4	5
Peso suelo seco [g]	1,22	1,00	0,95	0,99	0,69
Peso agua [g]	11,72	10,33	9,79	10,24	7,17
Contenido de humedad, $\omega$ [%]	960,66	1033,00	1030,53	1034,34	1039,13
Límite Líquido, LL [%]	1017,09				

Tabla 6-3: Determinación de límite plástico LP.

N° de Puntos	1	2
Peso suelo seco [g]	0,54	0,66
Peso agua [g]	1,04	1,20
Contenido de humedad, $\omega$ [%]	192,59	181,82
Límite Plástico, LP [%]	187,21	

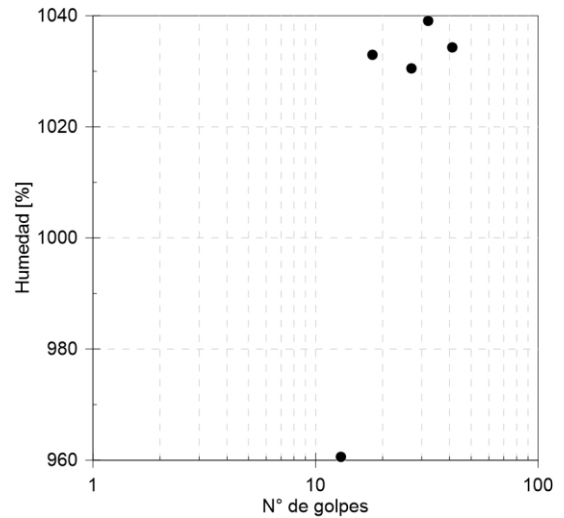


Figura 6-3: Límite de líquido versus número de golpes.

### 6.3 Ángulo en reposo

La Tabla 6-4 y en la Figura 6-4 se presenta los ángulos en reposo tanto de la laponita como el de la arena limpia y mezclada al 1%. Se tienen los siguientes ángulos en reposo promedio; para la laponita 35,5°, para la arena limpia 30,2° y para la arena DM1% 31,7°. Esto quiere decir que la laponita tiene un efecto en la arena, al aumentar aproximadamente 1,5° el ángulo en reposo.

Tabla 6-4: Ángulo en reposo para espécimen de laponita RD, arena limpia CS, y arena con 1% de laponita mezclada en seco.

Test	Laponita RD [°]	CS [°]	DM 1% [°]
1	35,0	30,8	30,7
2	33,3	30,7	30,7
3	38,7	30,4	32,4
4	35,5	29,5	33,0
5	35,0	29,8	31,5

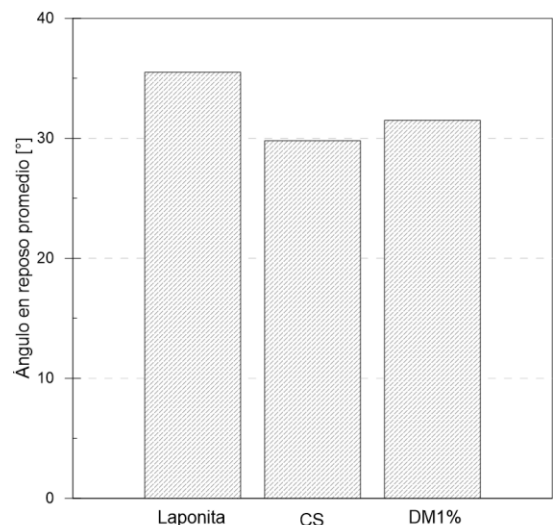


Figura 6-4: Ángulo en reposo promedio para los diferentes especímenes.

## 6.4 Índice de vacío máximo y mínimo

### 6.4.1 Laponita RD

De la Tabla 6-5 hasta la Tabla 6-8 se presenta el índice de vacío máximo y mínimo calculado por el método del tubo y el equipo de Harvard. Con el equipo de Harvard se obtiene un índice de vacío mínimo promedio de 1.17 y con el método del tubo un índice promedio mínimo de 1.34 y máximo de 1.99.

Tabla 6-5: Determinación de  $e_{\min}$ , para la laponita RD con método Harvard.

Muestra	Peso unitario [kN/m <sup>3</sup> ]	$e_{\min}$ [-]	Porosidad [-]
S1	11,35	1,18	0,54
S2	11,22	1,21	0,55
S3	11,43	1,17	0,54
S4	11,53	1,15	0,53
S5	11,59	1,14	0,53
Promedio	11,43	1,17	0,54

Tabla 6-6: Determinación de  $e_{\min}$ , para la laponita RD con método del tubo.

Muestra	Peso unitario [kN/m <sup>3</sup> ]	$e_{\min}$ [-]	Porosidad [-]
S1	11,35	1,35	0,62
S2	11,22	1,38	0,62
S3	11,43	1,33	0,62
S4	11,53	1,32	0,61
S5	11,59	1,33	0,62
Promedio	11,43	1,34	0,62

Tabla 6-7: Determinación de  $e_{\max}$ , para la laponita RD con método del tubo.

Muestra	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	$e_{\max}$ [-]	Porosidad [-]
S1	8,95	1,94	0,70
S2	8,65	2,03	0,71
S3	8,87	1,96	0,70
S4	8,65	2,03	0,71
Promedio	8,78	1,99	0,70

Tabla 6-8: Determinación de  $e_{\max}$ , para la laponita RD con método del tubo.

Muestra	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	$e_{\max}$ [-]	Porosidad [-]
S1	8,7	1,9	0,7
S2	8,9	1,8	0,6
S3	8,6	1,9	0,7
Promedio	8,7	1,8	0,6

## 6.4.2 Arena limpia

La Tabla 6-9 presenta los valores de índice mínimo y máximo para la arena limpia, medidos con el método japonés, el clásico método de depositación y uno modificado con menor energía de depositación. Estos valores son entre  $e_{min}$  igual a 0.477 y  $e_{max}$  0.759.

Tabla 6-9: Índices máximos y mínimos de arena limpia

Muestra	$e_{min}$ [-]	$e_{max}$ [-] (Tradicional)	$e_{max}$ [-] (No tradicional)
S1	0,474	0,700	0,761
S2	0,480	0,686	0,755
S3	0,477	0,718	0,773
S4	-	0,672	0,745
Promedio	0,477	0,694	0,759

## 6.4.3 DM 1%, 3%, 5% y 10%

La Figura 6-5 (a) presentan los índices de vacío máximo y mínimo de la laponita RD y de la arena limpia teórica y en la Figura 6-5 (b) se presenta el índice de vacío máximo y mínimo de la arena limpia presentes en los especímenes.

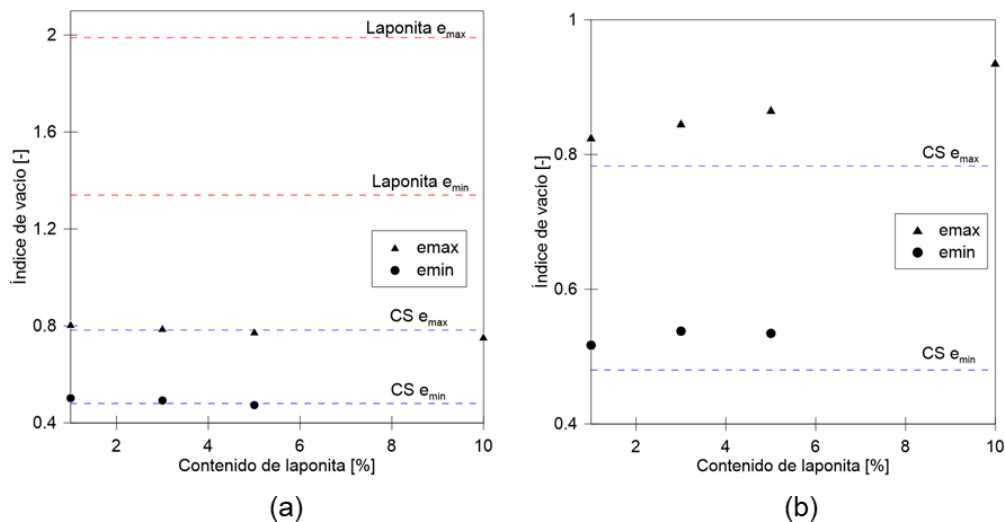


Figura 6-5: (a) Índices máximos y mínimos de laponita RD y arena limpia, (b) Índice de vacío máximo y mínimo de la arena limpia.

En la Tabla 6-10 se presentan los índices de vacíos máximos y mínimos de la arena limpia con diferentes contenidos de laponita. Se aprecia que en la medida que aumenta el contenido de laponita en las matrices arenosa, disminuyen tanto los índices mínimos y máximos. Esto ocurre porque mayor cantidad de laponita rellena los espacios intersticiales de la arena.

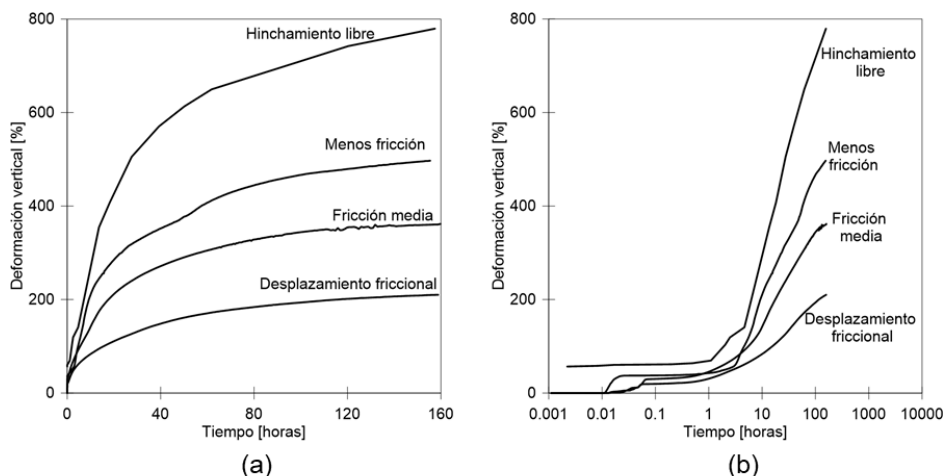
**Tabla 6-10:  $e_{max}$ ,  $e_{min}$ , de arena mezclada con diferentes contenidos de laponita en seco (con guion los elementos sin información).**

Contenido laponita [%]	$e_{min}$	$e_{max}$	$e_{CSmin}$	$e_{CSmax}$
1	0,50	0,81	0,52	0,83
3	0,49	0,79	0,54	0,85
5	0,47	0,78	0,53	0,87
10	-	0,76	-	0,94

## 6.5 Hinchamiento

### 6.5.1 Hinchamiento libre

En la Figura 6-6 (a) se presenta la respuesta de la laponita al hinchamiento, se puede observar que de forma libre es capaz de deformarse hasta un 800%, mientras que con fricción hasta un 200%. El mayor porcentaje de la deformación se presenta desde las 48 horas.



**Figura 6-6: (a) Deformación de hinchamiento versus tiempo, hinchamiento libre laponita RD, (b) Deformación de hinchamiento versus tiempo, hinchamiento libre laponita RD en escala logarítmica.**

La Figura 6-6 (b) es el mismo gráfico que (a) con la diferencia que se encuentra en escala de tiempo logarítmica. El fin de esta presentación es identificar el hinchamiento primario y el secundario de acuerdo con la norma ASTM D4546. Dado que no se presenta el quiebre característico se puede mencionar que la muestra se encuentra en el hinchamiento primario y que este proceso no ha finalizado a las 160 horas.

En la Figura 6-7 (a) se presenta una prueba de hinchamiento libre por inspección. Se observa que de forma libre, la laponita puede deformarse entre 400% y 1200%. Esto difiere de los resultados anteriores en los tiempos de hinchamiento, ya que en la experiencia por inspección visual le toma alrededor de 1000 horas alcanzar un 800% de deformación versus las 160 horas que le toma al realizarse en el edómetro. En (b) nuevamente no se presenta el quiebre característico del segundo hinchamiento, por lo que el proceso de hinchamiento primario aún no finaliza.



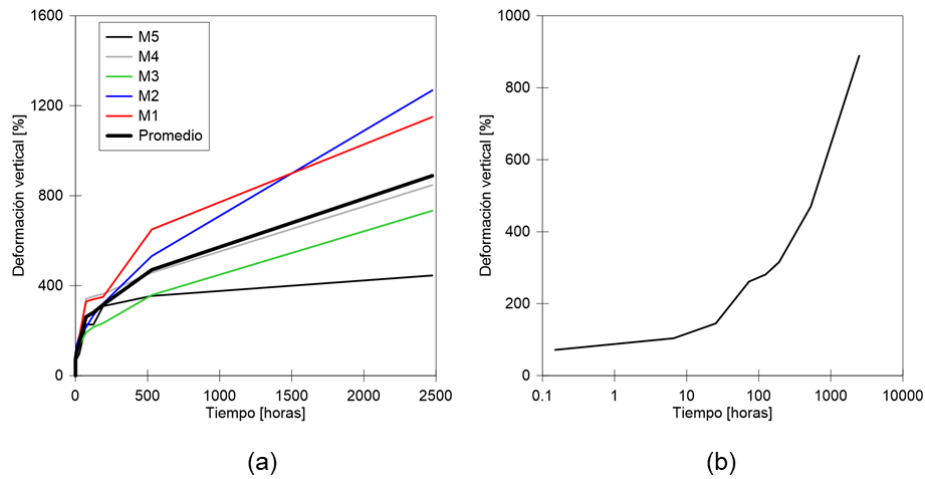


Figura 6-7: (a) Deformación de hinchamiento versus tiempo (observación) de laponita RD, (b) Deformación de hinchamiento versus tiempo en escala logarítmica (observación) de laponita RD.

### 6.5.2 Presión de hinchamiento

La Figura 6-8 presenta la presión de hinchamiento de la laponita según el ingreso del agua. Cuando el agua ingresa por los dos extremos se presenta la máxima presión de hinchamiento de aproximadamente 2800 kPa mientras que cuando sólo ingresa por uno de los extremos, no alcanza a desarrollarse este valor.

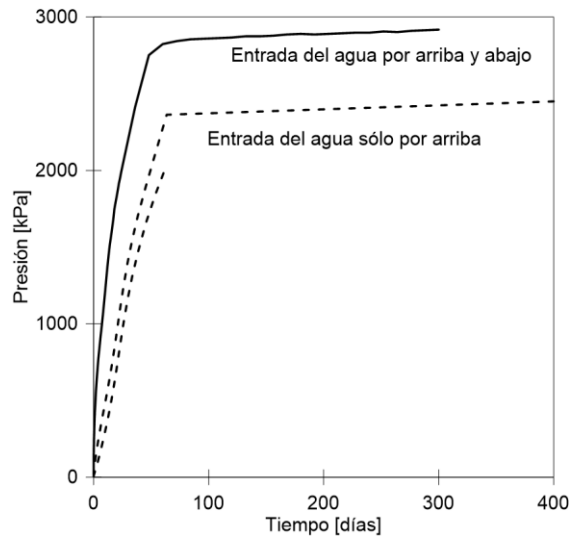


Figura 6-8: Presión de hinchamiento laponita RD versus tiempo.

### 6.6 Compresión edométrica

En la Tabla 6-11 se presentan las condiciones en las cuales se ensayaron los especímenes; el índice de vacío inicial, el tamaño de muestras de arena, laponita y *dry mix* y el contenido de humedad.

Tabla 6-11: Condiciones de muestras para la compresión.

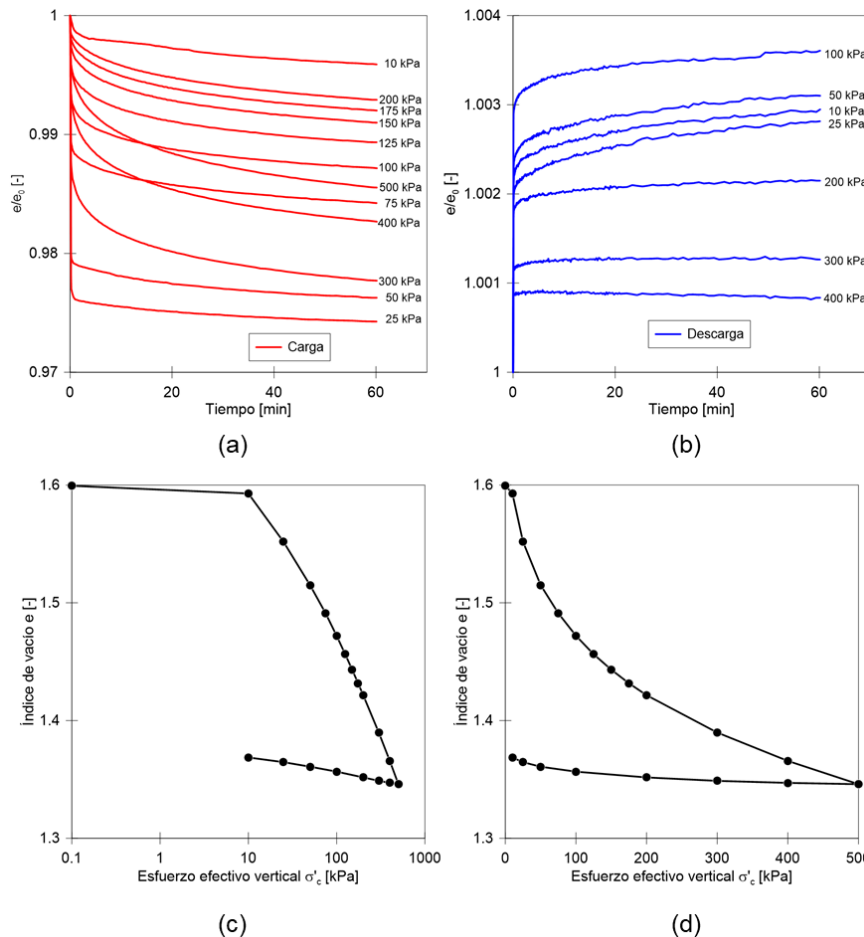
Espécimen	$e_{inicial}$ [-]	$W_{laponita}$ [g]	$W_{arena}$ [g]	$W_{agua}$ [%]
Pasos de 12 hrs	1,970	60,75	0	7
Pasos de 1 hr	1,621	65,42	0	7
CS	0,751	0	142,4	0
DM1%	0,749	0	118,2	0

## 6.6.1 Laponita RD

### 6.6.1.1 Pasos de carga de 1 hora

En la Figura 6-9 (a) y (b) se presenta los escenarios de carga y descarga respectivamente, éstas se realizan transcurrida la hora. La carga se realiza desde 10 kPa hasta 400 kPa. Se realizan 12 cargas y siete descargas.

En la Figura 6-9 (b) y (c), se presentan las curvas edométricas, esfuerzo efectivo vertical versus índice de vacío en escala logarítmica y lineal respectivamente; y en la Figura 6-9 (d) y (e) las curvas edométricas, esfuerzo efectivo vertical versus índice de vacío normalizado por el índice de vacío inicial en escala logarítmica y lineal respectivamente. Cabe mencionar que la muestra sufre una disminución de 15% del índice de vacío.



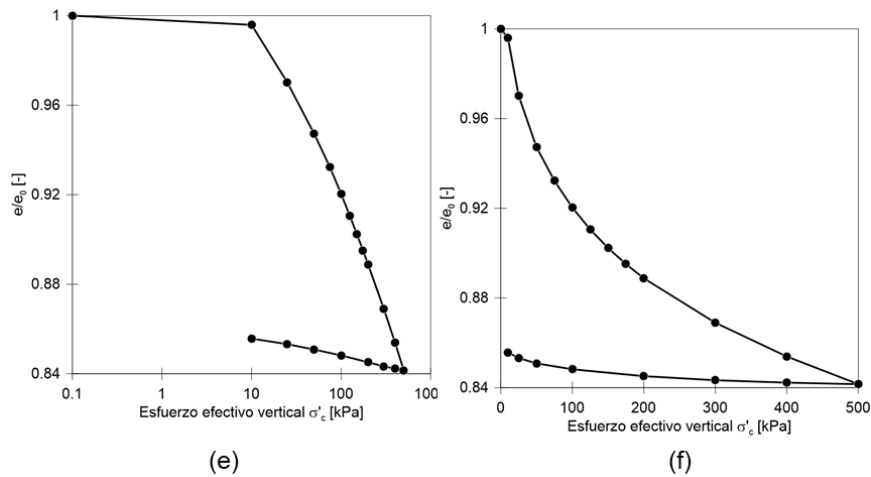


Figura 6-9: (a) Compresión carga , (b) Compresión descarga, (c) Índice de vacío versus esfuerzo efectivo vertical (escala logarítmica), (d) Índice de vacío versus esfuerzo efectivo vertical (lineal), (e) Índice de vacío normalizado versus esfuerzo efectivo vertical (escala logarítmica) y (f) Índice de vacío normalizado versus esfuerzo efectivo vertical (lineal), laponita RD (1 hora).

En la Tabla 6-12 se presentan los parámetros de la compresión para los ensayos en estas condiciones. Principalmente el índice de re-compresión  $C_r$ , el índice de compresión  $C_c$  y  $C_s$  el índice de hinchamiento.

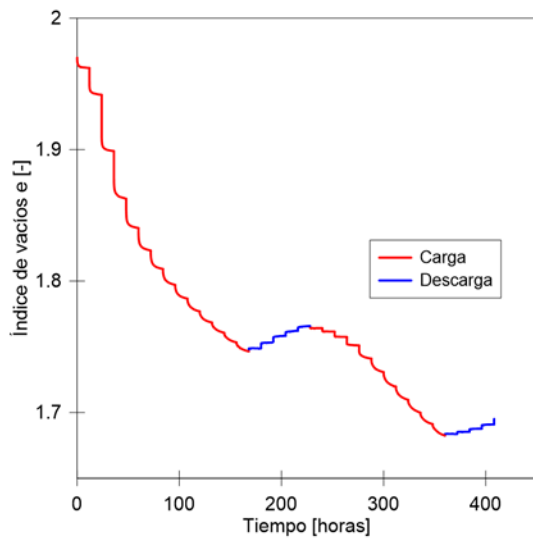
Tabla 6-12: Parámetros de compresión para la laponita RD con cambios de carga cada 1 hora.

$C_r$	0,020
$C_c$	0,172
$C_s$	0,017
$C_r/C_c$	0,115

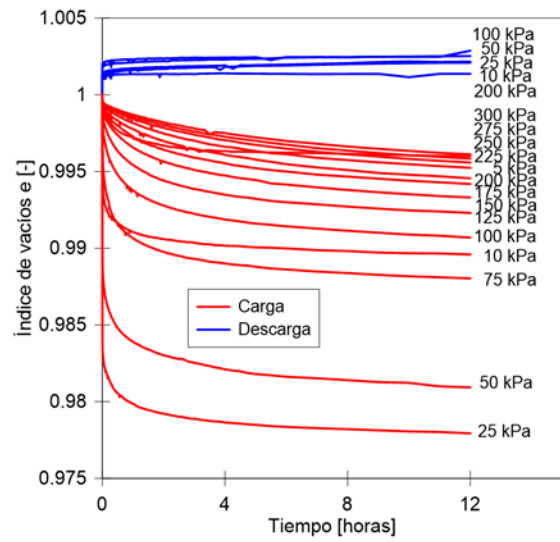
### 6.6.1.2 Pasos de 12 horas

En la Figura 6-10 (a), (b) y (c) se presenta los escenarios de carga y descarga, éstas se realizan transcurridas las 12 horas. La carga se realiza desde 10 kPa hasta 600 kPa, realizando la descarga entre la carga. Se realizan 24 cargas y ocho descargas.

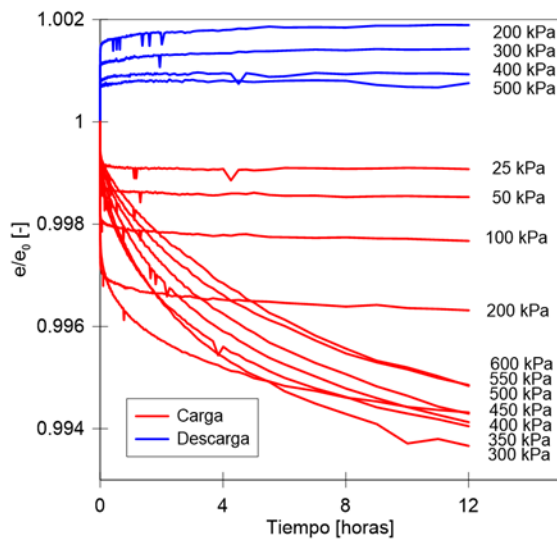
En la Figura 6-10 (d) y (e), se presentan las curvas edométricas, esfuerzo efectivo vertical versus índice de vacío en escala logarítmica y lineal respectivamente; y en la Figura 6-10 (f) y (g) las curvas edométricas, esfuerzo efectivo vertical versus índice de vacío normalizado por el índice de vacío inicial en escala logarítmica y lineal respectivamente. Cabe mencionar que la muestra sufre una disminución de 15% del índice de vacío, al igual que en el caso de una hora.



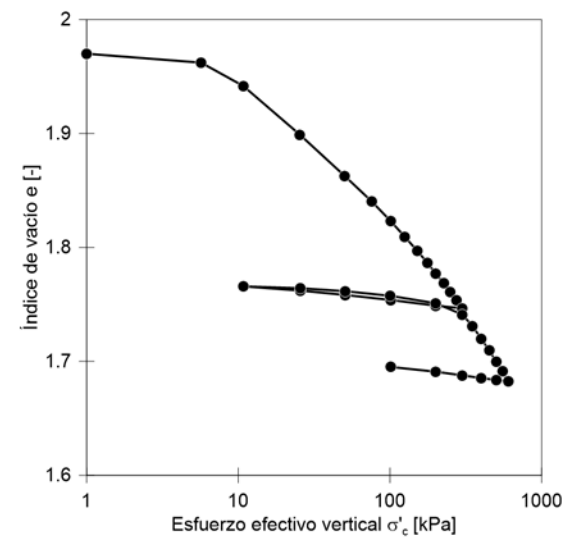
(a)



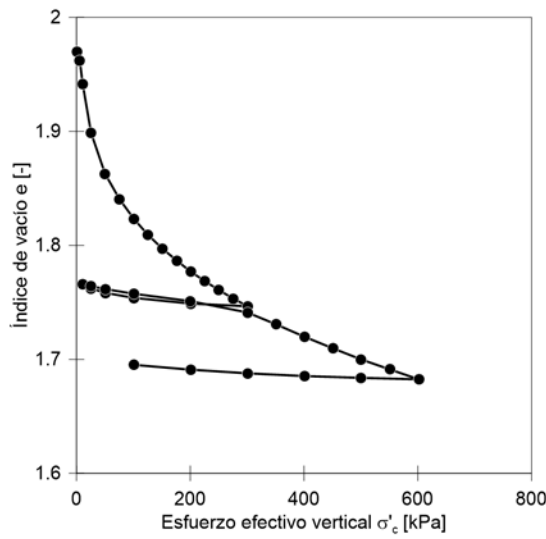
(b)



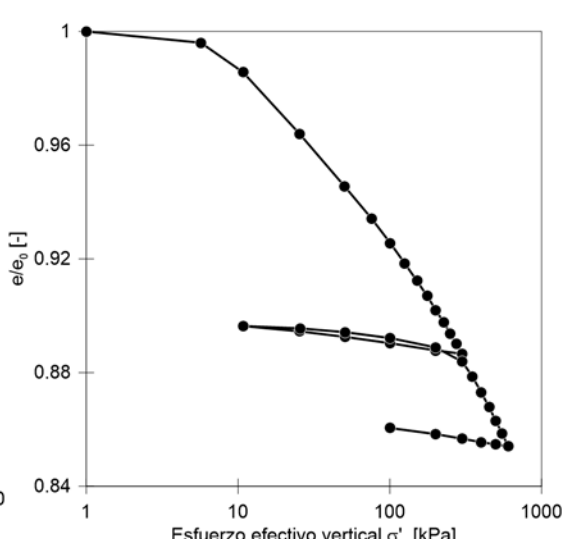
(c)



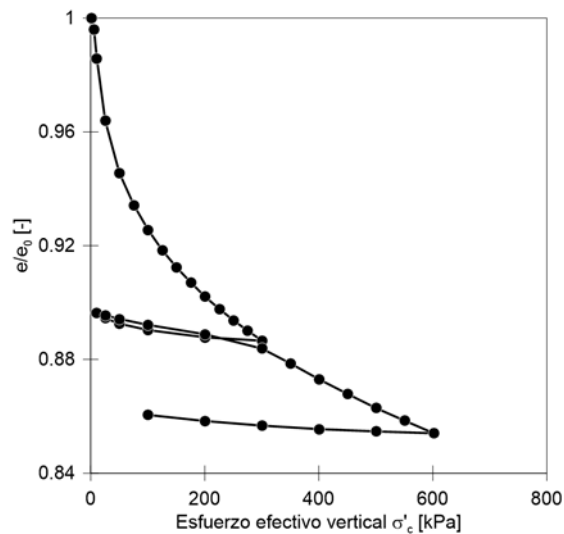
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 6-10: (a) Escenario completo de cargas y descargas, (b) Primera compresión carga/descarga, (c) Segunda compresión carga/descarga, (d) Índice de vacío versus esfuerzo efectivo vertical (escala logarítmica), (e) Índice de vacío versus esfuerzo efectivo vertical (lineal), (f) Índice de vacío normalizado versus esfuerzo efectivo vertical (escala logarítmica) y (g) Índice de vacío normalizado versus esfuerzo efectivo vertical (lineal), laponita RD (12 horas).

En la Tabla 6-13 se presentan los parámetros de la compresión para los ensayos en estas condiciones.

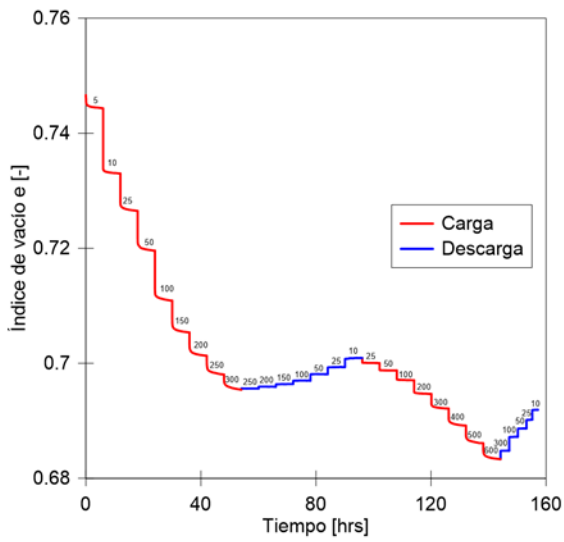
Tabla 6-13: Parámetros de compresión para la laponita RD con escenarios de cargas de 12 horas.

$C_r$	0,027
$C_c$	0,174
$C_s$	0,015
$C_r/C_c$	0,157

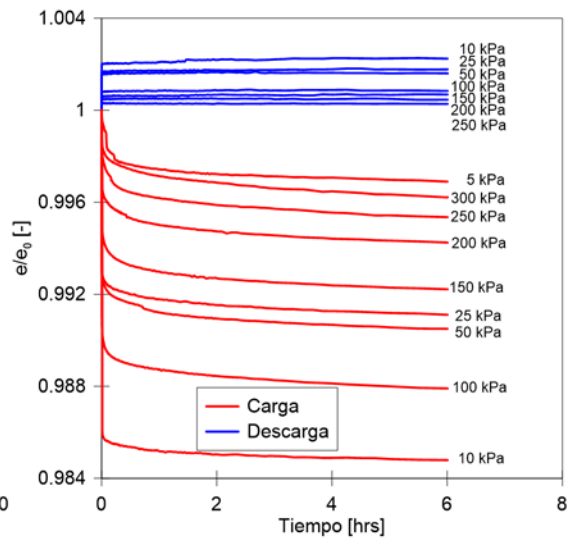
## 6.6.2 Arena limpia

En la Figura 6-11 (a), (b) y (c) se presenta los escenarios de carga y descarga, éstas se realizan transcurridas las 6 horas (algunas descargas se realizan cada 3 horas). La carga se realiza desde 5 kPa hasta 600 kPa.

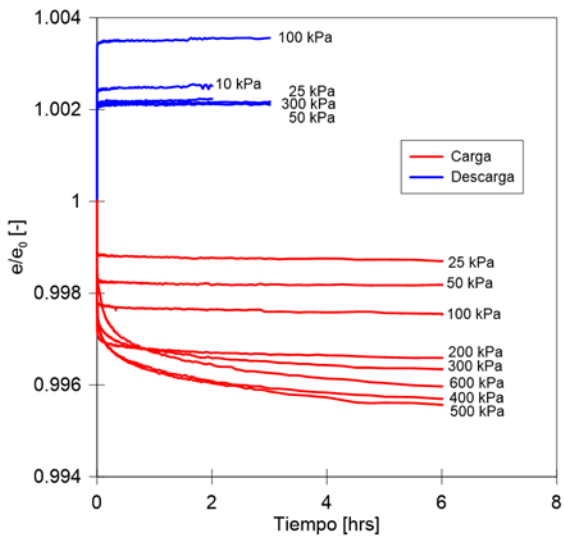
En la Figura 6-11 (d) y (e), se presentan las curvas edométricas, esfuerzo efectivo vertical versus índice de vacío en escala logarítmica y lineal respectivamente; y en la Figura 6-11 (f) y (g) las curvas edométricas, esfuerzo efectivo vertical versus índice de vacío normalizado por el índice de vacío inicial en escala logarítmica y lineal respectivamente. Cabe mencionar que la muestra sufre una disminución de 7% del índice de vacío y es muy probable que no disminuya más, dado que es una arena.



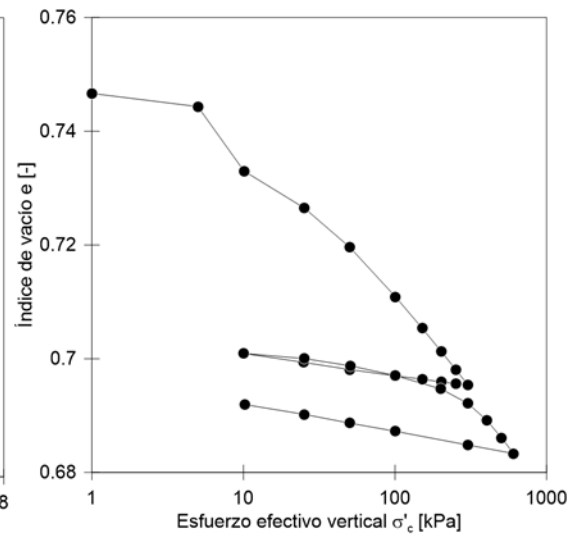
(a)



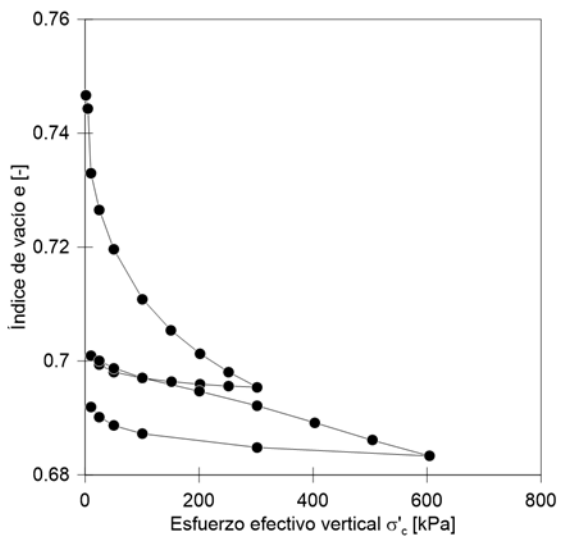
(b)



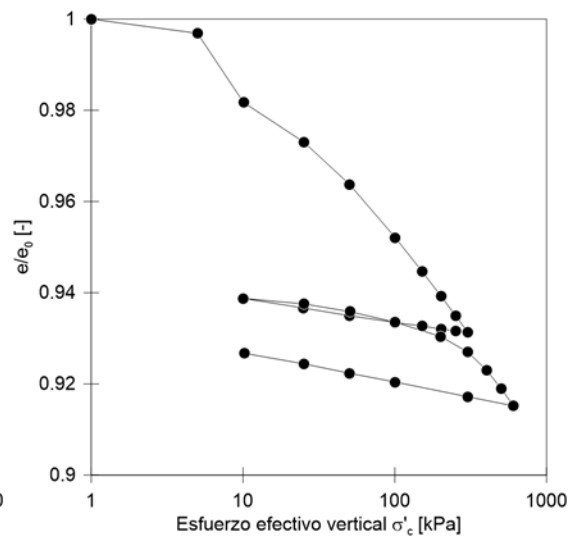
(c)



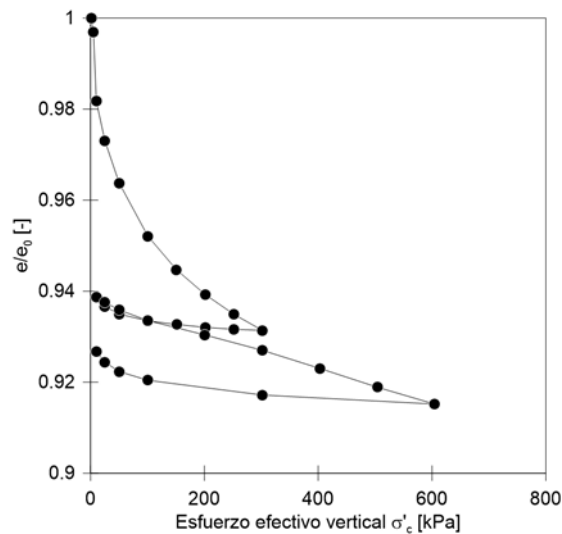
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 6-11: (a) Escenario completo de cargas y descargas, (b) Primera compresión carga/descarga, (c) Segunda compresión carga/descarga, (d) Índice de vacío versus esfuerzo efectivo vertical (escala logarítmica), (e) Índice de vacío versus esfuerzo efectivo vertical (lineal), (f) Índice de vacío normalizado versus esfuerzo efectivo vertical (escala logarítmica) y (g) Índice de vacío normalizado versus esfuerzo efectivo vertical (lineal), arena limpia de Ottawa (6 horas).

En la Tabla 6-14 se presentan los parámetros de la compresión para los ensayos en estas condiciones. Son los mismos que en secciones anteriores.

Tabla 6-14: Parámetros de compresión para la arena limpia CS, con escenarios de carga de 6 y 3 horas.

$C_r$	0,003
$C_c$	0,031
$C_s$	0,003
$C_r/C_c$	0,106

### 6.6.3 DM 1% Iaponita

En la Figura 6-12 (a) y (b) se presentan los escenarios de carga y descarga, éstas se realizan transcurridas las 6 horas (algunas descargas se realizan cada 3 horas). La carga se realiza desde 10 kPa hasta 600 kPa, realizando la descarga entre la carga.

En la Figura 6-12 (c) y (d), se presentan las curvas edométricas, esfuerzo efectivo vertical versus índice de vacío en escala logarítmica y lineal respectivamente; y en la Figura 6-12 (e) y (f) las curvas edométricas, esfuerzo efectivo vertical versus índice de vacío normalizado por el índice de vacío inicial en escala logarítmica y lineal respectivamente. Cabe mencionar que la muestra sufre una disminución de 9% del índice de vacío, lo que es mayor a una arena, esto se debe a la presencia de la Iaponita en la matriz.

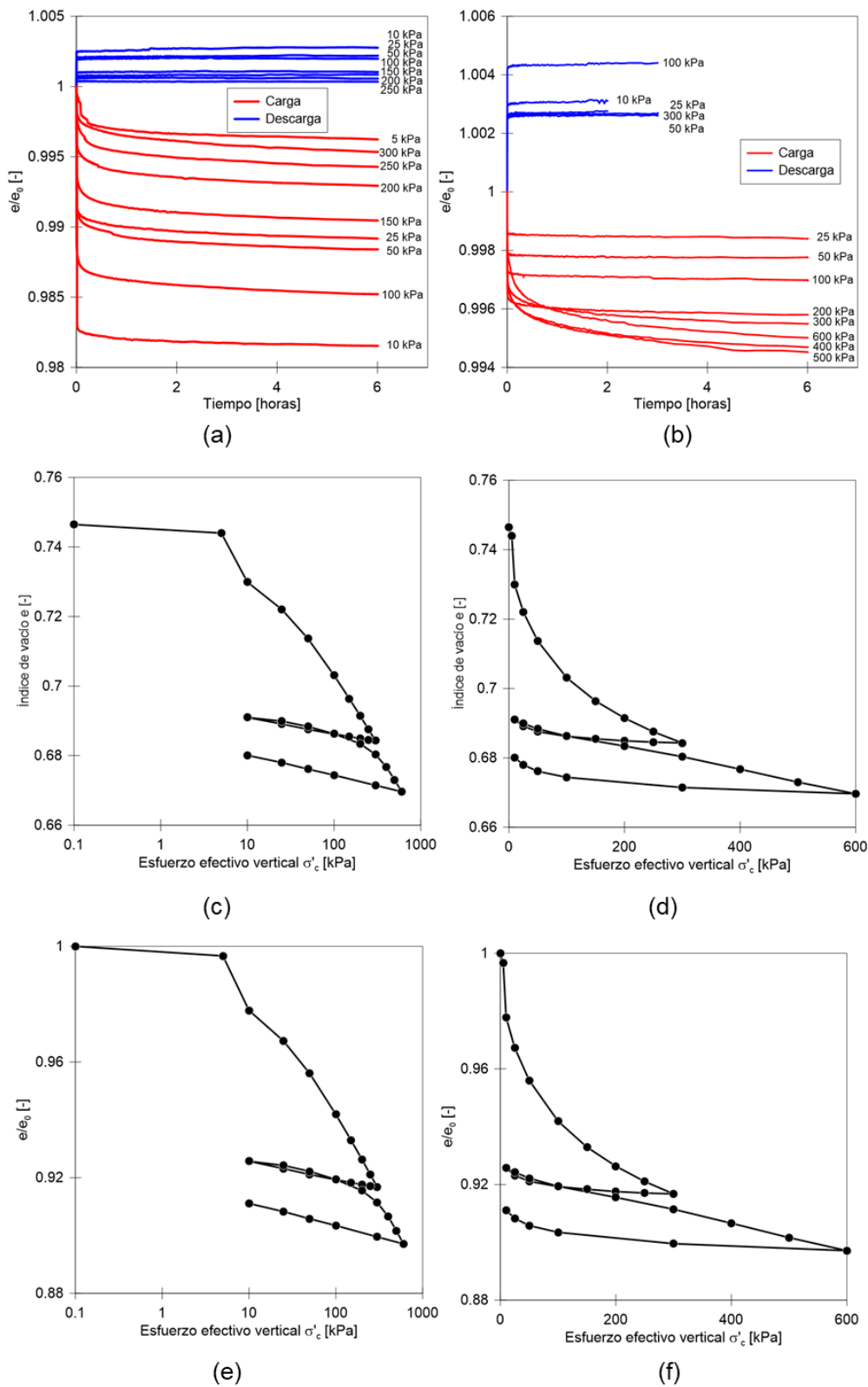


Figura 6-12: (a) Primera compresión carga/descarga , (b) Segunda compresión carga/descarga, (c) Índice de vacío versus esfuerzo efectivo vertical (escala logarítmica), (d) Índice de vacío versus esfuerzo efectivo vertical (lineal), (e) Índice de vacío normalizado versus esfuerzo efectivo vertical (escala logarítmica) y (f) Índice de vacío normalizado versus esfuerzo efectivo vertical (lineal), DM 1% (6 horas)-



En la Tabla 6-15 se presentan los parámetros de la compresión para los ensayos en estas condiciones.

Tabla 6-15: Parámetros de compresión para DM 1% para escenarios de cargas de 6 horas.

$C_r$	0,008
$C_c$	0,040
$C_s$	0,005
$C_r/C_c$	0,205

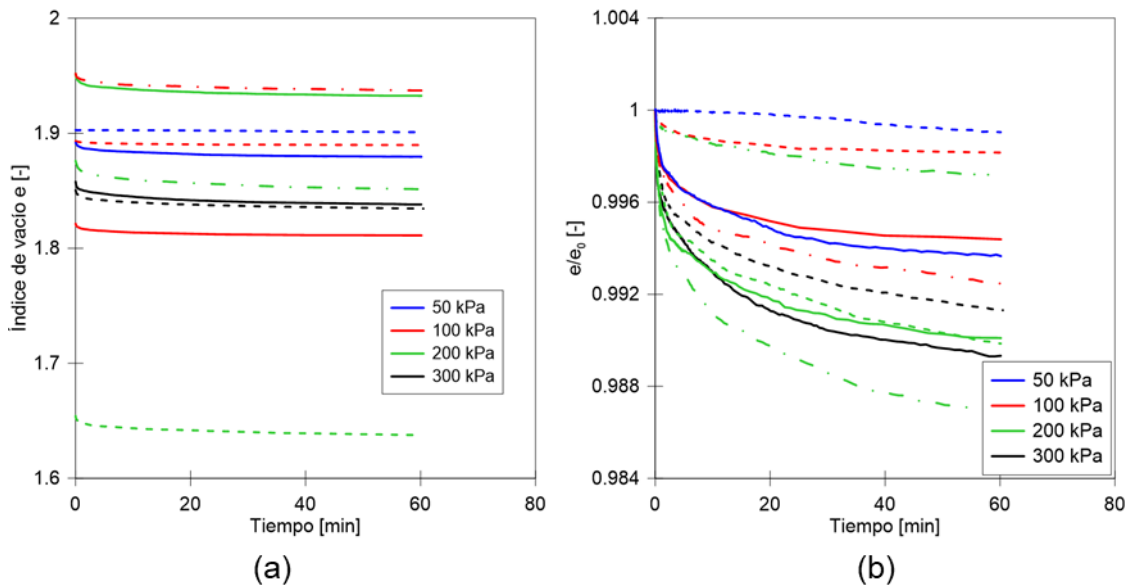
## 6.7 Corte directo

### 6.7.1 Laponita

#### 6.7.1.1 Laponita (Compresión 1 hora)

En las Figura 6-13 (a) y (b) se presenta la compresión de una hora de la muestra, antes de aplicar el corte. La Figura 6-13 (a) presenta el gráfico índice de vacío versus tiempo, los esfuerzos normales aplicados en estos especímenes son 50, 100, 200 y 300 kPa.

La Figura 6-13 (c) presenta el esfuerzo de corte versus la deformación horizontal, el comportamiento que desarrollan los especímenes es más bien contractivo, dada la baja densidad relativa que poseen las probetas. La Figura 6-13 (d) presenta un gráfico deformación vertical versus deformación horizontal, en estas curvas se corrobora la naturaleza contractiva de las probetas. Las experiencias se repitieron al menos dos veces por carga de esfuerzo vertical.



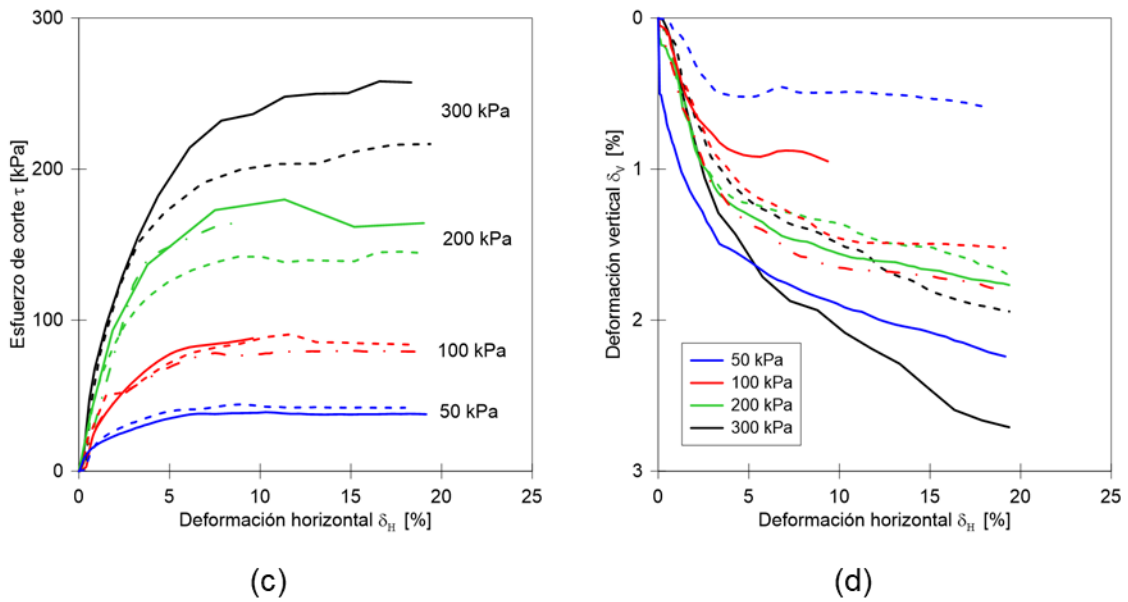


Figura 6-13: (a) Índice de vacío versus tiempo, (b) índice de vacío normalizado versus tiempo, (c) Esfuerzo de corte  $\tau$  versus deformación horizontal  $\delta_H$  y (d) Deformación vertical  $\delta_v$  versus deformación horizontal  $\delta_H$ ; muestras de laponita comprimidas durante 1 hora a 50, 100, 200 y 300 kPa.

En la Tabla 6-16 se presentan los parámetros de resistencia al corte a un 10% y a un 20% de deformación y estos se graficaron en la Figura 6-14. Al realizar la regresión lineal en el gráfico se obtienen los parámetros de resistencia al corte último de  $\phi = 37,9^\circ$  y una cohesión de 3,12 kPa, para la laponita con una compresión de una hora (Ver Tabla 6-17).

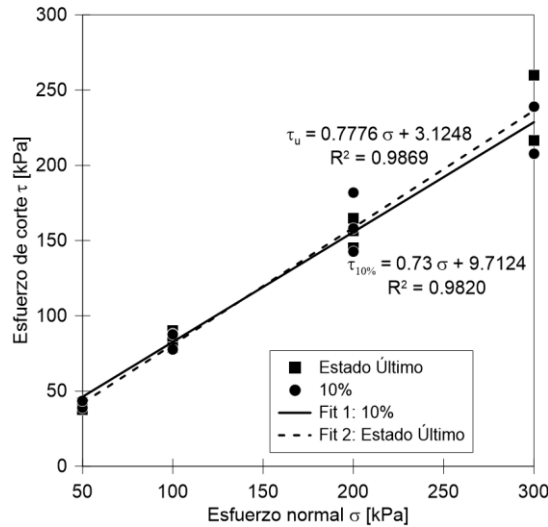


Figura 6-14: Parámetros de resistencia al corte de laponita RD con 1 hora de compresión.

Tabla 6-16: Valores corte directo muestra laponita RD con 1 hora de compresión.

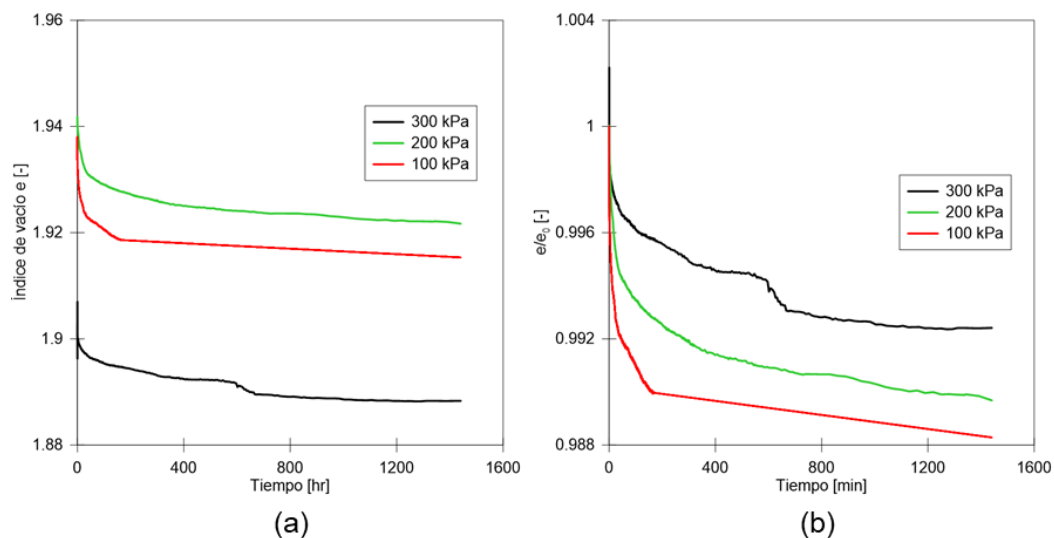
Test	$e_0$ [-]	Esfuerzo Normal [kPa]	Esfuerzo corte (10%) [kPa]	Esfuerzo corte (20%) [kPa]
Lap 1hr 50kPa	1,892	50	38,80	37,77
Lap 1hr 50 kPa	1,903	50	43,30	42,03
Lap 1hr 100 kPa	1,821	100	88,02	90,00
Lap 1hr 100 kPa	1,893	100	87,63	83,63
Lap 1hr 100 kPa	1,952	100	77,49	79,01
Lap 1hr 200 kPa	1,952	200	182,00	164,67
Lap 1hr 200 kPa	1,654	200	142,78	145,26
Lap 1hr 200 kPa	1,876	200	158,16	156,55
Lap 1hr 300 kPa	1,851	300	207,76	216,59
Lap 1hr 300 kPa	1,858	300	239,18	259,89

Tabla 6-17: Parámetros de resistencia al corte de laponita RD.

Parámetro	10%	20%
$\phi$ [°]	36.1	37.9
c [kPa]	9.71	3.12

### 6.7.1.2 Laponita (Compresión 24 horas)

Las Figura 6-15 (a) y (b) presentan la consolidación de 24 horas de la muestra, antes de aplicar el corte. En Figura 6-15 (a) se presenta el gráfico índice de vacío versus tiempo, los esfuerzos normales aplicados en estos especímenes son 100, 200 y 300 kPa. En la Figura 6-15 (c), se presenta el esfuerzo de corte versus la deformación horizontal, el comportamiento que desarrollan los especímenes es más bien contractivo, dada la baja densidad relativa que poseen las probetas. Las experiencias sólo se realizaron una vez.



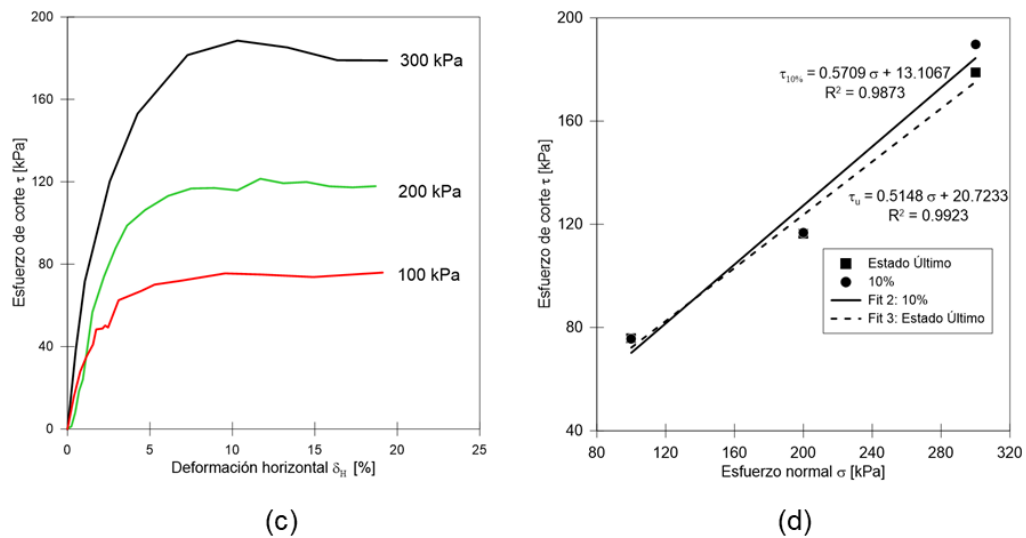


Figura 6-15: (a) Índice de vacío versus tiempo, (b) índice de vacío normalizado versus tiempo, (c) Esfuerzo de corte  $\tau$  versus deformación horizontal  $\delta_H$  y (d) Parámetros de resistencia al corte de laponita RD; comprimidas durante 24 horas a 100, 200 y 300 kPa.

La Tabla 6-18 presenta los parámetros de resistencia al corte a un 10% y a un 20% de deformación, estos se graficaron en la Figura 6-15 (d). Al realizar la regresión lineal en el gráfico se obtienen los parámetros de resistencia al corte último de  $\phi = 20,7^\circ$  y una cohesión de 13,1 kPa, para la laponita con una consolidación de una hora (Ver Tabla 6-19).

Tabla 6-18: Valores corte directo muestra laponita comprimida durante 24 horas.

Test	$e_0$ [-]	DR [%]	Esfuerzo Normal [kPa]	Esfuerzo corte (10%) [kPa]	Esfuerzo corte (20%) [kPa]
Lap 24hr – 100kPa	1.938	24	100	75.50	75.92
Lap 24hr – 200kPa	1.942	24	200	116.70	116.27
Lap 24hr – 300kPa	1.903	24	300	189.69	178.89

Tabla 6-19: Parámetros de resistencia laponita RD comprimidas durante 24 horas.

Parámetro	10%	20%
$\phi$ [°]	27.2	29.7
c [kPa]	20.7	13.1

## 6.7.2 Arena limpia

En las Figura 6-16 (a) y (b) se presenta la consolidación de una hora de la muestra, antes de aplicar el corte. En Figura 6-16 (a) se presenta el gráfico índice de vacío versus tiempo, los esfuerzos normales aplicados en estos especímenes son 50, 100, 200 y 300 kPa y en Figura 6-16 (b) se presenta el mismo gráfico pero normalizado.

En la Figura 6-16 (c), se presenta el esfuerzo de corte versus la deformación horizontal, el comportamiento que desarrollan los especímenes es más bien contractivo, dada la baja densidad relativa que poseen las probetas. En la Figura 6-16 (d) se presenta un gráfico deformación vertical versus deformación horizontal, en estas curvas se corrobora la naturaleza contractiva de las probetas. Las experiencias se repitieron al menos dos veces por carga de esfuerzo vertical.

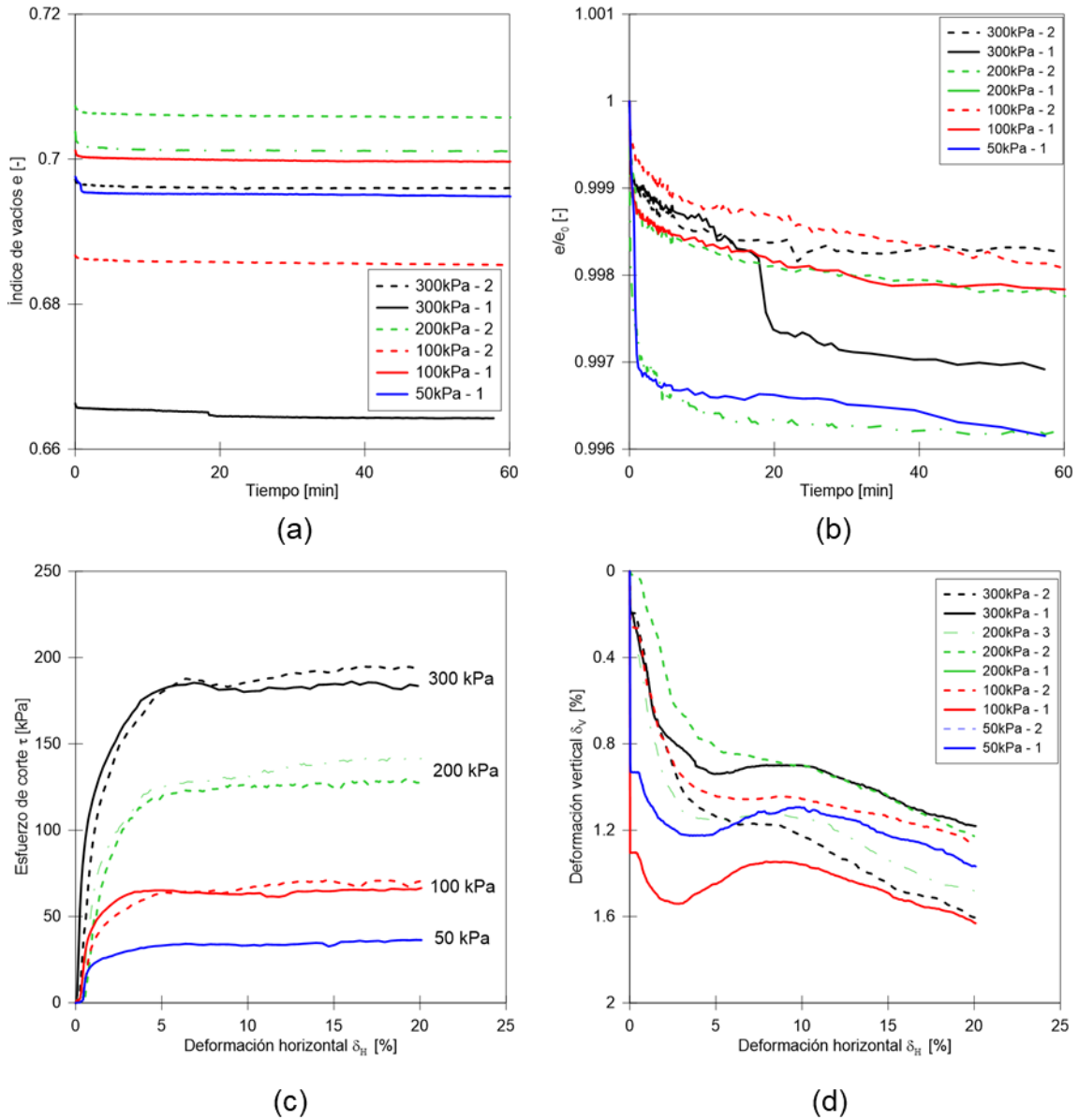


Figura 6-16: (a) Índice de vacío versus tiempo, (b) índice de vacío normalizado versus tiempo, (c) Esfuerzo de corte  $\tau$  versus deformación horizontal  $\delta_H$  y (d) Deformación vertical  $\delta_v$  versus deformación horizontal  $\delta_H$ ; muestras de arena limpia comprimidas durante 1 hora a 50, 100, 200 y 300 kPa.

En la Tabla 6-20 se presentan los parámetros de resistencia al corte a un 10% y a un 20% de deformación y estos se graficaron en la Figura 6-17. Al realizar la regresión lineal en el gráfico se obtienen los parámetros de resistencia al corte último de  $\phi = 32^\circ$  y una cohesión nula, dado que es una (Ver Tabla 6-21).

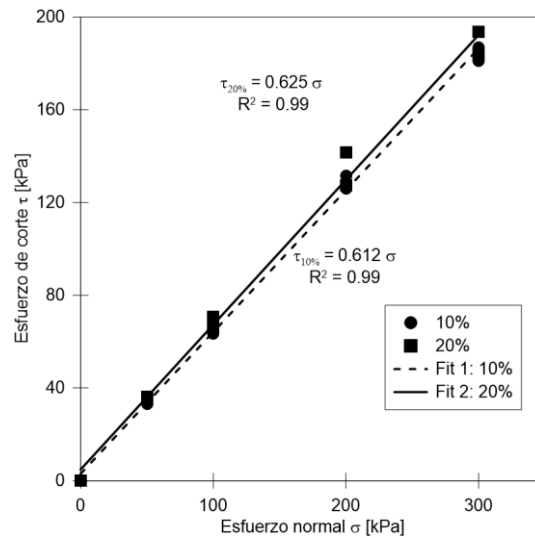


Figura 6-17: Parámetros de resistencia al corte de arena limpia con 1 hora de compresión.

Tabla 6-20: Valores corte directo muestra arena limpia con compresión de 1 hora.

Test	$e_0$ [-]	DR [%]	Esfuerzo Normal [kPa]	Esfuerzo corte (10%) [kPa]	Esfuerzo corte (20%) [kPa]
DSCS - 50 kPa	0.695	29	50	33	36
DSCS - 100 kPa	0.700	27	100	63	66
DSCS - 200 kPa	0.706	25	200	126	127
DSCS - 300 kPa	0.664	39	300	181	184
DSCS - 200 kPa	0.702	27	200	132	142
DSCS - 300 kPa	0.696	29	300	187	194
DSCS 100 kPa	0.685	32	100	66	71

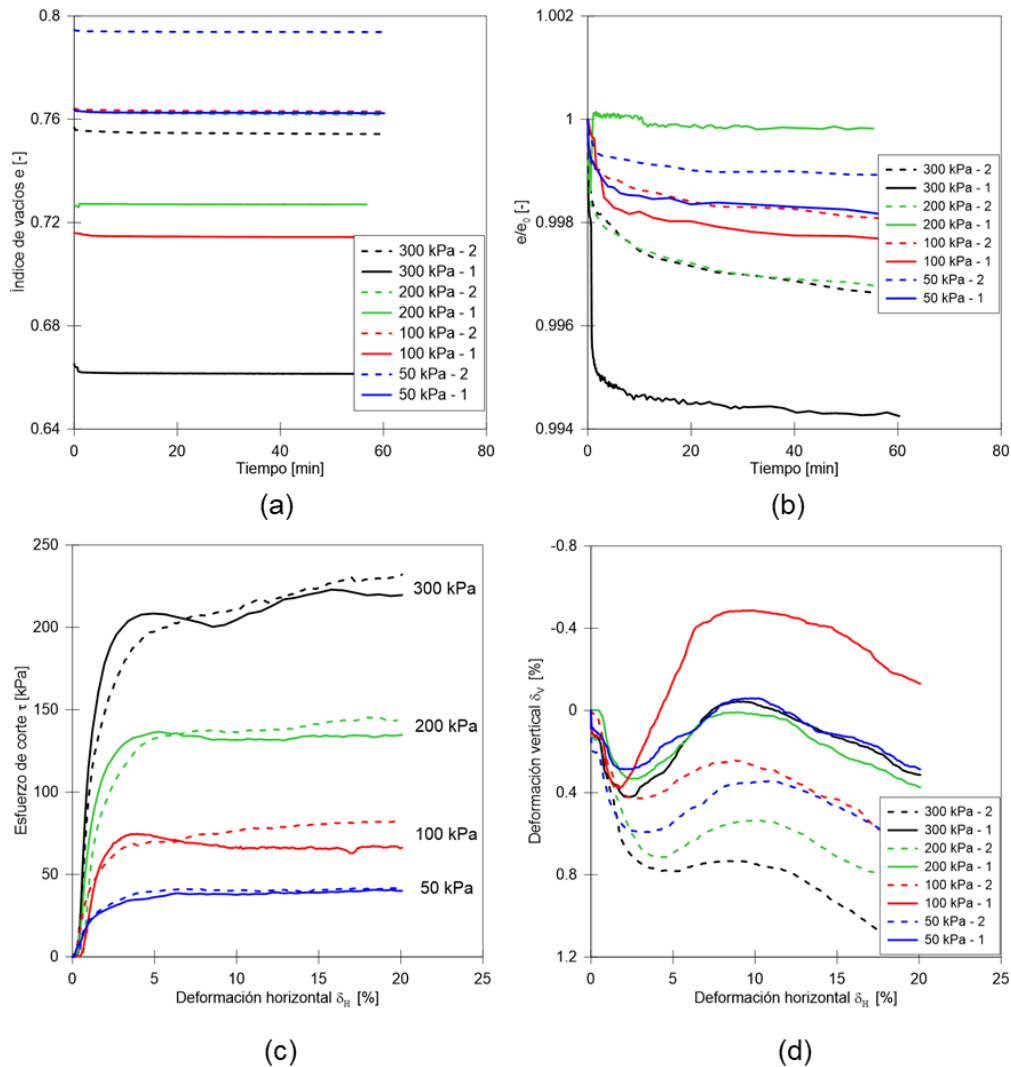
Tabla 6-21: Parámetros de resistencia arena limpia con compresión de 1 hora.

0	10%	20%
$\phi$ [°]	31.5	32
c [kPa]	0	0

### 6.7.3 DM1%

En las Figura 6-18 (a) y (b) se presenta la consolidación de una hora de la muestra, antes de aplicar el corte. En Figura 6-18 (a) se presenta el gráfico índice de vacío versus tiempo, los esfuerzos normales aplicados en estos especímenes son 50, 100, 200 y 300 kPa y en Figura 6-18 (b) se presenta el mismo gráfico pero normalizado.

En la Figura 6-18 (c), se presenta el esfuerzo de corte versus la deformación horizontal, el comportamiento que desarrollan los especímenes es más bien contractivo, dada la baja densidad relativa que poseen las probetas. En la Figura 6-18 (d) se presenta un gráfico deformación vertical versus deformación horizontal, en estas curvas se corrobora la naturaleza contractiva de las probetas. Las experiencias se repitieron al menos dos veces por carga de esfuerzo vertical.



**Figura 6-18: (a) Índice de vacío versus tiempo, (b) índice de vacío normalizado versus tiempo, (c) Esfuerzo de corte  $\tau$  versus deformación horizontal  $\delta_H$  y (d) Deformación vertical  $\delta_v$  versus deformación horizontal  $\delta_H$ ; muestras de arena DM1% consolidadas durante 1 hora a 50, 100, 200 y 300 kPa.**

La Tabla 6-22 presenta los parámetros de resistencia al corte a un 10% y a un 20% de deformación (Ver Figura 6-19). Al realizar la regresión lineal en el gráfico se obtienen los parámetros de resistencia al corte último de  $\phi = 36,2^\circ$  y se asume que la cohesión es nula, ya que la concentración de laponita es muy pequeña para afectar notablemente a la cohesión (Ver Tabla 6-23). La incorporación de 1% de laponita incrementa en aproximadamente  $4^\circ$  el ángulo de fricción interna de la arena limpia.

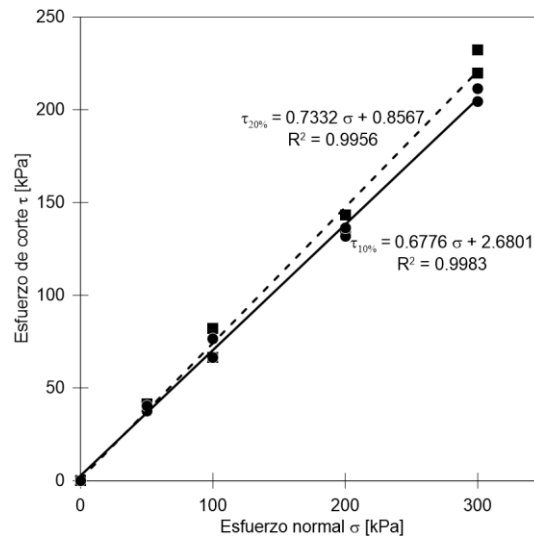


Figura 6-19: Parámetros de resistencia al corte de DM1% con 1 hora de compresión.

Tabla 6-22: Valores corte directo DM1% con 1 hora de compresión.

Test	$e_0$ [-]	Esfuerzo Normal [kPa]	Esfuerzo corte (10%) [kPa]	Esfuerzo corte (20%) [kPa]
DM1%-200KPa	0,727	200	131,7	134,8
DM1%-300KPa	0,661	300	204,6	219,6
DM1%-100KPa	0,714	100	66,5	66,3
DM1%-50KPa	0,762	50	37,7	41,4
DM1%-100KPa	0,763	100	76,5	82,1
DM1%-200KPa	0,762	200	136,2	143,2
DM1%-300KPa	0,754	300	211,5	232,1
DM1%-50KPa	0,794	50	40,4	41,5

Tabla 6-23: Parámetros de resistencia DM1% con 1 hora de compresión.

	10%	20%
$\phi$ [°]	34.1	36.2
c [kPa]	0	0

## 6.8 Microscopio electrónico de barrido (SEM)

### 6.8.1 Arena limpia

En la Figura 6-20 se presentan dos fotografías obtenidas del SEM de la muestra de arena limpia. (a) posee una magnificación de x200 y se observan partículas de arena de dimensiones regulares y redondeadas y (b) posee una magnificación de x20.000, se observa que en la superficie de una partícula de arena existe una pequeña cantidad de finos, que no supera el 2 a 5% de acuerdo con sus distribuidores.



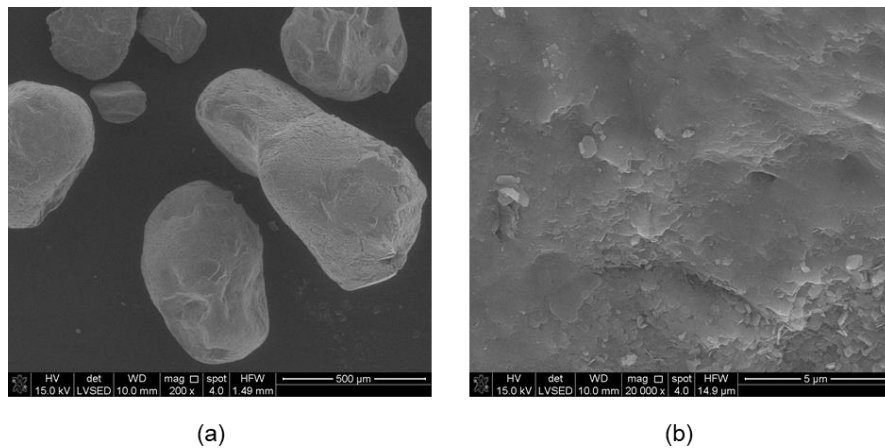


Figura 6-20: Imágenes obtenidas del SEM de (a) Arena limpia (x200), (b) Arena limpia (x20.000).

### 6.8.2 DM1%

En la Figura 6-21 se presentan dos fotografías obtenidas del SEM de la muestra de DM1%. (a) posee una magnificación de x200 y se observan partículas de arena de dimensiones regulares y redondeadas además de partículas más pequeñas y angulares. (b) posee una magnificación de x20.000, se observa que en la superficie de una partícula de arena existe más concentración de partículas que las observadas en la arena limpia.

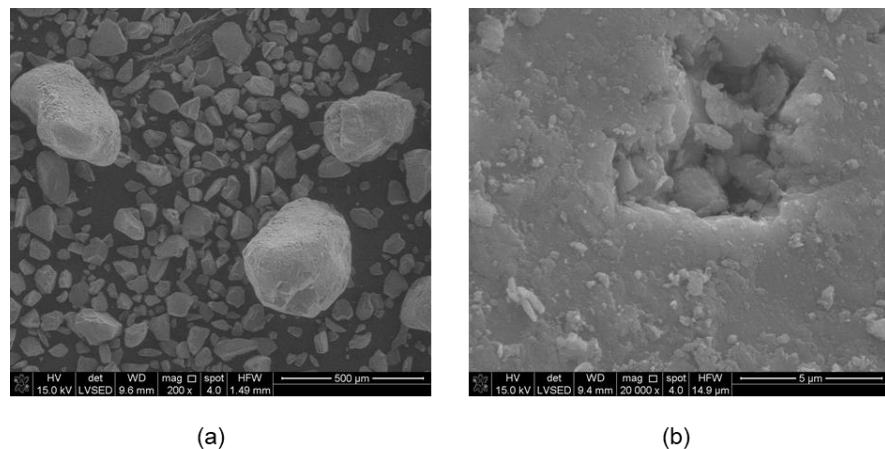
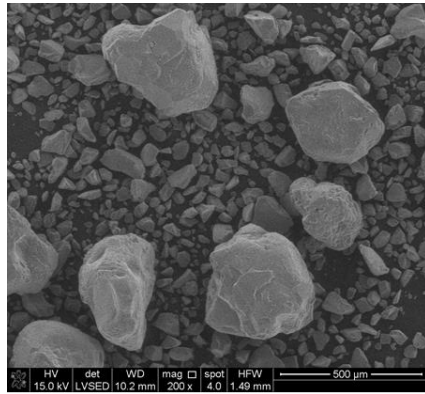


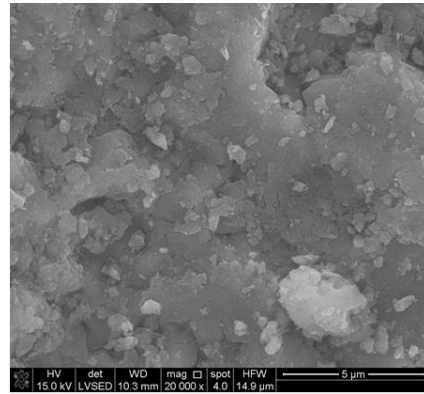
Figura 6-21: Imágenes obtenidas del SEM de (a) DM1% (x200), (b) DM1% (x20.000)

### 6.8.3 DM3%

En la Figura 6-22 se presentan dos fotografías obtenidas del SEM de la muestra de DM3%. (a) posee una magnificación de x200 y se observan partículas de arena de dimensiones regulares y redondeadas además partículas más pequeñas y angulares en mayor concentración que la muestra DM1%. (b) posee una magnificación de x20.000, se observa que en la superficie de una partícula de arena existe mucha más concentración de partículas que las observadas en la arena DM1%.



(a)



(b)

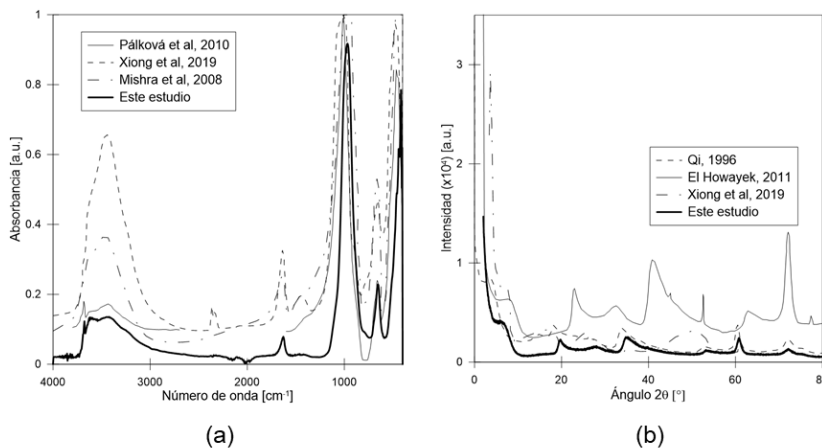
**Figura 6-22: Imágenes obtenidas del SEM de (a) DM3% (x200), (b) DM3% (x20.000)**

## CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 7.1 Comparación del análisis físico – químico con la bibliografía

La Figura 7-1 presenta que tanto el análisis FTIR y la difracción de rayos X son comparables con las realizadas con otros autores, a pesar de que se desconozca la metodología exacta de experimentación. Las principales diferencias en la Figura 7-1 (a) son las intensidades con las que se expresan los *peaks* de absorción, en particular los que están sobre los  $3000\text{ cm}^{-1}$ . Esto puede atribuirse a que en este estudio se secaron las muestras, por lo que el contenido de humedad es diferente a una muestra con humedad natural. Sin embargo, existen coincidencias en el resto de los *peaks* evidenciando la similitud del material.

La Figura 7-1 (b) presenta que no existen grandes diferencias en los resultados de difracción de rayos X. Las principales discrepancias en cuanto a la coincidencia de *peaks* se dan con El Howayek, (2011), esto se atribuye que en este estudio el ánodo utilizado en la emisión de los rayos X es de cobre, mientras que en los del autor es de cobalto. Si bien con esta técnica se puede obtener un patrón comparativo con otros autores, no se pueden obtener los parámetros cristalográficos para determinar su geometría, dado que la laponita es una nanopartícula (Tilley, (2004)).



**Figura 7-1: (a) Comparación de absorbancia versus número de onda de laponita de diferentes autores, (b) Comparación de intensidad versus ángulo de difracción  $2\theta$  de diferentes autores.**

En cuanto al análisis de la pérdida de humedad se observa que los escenarios de deshidratación para este estudio son diferentes a los reportados en la bibliografía. El primer escenario de deshidratación en la laponita bruta (LB) se da desde  $25^{\circ}\text{C}$  a  $116^{\circ}\text{C}$ , el segundo escenario desde  $116$  a  $535^{\circ}\text{C}$  y el tercero sobre los  $535^{\circ}\text{C}$ .

Las asignaciones realizadas en este trabajo son comparables con las de Guimarães et al., (2007) pero no así con los de El Howayek, (2011). Estas diferencias podrían explicarse debido a las diferentes tasas de incremento de temperatura usadas. En este trabajo y en de Guimarães et al., (2007) se ocupa una tasa de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  y El Howayek, (2011) ocupa una tasa de  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Esto implica que los escenarios de deshidratación ocurran a temperaturas diferentes. Otro factor que puede acentuar estas diferencias entre las curvas es el contenido de humedad inicial en las muestras.

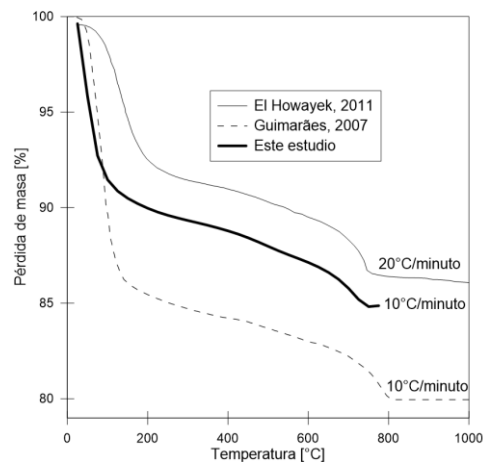


Figura 7-2: Comparación de temperatura versus pérdida de masa de laponita de diferentes autores.

La gran diferencia entre las superficies específicas reportadas por diferentes autores es debido al tipo de gas que se utiliza en el ensayo y al contenido de humedad inicial. En este estudio se realizó un ensayo BET con  $N_2$  y se obtuvo un valor de  $322 \text{ m}^2/\text{g}$ , lo cual dista de los  $370 \text{ m}^2/\text{g}$  reportados por los datos de fábrica BYK Additives & Instruments, (2013) y Herrera, (2003). También dista de los  $473 \text{ m}^2/\text{g}$  reportados por El Howayek, (2011). Estas diferencias podrían explicarse, en el primer caso porque se utiliza una temperatura de  $300^\circ\text{C}$ , por ende, puede estar ocurriendo la segunda deshidratación por lo que se pudieron degradar térmicamente algunos grupos O - H, reduciendo así el área superficial presente. En el segundo caso, la adsorción y desorción se realiza con agua. Cabe recordar que el análisis es sensible al contenido de humedad presente, debido a que el gas que penetra es agua. En relación con esto último, el gas elegido es una variable experimental importante que considerar dada la alta sensibilidad de la laponita de adsorber agua.

## 7.2 Efecto del tamaño de partículas y el contenido de agua

Los ensayos de humedad y termogravimetría TGA conversan con lo reportado por el fabricante BYK Additives & Instruments, (2013), es decir, el contenido de humedad no estructural, es alrededor de 10% en todas las muestras. No se puede confirmar un patrón de deshidratación de acuerdo con el tamaño de partículas dada las inconsistencias entre los ensayos de humedad y el primer escenario de los ensayos de termogravimetría. Tampoco se encuentran relaciones entre el tamaño de partículas versus los rangos de temperatura y tiempo que definen los tres escenarios de deshidratación presentados en las curvas termogravimétricas.

Si bien los estudios de pérdida de humedad parecieran no entregar alguna relación con respecto al tamaño de las partículas y el contenido de humedad, los ensayos que estudian la composición química indican lo contrario. Esto se evidencia en el análisis FTIR, en los *peaks* asociados a los números de onda cercanos a 3000, ya que están asociados a los enlaces O - H. A medida que mayor es el tamaño de la partícula de laponita, mayor es la absorbancia relativa, esto supone que las partículas de mayor tamaño poseen más enlaces O - H, es decir, más contenido de agua.

Junto con lo anterior, las curvas de difracción de rayos X presentan sus principales diferencias en el ángulo  $2\theta = 6,2 \pm 0,001$ , que está asociado al *peak* de los enlaces O – H. La comparación entre las curvas de muestras sin tamizar con humedad natural versus las muestras en seco evidencia que éstas últimas pudieron alcanzar la segunda deshidratación al ser calentadas a 105°C durante 300 minutos. Las diferencias en los *peaks* de este ángulo se vuelven a observar en muestras con diferentes tamaños, por lo que se supone que presentan distintas concentraciones de grupos O – H. Tanto LG como LM poseen un patrón cristalográfico similar en el ángulo en cuestión, mientras que LF posee un comportamiento diferente, más parecido a LB. Esto podría explicarse con la distribución granulométrica, dado que más del 50% del tamaño de las partículas corresponden a la fracción fina.

En cuanto a la concentración de los elementos químicos medidos por el EDS, fue el único ensayo de espectroscopía que no se encontró un patrón que asocie la concentración de los elementos con el tamaño de las partículas. Aunque las muestras LF presentaron la menor concentración de oxígeno, lo que indicaría un menor contenido de agua.

En cuanto a la morfología de las partículas, se observa que las partículas de mayor tamaño poseen formas regulares en sus tres dimensiones, mientras que las partículas finas son más bien planas. Esto puede sugerir que en las partículas de mayor tamaño de laponita existe una mayor cantidad de partículas unidas a través de los cationes libres, presentando distribuciones donde las moléculas de agua pueden quedar atrapadas.

### 7.3 Capacidad de adsorción de agua de la laponita

#### 7.3.1 Límites de Atterberg

En este estudio se obtuvo que el límite líquido de la laponita es 1017, el límite plástico 187, por lo tanto, el índice de plasticidad es 830. En la Tabla 7-1 se presenta el promedio y la desviación estándar de los límites de Atterberg consultados por la bibliografía (Ver Tabla 2-10) y en este trabajo. De acuerdo con esto, los valores obtenidos de límite líquido y límite plástico son más bajos con respecto a los autores.

**Tabla 7-1: Promedio y desviación estándar de los resultados de Límite de Atterberg de todos los autores.**

Parámetro	Límite líquido [%]	Límite plástico [%]	Índice de plasticidad [%]
Promedio [%]	1124	214	910
$\sigma$ [%]	118	36	135

La montmorillonita sódica posee un límite líquido de 700, un límite plástico de 250 y un índice de plasticidad de 650 (Lambe & Whitman, (1973)), lo cual es 40% menor que la laponita, es decir, la laponita tiene una capacidad de adsorción muchísimo mayor que las arcillas naturales. Esto último explica los altos índices de vacíos obtenidos en las mediciones de Wallace & Rutheford, (2015), superando los índices de vacío típicos de las montmorillonitas (Ver Figura 2-51).

Si bien la laponita posee un gran índice de plasticidad en comparación con arcillas naturales, no se entiende por qué posee una capacidad de intercambio catiónico (CEC) similar a las arcillas naturales (Ver Tabla 2-12). Una respuesta a este fenómeno puede ser el nano tamaño que poseen las partículas de laponita.

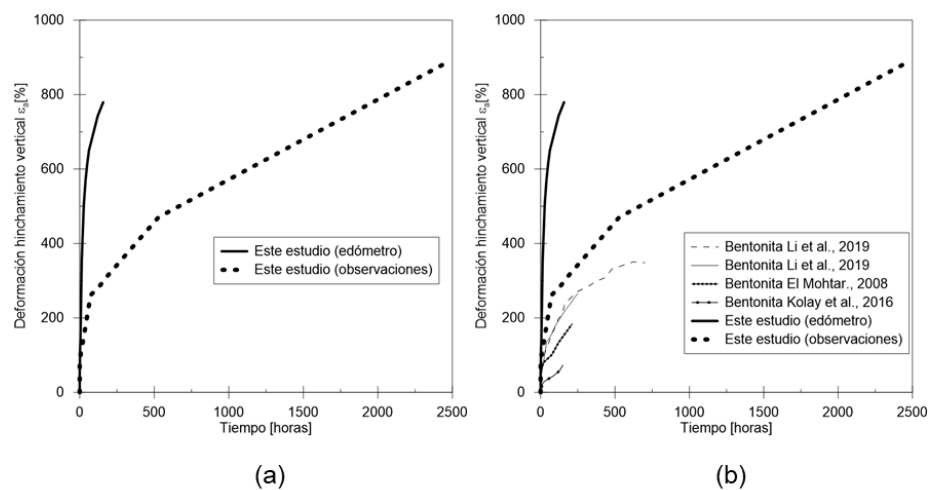
### 7.3.2 Hinchamiento y presión de hinchamiento

El hinchamiento es consecuencia inmediata de la gran capacidad de adsorción de agua de la laponita. La Figura 6-6 presenta que la laponita es capaz de deformarse hasta un 800% de forma libre, mientras que con fricción hasta un 200%, esto conversa con las pruebas visuales en donde se alcanza alrededor de 1000% de deformación axial.

En la Figura 7-3 (a) se presentan diferencias en el desarrollo del hinchamiento de la laponita de acuerdo si se ha medido con un edómetro o de forma visual. Estas diferencias dependen del contenido de humedad y la forma de saturación, la densidad de elaboración de la probeta y el contenido de sales en las suspensiones.

La Figura 7-3 (b) presenta una comparación de las curvas obtenidas tanto visualmente como edométricamente en probetas de bentonitas confeccionadas con una densidad de  $1.2 \text{ Mg/m}^3$  y un contenido de humedad similar a las probetas de este estudio, es decir entre 20 - 30%. En la bentonita se alcanza el segundo hinchamiento alrededor de las 400 horas y las deformaciones no alcanzan a superar a los 300% de deformación, es decir, la deformación de la laponita es alrededor de 2.5 veces mayor que el hinchamiento de la bentonita en los casos de máxima expresión (expansiones de 800%).

De lo anterior se puede concluir que para hacer una comparación adecuada entre distintas arcillas se debe realizar en las mismas condiciones experimentales, es decir, las probetas deben tener el mismo contenido de humedad y forma de saturación, la misma densidad de elaboración y el mismo contenido de sales.



**Figura 7-3: (a) Comparación de hinchamiento libre de pruebas edométricas versus observaciones (b) Hinchamiento libre de la bentonita (X. Li et al., (2019); X. Y. Li & Xu, (2019); Kolay & Ramesh, (2016), C. El Mohtar, (2008)) en comparación con el hinchamiento libre de laponita medido en edómetro y observaciones.**

En este trabajo la presión máxima de hinchamiento desarrollada por la laponita es 2800 kPa, con un contenido de humedad entre 20-30% y una densidad de elaboración de 2.05 Mg/m<sup>3</sup>. Esto es aproximadamente 24 veces mayor que la bentonita con 114.8 kPa con un contenido de humedad de 30.1% y una densidad de elaboración de 1.2 Mg/m<sup>3</sup>; y 7 veces mayor que la montmorillonita con 454.17 kPa con un contenido de humedad de 28.8% y una densidad de elaboración de 1.2 Mg/m<sup>3</sup> (Thakur & Singh, (2005)). Estos resultados discrepan con los de Kolay & Ramesh, (2016), ya que se obtienen presiones de hinchamiento máxima para la bentonita de 3521.64 kPa, lo cual es aproximadamente un 25% mayor que el de este estudio. Las muestras poseen un contenido de humedad de 40.5% y una densidad de elaboración de 1.19 Mg/m<sup>3</sup>.

#### **7.4 Propiedades geotécnicas de la laponita asociados a fenómenos físico – químicos**

La capacidad de adsorción de agua que posee la laponita es la responsable de las propiedades geotécnicas que posee, tales como; su alta superficie específica, alta plasticidad e impermeabilidad. Junto con lo anterior, calcular la repulsión de doble capa permite comprender los comportamientos mecánicos macroscópicos del suelo arcilloso, tales como la compresibilidad y la expansibilidad (Shang et al., (2018)).

##### **7.4.1 Superficie específica**

La superficie específica es una propiedad compleja de evaluar en una arcilla, dado que se encuentra controlada por las fuerzas de Van der Waals y/o las fuerzas electroestáticas. Es por esto, que el valor de la superficie específica es sensible a estas fuerzas producidas por los cationes de intercambio y por la presencia de agua. Entendiendo lo anterior, se comprende la diferencia entre las superficies específicas calculadas de forma teórica y las medidas de forma experimental a través de la técnica BET.

En el cálculo de la superficie específica de la partícula de laponita a través de la fórmula de Santamarina et al., (2001) se considera tanto la geometría de la partícula como la gravedad específica del suelo. Mientras que la fórmula de Meunier, (2005) considera la composición química de la laponita y la distribución de estos elementos en el espacio. Independientemente del método que se utilice, ambos llegan a un valor cercano de 900 m<sup>2</sup>/g, que es lo reportado por BYK Additives & Instruments, (2014) para la partícula de laponita individual. En estos cálculos no se considera el efecto de la fuerza iónica entre las partículas de laponita ni tampoco la presencia del agua.

El ensayo BET es capaz de considerar los efectos de fuerza iónica y presencia de agua, ya que el gas inyectado penetra los espacios accesibles entre las partículas, es por esto que este valor suele ser mucho menor que 900 m<sup>2</sup>/g, ya que producto de la fuerza iónica o a la ausencia de agua, los espacios entre partículas no son accesibles (Ver Figura 2-13).

## 7.4.2 Teoría de doble capa en la consolidación

Para conocer la repulsión electrostática debido a la teoría de doble capa, Tripathy & Schanz, (2007) propuso una metodología de cálculo basada en la información obtenida experimentalmente de los gráficos presión vertical versus el índice de vacío. Esta metodología utiliza la ecuación (III) y las constantes de la Tabla 7-2.

La Tabla 7-3 presenta los parámetros para el cálculo de la curva presión vertical versus índice de vacío; estas curvas son sensibles a la concentración de iones, a la temperatura, la gravedad específica de la arcilla y la superficie específica de la partícula de arcilla sin considerar interacción eléctrica.

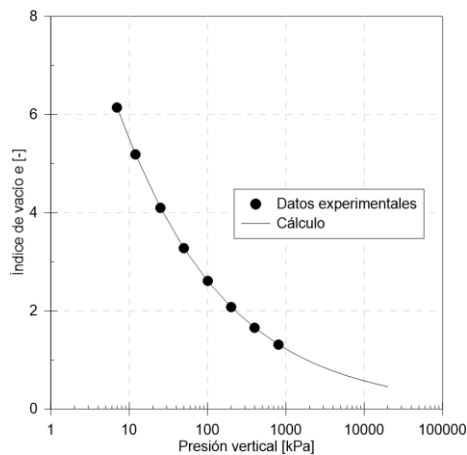


Figura 7-4: Gráfico presión vertical versus índice de vacíos para una bentonita alemana con datos empíricos y experimentales (Tripathy & Schanz, (2007)).

Tabla 7-2: Constantes utilizadas en el método de cálculo de Tripathy & Schanz, (2007).

Carga eléctrica elemental $e'$ [C]	$1.602 \cdot 10^{-19}$
Valencia de ión intercambiable $v$ [-]	1.9
Permitividad en el vacío $\epsilon_0$ [ $C^2 J^{-1} m^{-1}$ ]	$8.8542 \cdot 10^{-12}$
Constante dieléctrica del fluido (agua) $D$ [-]	80.4
Constante de Boltzmann $k$ [J/K]	$1.38 \cdot 10^{-23}$
Número de Avogadro $N_A$ [ión/mol]	$6.022 \cdot 10^{23}$
Peso específico del agua $\gamma_w$ [ $Mg/m^3$ ]	1

Tabla 7-3: Parámetros utilizados para el cálculo de la Figura 7-4.

Concentración iónica $n_0$ ( $10^{-4} M$ ) [ión/ $m^3$ ]	$6.022 \cdot 10^{22}$
Gravedad Específica $G_s$ [-]	2.8
Peso específico del agua $\gamma_w$ [ $Mg/m^3$ ]	1
Superficie específica [ $m^2/g$ ]	650
$K$ [1/m]	61737796
Temperatura absoluta (25°C) $T$ [K]	298



En la Figura 7-5 se realizó el mismo cálculo propuesto por Tripathy & Schanz, (2007) con los datos de Wallace & Rutheford, (2015). Para el cálculo se consideró los datos experimentales de consolidación del gel de laponita a 4% y 4.5% de concentración, una concentración iónica de  $2 \cdot 10^{-4}$  M (Wallace & Rutheford, (2015)), la gravedad específica de la laponita de acuerdo a la Tabla 2-2, temperatura ambiente (25°C) y la superficie específica calculada con el método de Santamarina et al., (2001).

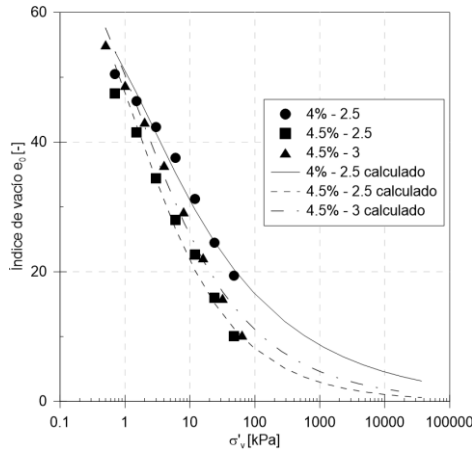


Figura 7-5: Datos de consolidación de Wallace & Rutheford, (2015) y calculados de forma teórica.

Tabla 7-4: Parámetros modificados de la Tabla 7-2 para el cálculo de trayectoria de laponita.

Concentración iónica $n_0$ ( $2 \cdot 10^{-4}$ M) [ion/m <sup>3</sup> ]	$1.2044 \cdot 10^{23}$
Gravedad Específica $G_s$ [-]	2.57
Superficie específica (medida con Santamarina et al., (2001) [m <sup>2</sup> /g]	859
K [1/m]	45952857
Temperatura absoluta (25°C) T [K]	298

La Figura 7-5 presenta una tendencia a la disminución del índice de vacío en la medida que se aplica presión vertical, esta tendencia es mayor en la medida que aumenta la concentración de laponita en la suspensión. Este fenómeno es más evidente al final de la curva, alrededor de los 40.000 kPa, en donde, las suspensiones de mayor concentración poseen menores índices de vacíos.

### 7.4.3 Teoría de doble capa en el hinchamiento

Komine & Ogata, (1996) propuso una metodología de cálculo para conocer la repulsión electroestática debido a la teoría de doble capa al dejar hinchar libremente a una arcilla. Esta metodología utiliza la ecuación (III), las ecuaciones presentes en dicho estudio y las constantes de la Tabla 7-2. En la Tabla 7-5 se presentan los parámetros solicitados para la bentonita.

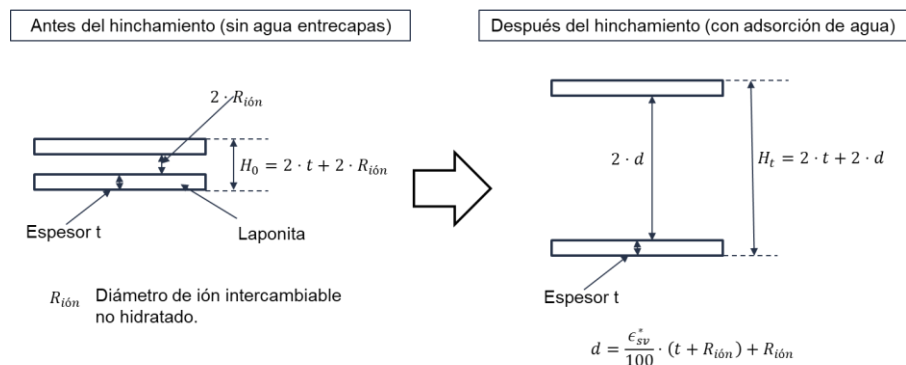


Figura 7-6: Proceso físico detrás del método de cálculo de Komine & Ogata, (1996).

En la Figura 7-7 se presenta la presión de hinchamiento a diferentes deformaciones máximas de hinchamiento para un tipo de bentonita a una concentración dada de iones. Se observa que principalmente predominan las fuerzas repulsivas.

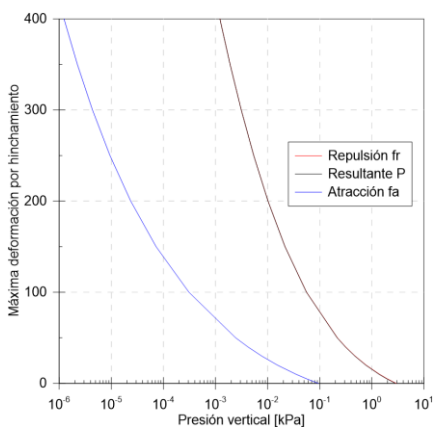


Figura 7-7: Presión de hinchamiento de la bentonita Komine & Ogata, (1996).

Tabla 7-5: Parámetros utilizados para el cálculo de la presión de hinchamiento para la bentonita Komine & Ogata, (1996).

Contenido de bentonita $C_m$ [%]	48
Densidad de la bentonita $\rho_s$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2.79
Densidad inicial de la bentonita compactada $\rho_{d0}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	1.9
Concentración de iones $n_0$ [mol/m <sup>3</sup> ]	20
Superficie específica minerales con hinchamiento $S_m$ [m <sup>2</sup> /g]	810
Superficie específica minerales sin hinchamiento $S_{mn}$ [m <sup>2</sup> /g]	0
Superficie específica calculada $S$ [m <sup>2</sup> /g]	388.8
Espesor de capa de montmorillonita $t$ [m]	$9.6 \cdot 10^{-10}$
Radio del ión sodio $Na^+$ $R_{ión}$ [m]	$9.8 \cdot 10^{-11}$
Constante de Hamaker $A_h$ [J]	$2.2 \cdot 10^{-20}$
Capacidad de intercambio iónico CEC $B$ [meq/g]	0.732
Valencia de ión intercambiable $v$ [-]	1.5
Temperatura absoluta (22°C) $T$ [K]	295

Con la metodología mencionada y con los parámetros presentados en la Tabla 7-6 para la laponita se obtiene la Figura 7-8. En este caso al tratarse de una arcilla pura, se considera que el material con potencial de hinchamiento es del 100%. En (a) se presentan las curvas de presión de hinchamiento a distintas densidades de confección de probeta y a distintos hinchamientos máximos de hinchamiento. A medida que menor es la densidad de confección, menor es la presión de hinchamiento y menor es la deformación de hinchamiento máximo. De acuerdo con lo anterior, es la densidad de confección la que define el hinchamiento máximo libre.

La Figura 7-8 (b) presenta una simulación de las curvas de presión de hinchamiento a diferentes concentraciones de iones, se observa la misma tendencia presentada en la Figura 7-8 (a), y en la medida que aumenta la concentración de iones, aumenta la distancia entre partículas, por lo tanto disminuye la presión de repulsión.

Tabla 7-6: Parámetros utilizados para el cálculo de la presión de hinchamiento para la laponita.

Contenido de laponita $C_m$ [%]	100
Densidad de la laponita $\rho_s$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2.57
Superficie específica minerales con hinchamiento $S_m$ [m <sup>2</sup> /g]	859
Espesor de capa de laponita $t$ [m]	$9.2 \cdot 10^{-10}$
Radio del ión sodio $Na^+$ $R_{ion}$ [m]	$9.8 \cdot 10^{-11}$
Constante de Hamaker $A_h$ [J]	$2.2 \cdot 10^{-20}$
Capacidad de intercambio iónico CEC $B$ [meq/g]	1.15
Valencia de ión intercambiable $v$ [-]	1
Temperatura absoluta (22°C) $T$ [K]	295

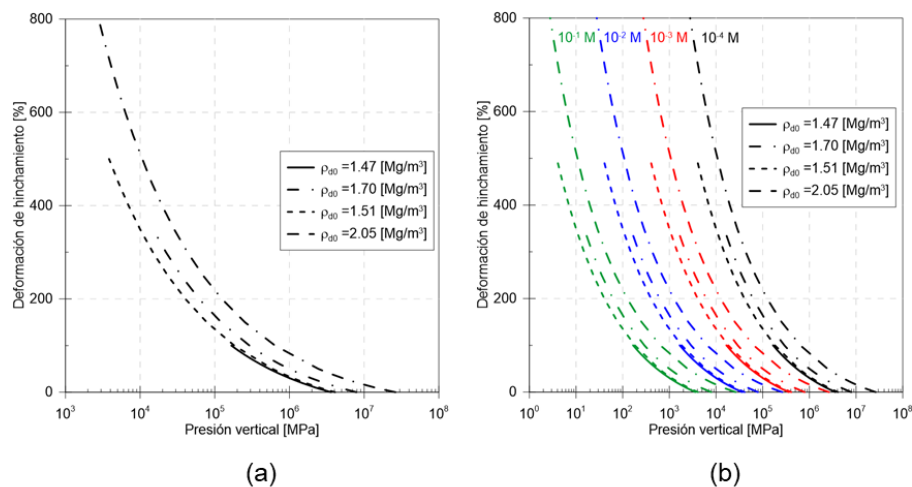


Figura 7-8: (a) Cálculo de presión de hinchamiento para las muestras de laponita realizadas en este estudio, (b) Cálculo de presión de hinchamiento a diferentes concentraciones de iones para las muestras realizadas en este estudio.

#### 7.4.4 Conductividad hidráulica de la laponita

La Figura 7-9 compila los resultados de Wallace & Rutheford, (2015) y Mesri & Olson, (1971). De ellos se concluye que el comportamiento de la laponita es similar al de la

montmorillonita sódica. La diferencia entre ellas radica en el gran índice de vacíos que es capaz de alcanzar la laponita, esto se puede atribuir a su gran capacidad de adsorción.

Como se mencionó anteriormente, el límite líquido de la laponita es alrededor 40% mayor que el de las montmorillonitas conocidas y de acuerdo con lo presentado en la Figura 7-9 la pendiente es 42% mayor para el caso de la laponita medida por edómetro y un 67% mayor para el caso de la laponita medida con permeámetro.

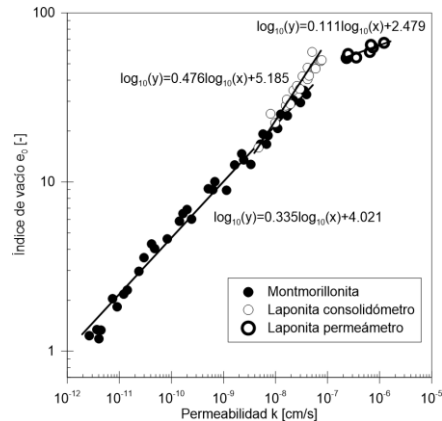


Figura 7-9: Conductividad hidráulica de la montmorillonita y la laponita Mesri & Olson, (1971); Wallace & Rutheford, (2015).

## 7.5 Relación entre las propiedades reológicas y las propiedades geotécnicas de la laponita

### 7.5.1 Relación entre la viscosidad y la resistencia al corte no drenado

En la sección 2.3.4 se recordó los principios básicos que gobiernan a los fluidos. Johnson, (1970) define la relación entre la viscosidad de una suspensión o lodo en la ecuación (XXXVII). Cuando un lodo/suspensión se mueve en una superficie con pendiente, la gravedad induce un esfuerzo de corte  $\tau$  (ecuación (XXXVII)) y de forma opuesta reacciona el esfuerzo de corte no drenado  $S_u$ . La viscosidad está asociada con el gradiente de velocidades del lodo/suspensión.

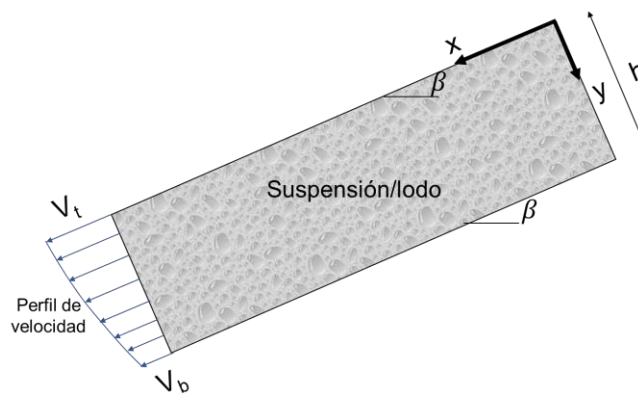


Figura 7-10: Distribución de velocidad de un lodo o suspensión de arcilla Vallejo & Scovazzo, (2003).

$$\frac{-dv}{dy} = \frac{\tau - S_u}{\eta} \quad (\text{XXXVI})$$

$$\tau = \gamma \cdot y \cdot \text{sen}(\beta) \quad (\text{XXXVII})$$

Al manipular algebraicamente las ecuaciones (XXXVII) y (XXXVIII) e integrando desde 0 a una altura  $h$  y entre la velocidad entre el borde libre ( $V_t$ ) y la velocidad directamente de la superficie de contacto ( $V_b$ ), se obtiene la expresión (XXXIX).

$$(V_t - V_b) = \frac{\gamma \cdot h^2 \cdot \text{sen}(\beta) - 2 \cdot S_u \cdot h}{2 \cdot \eta} \quad (\text{XXXVIII})$$

Para entender del mecanismo de movilización del lodo/suspensión se necesita determinar tanto el esfuerzo de corte no drenado como la viscosidad, o puesto de otra forma si se conoce la distribución de velocidades en un lodo/suspensión se podría conocer la viscosidad en función del esfuerzo de corte no drenado y viceversa. De estas expresiones y de los estudios revisados sobre reología y esfuerzo de corte no drenado se concluye que la viscosidad es directamente proporcional al esfuerzo de corte no drenado.

## 7.5.2 Tixotropía

Tanto en los estudios reológicos como en los geotécnicos de una suspensión de laponita; la viscosidad y el esfuerzo de corte no drenado aumentan con el tiempo. Cabe mencionar que a edades tempranas, la suspensión de laponita presenta un comportamiento Newtoniano, con una viscosidad cuatro veces la del agua (El Howayek, (2011)) (Ver Figura 2-32 (a)). En este periodo no ocurre la transición solución a gel o vidrio (Ver Figura 2-40 (a)). Transcurrido dicho periodo comienza el comportamiento viscoelástico de la suspensión (Ver Figura 2-32 (b)). En este periodo se desarrollan las características viscoelásticas del gel.

La Figura 7-11 (a) presenta los resultados de viscosidad obtenidos por El Howayek, (2011) a 10, 100 y 200 minutos. A medida que aumenta la concentración, la viscosidad aumenta de manera lineal. A los 10 minutos la pendiente es considerablemente menor, en comparación con la pendiente de los 100 y 200 minutos. Esto se debe a que se comporta como un fluido Newtoniano mientras que a 100 y 200 minutos la viscosidad aumenta de forma pronunciada.

La Figura 7-11 (b) presenta los resultados reportados por Wallace & Rutheford, (2015), de la resistencia al corte no drenado luego de 7 días y 14 días de acuerdo a distintas concentraciones. En esta edad la suspensión ya se encuentra en estado gel y debería tener un comportamiento viscoelástico marcado.

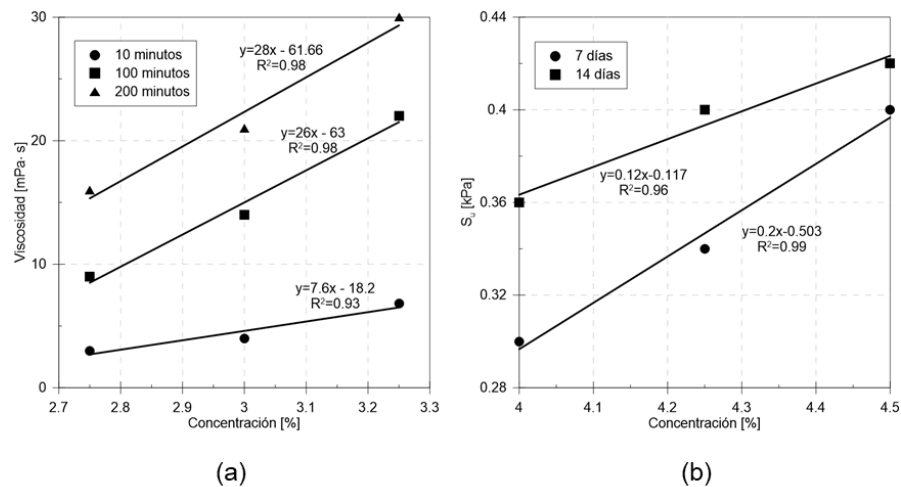


Figura 7-11: (a) Viscosidad versus diferentes concentraciones a 10 minutos, 100 minutos y 200 minutos (El Howayek, (2011)); (b) Esfuerzo al corte no drenado versus diferentes concentraciones a 7 y 14 días (Wallace & Rutheford, (2015)).

### 7.5.3 Resistencia a diferentes profundidades

Wallace & Rutheford, (2015) estudiaron la resistencia al corte no drenado a distintas profundidades y concentraciones. En estos estudios determinaron que el valor de  $S_u$  no varía de acuerdo con la profundidad de la muestra, sino que se mantiene constante (Tabla 2-15), este fenómeno se contrapone con lo esperado.

La discrepancia discutida, puede tener tres posibles explicaciones. La primera es que las arcillas naturales no se encuentran puras en la naturaleza, es decir, se encuentran en diferentes concentraciones con otros suelos, por lo que el valor de  $S_u$  sería resultado de un comportamiento combinado. La segunda, la laponita se encuentra con un gran nivel de saturación lo que permite que las partículas de se dispongan como un vidrio o como un gel. Dependiendo de su estado es que se define si su estructura es predominantemente una “red” o un “enjaulamiento” de partículas. Y tercero, las distancias consideradas en la experiencia de Wallace & Rutheford, (2015) no son significativas para hacer un estudio confiable de la influencia de la profundidad en la resistencia de corte no drenado.

### 7.6 Especímenes permeados versus mezclado en seco

En este trabajo se utilizó el mezclado en seco o *dry mix* como metodología para incorporar la laponita en una matriz arenosa. Tal como se revisó en la sección 2.6, existen ciertas consideraciones que se deben tener en cuenta al momento de utilizar esta metodología; como por ejemplo, que la laponita no queda uniformemente repartida entre los espacios intersticiales de la arena y que en la medida que penetra un flujo de agua, aumentará la conductividad hidráulica.

Por lo anterior, es conveniente realizar pruebas geotécnicas en especímenes permeados. Para esto, en la sección de Anexos se propone el diseño de un permeámetro. Este

dispositivo está basado en el trabajo de C. S. El Mohtar & Rugg, (2011), y está adecuado a las necesidades particulares de materialidad y mano de obra. En este dispositivo se debe fabricar una probeta compatible con todos los equipos geotécnicos, es decir; equipo triaxial, consolidación, entre otros.

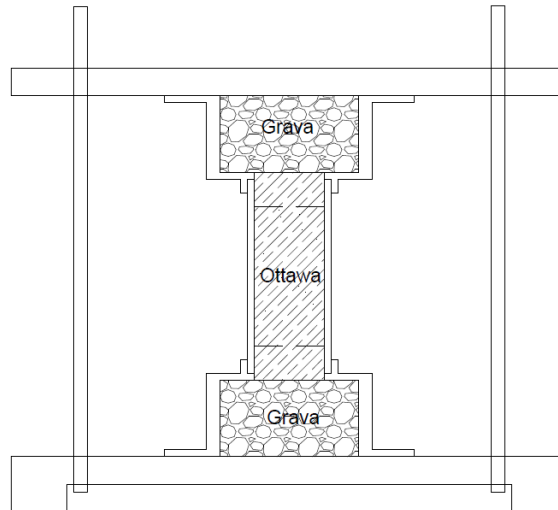


Figura 7-12: Perfil del dispositivo o permeámetro creado en este trabajo.

## 7.7 Desempeño de arena mezcladas en seco con 1% de laponita

### 7.7.1 Comparación de curvas granulométricas

La Figura 7-13 (a) presenta un resumen del promedio de las curvas granulométricas de todos los especímenes. La Figura 7-13 (b) muestra la tendencia de las curvas granulométricas al incorporar 1%, 1.64 y 3% de laponita, la principal diferencia se encuentra entre 0.04 mm a 0.2 mm. A medida que existe una concentración mayor de laponita en la matriz de arena, la curva se desplaza hacia la izquierda. Esto se explica debido a que una considerable parte de la fracción fina queda en la superficie de las partículas de arena.

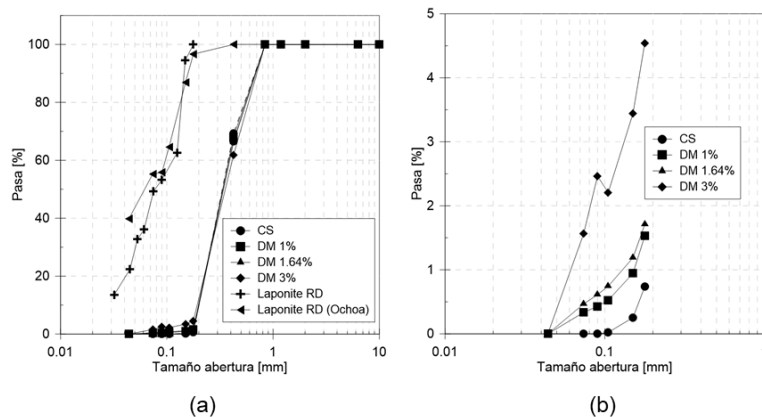


Figura 7-13: (a) Comparación de curva granulométricas de este estudio; (b) Comparación de curva granulométricas mezcla seca.

La Figura 7-14 (a) cuantifica el porcentaje de laponita atrapada por cada fracción. Con una concentración de un 1.64% de laponita, se retiene aproximadamente un 70%. Esto se atribuye a las fuerzas electroestáticas entre la laponita y la arena. La Figura 7-14 (b) presenta la relación entre el porcentaje de concentración de laponita versus el coeficiente de curvatura  $C_c$ , que posee una relación lineal decreciente a medida que aumenta el porcentaje de laponita en los especímenes.

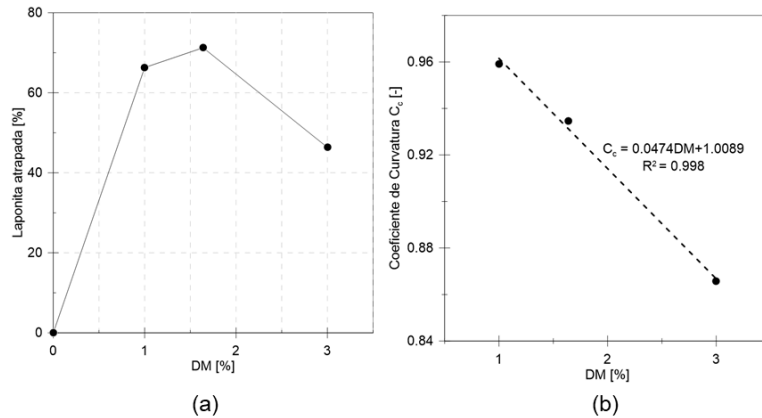


Figura 7-14: (a) Laponita atrapada por fracción, (b) Relación coeficiente de curvatura  $C_c$  y porcentaje de laponita en especímenes *Dry Mix*.

La Figura 7-15 presenta una comparación de la granulometría reportada en la bibliografía versus la obtenida en este trabajo de la laponita. La curva granulométrica láser se encuentra más a la izquierda que la convencional, una posible explicación es que la laponita se encuentra en conglomerados Nicolai T, (2000) y al estar en suspensión (0.2%), las partículas se dispersan. Por lo tanto, las diferencias se atribuyen a las dos metodologías empleadas.

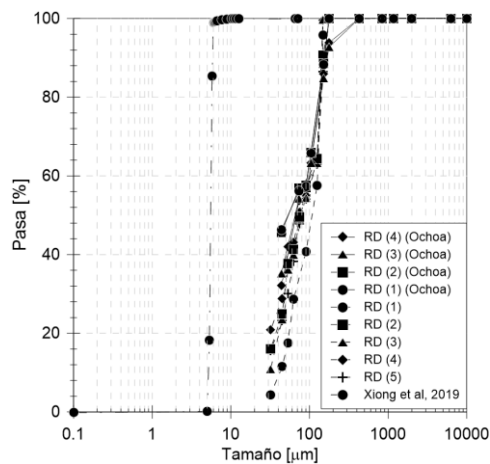


Figura 7-15: Comparación entre curva granulométrica obtenidas en este trabajo versus Xiong et al., (2019).



## 7.7.2 Ángulo en reposo

La Tabla 7-7 presenta el promedio de los valores de la Tabla 6-4 del ángulo en reposo para los tres especímenes; laponita RD 35.5°, arena de Ottawa 30.2° y DM1% 31.7°. De esto se concluye que el incorporar 1% de laponita en arena de Ottawa, el ángulo en reposo aumenta alrededor de un 5% del valor de la arena. Cabe mencionar que en estos ensayos hay variabilidad dada la desviación estándar.

Tabla 7-7: Ángulo en reposo promedio.

	Laponita RD [°]	CS [°]	DM 1% [°]
<b>Promedio</b>	35.5	30.2	31.7
<b><math>\sigma</math></b>	1.97	0.57	1.03

Kim et al., (2018) estudió la arena Jumunjin ( $C_c = 1.06$ ,  $C_u = 1.3$ ,  $G_s = 2.65$ ,  $D_{50} = 0.5$  mm), que es similar a la de Ottawa, con distintas concentraciones de bentonita. La Tabla 7-8 presenta que a medida que aumenta el porcentaje de bentonita en la matriz de arena el ángulo en reposo aumenta. El incremento del ángulo en reposo se da en distintas tasas, en pequeñas concentraciones (< 5%) aumenta alrededor de 1%; entre 5-10% aumenta un 6% y sobre los 10% aumenta de 12 a 18%.

Tabla 7-8: Ángulo en reposo de arena de Jumunjin (Kim et al., (2018)).

Contenido de bentonita [%]	0	5	10	15	20	25	30
<b>Ángulo en reposo</b>	34.5	34.9	36.7	38.7	39.3	40.8	40.3
<b><math>\sigma</math></b>	0.3	0.08	0.2	0.25	0.48	0.93	0.74
<b>Porcentaje de diferencia [%]</b>	-	1	6	12	14	18	17
<b>USCS</b>	SP	SP	SP-SC	SC	SC	SC	SC

De la experiencia de arena con bentonita se puede inferir en primer lugar que en la medida que se incremente la concentración de laponita en la arena aumentará el ángulo en reposo de la arena y en segundo lugar, la laponita le otorgaría a la arena un ángulo en reposo mucho mayor que la bentonita. Ya que con 1% de concentración de laponita aumenta alrededor de un 5% el ángulo en reposo de la arena de Ottawa, mientras que la bentonita con un 5% de concentración aumenta el ángulo en reposo alrededor de 1% de la arena de Jumunjin.

## 7.7.3 Índice de vacío máximo y mínimo

La Tabla 7-9 presenta un resumen del índice de vacío máximo y mínimo de todos los especímenes; para la laponita  $e_{max}=1.9$  y  $e_{min} =1.17$ ; para la arena limpia de Ottawa  $e_{min}=0.477$  y  $e_{max} = 0.759$ . Esto último conversa con los valores presentados en la sección 3.1. También se obtuvieron los resultados de las muestras *dry mix* con concentraciones de laponita de 1%, 3%, 5% y 10%. En la medida que aumenta el contenido de finos disminuye el índice de vacíos mínimo y disminuye el índice de vacío máximo, esto sugiere una disminución de la permeabilidad.

Tabla 7-9: Resumen de  $e_{min}$ , y  $e_{max}$ .

Espécimen	Muestra	$e_{min}$ [-]	$e_{max}$ [-]
Laponita	Promedio (Harvard)	1.17	-
	Promedio (M. tubo)	1.34	1.90
Arena limpia	Tradicional	0.477	0.759
DM	DM1%	0.5	0.81
	DM3%	0.49	0.79
	DM5%	0.47	0.78
	DM10%	-	0.76

La Figura 7-16 (a) presenta el comportamiento del índice de vacío de una mezcla de arena con bentonita. Si el contenido de finos está por debajo del valor límite ( $CF^*$ ), entonces el índice de vacío será el de la arena, si lo supera, el índice de vacío será el de la arcilla. Esto se evidencia en la Figura 7-16 (b), que exhibe la contribución de la arena al aumentar el contenido de finos. Cuando el contenido de finos está bajo  $W_s^a$  el comportamiento predominante es el de la arena; cuando está entre  $W_s^a$  y  $W_s^b$  el comportamiento es intermedio y es aquí donde la presencia de finos induce diferencias en los índices de vacíos de la arena; si supera  $W_s^b$ , el comportamiento es el de la arcilla.

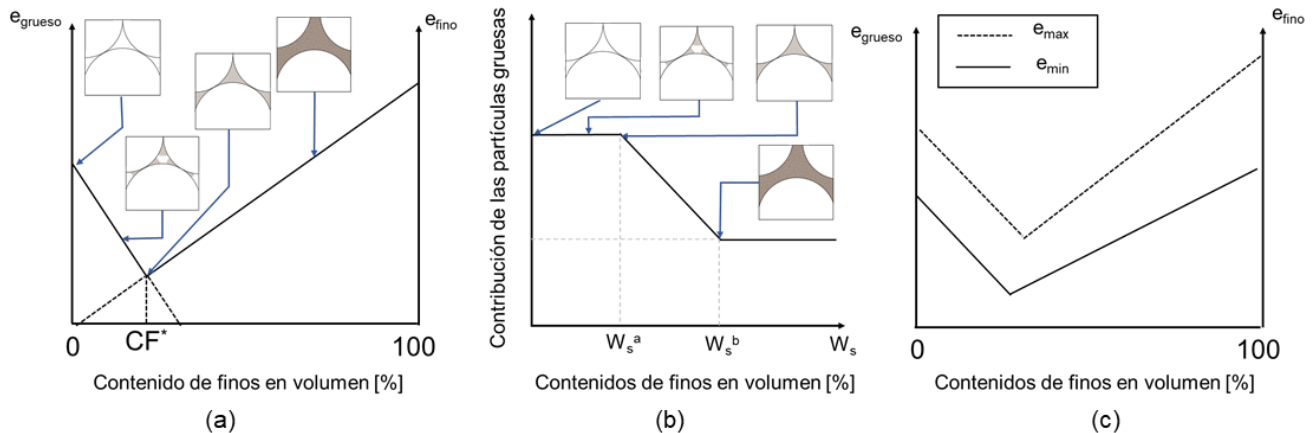


Figura 7-16: (a) Variación teórica del ángulo de fricción interna con distinto contenido de finos versus índice de vacíos; (b) Contribución del tamaño de partícula, (c) Variación teórica de  $e_{max}$  y  $e_{min}$  para la bentonita; Kim et al., (2018).

De acuerdo con lo analizado sobre el índice de vacío de la arena y la arcilla, se obtiene la Figura 7-16 (c), en donde se exhibe la variación del índice de vacío máximo y mínimo de acuerdo con el contenido de bentonita en la arena Jumunjin. Se esperaría que este comportamiento también se presente en las mezclas de arena de Ottawa con laponita, ya que en la medida que aumenta el contenido de finos disminuyen tanto el  $e_{max}$  y el  $e_{min}$  de la arena.

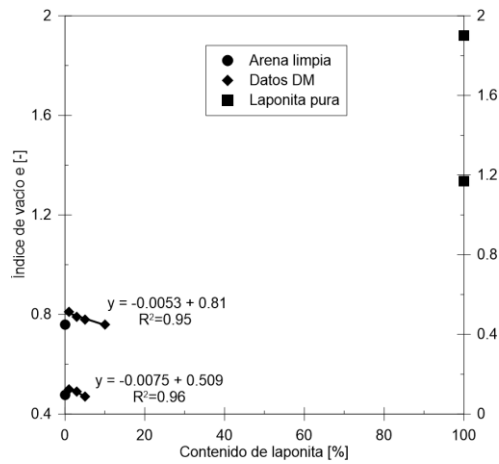


Figura 7-17: Variación teórica de  $e_{max}$  y  $e_{min}$  para la bentonita Kim et al., (2018).

### 7.7.4 Compresión edométrica

La Tabla 7-10 presenta los parámetros de compresión de especímenes de una y 12 horas. El índice de compresión y re-compresión de los especímenes de laponita consolidadas en pasos de 12 horas son mayores en 1% y 35% respectivamente en comparación con los de pasos de una hora. El índice de hinchamiento es menor para los especímenes de 12 horas en 11% versus los de una hora.

La Tabla 7-11 presenta los parámetros de consolidación de la arena de Ottawa con 1% de laponita. Se observa que en la medida que se incorpora laponita, aumenta el índice de compresión en un 29%, el de re-compresión un 166% y el de hinchamiento un 66% versus la arena limpia.

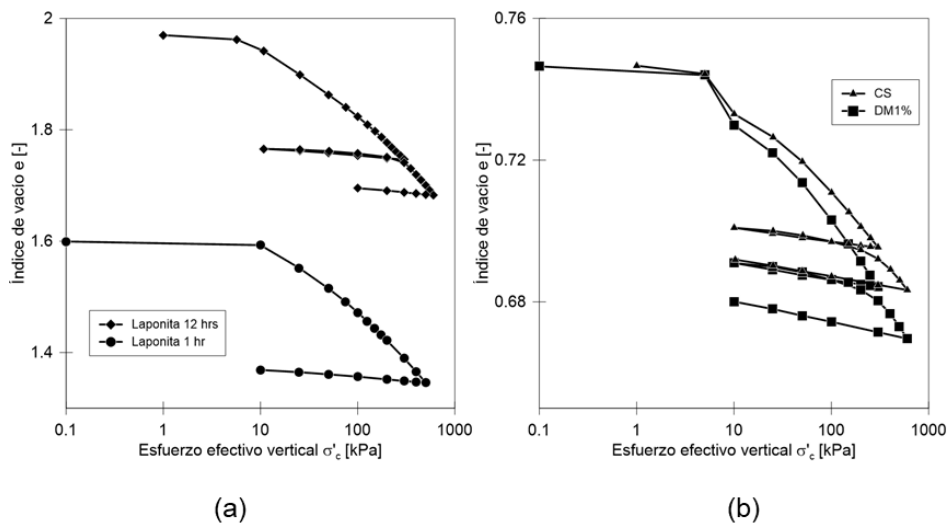
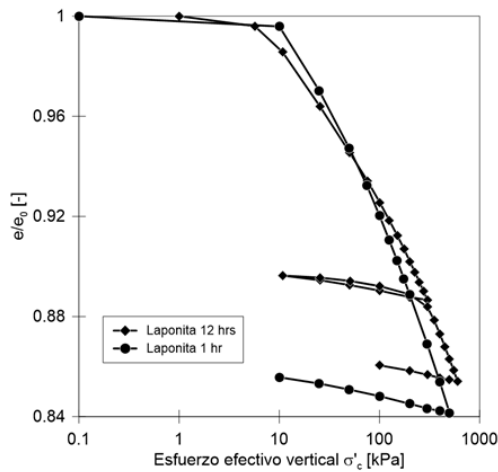
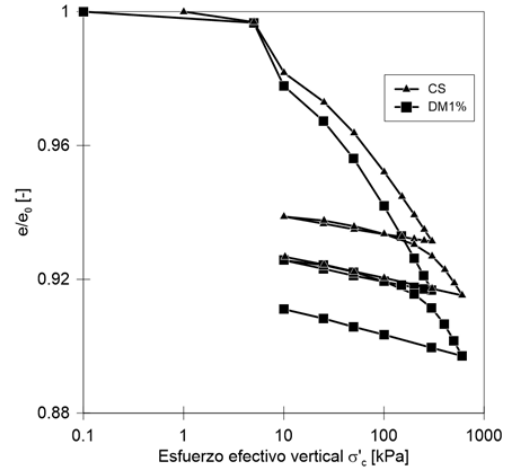


Figura 7-18: (a) Comparación entre Laponita RD distintos tiempos de consolidación; (b) Comparación entre arenas con y sin Laponita RD.



(c)



(d)

Figura 7-19: (a) Comparación entre Laponita RD distintos tiempos de consolidación normalizado; (b) Comparación entre arenas con y sin Laponita RD normalizado.

Tabla 7-10: Parámetros compresión la laponita RD.

	Laponita 1 hora	Laponita 12 horas
$C_r$	0.020	0.027
$C_c$	0.172	0.174
$C_s$	0.017	0.015
$C_r/C_c$	0.115	0.157

Tabla 7-11: Parámetros compresión de la arena con mezcla de laponita.

	CS	DM1%
$C_r$	0.003	0.008
$C_c$	0.031	0.040
$C_s$	0.003	0.005
$C_r/C_c$	0.106	0.205

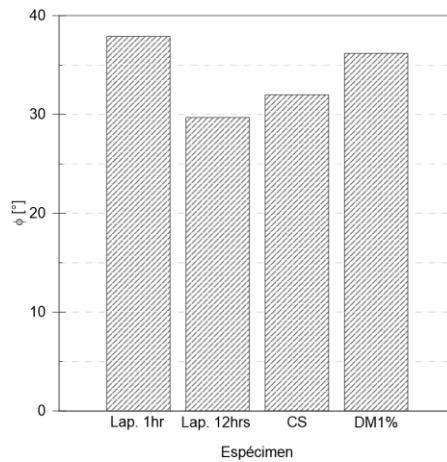
### 7.7.5 Corte Directo

Tanto en la Tabla 7-12 como en la Figura 7-20 se presentan los parámetros de resistencia de los diferentes especímenes estudiados, el parámetro de fricción interna  $\phi$  y la cohesión  $c$ . A medida que se consolida mayor tiempo el espécimen de laponita, menor es su ángulo de fricción interna, mientras que el parámetro cohesivo es mayor que el espécimen con menor tiempo de compresión. Esto se puede atribuir a que la compresión induce un reacomodo de las partículas y al acercarse unas a otras, se producen fuerzas atractivas muy intensas, fortaleciendo la cohesión.

En los especímenes de arena limpia y arena mezclada con laponita se observa un incremento en el ángulo de fricción interna en alrededor de un 13% en la resistencia última. Es posible que exista algún efecto de la cohesión, pero al tratarse de tan baja concentración de laponita ésta se considera mínima y cercana a 0.

Tabla 7-12: Resumen de parámetros resistentes de todos los especímenes.

Especímen	10%		20%	
	$\phi$ [°]	$c$ [kPa]	$\phi$ [°]	$c$ [kPa]
Laponita (1 hora)	36.1	9.71	37.9	3.15
Laponita (12 horas)	27.2	20.7	29.7	13.1
CS	31.5	0	32	0
DM1%	34.1	0	36.2	0



**Figura 7-20: Valor del ángulo de fricción interna  $\phi$  para todos los especímenes.**

Estudios en la arena de relave “El Torito” (Rodríguez, (2019)), determinó que la incorporación de 1% de laponita no afecta a los parámetros resistentes, es decir, no hay variación del ángulo de fricción interna ( $35^\circ$ ) ni se presenta cohesión (0 kPa). Otro estudio, en una arena muy similar a la arena de Ottawa, revela que la incorporación de bentonita implica un aumento del ángulo de fricción interna (Ver Tabla 7-13). Dado lo anterior, se esperaría que a mayores concentraciones de laponita en una matriz arenosa mayor será el ángulo de fricción interna.

**Tabla 7-13: Ángulo de fricción interna arena de Jumunjin Kim et al., (2018).**

Contenido de bentonita [%]	0	5	10	15	20	25	30
Ángulo de fricción interna	35.7	36.5	38.7	38.7	36.9	36.7	34

La resistencia al corte de la mezcla de arena con arcilla con bajo contenido de finos dependen principalmente de las propiedades de las partículas de arena. En la medida que aumenta el contenido de finos, los vacíos se rellenan por completo quedando las partículas de arena completamente rodeadas de finos, por lo que es muy probable que la zona de corte ocurren dentro de dicha zona, es decir, el espécimen se rige por las propiedades de las arcillas (Kim et al., (2018)).

## **CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **8.1 Conclusiones**

En comparación del análisis físico - químico realizado en este trabajo versus la bibliografía, se puede concluir que los resultados son concordantes. Las diferencias que existen se deben a las condiciones experimentales tanto del material como la metodología de ensayo. Finalmente, el material caracterizado es el mismo, por lo que este estudio es representativo.

En relación con el contenido de humedad y al tamaño de partículas, no se puede asegurar que exista un patrón en el contenido de humedad de acuerdo con el tamaño, aunque algunos ensayos de espectrometría indiquen que sí existe. En relación con la composición química, en todos los rangos de tamaño existe una concentración relativamente constante de los elementos químicos, por lo que las muestras son bastante homogéneas en todos los tamaños o fracciones de laponita.

En este estudio se corroboró que la laponita es una arcilla de altísima plasticidad, siendo alrededor de un 40% más plástica que una montmorillonita sódica. Esta propiedad define tanto el comportamiento ante la consolidación como el hinchamiento. Esta particularidad es atribuible al tamaño nanométrico que tiene la partícula, ya que posee un número de CEC dentro de lo esperado en arcillas naturales.

Consecuencia de la gran capacidad de adsorción de agua de la laponita es que ésta puede deformarse axialmente entre un 800% - 1000% de forma libre. Esto es al menos 2.5 veces mayor que arcillas naturales como la bentonita en condiciones similares. Junto con esto, la laponita alcanza una presión de hinchamiento máxima de 2800 kPa, lo que dependiendo de las condiciones experimentales puede ser 24 veces mayor que una bentonita o un 25% menor, de acuerdo con lo reportado.

La variabilidad del comportamiento expansivo de las arcillas sugiere que la presión de hinchamiento es sensible a la densidad de elaboración de la probeta, el contenido de humedad, como ésta ha sido hidratada y del contenido de sales. Dado lo anterior, se corrobora que el desarrollo de las curvas de hinchamiento de la bentonita puede variar de acuerdo con estos parámetros, por lo que se sugiere que esto también ocurra en la laponita.

La capacidad de adsorción de agua que posee la laponita es la responsable de las propiedades geotécnicas que ésta posee; como por ejemplo su alta superficie específica, alta plasticidad, alta impermeabilidad, gran capacidad de compresión y de expansibilidad.

La superficie específica de la laponita medida en este estudio es de 322 m<sup>2</sup>/g, lo cual es cercano a lo reportado por el fabricante y por otros autores (370 m<sup>2</sup>/g). Este valor discrepa de la superficie calculada de forma teórica (760 – 846 m<sup>2</sup>/g). Esto se justifica debido a que en el cálculo teórico no se considera el efecto de las fuerzas electroestáticas y de la presencia de agua, lo cual la técnica BET es capaz de suplir dada su metodología experimental.

La superficie específica es uno de los parámetros requeridos por los métodos numéricos de la teoría de doble capa, tanto para la consolidación como para la expansibilidad. La teoría de la doble capa modela de forma precisa el comportamiento de la laponita ante la consolidación considerando los datos de Wallace & Rutheford, (2015) y el hinchamiento con los datos de este estudio. Los resultados obtenidos modelan el fenómeno de forma exitosa a pesar de considerar la interacción de las partículas de forma ideal, es decir, con disposición paralela de las partículas.

Para la consolidación el cálculo de la curva presión vertical versus índice de vacío requiere de la concentración de iones, temperatura, gravedad específica de la arcilla y superficie específica de la partícula de arcilla sin considerar interacción eléctrica. Para el hinchamiento son estos mismos parámetros además de la densidad de confección de la probeta. Cabe mencionar que en la teoría de la doble capa predominan principalmente las fuerzas repulsivas ante que las atractivas, por lo que la fuerza resultante termina siendo repulsiva.

En cuanto a la permeabilidad se observa que la laponita está en el rango de los suelos prácticamente impermeables y dado los valores obtenidos de  $c_v$  por Wallace & Rutheford, (2015), a la laponita le tomará bastante tiempo en consolidar y será de acuerdo a la concentración de ésta. La pendiente de permeabilidad versus índice de vacío obtenida por Wallace & Rutheford, (2015) es 42% mayor para el caso de la laponita medida por edómetro y un 67% mayor para el caso de la laponita medida con permeámetro que las montmorillonitas comunes. Esto conversa con que el límite líquido de la laponita es alrededor de un 40% mayor que el de las montmorillonitas conocidas.

De acuerdo a los resultados de reología de suspensiones de laponita de El Howayek, (2011) y los ensayos geotécnicos de Wallace & Rutheford, (2015), no se puede determinar una relación con respecto a la viscosidad y a la resistencia del corte no drenado ya que los especímenes poseen diferentes concentraciones. Para determinar la relación lineal entre la viscosidad y la resistencia del corte no drenado, se debe conocer la distribución de velocidades en una suspensión (Johnson, (1970)).

Con los autores anteriormente mencionados si se puede comprobar la relación de las propiedades tixotrópicas a distintos tiempos y diferentes concentraciones de laponita. Tanto los resultados de viscosidad como las de corte no drenado presentan una tendencia lineal en la medida que se incrementa la concentración en distintas ventanas de tiempo. Esto contempla desde que la suspensión se comporta como un fluido Newtoniano hasta cuando se comporta como uno viscoelástico.

Un fenómeno que no se ha esclarecido con los estudios, es el comportamiento no drenado de la laponita a diferentes profundidades. Los estudios de Wallace & Rutheford, (2015) determinan que el valor de  $S_u$  no varía en profundidad, pero en arcillas naturales  $S_u$  aumenta conforme a la profundidad. Esta dicotomía podría aclararse al realizar ensayos con profundidades más representativas.

En relación con la distribución granulométrica de los especímenes *dry mix* se concluye que en la medida que aumenta el porcentaje de laponita, la curva granulométrica se desplaza más hacia la izquierda hasta el tamaño 0.2 mm, además en la medida que

aumenta el porcentaje de laponita disminuye de forma lineal el coeficiente de curvatura  $C_c$ , mientras que el de uniformidad se mantiene relativamente constante. Cabe mencionar que las partículas de laponita retenidas supera el 50% de la muestra.

En cuanto a la curva granulométrica de la laponita medida con granulometría láser se encuentra más a la izquierda que la obtenida con la norma ASTM D-422. Esto se puede explicar ya que la laponita se encuentra en conglomerados y al estar en suspensión (0.2%), las partículas se dispersan pudiéndose captar las partículas de menores tamaños. Estas diferencias se atribuyen a diferencias experimentales.

Al incorporar 1% de laponita en arena de Ottawa, el ángulo en reposo aumenta alrededor de un 5% del valor de la arena. Estudios con bentonita sugieren que el ángulo en reposo de la arena de Ottawa aumentaría en la medida que se incremente el contenido de la arcilla. Junto con lo anterior, la laponita incrementa de forma más significativa el ángulo en reposo de una arena en comparación con la bentonita.

El índice de vacío máximo y mínimo de la laponita es  $e_{max}=1.9$  y  $e_{min}=1.17$  respectivamente y para la arena de Ottawa  $e_{min}=0.477$  y  $e_{max}=0.759$  respectivamente. La incorporación de la laponita de 1%, 3%, 5% y 10% produce una disminución tanto del índice de vacío máximo y mínimo. Se infiere que la disminución alcanzará un valor mínimo y que desde ese punto el índice de vacío que predominará es el de la arcilla.

En este trabajo se estudió principalmente el fenómeno de compresión más que consolidación ya que los especímenes no fueron saturados. Se observa que la adición de 1% de laponita incrementó el coeficiente de compresión, re-compresión e hinchamiento. De acuerdo con lo analizado en estudios realizados en especímenes de arena con bentonita, se esperaría que en la medida que se incremente el contenido de laponita, aumente el coeficiente de compresión  $C_c$ , el coeficiente de hinchamiento se mantendría constante y disminuiría el valor de  $c_v$ .

De acuerdo con el estudio de resistencia al corte realizado en este estudio y al comportamiento estudiado en especímenes de arena con bentonita se deduce que la incorporación de laponita puede significar un aumento en el ángulo de fricción interna, lo anterior se traduce en una mayor resistencia al corte. La resistencia al corte de la mezcla de arena con arcilla con bajo contenido de finos dependen principalmente de las propiedades de las partículas de arena, mientras que en alta concentración de finos el espécimen se rige por las propiedades de las arcillas.

En las imágenes obtenidas a través del SEM se puede apreciar que en la medida que se incorpora más laponita, la presencia de ella es mayor en la superficie de la arena, se presume que las partículas de laponita que quedan adheridas en la superficie de las de arena lo hacen a través de atracción electrostática.

Finalmente, en cuanto a las aplicaciones en la ingeniería civil, con este trabajo se tiene cierto bagaje en cuanto a las propiedades físico, químicas, reológicas y geotécnicas. Pero si se desea conocer más en profundidad el desempeño de la laponita, debe estudiarse con condiciones de ensayo específicas, no obviando los parámetros que controlan su comportamiento, como la presencia de agua, la concentración de laponita, la presencia



de iones, el pH, la temperatura y el tiempo. El uso de la laponita se ve factible en las aplicaciones mencionadas en la sección 2.7 siempre que se controlen los parámetros mencionados.

## **8.2 Recomendaciones para trabajos futuros**

Se recomienda realizar ensayos acabados de adsorción de agua en suspensiones de laponita a distintas concentraciones. Entre los ensayos a realizar se puede mencionar hinchamiento libre y presión de hinchamiento, con extensos tiempos de hinchamiento y consolidación con largos tiempos de carga para estudiar los fenómenos de consolidación primaria y compresión secundaria y corroborar lo modelado por la teoría de la doble capa.

Se recomienda realizar un estudio acabado de la deducción de propiedades geotécnicas de acuerdo con las propiedades reológicas. Es decir, realizar mediciones de la viscosidad, esfuerzo del corte no drenado y el perfil de velocidades en suspensiones de laponita a una misma concentración. Se propone de 3% a 4.5% de concentración en masa de agua si se quiere conocer el rango viscoelástico y en mayores concentraciones si se quiere estudiar el comportamiento como plástico de Bingham.

Para evaluar el desempeño de la laponita en matrices arenosas, se recomienda una batería de ensayos geotécnicos, que incluyan, granulometría, ángulo en reposo, índice de vacío máximo y mínimo, consolidación, corte directo, triaxial monotónico y permeabilidad para especímenes con diferentes contenidos de laponita (1%, 3%, 5%, 10%, 15%, 30%, 40%, 50%, 70% y 90%).

Se recomienda realizar pruebas de permeabilidad en los especímenes obtenidos del permeámetro propuesto en este estudio, para conocer su eficacia y compararlos con los resultados de permeabilidad obtenidos con muestras mezcladas en seco con distintas concentraciones de laponita. El estudio es similar al realizado en el trabajo de El Howayek, (2011).

Luego de determinadas la conductividad hidráulica de los especímenes mencionado en el párrafo anterior, realizar una batería de ensayos geotécnicos en las muestras permeadas para evaluar la influencia en la forma de permeación. Con concentraciones equivalentes a la masa en suelo de 1%, 3%, 5%, 10%, 15%, 30%, 40%, 50%, 70% y 90%.

## CAPÍTULO 9: BIBLIOGRAFÍA

- Al-Mukhtar, M., Qi, Y., Alcover, F., Conard, J., & Bergaya, F. (2000). Hydromechanical Effects:(II) on the Water- Na-Smectite System. *Clay Minerals*.
- Al-Mukhtar, M., Qi, Y., Alcover, J. F., & Bergaya, F. (1999). Oedometric and water-retention behavior of highly compacted unsaturated smectites. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 675–684. <https://doi.org/10.1139/cgj-36-4-675>
- Amarasinghe, P. M., Katti, K. S., & Katti, D. R. (2011). Insight into Role of Clay-Fluid Molecular Interactions on Permeability and Consolidation Behavior of Na-Montmorillonite Swelling Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(2), 138–146. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000567](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000567)
- ASTM INTERNATIONAL. (2007). *ASTM D422-63(2007)e2 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*.
- Biscontin, G., & Pestana, J. M. (2001). Influence of Peripheral Velocity on Vane Shear Strength of an Artificial Clay. *Geotech Test*, 24, 423–429.
- Bjrrum, L. (1972). Embankments on soft ground. *Proceedings, ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures*, 2, 1–54.
- Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics and Foundations* (I. John Wiley & Sons (ed.); Third).
- BYK Additives & Instruments. (2013). Laponite RD Technical Data Sheet. In *Area* (Issue 10).
- BYK Additives & Instruments. (2014). *Technical Information B-RI 21 LAPONITE* (p. 24).
- Carter, M., & Bentley, S. P. (1991). *Correlations of Soil Properties*.
- Casagrande, A., & Fandum, R. (1940). *Notes on Soil for Engineering Purposes*.
- Dubinin, M. M. (1975). Physical Adsorption of Gases and Vapors in Micropores. In *Progress in Surface and Membrane Science* (Vol. 9). ACADEMIC PRESS, INC. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-571809-7.50006-1>
- El Howayek, A. (2011). *Characterization, Rheology and Microstructure of Laponite Suspensions*.
- El Mohtar, C. (2008). *Pore Fluid Engineering: An Autoadaptive Design for Liquefaction Mitigation*.
- El Mohtar, C. S., & Rugg, D. A. (2011). New three-way split mold design and experimental procedure for testing soft, grouted soils. *Geotechnical Testing Journal*, 34(6), 708–720. <https://doi.org/10.1520/GTJ103645>
- Elkhatny, S. (2019). Development of a homogenous cement slurry using synthetic modified phyllosilicate while cementing HPHT wells. *Sustainability (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/su11071923>
- Fuente, A. de la, Niño, Y., & Tamburrino, A. (2010). *Mecánica de Fluidos* (p. 144).
- Gidley, I., & Grozic, J. (2008). Gas hydrate dissociation structures in submarine slopes. *The 4th Canadian Conference on Geohazards : From Causes to Management.*, 1993, 491–498. <http://www.geohazard.ggl.ulaval.ca/Processus/gidley.pdf>
- Giese, R. F., & Oss, C. J. van. (2002). Surface Thermodynamic Properties of Minerals. In *Colloid and Surface Properties of Clays and Related Minerals* (pp. 229–235).
- Grill, A. (2009). Porous pSiCOH Ultralow- k Dielectrics for Chip Interconnects Prepared by PECVD . *Annual Review of Materials Research*, 39(1), 49–69. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-082908-145305>
- Guimarães, A. de M. F., Ciminelli, V. S. T., & Vasconcelos, W. L. (2007). Surface modification of synthetic clay aimed at biomolecule adsorption: Synthesis and

- characterization. *Materials Research*, 10(1), 37–41. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392007000100009>
- Herrera, N. (2003). *Aqueous Dispersions of Silane - Functionalized Laponite Clay Platelets. A first Step toward the Elaboration of Water - Based Polymer/Clay Nanocomposites*.
- Huang, X., Lv, K., Sun, J., Lu, Z., Bai, Y., Shen, H., & Wang, J. (2019). Enhancement of thermal stability of drilling fluid using laponite nanoparticles under extreme temperature conditions. *Materials Letters*, 248, 146–149. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.005>
- Huang, Y., & Wang, L. (2016). Laboratory investigation of liquefaction mitigation in silty sand using nanoparticles. *Engineering Geology*, 204(January), 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.01.015>
- Iskander, M. (2018). Transparent soils turn 25: Past, present and future. *Physical Modelling in Geotechnics - McNamara et Al (Eds)*, 389–394. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Jlassi, K., Chehimi, M., & Thomas, S. (2017). *Clay-Polymer Nanocomposites*. Elsevier.
- Johnson, A. M. (1970). *Physical processes in geology*.
- Kim, D., Nam, B. H., & Youn, H. (2018). Effect of clay content on the shear strength of clay–sand mixture. *International Journal of Geo-Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0087-x>
- Kolay, P. K., & Ramesh, K. C. (2016). Reduction of Expansive Index, Swelling and Compression Behavior of Kaolinite and Bentonite Clay with Sand and Class C Fly Ash. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(1), 87–101. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9930-4>
- Komine, H., & Ogata, N. (1996). Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite. *Canadian Geotechnical Journal*, 11–22.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1973). *Soil Mechanics* (Willey & s).
- Laurini, E., Posocco, P., Fermeglia, M., & Prici, S. (2017). Multiscale Simulations of Thermoplastic Polyurethane-Based Nanocomposites. In Khoulood Jlassi, M. Chehimi, & S. Thomas (Eds.), *Clay-Polymer Nanocomposites* (pp. 84–112). Elsevier.
- Li, X., Xu, Y., & Li, C. (2019). Experimental study on the 1-D free swelling of compacted bentonite. *Acta Geotechnica*, 15(7), 1895–1907. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00903-w>
- Li, X. Y., & Xu, Y. (2019). Experimental study of the effect on one-dimension erosion of compacted bentonite. *7th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, AP-UNSAT 2019*, 314–317. <https://doi.org/10.3208/jgssp.v07.050>
- Li, Y., Xie, S., Zhao, Y., Xia, L., Li, H., & Song, S. (2019). The Life Cycle of Water Used in Flotation: a Review. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 36(2), 385–397. <https://doi.org/10.1007/s42461-018-0004-z>
- Liu, F., Jiang, G. C., Wang, K., & Wang, J. (2017). Laponite nanoparticle as a multi-functional additive in water-based drilling fluids. *Journal of Materials Science*, 52(20), 12266–12278. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1375-0>
- Madsen, F. T., & Müller-Vonmoos, M. (1989). The swelling behaviour of clays. *Applied Clay Science*, 4, 143–156.
- Mery, H. (1972). *Mecánica de Fluidos I*.
- Mesri, G., & Olson, R. E. (1971). *Mechanisms Controlling the Liquid Limit of Clays*. 1(1953), 151–158.
- Meunier, A. (2005). *Clays* (Springer (ed.)).

- Mishra, A. K., Chattopadhyay, S., Nando, G. B., & Devadoss, E. (2008). Synthesis and characterization of elastomeric polyurethane-laponite nanocomposite. *Designed Monomers and Polymers*, 11(5), 395–407. <https://doi.org/10.1163/156855508X328103>
- Mohtar, C. S. El. (2008). PORE FLUID ENGINEERING: AN AUTOADAPTIVE DESIGN FOR LIQUEFACTION MITIGATION. In *Purdue University*.
- Mourchid, A., Delville, A., & Levitz, P. (1995). Sol-gel transition of colloidal suspensions of anisotropic particles of laponite. *Faraday Discussions*, 101(i), 275–285. <https://doi.org/10.1039/FD9950100275>
- Neumann, B. (1971). *Synthetic Hectorite - type clay minerals* (p. 6). United States Patent.
- Nicolai T, C. S. (2000). *Light scattering study of the dispersion of laponite*.
- Ochoa, F. (2015). *Cyclic Behavior of Sands With Superplastic Fines*.
- Pálková, H., Madejová, J., Zimowska, M., & Serwicka, E. M. (2010). Laponite-derived porous clay heterostructures: II. FTIR study of the structure evolution. *Microporous and Mesoporous Materials*, 127(3), 237–244. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2009.07.012>
- Pardo Tobar, G. S., & Orense, R. P. (2017). Experimental study on the self-healing effect of laponite on the liquefaction resistance of sand. *Proc. 20th NZGS Geotechnical Symposium*, 1–8.
- Qi, Y., Al-Mukhtar, M., Alcover, J. F., & Bergaya, F. (1996). Coupling analysis of macroscopic and microscopic behaviour in highly consolidated Na-laponite clays. *Applied Clay Science*, 11(2–4), 185–197. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(96\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(96)00016-6)
- Ramsay, J. D. F. (1986). Colloidal properties of synthetic hectorite clay dispersions. *Journal of Colloid And Interface Science*, 109(2), 448–454. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(86\)90322-X](https://doi.org/10.1016/0021-9797(86)90322-X)
- Rodríguez, C. (2019). *Respuesta Cíclica de Arenas de Relaves con Nanopartículas*. Universidad de Chile.
- Roy, M., & Leblanc, A. (1988). *Factor Affecting the Measurements and Interpretation of the Vane Strength in Soft Sensitive Clays*.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A., & Fam, M. A. (2001). *Soils and Waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*. Wiley.
- Savage, D. (2005). *The Effects of High Salinity Groundwater on the Performance of Clay Barriers*.
- Scalisi, F. (2014). Nanotechnology and earth construction: The mechanical properties of adobe brick stabilized by Laponite nanoparticles. *Advanced Materials Research*, 983, 63–66. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.983.63>
- Scalisi, F., & Sposito, C. (2017). Performance of Earth Bricks Supplemented by Nanoparticles and their Application in Architecture. *Applied Mechanics and Materials*, 864, 8–13. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.864.8>
- Shang, X., Lu, J., Kuang, L., Yang, C., & Zhou, G. (2018). Empirical formulae for electric double-layer repulsion between two arbitrarily inclined clay particles. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(6), 1183–1189. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.005>
- Shen, M. (2014). *Rheological Properties of Laponite And Chemically Modified Laponite Suspensions*. 135.
- Skoog, D. A., & Crouch, S. R. (2008). *Principios de análisis instrumental*.
- Sridharan, A., & Jayadeva, M. S. (1982). *Double layer theory and compressibility of clays*.

- Tanaka, H., Meunier, J., & Bonn, D. (2004). Nonergodic states of charged colloidal suspensions: Repulsive and attractive glasses and gels. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 69(3 1), 1–6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.031404>
- Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1981). *Soil mechanics in engineering practice*. [https://doi.org/10.1016/s0013-7952\(97\)81919-9](https://doi.org/10.1016/s0013-7952(97)81919-9)
- Thakur, V., & Singh, D. (2005). Rapid Determination of Swelling Pressure of Clay Minerals. *Journal of Testing and Evaluation*, 33(4), 11866. <https://doi.org/10.1520/jte11866>
- Theo, J., Komarneni, S., & Amonette, J. (1999). *Synthesis of smectite clay minerals: A critical review*, Centre for Instrumental and Developmental Chemistry. Australia, Intercollege Materials Research Laboratory and Department of Agronomy, USA, Environmental Molecular Sciences Laboratory, USA.
- Thermo Scientific. (2013). *Introduction to Forier Transform Infrared Spectroscopy*. <http://www.ftpx.com/ftpintro.aspx>
- Thompson, D. W., & Butterworth, J. T. (1992). The nature of laponite and its aqueous dispersions. *Journal of Colloid And Interface Science*, 151(1), 236–243. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(92\)90254-J](https://doi.org/10.1016/0021-9797(92)90254-J)
- Tilley, R. (2004b). *Understanding Solids*.
- Torii, K., & Iwasaki, T. (1987). *Synthesis of hectorite*. Government Industrial Research Institute.
- Tripathy, S., & Schanz, T. (2007). Compressibility behaviour of clays at large pressures. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(3), 355–362. <https://doi.org/10.1139/T06-123>
- Vallejo, L. E., & Scovazzo, V. A. (2003). Determination of the shear strength parameters associated with mudflows. *Japanese Geotechnical Society*, 43(2), 129–133.
- Wallace, J. F., & Rutheford, C. J. (2015). Geotechnical Properties of Laponite RD. *Geotechnical Testing Journal*.
- Xiong, Z. Q., Li, X. D., Fu, F., & Li, Y. N. (2019). Performance evaluation of laponite as a mud-making material for drilling fluids. *Petroleum Science*, 16(4), 890–900. <https://doi.org/10.1007/s12182-018-0298-y>
- Yang, S., Choi, J. C., Vanneste, M., & Kvalstad, T. (2018). Effects of gas hydrates dissociation on clays and submarine slope stability. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(3), 941–952. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1088-2>
- Zhou, C.-H., Tong, D., & Li, X. (2010). Synthetic Hectorite: Preparation, Pillaring and Applications in Catalysis. In A. Gil, S. A. Korili, R. Trujillano, & M. A. Vicente (Eds.), *Pillared Clays and Related Catalysts* (Springer, pp. 67–98).
- Al-Mukhtar, M., Qi, Y., Alcover, F., Conard, J., & Bergaya, F. (2000). Hydromechanical Effects:(II) on the Water- Na-Smectite System. *Clay Minerals*.
- Al-Mukhtar, M., Qi, Y., Alcover, J. F., & Bergaya, F. (1999). Oedometric and water-retention behavior of highly compacted unsaturated smectites. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 675–684. <https://doi.org/10.1139/cgj-36-4-675>
- Amarasinghe, P. M., Katti, K. S., & Katti, D. R. (2011). Insight into Role of Clay-Fluid Molecular Interactions on Permeability and Consolidation Behavior of Na-Montmorillonite Swelling Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(2), 138–146. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000567](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000567)
- ASTM INTERNATIONAL. (2007). *ASTM D422-63(2007)e2 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*.

- Biscontin, G., & Pestana, J. M. (2001). Influence of Peripheral Velocity on Vane Shear Strength of an Artificial Clay. *Geotech Test*, 24, 423–429.
- Bjrrum, L. (1972). Embankments on soft ground. *Proceedings, ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures*, 2, 1–54.
- Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics and Foundations* (I. John Wiley & Sons (ed.); Third). BYK Additives & Instruments. (2013). Laponite RD Technical Data Sheet. In *Area* (Issue 10).
- BYK Additives & Instruments. (2014). *Technical Information B-RI 21 LAPONITE* (p. 24).
- Carter, M., & Bentley, S. P. (1991). *Correlations of Soil Properties*.
- Casagrande, A., & Fandum, R. (1940). *Notes on Soil for Engineering Purposes*.
- Dubin, M. M. (1975). Physical Adsorption of Gases and Vapors in Micropores. In *Progress in Surface and Membrane Science* (Vol. 9). ACADEMIC PRESS, INC. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-571809-7.50006-1>
- El Howayek, A. (2011). *Characterization, Rheology and Microstructure of Laponite Suspensions*.
- El Mohtar, C. (2008). *Pore Fluid Engineering: An Autoadaptive Design for Liquefaction Mitigation*.
- El Mohtar, C. S., & Rugg, D. A. (2011). New three-way split mold design and experimental procedure for testing soft, grouted soils. *Geotechnical Testing Journal*, 34(6), 708–720. <https://doi.org/10.1520/GTJ103645>
- Elkhatny, S. (2019). Development of a homogenous cement slurry using synthetic modified phyllosilicate while cementing HPHT wells. *Sustainability (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/su11071923>
- Fuente, A. de la, Niño, Y., & Tamburrino, A. (2010). *Mecánica de Fluidos* (p. 144).
- Gidley, I., & Grozic, J. (2008). Gas hydrate dissociation structures in submarine slopes. *The 4th Canadian Conference on Geohazards : From Causes to Management.*, 1993, 491–498. <http://www.geohazard.ggl.ulaval.ca/Processus/gidley.pdf>
- Giese, R. F., & Oss, C. J. van. (2002). Surface Thermodynamic Properties of Minerals. In *Colloid and Surface Properties of Clays and Related Minerals* (pp. 229–235).
- Grill, A. (2009). Porous pSiCOH Ultralow- k Dielectrics for Chip Interconnects Prepared by PECVD . *Annual Review of Materials Research*, 39(1), 49–69. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-082908-145305>
- Guimarães, A. de M. F., Ciminelli, V. S. T., & Vasconcelos, W. L. (2007). Surface modification of synthetic clay aimed at biomolecule adsorption: Synthesis and characterization. *Materials Research*, 10(1), 37–41. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392007000100009>
- Herrera, N. (2003). *Aqueous Dispersions of Silane - Functionalized Laponite Clay Platelets. A first Step toward the Elaboration of Water - Based Polymer/Clay Nanocomposites*.
- Huang, X., Lv, K., Sun, J., Lu, Z., Bai, Y., Shen, H., & Wang, J. (2019). Enhancement of thermal stability of drilling fluid using laponite nanoparticles under extreme temperature conditions. *Materials Letters*, 248, 146–149. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.005>
- Huang, Y., & Wang, L. (2016). Laboratory investigation of liquefaction mitigation in silty sand using nanoparticles. *Engineering Geology*, 204(January), 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.01.015>
- Iskander, M. (2018). Transparent soils turn 25: Past, present and future. *Physical Modelling in Geotechnics - McNamara et Al (Eds)*, 389–394.

- <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Jlassi, K., Chehimi, M., & Thomas, S. (2017). *Clay-Polymer Nanocomposites*. Elsevier.
- Johnson, A. M. (1970). *Physical processes in geology*.
- Kim, D., Nam, B. H., & Youn, H. (2018). Effect of clay content on the shear strength of clay–sand mixture. *International Journal of Geo-Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0087-x>
- Kolay, P. K., & Ramesh, K. C. (2016). Reduction of Expansive Index, Swelling and Compression Behavior of Kaolinite and Bentonite Clay with Sand and Class C Fly Ash. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(1), 87–101. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9930-4>
- Komine, H., & Ogata, N. (1996). Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite. *Canadian Geotechnical Journal*, 11–22.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1973). *Soil Mechanics* (Wiley & s).
- Laurini, E., Posocco, P., Fermeglia, M., & Prici, S. (2017). Multiscale Simulations of Thermoplastic Polyurethane-Based Nanocomposites. In Khoulood Jlassi, M. Chehimi, & S. Thomas (Eds.), *Clay-Polymer Nanocomposites* (pp. 84–112). Elsevier.
- Li, X., Xu, Y., & Li, C. (2019). Experimental study on the 1-D free swelling of compacted bentonite. *Acta Geotechnica*, 15(7), 1895–1907. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00903-w>
- Li, X. Y., & Xu, Y. (2019). Experimental study of the effect on one-dimension erosion of compacted bentonite. *7th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, AP-UNSAT 2019*, 314–317. <https://doi.org/10.3208/jgssp.v07.050>
- Li, Y., Xie, S., Zhao, Y., Xia, L., Li, H., & Song, S. (2019). The Life Cycle of Water Used in Flotation: a Review. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 36(2), 385–397. <https://doi.org/10.1007/s42461-018-0004-z>
- Liu, F., Jiang, G. C., Wang, K., & Wang, J. (2017). Laponite nanoparticle as a multi-functional additive in water-based drilling fluids. *Journal of Materials Science*, 52(20), 12266–12278. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1375-0>
- Madsen, F. T., & Müller-Vonmoos, M. (1989). The swelling behaviour of clays. *Applied Clay Science*, 4, 143–156.
- Mery, H. (1972). *Mecánica de Fluidos I*.
- Mesri, G., & Olson, R. E. (1971). *Mechanisms Controlling the Liquid Limit of Clays*. 1(1953), 151–158.
- Meunier, A. (2005). *Clays* (Springer (ed.)).
- Mishra, A. K., Chattopadhyay, S., Nando, G. B., & Devadoss, E. (2008). Synthesis and characterization of elastomeric polyurethane-laponite nanocomposite. *Designed Monomers and Polymers*, 11(5), 395–407. <https://doi.org/10.1163/156855508X328103>
- Mohtar, C. S. El. (2008). PORE FLUID ENGINEERING: AN AUTOADAPTIVE DESIGN FOR LIQUEFACTION MITIGATION. In *Purdue University*.
- Mourchid, A., Delville, A., & Levitz, P. (1995). Sol-gel transition of colloidal suspensions of anisotropic particles of laponite. *Faraday Discussions*, 101(i), 275–285. <https://doi.org/10.1039/FD9950100275>
- Neumann, B. (1971). *Synthetic Hectorite - type clay minerals* (p. 6). United States Patent.
- Nicolai T, C. S. (2000). *Light scattering study of the dispersion of laponite*.
- Ochoa, F. (2015). *Cyclic Behavior of Sands With Superplastic Fines*.
- Pálková, H., Madejová, J., Zimowska, M., & Serwicka, E. M. (2010). Laponite-derived porous clay heterostructures: II. FTIR study of the structure evolution. *Microporous*

- and *Mesoporous Materials*, 127(3), 237–244.  
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2009.07.012>
- Pardo Tobar, G. S., & Orense, R. P. (2017). Experimental study on the self-healing effect of laponite on the liquefaction resistance of sand. *Proc. 20th NZGS Geotechnical Symposium*, 1–8.
- Qi, Y., Al-Mukhtar, M., Alcover, J. F., & Bergaya, F. (1996). Coupling analysis of macroscopic and microscopic behaviour in highly consolidated Na-laponite clays. *Applied Clay Science*, 11(2–4), 185–197. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(96\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(96)00016-6)
- Ramsay, J. D. F. (1986). Colloidal properties of synthetic hectorite clay dispersions. *Journal of Colloid And Interface Science*, 109(2), 448–454.  
[https://doi.org/10.1016/0021-9797\(86\)90322-X](https://doi.org/10.1016/0021-9797(86)90322-X)
- Rodríguez, C. (2019). *Respuesta Cíclica de Arenas de Relaves con Nanopartículas*. Universidad de Chile.
- Roy, M., & Leblanc, A. (1988). *Factor Affecting the Measurements and Interpretation of the Vane Strength in Soft Sensitive Clays*.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A., & Fam, M. A. (2001). *Soils and Waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*. Wiley.
- Savage, D. (2005). *The Effects of High Salinity Groundwater on the Performance of Clay Barriers*.
- Scalisi, F. (2014). Nanotechnology and earth construction: The mechanical properties of adobe brick stabilized by Laponite nanoparticles. *Advanced Materials Research*, 983, 63–66. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.983.63>
- Scalisi, F., & Sposito, C. (2017). Performance of Earth Bricks Supplemented by Nanoparticles and their Application in Architecture. *Applied Mechanics and Materials*, 864, 8–13. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.864.8>
- Shang, X., Lu, J., Kuang, L., Yang, C., & Zhou, G. (2018). Empirical formulae for electric double-layer repulsion between two arbitrarily inclined clay particles. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(6), 1183–1189.  
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.005>
- Shen, M. (2014). *Rheological Properties of Laponite And Chemically Modified Laponite Suspensions*. 135.
- Skoog, D. A., & Crouch, S. R. (2008). *Principios de análisis instrumental*.
- Sridharan, A., & Jayadeva, M. S. (1982). *Double layer theory and compressibility of clays*.
- Tanaka, H., Meunier, J., & Bonn, D. (2004). Nonergodic states of charged colloidal suspensions: Repulsive and attractive glasses and gels. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 69(3 1), 1–6.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.031404>
- Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1981). *Soil mechanics in engineering practice*.  
[https://doi.org/10.1016/s0013-7952\(97\)81919-9](https://doi.org/10.1016/s0013-7952(97)81919-9)
- Thakur, V., & Singh, D. (2005). Rapid Determination of Swelling Pressure of Clay Minerals. *Journal of Testing and Evaluation*, 33(4), 11866.  
<https://doi.org/10.1520/jte11866>
- Theo, J., Komarneni, S., & Amonette, J. (1999). *Synthesis of smectite clay minerals: A critical review*, Centre for Instrumental and Developmental Chemistry. Australia, Intercollege Materials Research Laboratory and Department of Agronomy, USA, Environmental Molecular Sciences Laboratory, USA.
- Thermo Scientific. (2013). *Introduction to Forier Transform Infrared Spectroscopy*.



- <http://www.ftpx.com/ftpintro.aspx>
- Thompson, D. W., & Butterworth, J. T. (1992). The nature of laponite and its aqueous dispersions. *Journal of Colloid And Interface Science*, 151(1), 236–243. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(92\)90254-J](https://doi.org/10.1016/0021-9797(92)90254-J)
- Tilley, R. (2004a). *Understanding Solids*.
- Tilley, R. (2004b). *Understanding Solids*.
- Torii, K., & Iwasaki, T. (1987). *Synthesis of hectorite*. Government Industrial Research Institute.
- Tripathy, S., & Schanz, T. (2007). Compressibility behaviour of clays at large pressures. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(3), 355–362. <https://doi.org/10.1139/T06-123>
- Vallejo, L. E., & Scovazzo, V. A. (2003). Determination of the shear strength parameters associated with mudflows. *Japanese Geotechnical Society*, 43(2), 129–133.
- Wallace, J. F., & Rutheford, C. J. (2015). Geotechnical Properties of Laponite RD. *Geotechnical Testing Journal*.
- Xiong, Z. Q., Li, X. D., Fu, F., & Li, Y. N. (2019). Performance evaluation of laponite as a mud-making material for drilling fluids. *Petroleum Science*, 16(4), 890–900. <https://doi.org/10.1007/s12182-018-0298-y>
- Yang, S., Choi, J. C., Vanneste, M., & Kvalstad, T. (2018). Effects of gas hydrates dissociation on clays and submarine slope stability. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(3), 941–952. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1088-2>
- Zhou, C.-H., Tong, D., & Li, X. (2010). Synthetic Hectorite: Preparation, Pillaring and Applications in Catalysis. In A. Gil, S. A. Korili, R. Trujillano, & M. A. Vicente (Eds.), *Pillared Clays and Related Catalysts* (Springer, pp. 67–98).

## CAPÍTULO 10: Anexos

### 10.1 Granulometría

Tabla 10-1: Granulometría 1 laponita RD.

N° malla	Abertura [mm]	Retenido [g]	Retenido [%]	Pasa [%]
100	0,149	0,84	4,20	95,80
140	0,125	7,64	38,22	57,58
170	0,09	3,37	16,86	40,72
230	0,063	2,4	12,01	28,71
270	0,053	2,22	11,11	17,61
325	0,045	1,22	6,10	11,51
450	0,032	1,42	7,10	4,40
<b>Fondo</b>	-	0,88	4,40	
	<b>Total [g]</b>	19,99		
	<b>Pérdida [g]</b>	0,01		
	<b>Pérdida [%]</b>	0,05		

Tabla 10-2: Granulometría 2 laponita RD.

N° malla	Abertura [mm]	Retenido [g]	Retenido [%]	Pasa [%]
100	0,149	1,87	9,35	90,65
140	0,125	5,25	26,26	64,38
170	0,09	1,47	7,35	57,03
200	0,075	1,51	7,55	49,47
230	0,063	1,62	8,10	41,37
270	0,053	0,73	3,65	37,72
325	0,045	2,55	12,76	24,96
450	0,032	1,8	9,00	15,96
<b>Fondo</b>	-	3,19	15,96	
	<b>Total [g]</b>	19,99		
	<b>Pérdida [g]</b>	0,01		
	<b>Pérdida [%]</b>	0,05		

**Tabla 10-3: Granulometría 3 laponita RD.**

<b>N° malla</b>	<b>Abertura [mm]</b>	<b>Retenido [g]</b>	<b>Retenido [%]</b>	<b>Pasa [%]</b>
100	0,149	0,06	0,30	99,70
140	0,125	7,27	36,37	63,33
170	0,09	1,5	7,50	55,83
200	0,075	1,35	6,75	49,07
230	0,063	1,83	9,15	39,92
270	0,053	0,76	3,80	36,12
325	0,045	2,51	12,56	23,56
450	0,032	2,53	12,66	10,91
<b>Fondo</b>	-	1,77	8,85	
	<b>Total [g]</b>	19,58		
	<b>Pérdida [g]</b>	0,42		
	<b>Pérdida [%]</b>	2,1		

**Tabla 10-4: Granulometría 4 laponita RD.**

<b>N° malla</b>	<b>Abertura [mm]</b>	<b>Retenido [g]</b>	<b>Retenido [%]</b>	<b>Pasa [%]</b>
100	0,149	0,08	0,40	99,60
140	0,125	6,95	34,77	64,83
170	0,09	1,38	6,90	57,93
200	0,075	1,44	7,20	50,73
230	0,063	1,52	7,60	43,12
270	0,053	0,23	1,15	41,97
325	0,045	2,62	13,11	28,86
450	0,032	1,61	8,05	20,81
<b>Fondo</b>	-	4,12	20,61	
	<b>Total [g]</b>	19,95		
	<b>Pérdida [g]</b>	0,05		
	<b>Pérdida [%]</b>	0,25		

Tabla 10-5: Granulometría 5 laponita RD.

N° malla	Abertura [mm]	Retenido [g]	Retenido [%]	Pasa [%]
100	0,149	2,69	13,46	86,54
140	0,125	4,71	23,56	62,98
170	0,09	1,58	7,90	55,08
200	0,075	1,45	7,25	47,82
230	0,063	1,91	9,55	38,27
270	0,053	1,63	8,15	30,12
325	0,045	1,38	6,90	23,21
450	0,032	1,53	7,65	15,56
<b>Fondo</b>	-	2,99	14,96	
	<b>Total [g]</b>	19,87		
	<b>Pérdida [g]</b>	0,13		
	<b>Pérdida [%]</b>	0,65		

## 10.2 Humedad

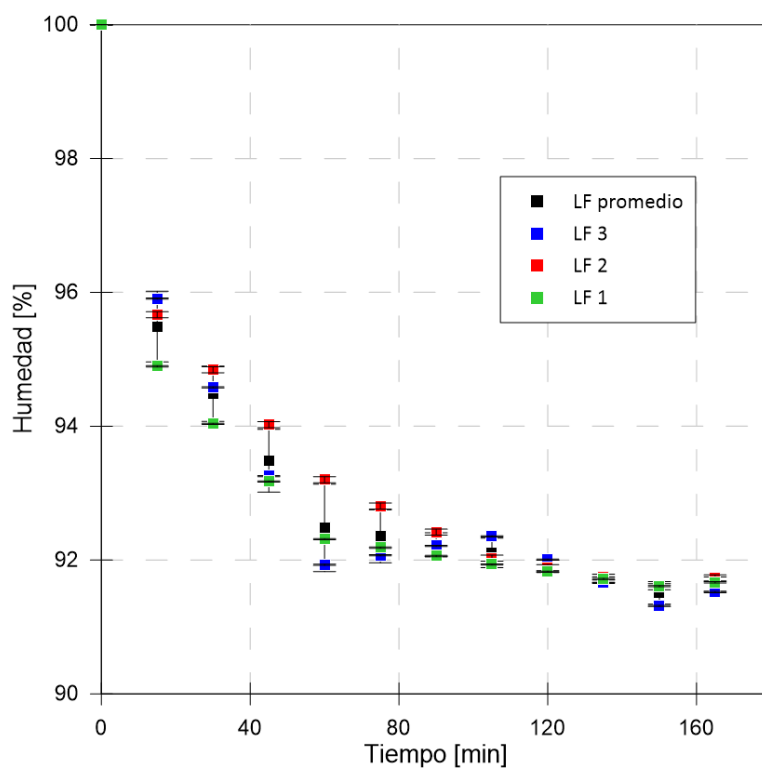


Figura 10-1: Humedad laponita fina LF.

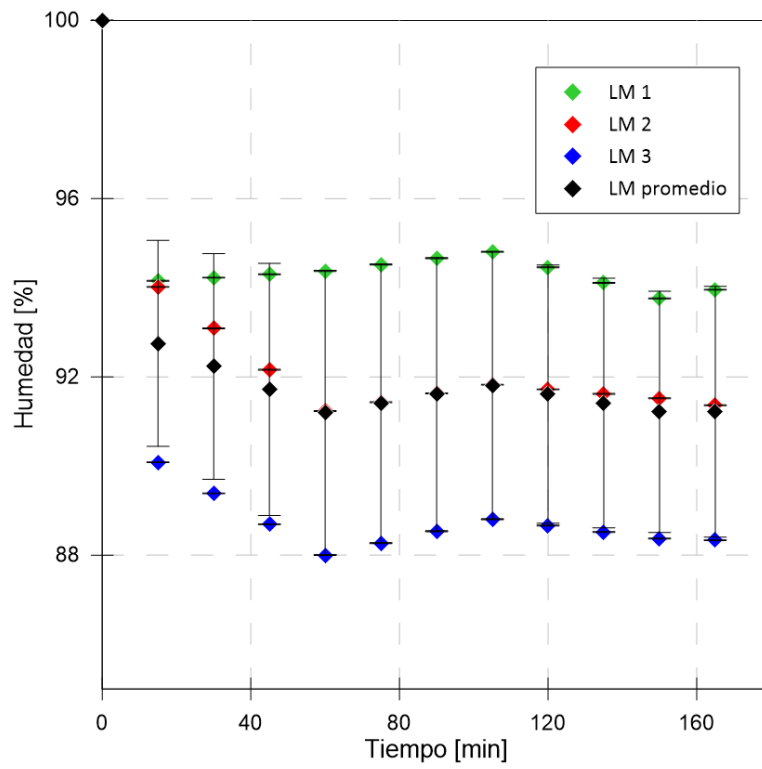


Figura 10-2: Humedad laponita mediana LM.

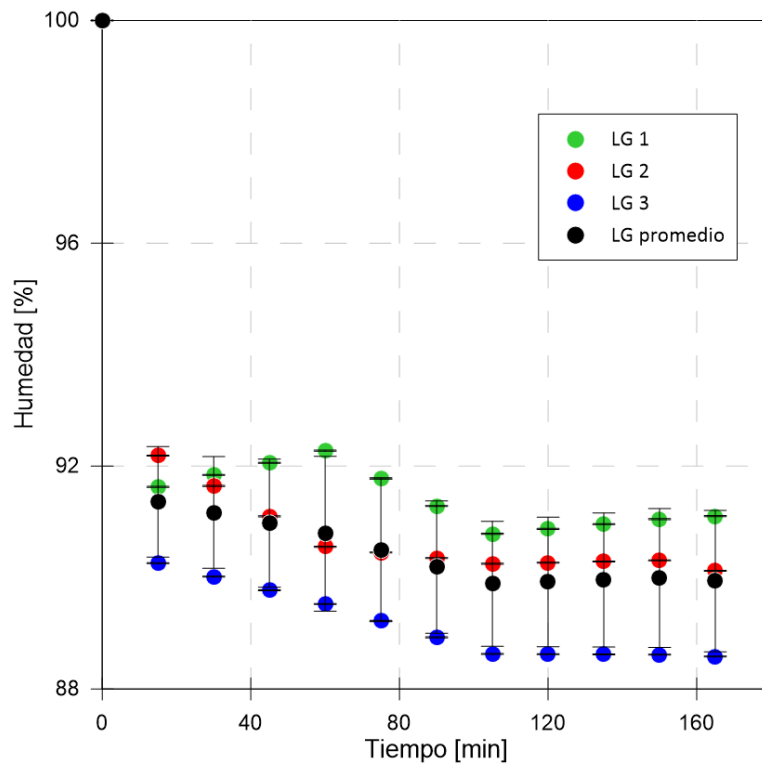


Figura 10-3: Humedad laponita grande LG.

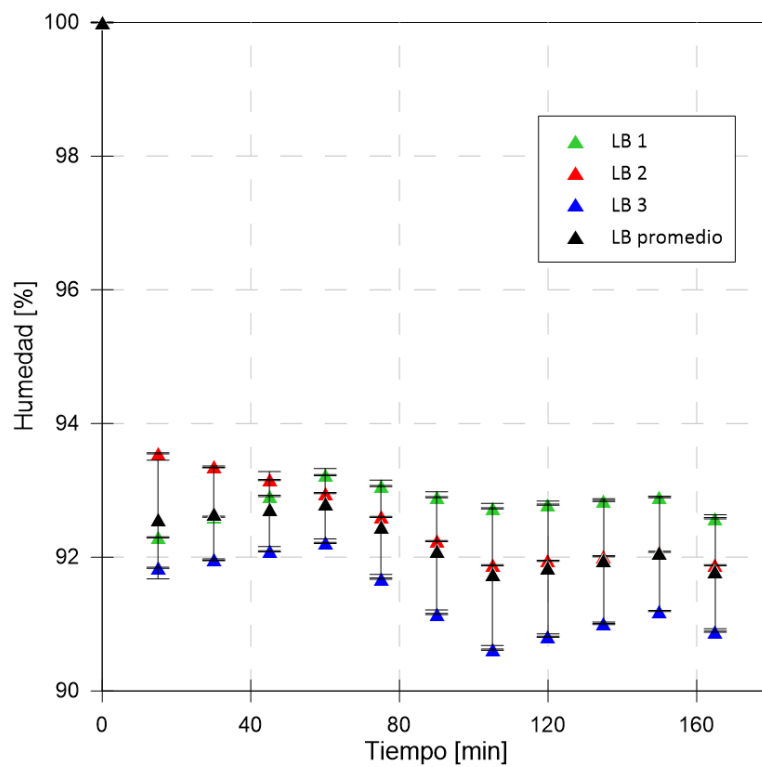


Figura 10-4: Humedad laponita bruta LB.

### 10.3 Espectroscopía de Infrarrojos por Transformada de Fourier (FT-IR)

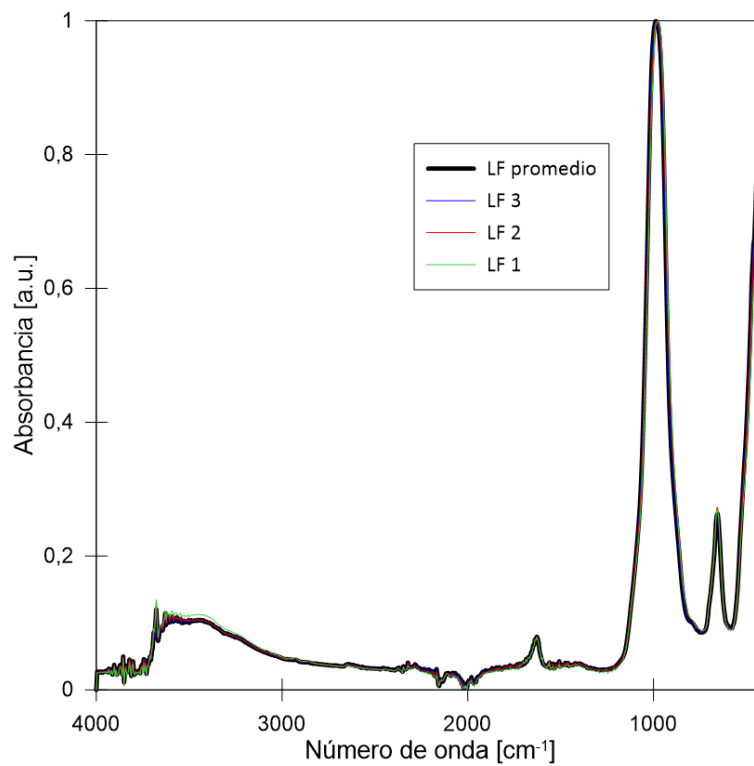


Figura 10-5: FTIR laponita fina, LF.

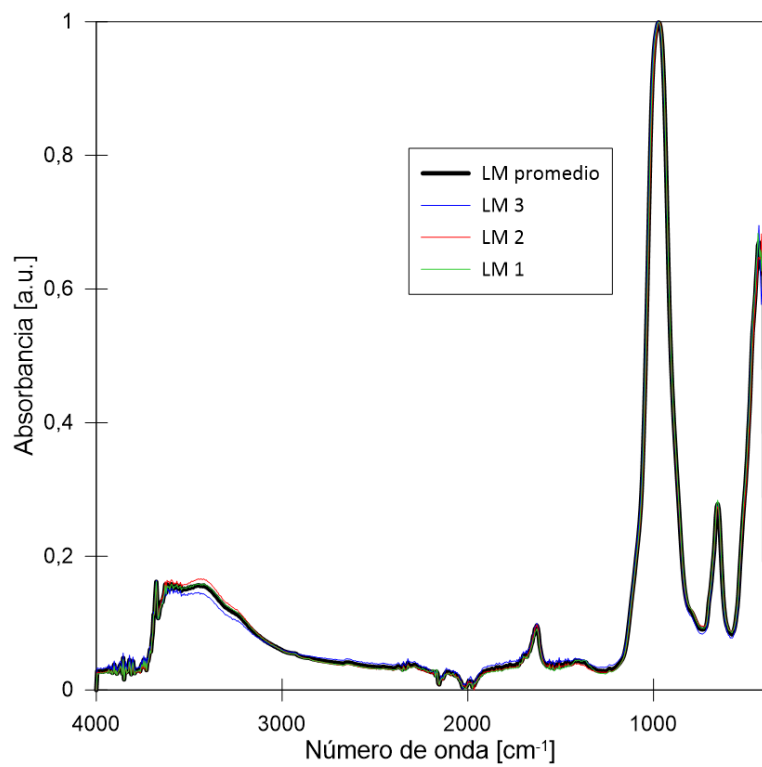


Figura 10-6: FTIR laponita mediana, LM.

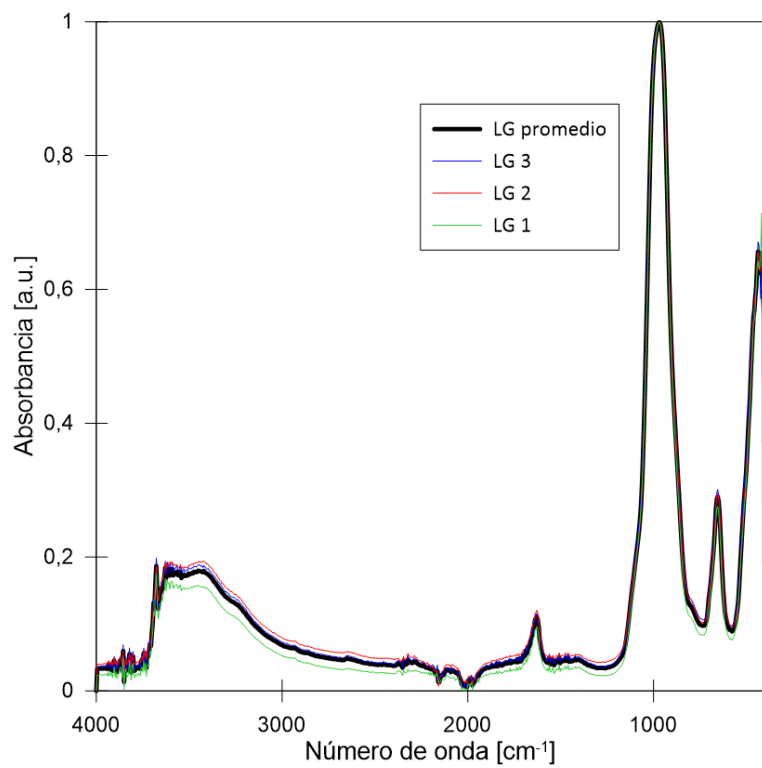


Figura 10-7: FTIR laponita gruesa, LG.

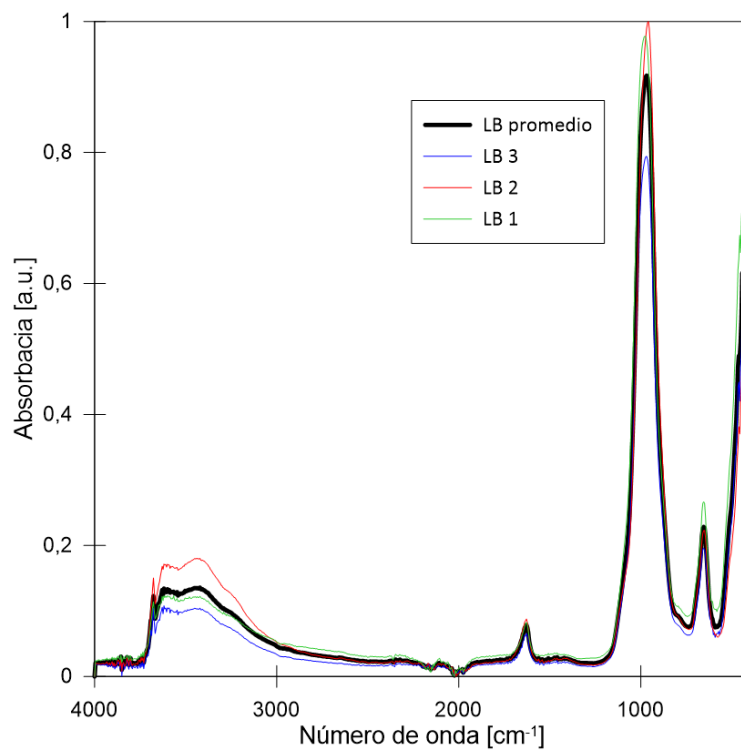


Figura 10-8: FTIR laponita gruesa, LG.

## 10.4 Análisis Termogravimétrico (TGA)

### 10.4.1 Temperatura versus masa

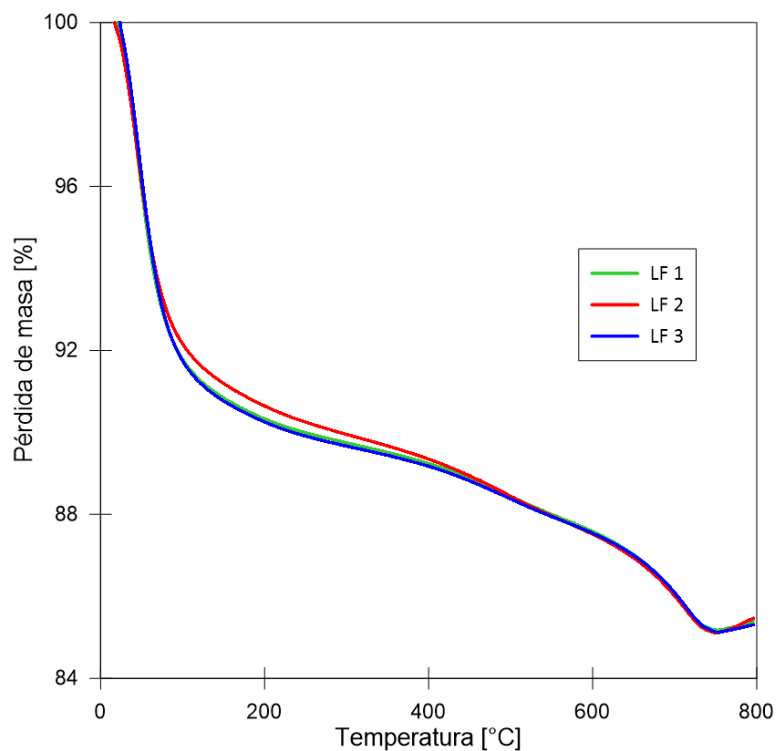
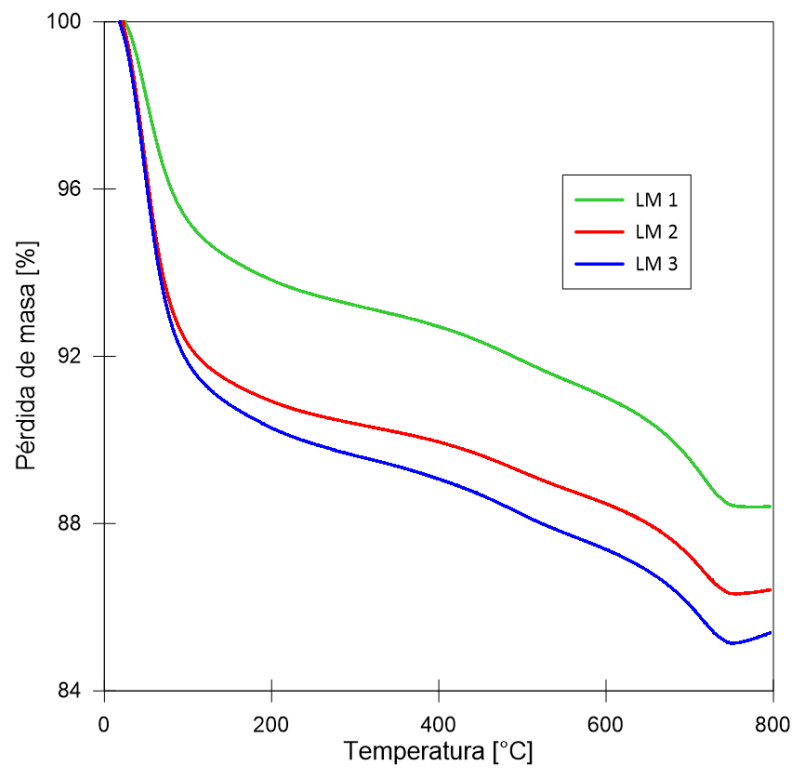
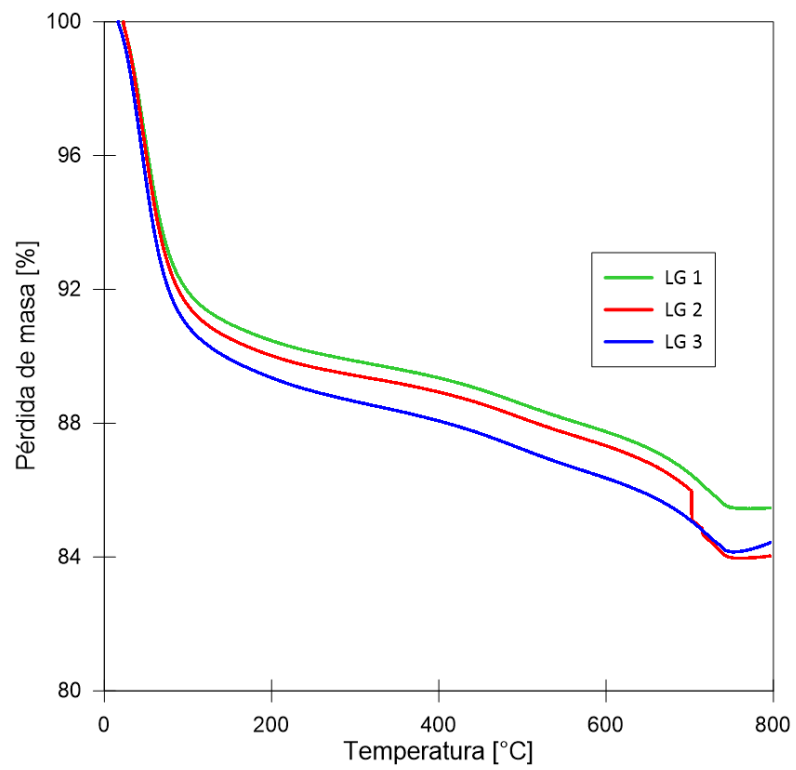


Figura 10-9: Pérdida de masa versus temperatura en laponita fina LF.





**Figura 10-10: Pérdida de masa versus temperatura en laponita mediana LM.**



**Figura 10-11: Pérdida de masa versus temperatura en laponita grande LG.**

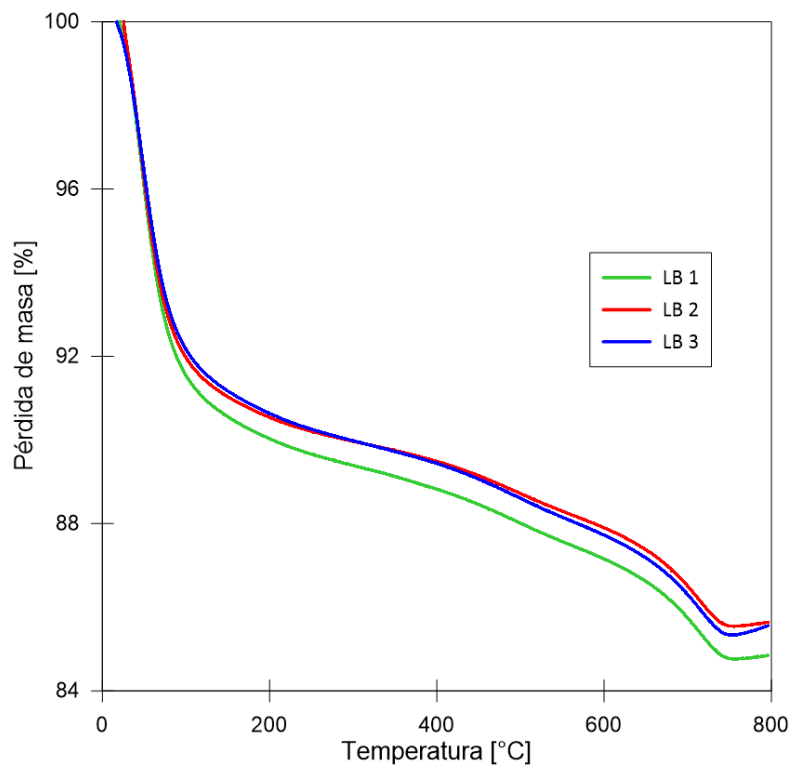


Figura 10-12: Pérdida de masa versus temperatura en laponita bruta LB.

#### 10.4.2 Tiempo versus masa

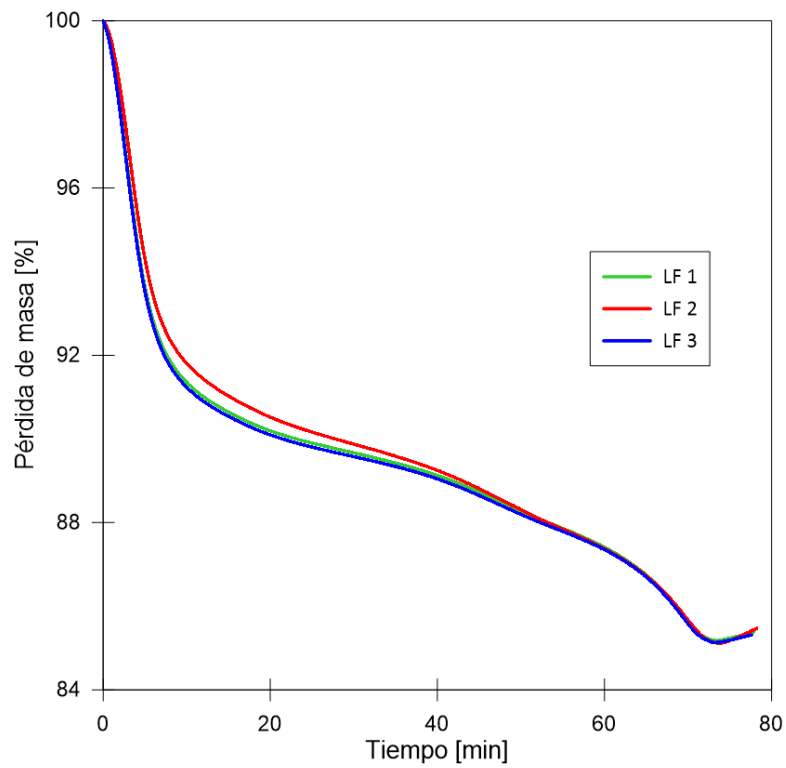


Figura 10-13: Pérdida de masa versus tiempo en laponita fina LF.

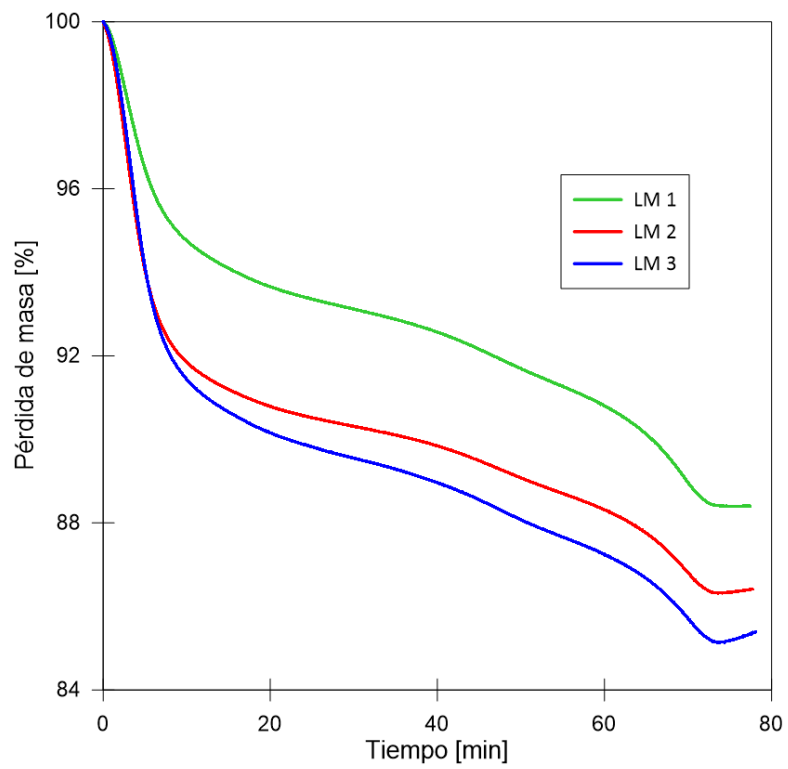


Figura 10-14: Pérdida de masa versus tiempo en laponita mediana LM.

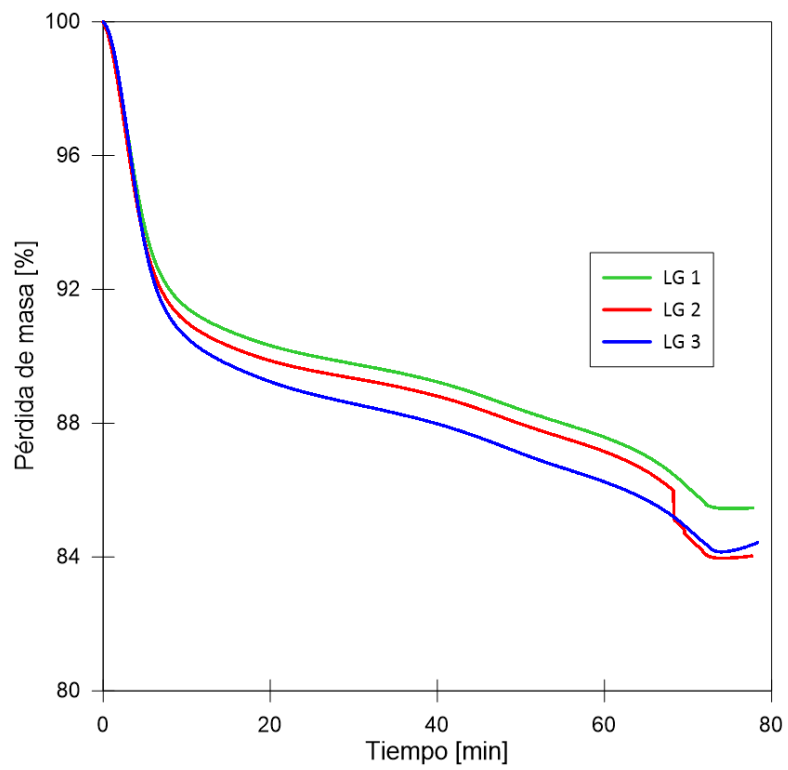


Figura 10-15: Pérdida de masa versus tiempo en laponita grande LG.

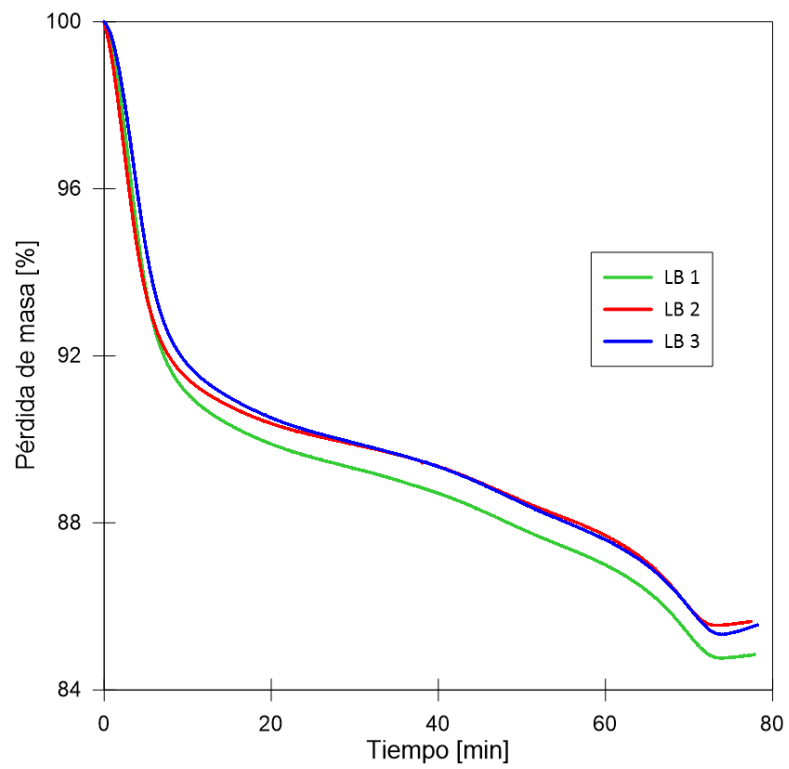


Figura 10-16: Pérdida de masa versus tiempo en laponita bruta LB.

### 10.4.3 Temperatura versus primera derivada

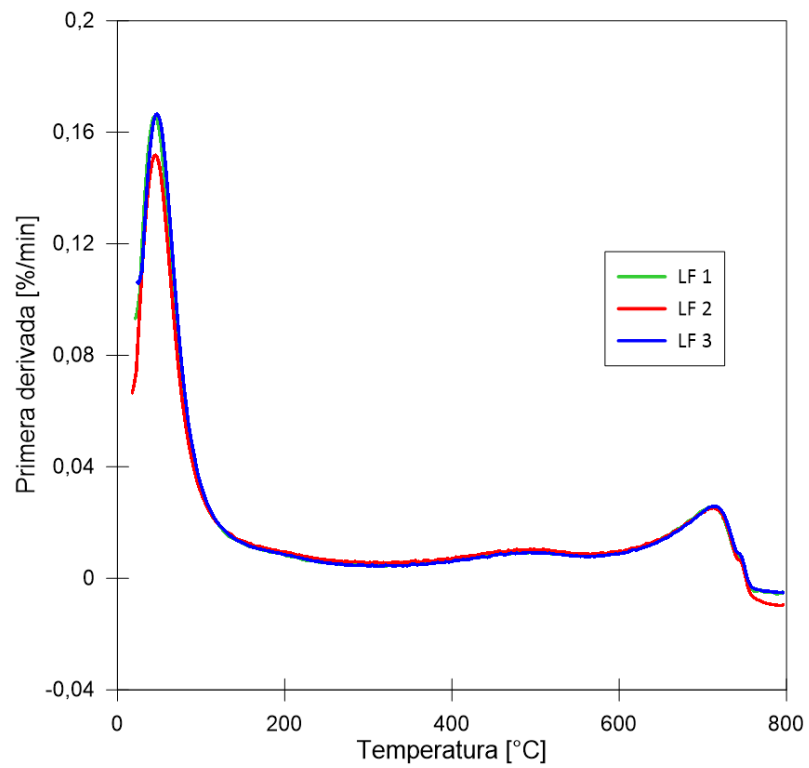
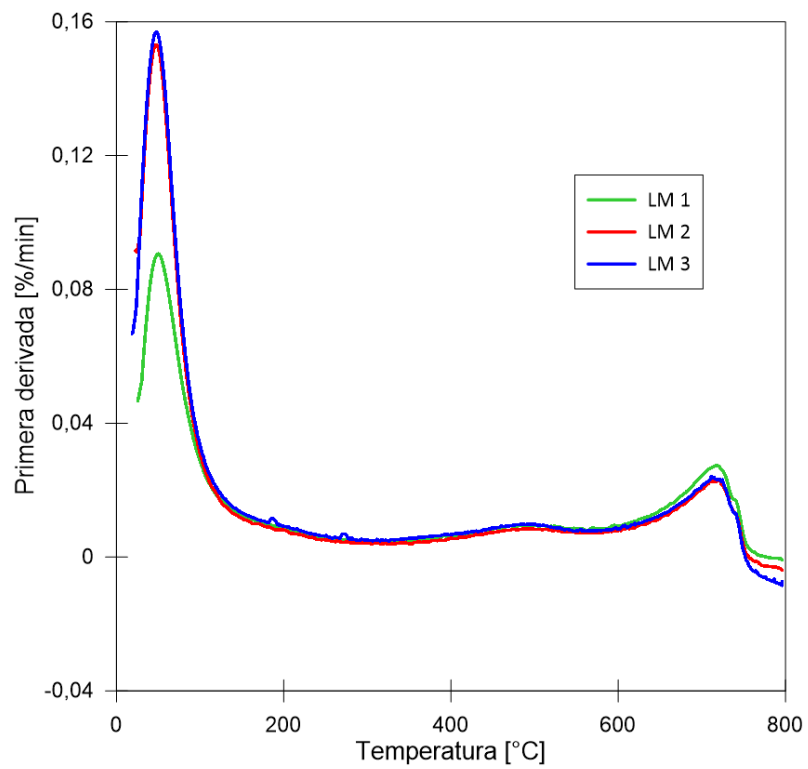
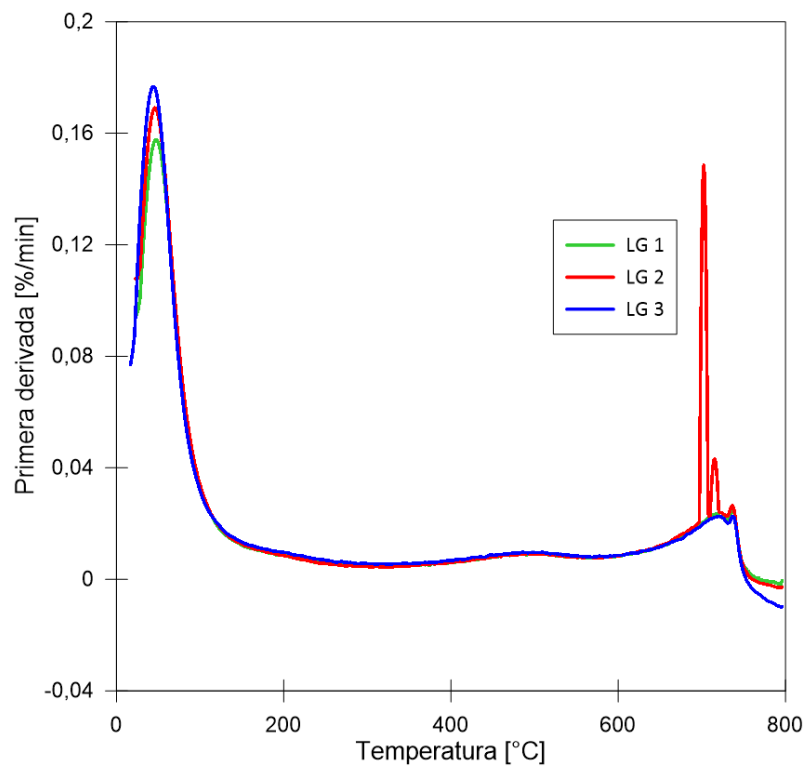


Figura 10-17: Primera derivada versus temperatura en laponita fina LF.



**Figura 10-18: Primera derivada versus temperatura en laponita mediana LM.**



**Figura 10-19: Primera derivada versus temperatura en laponita grande LG.**

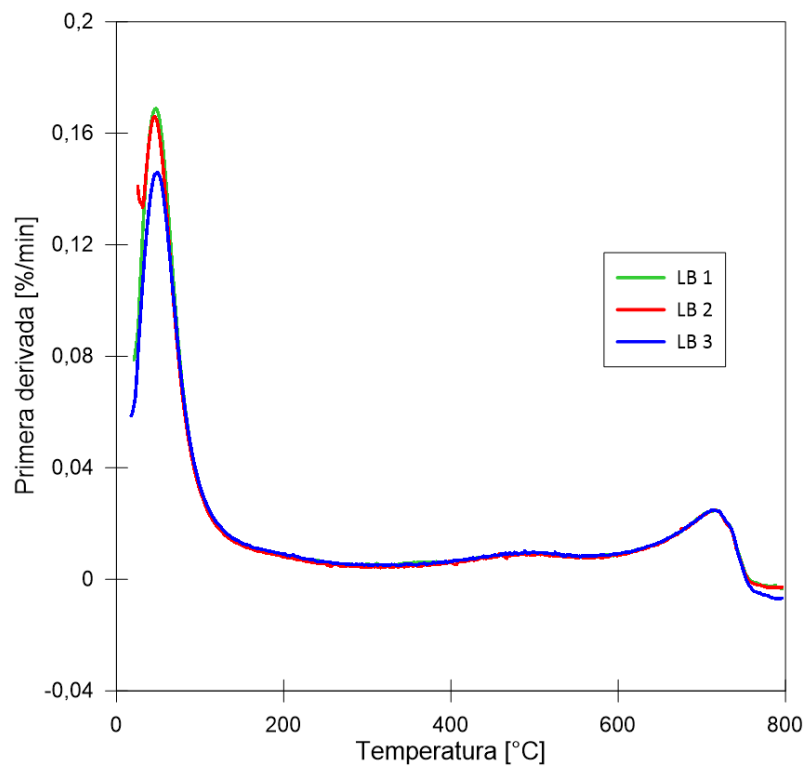


Figura 10-20: Primera derivada versus temperatura en laponita bruta LB.

#### 10.4.4 Tiempo versus primera derivada

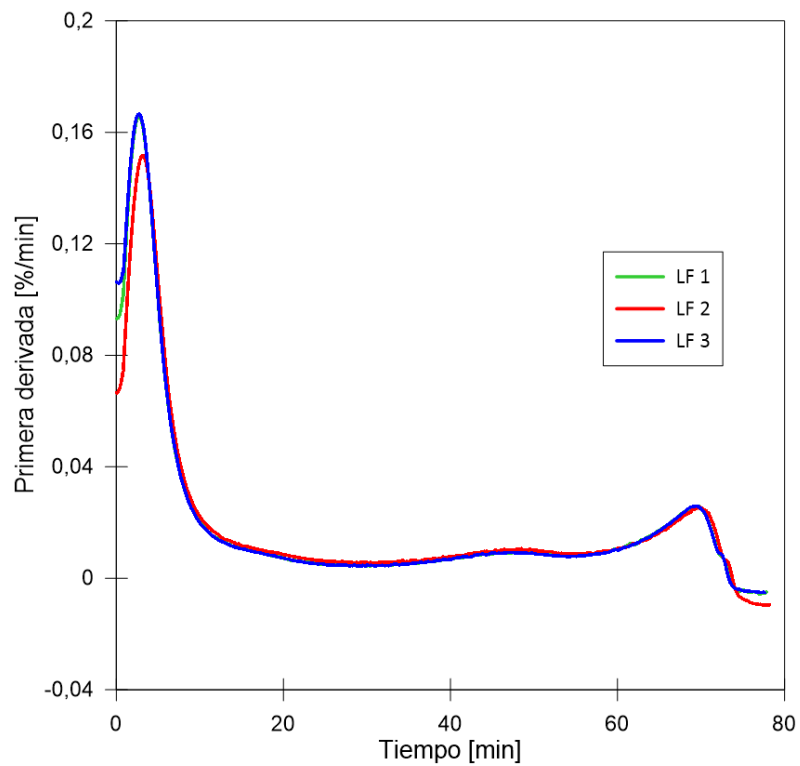
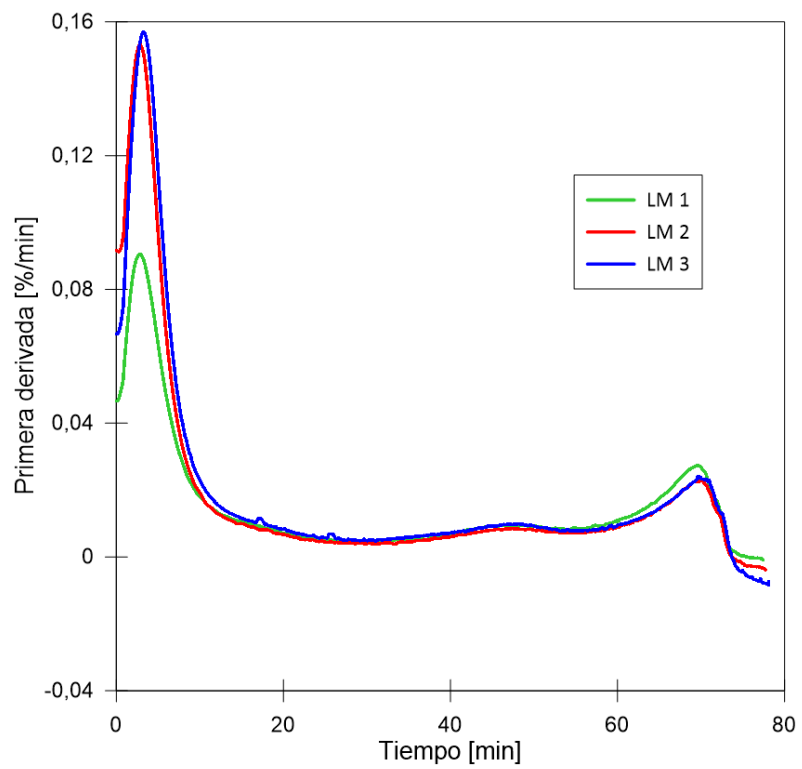
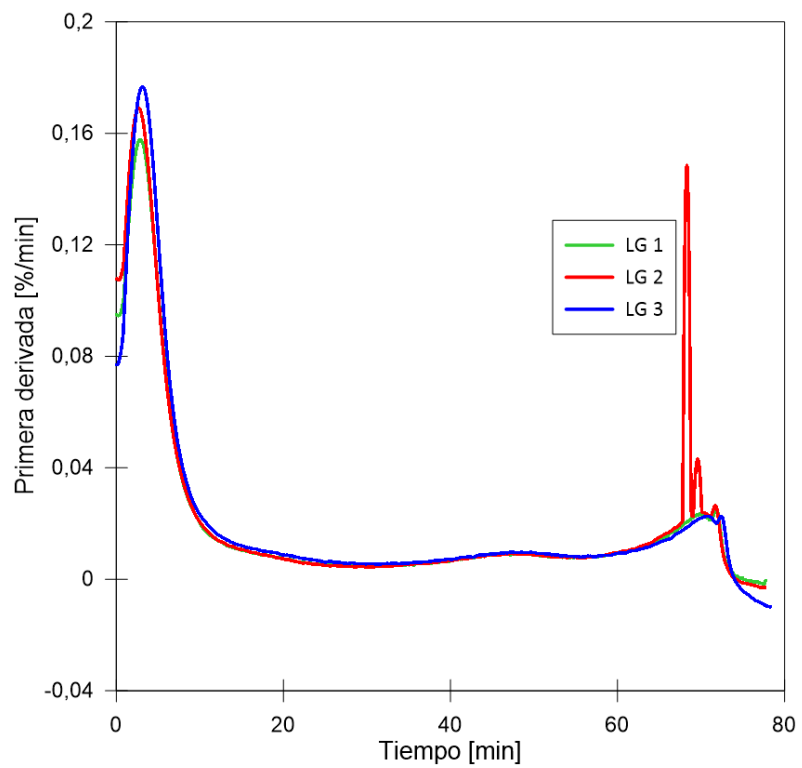


Figura 10-21: Primera derivada versus tiempo en laponita fina LF.



**Figura 10-22: Primera derivada versus tiempo en laponita media LM.**



**Figura 10-23: Primera derivada versus tiempo en laponita gruesa LG.**

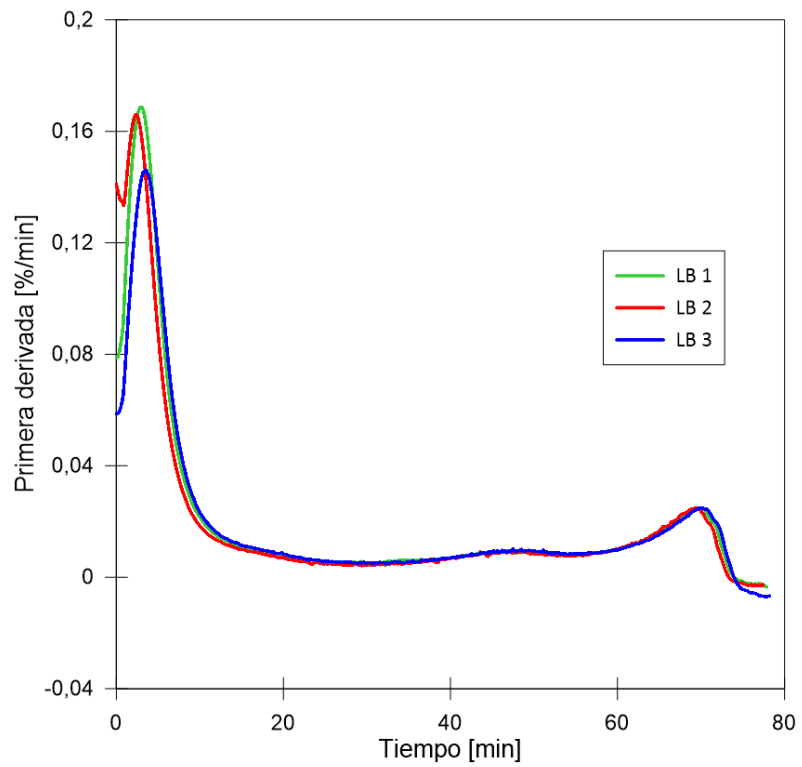


Figura 10-24: Primera derivada versus tiempo en laponita bruta LB.

### 10.4.5 Promedio primera derivada

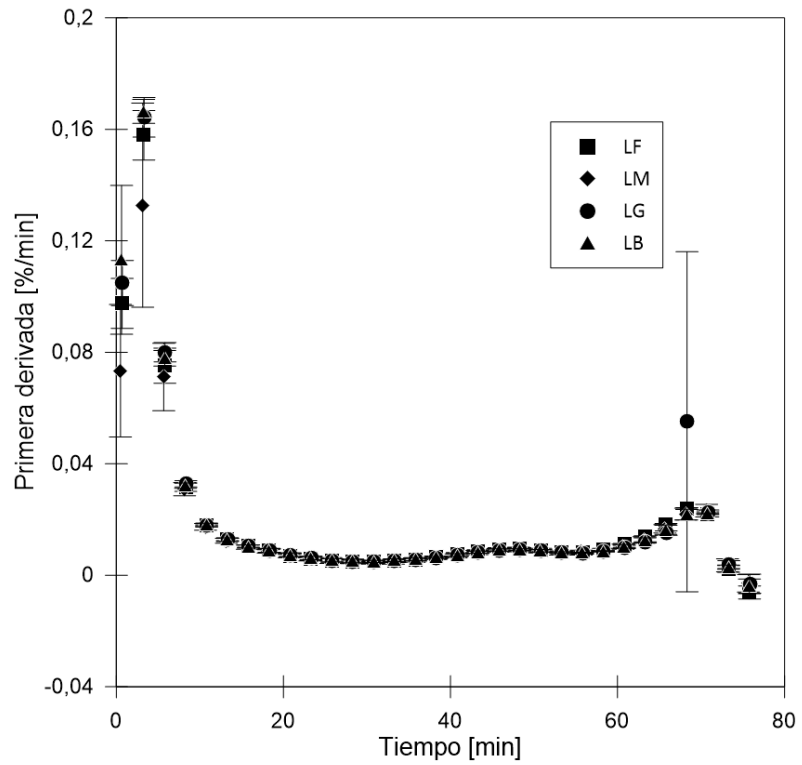


Figura 10-25: Promedio primera derivada versus tiempo en laponita fina LF, laponita mediana LM, laponita gruesa LG y laponita bruta LB.



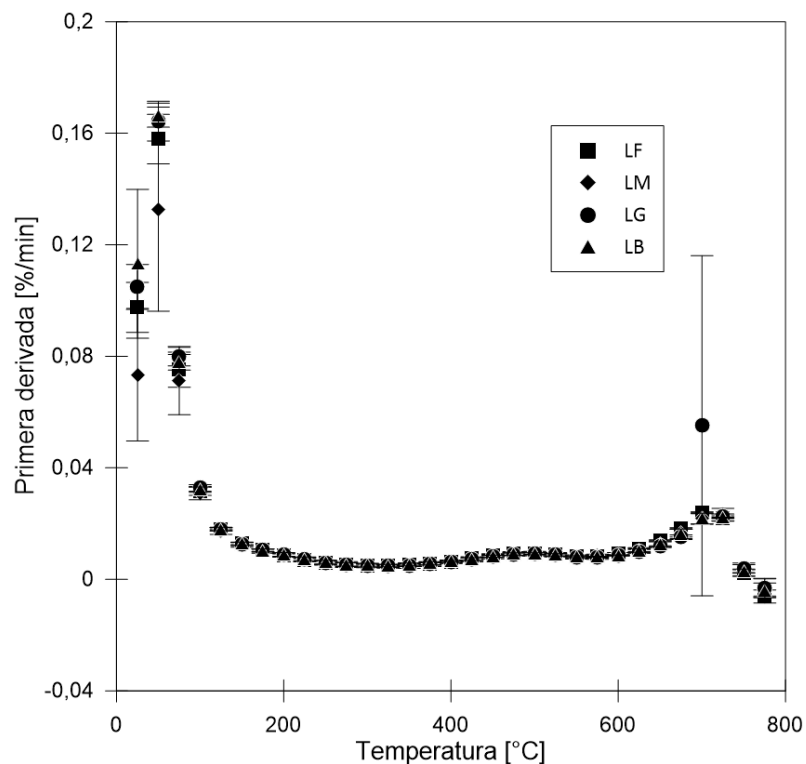


Figura 10-26: Promedio primera derivada versus temperatura en laponita fina LF, laponita mediana LM, laponita gruesa LG y laponita bruta LB.

## 10.5 SEM

### 10.5.1 EDS

Tabla 10-6: Espectro EDS laponita fina LF.

Espectro	O [%]	Na [%]	Mg [%]	Si [%]	Total [%]
Espectro 1	0,09	1,62	17,92	32,36	100
Espectro 2	46,49	1,39	17,86	34,26	100
Espectro 3	31,89		18,08	50,03	100
Espectro 4	54,64	1,66	16,15	27,54	100
Espectro 5	30,53		16,36	53,11	100
Espectro 6	30,49	1,06	18,33	50,12	100
Espectro 7	43,79	1,45	18,53	36,23	100
Espectro 8	42,08	1,37	18,56	37,98	100
Espectro 9	33,57	1,5	16,34	48,59	100
Espectro 10	38,72	1,2	15,34	44,75	100

**Tabla 10-7: Espectro EDS Iaponita mediana LM.**

Espectro	O [%]	Na [%]	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Total [%]
Espectro 1	51.96		15.00		33.04	100.00
Espectro 2	48.79	1.35	17.68		32.17	100.00
Espectro 3	45.29	1.41	18.41		34.90	100.00
Espectro 4	56.21	1.70	16.12		25.97	100.00
Espectro 5	40.15		14.34	1.27	44.24	100.00
Espectro 6	37.61	1.24	17.63		43.52	100.00
Espectro 7	50.86	1.56	17.99		29.59	100.00
Espectro 8	47.62	1.45	17.79		33.14	100.00
Espectro 9	55.12	1.56	16.84		26.48	100.00
Espectro 10	47.09	1.76	18.31		32.84	100.00

**Tabla 10-8: Espectro EDS Iaponita grande LG.**

Espectro	O [%]	Na [%]	Mg [%]	Si [%]	Total [%]
Espectro 1	39,52	1,58	19,01	39,89	100
Espectro 2	41,66	1,7	18,61	38,03	100
Espectro 3	33,25	1,26	18,31	47,18	100
Espectro 4	35,29	1,12	18,55	45,05	100
Espectro 5	41,37	1,46	18,51	38,66	100
Espectro 6	44,51	1,62	18,68	35,2	100
Espectro 7	33,03		18,85	48,12	100
Espectro 8	41,73	1,06	19	38,22	100
Espectro 9	37,13	1,47	18,15	43,25	100
Espectro 10	30,16		16,15	53,7	100

**Tabla 10-9: Espectro EDS Iaponita bruta LB.**

Espectro	O [%]	Na [%]	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Total [%]
Espectro 1	44,05	1,72	18,73		35,49	100
Espectro 2	39,81	1,6	19,19		39,4	100
Espectro 3	49,12	1,85	16,3		32,73	100
Espectro 4	36,48	1,3	18,17		44,06	100
Espectro 5	41,26	1,67	19,01		38,07	100
Espectro 6	43,99	1,74	18,41	0,33	35,52	100
Espectro 7	38,66	1,73	19,2		40,41	100
Espectro 8	34,55	1,28	19,22		44,95	100
Espectro 9	47,36	1,81	18,4		32,44	100
Espectro 10	40,14	1,55	19,28	0,39	38,64	100

## 10.6 Dispositivo permeámetro

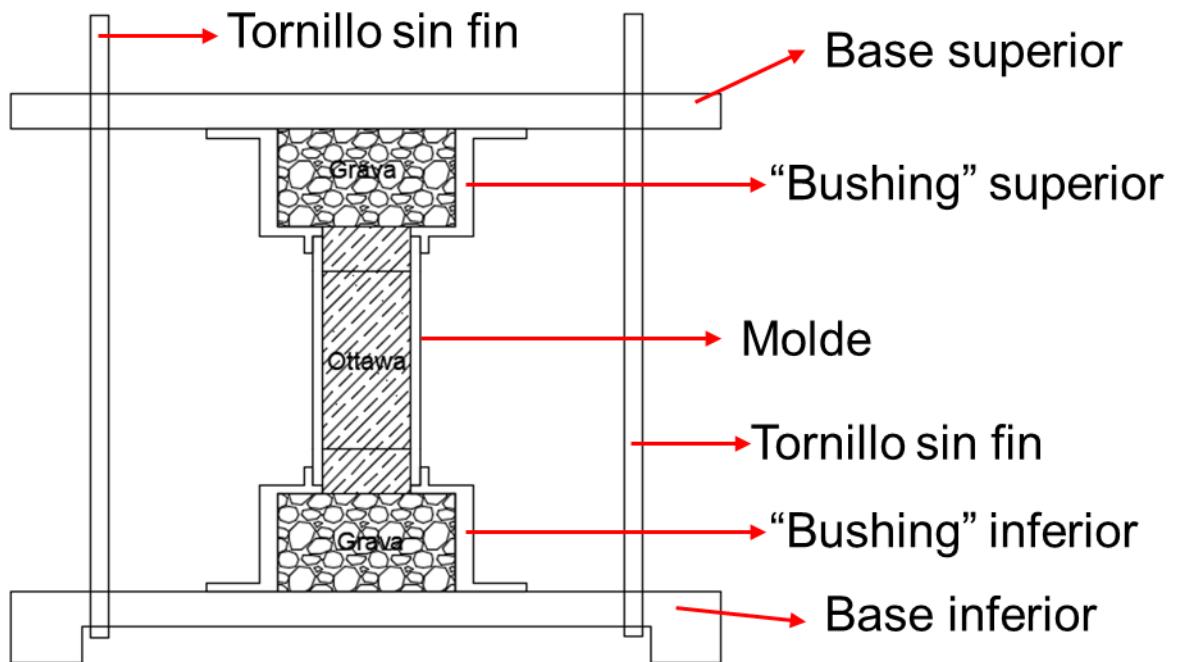


Figura 10-27: Partes del dispositivo permeámetro.

Las unidades en todas las figuras siguientes se encuentran en mm.

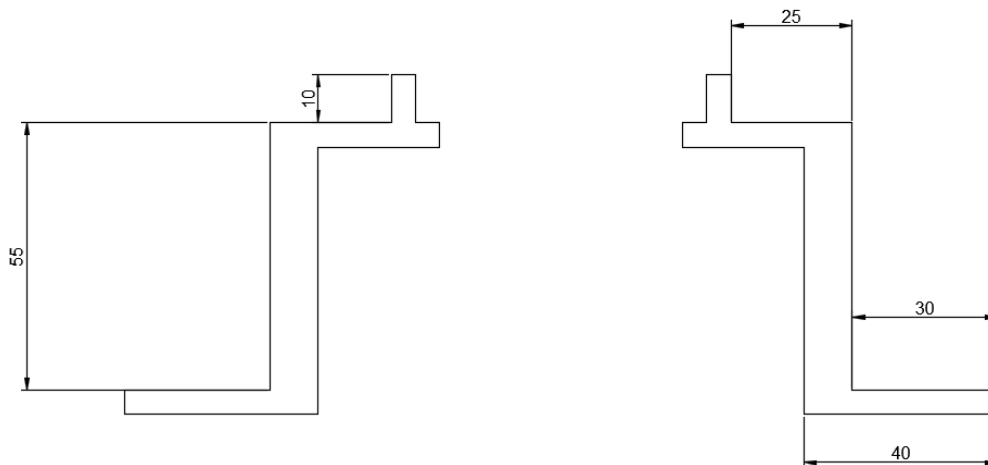


Figura 10-28: Perfil del "Bushing".

Bushing vista en planta

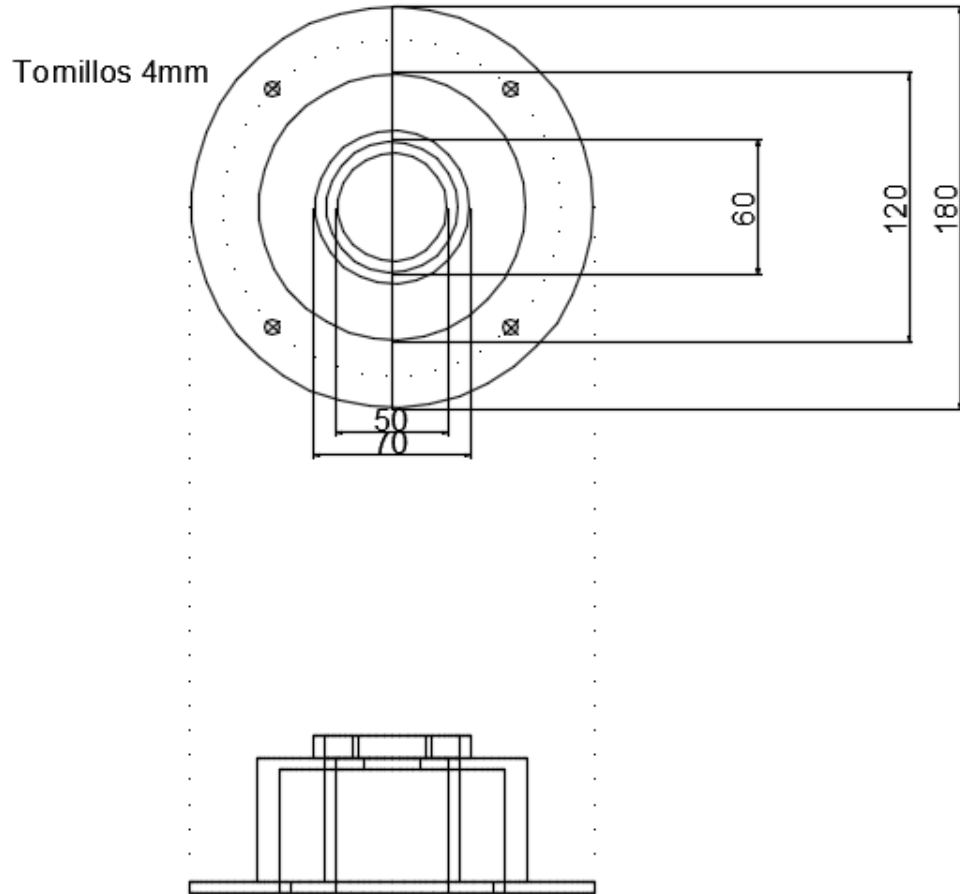


Figura 10-29: "Bushing" en planta y en elevación.

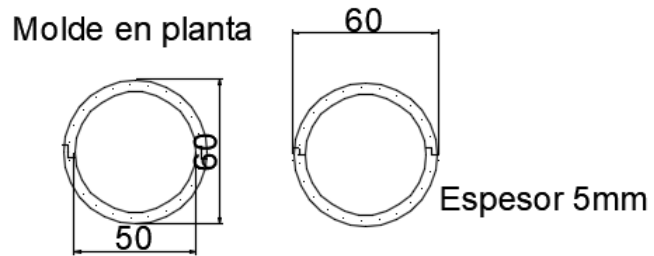
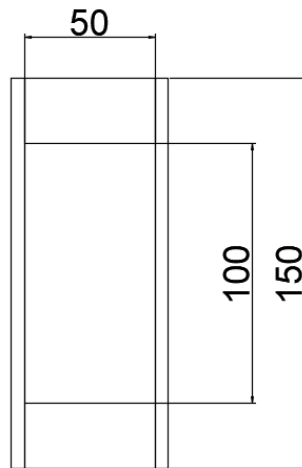


Figura 10-30: Molde en planta.

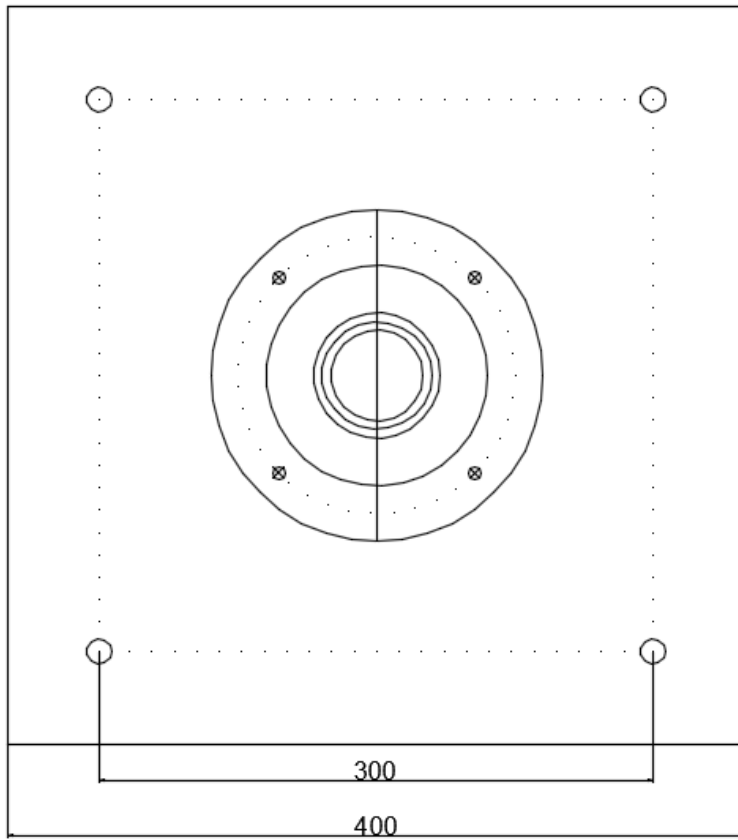


Figura 10-31: Molde en elevación en 3D..



Espesor del molde 5 mm

Figura 10-32: Dimensiones del molde.



Indicación de los agujeros:

Agujeros de los fierros poseen un diámetro de 15 mm y los tornillos sin fin poseen un diámetro de 4 mm.

Base cuadrada y simétrica

Figura 10-33: Base de *plexiglass* superior/inferior vista en planta.

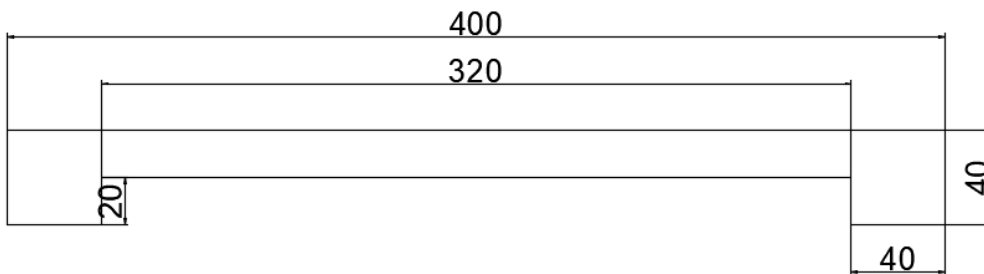


Figura 10-34: Base de *plexiglass* superior/inferior vista en elevación