



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES  
FACULTAD DE INGENIERÍA

**Tesis de Grado de Ingeniería Civil**  
Laboratorio de Mecánica de Suelos

---

- **Suelos compactados con incorporación de polímeros -**  
**Aplicación a proyectos de Ingeniería Civil**

---

Autor:

Luz Marina Marti

Director de Tesis:

Dr. Diego Manzanal

Co – Directores de Tesis:

Dra. Teresa María Pique

Ing. Mauro Codevilla

-Diciembre de 2015-

# Índice general

<b>1. Introducción - Motivación</b>	<b>9</b>
<b>2. Estado del arte</b>	<b>11</b>
2.1. Reseña histórica . . . . .	11
2.2. Uso de suelos con polímeros en la ingeniería civil y agrónoma . . . . .	11
2.3. Uso de polímeros en la ingeniería geotécnica . . . . .	12
<b>3. Materiales: caracterización</b>	<b>17</b>
3.1. Caracterización suelo fino . . . . .	17
3.1.1. Ensayos físicos . . . . .	18
3.1.1.1. Límites de Atterberg . . . . .	18
3.1.1.2. Fracción pasante tamiz #200 . . . . .	20
3.1.1.3. Carta de plasticidad . . . . .	20
3.1.1.4. Hidrometría . . . . .	21
3.1.1.5. Gravedad específica . . . . .	23
3.1.1.6. Superficie Específica de las partículas. Absorción de Azul de Metileno. . . . .	23
3.1.2. Ensayos de comportamiento mecánico . . . . .	24
3.1.2.1. Ensayo Proctor Estándar . . . . .	24
3.1.2.2. Índice de expansión . . . . .	25
3.1.3. Ensayos de caracterización hidráulica . . . . .	33
3.1.3.1. Ensayo de permeabilidad . . . . .	33
3.1.3.2. Medición de succión con técnica de papel de filtro . . . . .	34
3.1.4. Ensayos de composición y caracterización de microestructura . . . . .	43
3.1.4.1. Difracción de rayos X - DRX . . . . .	43
3.1.4.2. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier: FTIR . . . . .	44
3.1.4.3. Análisis de termogravimetría: TGA . . . . .	46
3.1.4.4. Ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio . . . . .	47
3.1.4.5. Microscopía electrónica de barrido - SEM . . . . .	49
3.2. Caracterización suelo granular . . . . .	52
3.2.1. Ensayos físicos . . . . .	52
3.2.2. Ensayos de comportamiento mecánico . . . . .	54
3.3. Polímero . . . . .	55
3.3.1. Selección del aditivo . . . . .	55
3.3.2. Composición y propiedades . . . . .	55
3.3.3. Usos de APAM . . . . .	56
3.3.4. Preparación de la solución de PAM . . . . .	57
3.3.5. Preparación de los films de APAM y CPAM . . . . .	57
3.3.6. Ensayos de composición y caracterización de la microestructura . . . . .	59
3.3.6.1. Ensayo de absorción de humedad . . . . .	59

3.3.6.2.	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier: FTIR . . . .	60
3.3.6.3.	Análisis de termogravimetría: TGA . . . . .	62
3.3.6.4.	Difracción de rayos X - DRX . . . . .	63
3.3.6.5.	Ensayo de Calorimetría Diferencial de Barrido: DSC . . . . .	65
<b>4.</b>	<b>Mezclas: Suelo - Polímero</b>	<b>68</b>
4.1.	Caracterización de la mezcla Arcilla + APAM . . . . .	68
4.1.1.	Caracterización mezcla arcilla + APAM 0,5 % . . . . .	68
4.1.1.1.	Elección y preparación de la mezcla . . . . .	68
4.1.1.2.	Ensayos físicos . . . . .	70
4.1.1.3.	Ensayos de comportamiento mecánico . . . . .	71
4.1.1.4.	Ensayos de caracterización hidráulica . . . . .	75
4.1.1.5.	Ensayos de composición y caracterización de la microestructura . .	76
4.1.2.	Caracterización mezcla arcilla + APAM 1,5 % . . . . .	80
4.1.2.1.	Ensayos físicos . . . . .	80
4.1.2.2.	Ensayos de comportamiento mecánico . . . . .	80
4.1.2.3.	Ensayos de caracterización hidráulica . . . . .	82
4.1.2.4.	Ensayos de composición y caracterización de la microestructura . .	83
4.2.	Caracterización de la mezcla Arena-Arcilla-Polímero . . . . .	85
4.2.1.	Estudio de optimización de mezclas . . . . .	85
4.2.2.	Ensayos físicos . . . . .	86
4.2.3.	Ensayos de comportamiento hidráulico . . . . .	87
4.2.3.1.	Succión - Método del papel filtro . . . . .	87
4.2.3.2.	Ensayo de columna de permeabilidad . . . . .	89
4.2.3.3.	Ensayo de permeabilidad . . . . .	101
4.2.4.	Ensayos de comportamiento mecánico . . . . .	101
4.2.4.1.	Hinchamiento libre - Consolidación uniaxial . . . . .	101
4.2.4.2.	Ensayo de compresión simple - UCS . . . . .	102
4.2.5.	Ensayos de caracterización de microestructura . . . . .	105
4.2.5.1.	Ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio . . . . .	105
4.2.5.2.	Ensayo de microscopía electrónica de barrido . . . . .	106
<b>5.</b>	<b>Análisis de resultados</b>	<b>112</b>
5.1.	Comparación de arcilla y mezclas . . . . .	112
5.1.1.	Ensayos físicos . . . . .	112
5.1.2.	Ensayos de comportamiento mecánico . . . . .	112
5.1.2.1.	Ensayo Proctor Normal . . . . .	112
5.1.2.2.	Hinchamiento libre - Consolidación uniaxial - Presión de hincha- miento . . . . .	113
5.1.3.	Ensayos de caracterización hidráulica . . . . .	114
5.1.3.1.	Ensayo de permeabilidad . . . . .	114
5.1.3.2.	Ensayo de succión con papeles filtro . . . . .	114
5.1.4.	Ensayos de composición y caracterización de la microestructura . . . . .	115
5.1.4.1.	Porosimetría por intrusión de mercurio . . . . .	115
<b>6.</b>	<b>Barreras hidráulicas para depósitos de residuos sólidos</b>	<b>120</b>
6.1.	Introducción . . . . .	120
6.2.	Residuos sólidos urbanos . . . . .	120
6.3.	Requerimientos físicos de barreras hidráulicas . . . . .	121
6.3.1.	Impermeabilidad . . . . .	121
6.3.2.	Estabilidad volumétrica . . . . .	121
6.3.3.	Estabilidad frente al deslizamiento . . . . .	123

6.4.	Desarrollo . . . . .	124
6.4.1.	Estabilidad volumétrica . . . . .	124
6.4.1.1.	Caso base . . . . .	125
6.4.1.2.	Mezcla arcilla - polímero (MAP) . . . . .	125
6.4.1.3.	Mezcla arena - arcilla (MAA) . . . . .	126
6.4.1.4.	Mezcla arena - arcilla - polímero (MAAP) . . . . .	127
6.4.1.5.	Resumen de resultados . . . . .	127
6.4.2.	Estabilidad frente al deslizamiento . . . . .	128
6.4.3.	Impermeabilización . . . . .	129
6.5.	Conclusiones . . . . .	129
<b>7.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>131</b>

# Índice de figuras

2.3.1. Curvas de retención.[40]	13
2.3.2. Esquema de modificación de las capas de arcilla [37]	14
2.3.3. Curvas Proctor [37]	15
2.3.4. Curvas de compresión [37]	15
3.1.1. Lugar de extracción del suelo	17
3.1.2. Cascador de Casagrande	19
3.1.3. Variación del volumen según humedad	19
3.1.4. Ensayo límite de contracción	20
3.1.5. Carta de plasticidad	21
3.1.6. Ensayo de hidrometria	22
3.1.7. Curvas granulométricas	22
3.1.8. Ensayo Superficie Específica con Azul de Metileno	23
3.1.9. Propiedades de arcillas	24
3.1.10. Curva de compactación arcilla natural	25
3.1.11. Curva de hinchamiento libre de la arcilla	26
3.1.12. Curva de consolidación	28
3.1.13. Resultado de ensayo de consolidación unidimensional	28
3.1.14. Molde utilizado para el ensayo de presión de hinchamiento	29
3.1.15. Curva de hinchamiento libre muestra seca - Arcilla	30
3.1.16. Curva de compresibilidad de la muestra seca - Arcilla	30
3.1.17. Identificación de las fases del ensayo - Arcilla	31
3.1.18. Determinación de la presión de hinchamiento - Arcilla	31
3.1.19. Curva de hinchamiento libre de la muestra húmeda - Arcilla	32
3.1.20. Curva de compresibilidad de la muestra húmeda - Arcilla	32
3.1.21. Identificación de las fases del ensayo- Arcilla	33
3.1.22. Curva de ensayo de permeabilidad de la arcilla	34
3.1.23. Fenómeno de tensión superficial	35
3.1.24. (a) Detalle menisco capilar. (b) Ascenso capilar. (c) Presión del agua	36
3.1.25. Esquema de la geometría del menisco formado en partículas esféricas	36
3.1.26. Curvas de retención de distintas tipologías de suelo. [20]	37
3.1.27. Curva de calibración Whatman N <sup>o</sup> 42 y Schleicher & Schuell N <sup>o</sup> 589.	39
3.1.28. Esquema de la medición de succión total y mátrica. [5]	39
3.1.29. Compactación estática de las muestras.	40
3.1.30. Armado de ensayo de succión mediante papeles filtro.	41
3.1.31. Almacenamiento de las muestras a temperatura controlada.	41
3.1.32. Balanza electrónica de alta precisión. (0,1 mg)	42
3.1.33. Curva de retención de la arcilla.	43
3.1.34. Difractogramas Arcilla, ejemplo Arcilla seca a 60 °C	43
3.1.35. Espectro FTIR para la arcilla	45

3.1.36	Perdida de peso Arcilla . . . . .	47
3.1.37	Volumen de poros en función de diámetro de poros muestras seca y húmeda- Arcilla . . . . .	49
3.1.38	Microscopio electrónico de barrido . . . . .	50
3.1.39	Vista de arcilla, muestra seca . . . . .	51
3.1.40	Vista de arcilla, muestra húmeda . . . . .	51
3.2.1.	Curva granulométrica arena . . . . .	52
3.2.2.	Método simplificado - Determinación del ángulo crítico - Arena . . . . .	53
3.2.3.	Ángulo de fricción interna crítico - Arena . . . . .	53
3.2.4.	Proctor normal arena . . . . .	54
3.3.1.	Fórmula química Poliacrilamida . . . . .	55
3.3.2.	Poliacrilamida . . . . .	56
3.3.3.	Formulas iónicas poliacrilamida catiónica y aniónica . . . . .	56
3.3.4.	Preparación de solución de PAM . . . . .	57
3.3.5.	Film de APAM . . . . .	58
3.3.6.	Film de CPAM . . . . .	58
3.3.7.	Dispositivo de ensayo de absorción de humedad . . . . .	59
3.3.8.	Absorción de humedad de los films de APAM y CPAM . . . . .	60
3.3.9.	Espectro FTIR para un film de APAM . . . . .	61
3.3.10	Espectro FTIR para un film de CPAM . . . . .	61
3.3.11	Gráficos de TGA para la APAM y la CPAM . . . . .	63
3.3.12	DRX de la APAM . . . . .	64
3.3.13	DRX de la CPAM . . . . .	64
3.3.14	DSC del APAM . . . . .	66
3.3.15	DSC de la CPAM . . . . .	67
4.1.1.	Material formando lasjas . . . . .	69
4.1.2.	Material con consistencia de espuma . . . . .	70
4.1.3.	Material formando hilos . . . . .	71
4.1.4.	Curva Proctor estándar para la arcilla modificada con 0,5 % de APAM . . . . .	72
4.1.5.	Curva de hinchamiento libre muestra seca - Arcilla-APAM 0,5 % . . . . .	73
4.1.6.	Curva de compresibilidad de la muestra seca - Arcilla-APAM 0,5 % . . . . .	73
4.1.7.	Curva de hinchamiento libre muestra húmeda- Arcilla-APAM 0,5 % . . . . .	74
4.1.8.	Curva de compresibilidad de la muestra húmeda- Arcilla-APAM 0,5 % . . . . .	74
4.1.9.	Curva de retención de arcilla + APAM 0,5 % . . . . .	76
4.1.10	Porosimetría de mercurio, muestra seca.- Arcilla-APAM 0,5 % y Arcilla . . . . .	76
4.1.11	Porosimetría de mercurio, muestra húmeda- Arcilla-APAM 0,5 % y Arcilla . . . . .	77
4.1.12	Arcilla con APAM 0,5 %, foto 1-seca (izquierda) y foto 2-húmeda (derecha), escala 1 $\mu\text{m}$ - Magnificación 12.00 KX . . . . .	77
4.1.13	Arcilla Seca con APAM 0,5 %: (izquierda) Escala 200 nm- Magnificación 50.00 KX - (derecha) zoom Escala 200 nm - Magnificación 100.00 KX . . . . .	78
4.1.14	Arcilla húmeda con APAM 0,5 % . . . . .	78
4.1.15	Imágenes de una mezcla arena-bentonita-polímero, según [34] . . . . .	79
4.1.16	Curva Proctor Arcilla + APAM 1,5 % . . . . .	80
4.1.17	Curva de compresibilidad arcilla + APAM 1,5 % . . . . .	81
4.1.18	Curva de retención de la arcilla + APAM 1,5 % . . . . .	82
4.1.19	SEM Mezcla 1,5 % APAM . . . . .	83
4.1.20	SEM Mezcla 1,5 % APAM . . . . .	84
4.2.1.	Estudio de mezclas . . . . .	86
4.2.2.	Densidad máxima de cada mezcla . . . . .	86
4.2.3.	Curvas de retención de agua para mezclas A y B . . . . .	88
4.2.4.	Curvas de retención mezcla A con relación de vacíos diferente . . . . .	89
4.2.5.	Sensores de humedad volumétrica . . . . .	90

4.2.6. Curva de calibración EC-5 (A)	92
4.2.7. Curva de calibración EC-5 (B)	92
4.2.8. Curva de calibración 5TE (C)	93
4.2.9. Curva de calibración EC-5 (D)	93
4.2.10. Curva de calibración EC-5 (E)	94
4.2.11. Sensor de succión mátrica MPS-2	94
4.2.12. Permeámetro de carga constante	96
4.2.13. Columna de permeabilidad	97
4.2.14. Variación de succión durante todo el ensayo	98
4.2.15. Detalle de la variación de succión	99
4.2.16. Variación de la humedad volumétrica en el tiempo	99
4.2.17. Humedad volumétrica vs succión	100
4.2.18. Diagrama de humedades finales	100
4.2.19. Curva de compresibilidad Mezcla A y B	102
4.2.20. Curva esfuerzo - deformación mezcla A	103
4.2.21. Curva esfuerzo - deformación mezcla B	104
4.2.22. Tipos de roturas	104
4.2.23. Porosimetría para muestras secas - Mezclas A y B	105
4.2.24. Porosimetría para muestras húmedas - Mezclas A y B	105
4.2.25. SEM de arena y arcilla	106
4.2.26. SEM de arena arcilla y polímero	107
4.2.27. Polímero formando un nudo	108
4.2.28. Hilos de polímero	109
4.2.29. SEM de Mezcla no óptima	110
4.2.30. Interacción suelo - polímero	111
5.1.1. Curvas Proctor estándar arcilla sola y arcilla modificada	113
5.1.2. Curvas de retención de las muestras	115
5.1.3. Volúmen de poros en función del diámetro de poros, muestra de rama seca	116
5.1.4. Volúmen de poros en función del diámetro de poros; muestra rama húmeda	117
5.1.5. Porosimetría para muestras de rama seca	118
5.1.6. Porosimetría para muestras de rama húmeda	118
6.3.1. Esquema de cambios volumétricos	122
6.3.2. Fisuras en arcilla	122
6.3.3. Talud infinito	123
6.4.1. Esquema del caso base	124
6.4.2. Curva de compresibilidad arcilla	125
6.4.3. Curva de compresibilidad arcilla + APAM 1,5%	126
6.4.4. Curva de compresibilidad de arena y arcilla	126
6.4.5. Curva de compresibilidad de arena arcilla y polímero	127
6.5.1. Resumen características de cada mezcla	130
7.0.1. Interacción suelo - polímero	134

# Índice de cuadros

3.1.1.Relación entre el potencial de hinchamiento y el índice de plasticidad, según Seed, Woodwar y Ludgren, 1962 . . . . .	26
3.1.2.Características de las muestras de arcilla . . . . .	29
3.1.3.Escalones de carga para el ensayo de presión de hinchamiento . . . . .	29
3.1.4.Índices de compresión e hinchamiento para arcilla rama seca - Arcilla . . . . .	32
3.1.5.Índices de compresión y de hinchamiento para la muestra húmeda- Arcilla . . . . .	33
3.1.6.Valores usuales de conductividad hidráulica . . . . .	34
3.1.7.Resultados ensayo de succión - Arcilla . . . . .	42
3.1.8.Interpretación Difractogramas - Arcilla . . . . .	44
3.1.9.Elementos químicos usuales de una arcilla . . . . .	45
3.1.10Picos experimentales de la muestra de arcilla . . . . .	45
3.1.11Parámetros de la TGA para las dos muestras de arcilla . . . . .	46
3.1.12Características de las muestras de porosimetría - Arcilla . . . . .	48
3.1.13Repartición de los tamaños de poros- Arcilla . . . . .	49
3.2.1.Parámetros arena . . . . .	52
3.3.1.Valores finales del ensayo de absorción de humedad . . . . .	60
3.3.2.Identificación de los picos experimentales de APAM . . . . .	61
3.3.3.Identificación de los picos experimentales de CPAM . . . . .	62
3.3.4.Parámetros de la TGA para las tres muestras de APAM . . . . .	62
3.3.5.Identificación de las pérdidas de masa de la APAM . . . . .	63
3.3.6.Parámetros del DSC para la APAM . . . . .	65
3.3.7.Valores promedios de Tg y Tf de la APAM . . . . .	66
3.3.8.Parámetros del DSC CPAM . . . . .	67
3.3.9.Valores promedios de Tg y Tf de la APAM . . . . .	67
4.1.1.Proporciones de la mezcla experimental . . . . .	69
4.1.2.Escalones de carga para el ensayo de presión de hinchamiento . . . . .	72
4.1.3.Características de las muestras de Arcilla-APAM 0,5 % . . . . .	73
4.1.4.Índices de compresión y de hinchamiento para muestra de rama seca- Arcilla-APAM 0,5 % . . . . .	74
4.1.5.Índices de compresión y de hinchamiento para la muestra húmeda- Arcilla-APAM 0,5 % . . . . .	75
4.1.6.Datos experimentales Arcilla + APAM 0,5 % . . . . .	75
4.1.7.Proporciones de la mezcla experimental - Arcilla - APAM 1,5 % . . . . .	80
4.1.8.Características de las muestras de - Arcilla - APAM 1,5 % . . . . .	81
4.1.9.Escalones de carga para el ensayo de presión de hinchamiento . . . . .	81
4.1.10Índices de compresión e hinchamiento - Arcilla - APAM 1,5 % . . . . .	82
4.1.11Datos experimentales Arcilla + APAM 1,5 % . . . . .	82
4.2.1.Composición de las mezclas . . . . .	85
4.2.2.Contenido de las mezclas analizadas . . . . .	87

4.2.3.Datos experimentales mezcla B - $e=0,54$ . . . . .	87
4.2.4.Datos experimentales mezcla A - $e=0,54$ . . . . .	87
4.2.5.Datos experimentales mezcla A - $e=0,62$ . . . . .	89
4.2.6.Características de las muestras A y B . . . . .	101
4.2.7.Escalones de carga para el ensayo de presión de hinchamiento . . . . .	101
4.2.8.Indices de compresión e hinchamiento - Mezcla A y B . . . . .	102
4.2.9.Muestras ensayadas a compresión uniaxial - Mezclas A y B . . . . .	103
5.1.1.Comparativa Límites de Atterberg . . . . .	112
5.1.2.Comparación de puntos óptimos de compactación . . . . .	112
5.1.3.Indices de compresión e hinchamiento para las muestras de suelo y suelo-polímero . . . . .	114
5.1.4.Parámetros de las curvas de retención . . . . .	115
5.1.5.Características de las muestras arcilla-APAM . . . . .	116
6.4.1.Valor de entrada de aire . . . . .	127
6.4.2.Expansión volumétrica para cada mezcla . . . . .	128
6.4.3.Factores de seguridad para los materiales propuestos . . . . .	128
6.4.4.Valores de permisividad calculados . . . . .	129

# Capítulo 1

## Introducción - Motivación

El presente trabajo resume el esfuerzo, cooperación y dedicación conjunta del Instituto de Tecnología en Polímeros y Nanotecnología (ITPN) y Laboratorio de Mecánica de Suelos (LMS) de la Universidad de Buenos Aires, quienes han asumido el compromiso de llevar a cabo una Tesis de grado en Ingeniería Civil sobre un área en creciente desarrollo: El uso de polímeros como agregado de suelos en el ámbito de la ingeniería geotécnica.

El agregado de polímeros en suelos había sido implementado en décadas pasadas por la ingeniería agronómica, principalmente con el objeto de control de procesos de erosión y mejora de tasas de infiltración para terrenos de siembra.

En las últimas dos décadas, el uso de polímeros en la ingeniería geotécnica ha incrementado su participación en los procesos constructivos tradicionales, a saber: subbases de pavimentos, barreras hidráulicas en rellenos sanitarios, fluidos estabilizantes para perforaciones, etc.

El presente trabajo focaliza el estudio de agregado de polímeros en suelos con el objeto de mejorar el comportamiento hidro-mecánico de barreras hidráulicas en rellenos de almacenamiento de residuos domiciliarios.

El empleo de barreras hidráulicas ejecutadas mediante la colocación de suelos compactados (práctica tradicional) requiere del uso de materiales naturales con alto contenido de arcillas, preferentemente cercanos al lugar de ejecución del relleno. Esta técnica presenta como problemática que frente a la acción del intemperismo esos materiales experimentan variaciones en su contenido de humedad, asociados a cambios volumétricos en la barrera y por consiguiente la formación de fisuras o grietas que facilitan el proceso de percolación de fluidos contaminantes hacia el suelo natural. Esta problemática ha sido estudiada por numerosos autores (Chamberlain and Gow 1979; Kleppe and Olson 1985; Konrad 1989; Othman and Benson 1992; Morris et al. 1992; Daniel and Wu 1993; Shear et al. 1993; LaPlante and Zimmie 1993; Bowders and McClelland 1994; Inyang 1994; Fang 1994; Fleming and Inyang 1995; Doll 1997; Daniels et al. 1999; Albrecht and Benson 2001).

Frente a esta problemática, la incorporación de polímeros a los suelos naturales ha comenzado a tener relevancia en la mejora del comportamiento de barreras hidráulicas en esta última década, obteniéndose mejoras de comportamiento en términos de conductividad hidráulica y de resistencia mecánica.

En virtud de los antecedentes aquí presentados, este trabajo tiene por objetivo validar una técnica novedosa de mejora del terreno natural mediante su estudio a nivel de laboratorio.

Esperamos que sea de su agrado la lectura de esta Tesis.

## Agradecimientos

Gracias a mi familia, por su apoyo incondicional y constante motivación.

Gracias a la Dra. Pique, Ing. Codevilla, Dr. Manzanal, por su paciencia, dedicación, criterio y aliento. Ha sido un privilegio contar con su guía y ayuda.

Gracias al equipo del Laboratorio de Mecánica de Suelos, a los estudiantes Santiago Rearte, Ignacio Acueto y Mariano Tomás Fernández, por su desinteresada ayuda en la realización de ensayos.

Gracias al director del Laboratorio de Mecánica de Suelos, Dr. Sfriso, y a la directora del Instituto de Tecnología en Polímeros y Nanotecnología, Dra. Analía Vazquez.

Gracias al Ing. Osvaldo Ledesma por guiarme en la realización de la aplicación.

Sin el aporte de todos ustedes hubiera sido de mayor dificultad para mi llegar a la culminación de este trabajo.

# Capítulo 2

## Estado del arte

A la hora de mezclar suelos con polímeros se debe evaluar la compatibilidad entre uno y otro. Además el polímero utilizado no debe emitir residuos tóxicos al medio ambiente, por lo tanto, se ve limitado el rango de sustancias que se pueden vincular.

El polímero interactuando químicamente con el suelo modifica sus propiedades, ya sean mecánicas (resistencia, deformaciones), físicas (tales como límites de Atterberg) o químicas (por interacción entre grupos reactivos del polímero y suelo).

Se presentarán algunos trabajos en los que se vinculan suelos con polímeros, para diversas aplicaciones.

### 2.1. Reseña histórica

Los aditivos de naturaleza polimérica tienen una larga tradición, durante los años 70 del siglo XX. Su desarrollo estuvo ligado a la investigación militar con el fin de obtener aditivos para el diseño y ejecución de pistas de aterrizaje de aviones y helicópteros. Posteriormente, su desarrollo pasó al ámbito civil y actualmente existen numerosas investigaciones. Hoy en día muchas empresas cuentan con fórmulas propias sobre las que existe poca documentación técnica independiente.

### 2.2. Uso de suelos con polímeros en la ingeniería civil y agrónoma

#### Agricultura

En Awad M. Helalia y J. Letey [1] se utilizó una solución polimérica para cambiar las propiedades defectuosas del suelo y así aumentar el rendimiento de los cultivos. El polímero utilizado es el tripolifosfato de sodio o acetato vinílico en bajas concentraciones. Al secar la solución se forma una costra microporosa resistente a la lluvia, lo que ayuda a evitar la erosión del suelo, y a conservar el agua por más tiempo en él.

Una investigación realizada por Bakass y col. [4] trató de mejorar la retención de agua adentro del suelo para disminuir las pérdidas de agua de riego por evaporación o infiltración. El polímero utilizado fue ácido acrílico que tiene propiedades superabsorbentes. El estudio del secado mostró que la presencia de gel polimérico superabsorbente permite conservar el agua adentro del suelo 8 días más que sin el polímero, y aumentar la capacidad de absorción de agua del suelo. El proceso de secado de la mezcla empieza por la evacuación del agua del polímero, retrasando la pérdida de agua del suelo. Ese resultado es muy interesante para ahorrar agua de riego y mejorar el aprovechamiento de este recurso.

## Aerogeles de arcilla-polímero

Las espumas poliméricas presentan inconvenientes ya que en su composición o fabricación a menudo se usa productos químicos y agentes espumantes que presentan toxicidad ambiental.

Los aerogeles de polímero-arcilla se están desarrollando como un nuevo material para sustituir las espumas poliméricas en algunas aplicaciones como aislamiento térmico, resistencia mecánica al impacto y construcción. Esta es una alternativa basada en los nanocompuestos. Los materiales intervinientes son montmorillonita MMT y polivinil alcohol PVOH (biodegradable).

El proceso inicia con la mezcla de una solución acuosa del polímero con una solución gelificada de la arcilla. La mezcla resultante es congelada adquiriendo entonces su estructura de aerogel. Posteriormente se extrae el agua por sublimación mediante el proceso de liofilización. Con este proceso se obtiene un material compuesto de polímero y arcilla similar a una espuma y con densidades entre 0,05 y 0,2 g/cm<sup>3</sup>. Los aerogeles presentan un comportamiento a compresión similar al de las espumas poliméricas. La tensión y el módulo presentan una dependencia de forma de ley de potencia con respecto a la composición de arcilla o polímero. Al aumentar las concentraciones se incrementan los valores de estas propiedades. En impacto, los aerogeles presentan un aumento de la rigidez con el incremento de la concentración tanto de arcilla como de polímero. En algunas aplicaciones se requiere mejorar el comportamiento ante la llama del material es por ello que se estudia la respuesta de los aerogeles ante el fuego. Se fabrican aerogeles con composiciones modificadas con hidróxido de aluminio, polifosfatos de amonio y gel de sílice como aditivos. A través del uso del calorímetro de cono y el análisis termogravimétrico, se observa una mejora de la resistencia al fuego de los aerogeles con el uso de hidróxido de aluminio y el polifosfato de amonio. El gel de sílice no mejora la resistencia al fuego. Sin embargo, las propiedades mecánicas a compresión e impacto se ven afectadas negativamente por los aditivos. [22].

## Residuos: Aplicación a bio-reactores

Uno de los tipos de almacenamiento de residuos consiste en bio reactores, donde un aporte de agua permite descontaminar el suelo eliminando nutrientes y microflora. Una característica de esas estructuras es su gran tamaño. A través de un estudio [7] fue analizado el agregado de polímero al conjunto contaminado, y se vio que permitió absorber una gran parte de la polución del suelo. El polímero ensayado es un termoplástico amorfo conocido como el Hytrel 8206, y permitió sacar hasta 85 % de los contaminantes del suelo en 4 horas, concentrándolos adentro de la matriz polimérica. Además, el polímero puede reutilizarse.

## 2.3. Uso de polímeros en la ingeniería geotécnica

### Barreras impermeables

Zhou et al. [40] describe el uso de poliácridamida - montmorillonita para utilizarlo como barrera impermeable de desechos ácidos provenientes de la minería, denominados tailings. La mezcla de suelo y polímero se hidrata hasta absorber 680 veces su peso seco, cuando el suelo sin polímero absorbe hasta 10 veces su peso seco. Basándose en la gran capacidad de absorber agua, la fuerte retención de humedad y elevada presión de hinchamiento, concluye que el polímero super absorbente junto con la montmorillonita puede ser utilizado como sello impermeable.

El mismo autor investigó la mezcla de arena, bentonita, poliácridamida, y tailings. Como resultado se puede observar en la Figura N<sup>o</sup>2.3.1 las curvas de retención de los distintos suelos utilizados.

La conductividad hidráulica de la arena utilizada era de  $5,3,10^{-4}m/s$ , al agregar un 1 % de polímero esta misma disminuye a  $1,9,10^{-8}m/s$ .

Otro dato a tener en cuenta de esta investigación es que agregar polímero al residuo ácido (tailing) éste no actuó como debería, explica que los cationes divalentes lixivian las partículas de

polímero, acortando las cadenas del polímero. Ello provoca que el polímero no pueda hidratarse a su máxima capacidad.

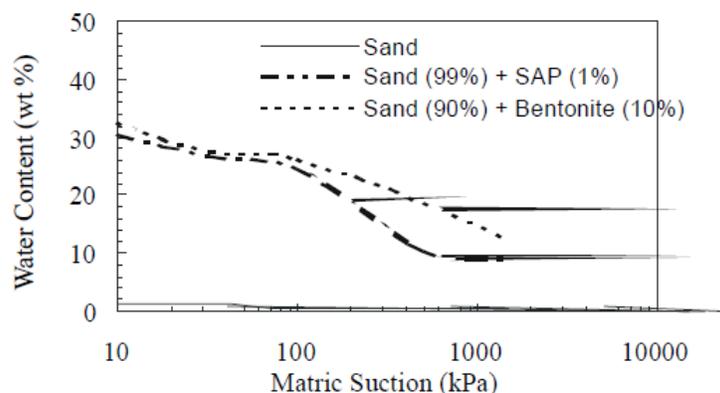


Figura 2.3.1: Curvas de retención.[40]

En John L. Daniels [15] se investiga la durabilidad de barreras impermeables compuestas por arena, arcilla y poliacrilamida, realizando ciclos de congelamiento - deshielo y desecación para analizar las fisuras. Como resultado llega a que un suelo compuesto por 70 % de arena y 30 % de arcilla posee un área de fisuras del 11,9 %, mediante la modificación con poliacrilamida se reduce al 3,4 %.

Otra investigación realizada por S.S. Agus [34] en la que utilizan un material compuesto por arena, bentonita y polímero para aplicarlo en rellenos sanitarios, evalúan propiedades como permeabilidad, capacidad de retención de agua, succión, compresibilidad y resistencia, y a su vez, cómo varían estos parámetros para diferentes condiciones de compactación. Este material se coloca en forma de capa; al estar mojada, la bentonita se hincha y el polímero reacciona, formando un gel denso y sólido que impide el pasaje de productos lixiviados. Se obtuvo que las características hidromecánicas, salvo presión de hinchamiento, de la mezcla no presentan grandes variaciones al modificar las condiciones de compactación.

En la investigación de Razakamanantsoa A.R [27], realiza mezclas entre bentonita y polímeros electrolitos, se evidenció una disminución de la conductividad hidráulica comparando el suelo no modificado y el suelo con agregado de polímero.

## Estabilización de suelos

El ejército de EE.UU realizó una investigación sobre la mezcla de arena con un co-polímero de acrílico vinil acetato. Como resultado se obtuvo que aumentó la rigidez del suelo a valores mayores que una mezcla de suelo - cemento. Además las concentraciones de polímero intervinientes son mucho menores a las de suelo-cemento, lo que constituye un ahorro de material.

Una empresa francesa, llamada Uretrek [35] puso en práctica un método de inyección de resina expansiva que aumenta su tamaño y provoca el desplazamiento de una construcción dañada por asentamientos diferenciales, restituyendo su posición original. Otro método consiste en inyectar una mezcla de arcilla y resina expansiva en un suelo cuyo índice de vacíos es alto para llenar vacíos y obtener un material más compacto. La implementación de este método conlleva a disminuir la permeabilidad e impedir el hinchamiento de la arcilla.

También se utilizan polímeros en la estabilización de suelos para uso en carreteras, John Derec et al [16] tiene como objetivo utilizar aditivos poliméricos que modifiquen las propiedades de suelos tales como aumentar su capacidad portante y reducir su susceptibilidad al agua. No sólo

para utilizarlo en las explanadas, sino también en la base y sub-base de la carretera. Para probar los efectos de esta mezcla de suelo, cal y polímero, se realizó un tramo de carretera en Andalucía, España, donde se pudo observar una mejora sustancial en cuanto a capacidad portante, flexibilidad del conglomerado resultante, reducción drástica de la permeabilidad, y por lo tanto, de la susceptibilidad al agua. A diferencia del tratamiento exclusivo con cal, el uso del polímero permite reducir el plazo de las reacciones que estabilizan propiamente el suelo. Como es sabido, la cal modifica muy rápidamente las propiedades de la arcilla pero sólo estabiliza a largo plazo. Por otro lado, las reacciones puzolánicas de la cal, dan lugar a silicatos y aluminatos cálcicos hidratados como los del cemento portland, por lo que la estabilización con cal, si se produce, es necesariamente rígida, lo que provoca que puedan producirse fisuras, y así aumentar la permeabilidad del material.

Además, la adición de polímero permite que las reacciones de estabilización se produzcan en horas/días, y no en meses/años, por lo que se reduce notablemente el tiempo de curado.

Waseim Ragab Azzam [37], utiliza polipropileno para modificar las características geotécnicas de una arcilla, realizando cambios en su microestructura construyendo nanocompuestos en los poros del material, como organoarcillas. En La Figura N<sup>o</sup> 2.3.2 se observa la modificación de la arcilla mediante el proceso de intercambio iónico.

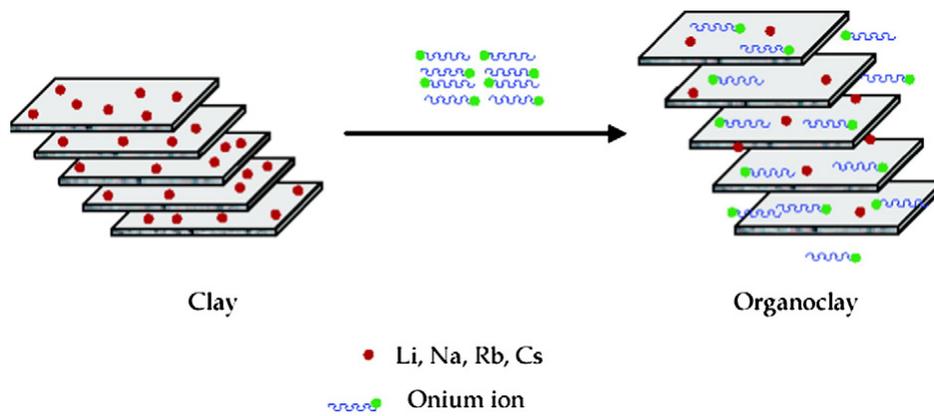


Figura 2.3.2: Esquema de modificación de las capas de arcilla [37]

En las curvas proctor presentadas en la Figura N<sup>o</sup> 2.3.3 se demuestra cómo al ir agregando mayores cantidades de polímero, la densidad seca óptima aumenta, pero la humedad óptima decrece.

El aumento de la densidad seca óptima se debe a la formación de nanocompuestos y la interacción con la arcilla. A menor volumen, y mayor peso, obtenemos una mayor densidad. En cambio, la absorción de agua en exceso por parte del polímero en la reacción química inicial, se traduce en un aumento de la humedad óptima.

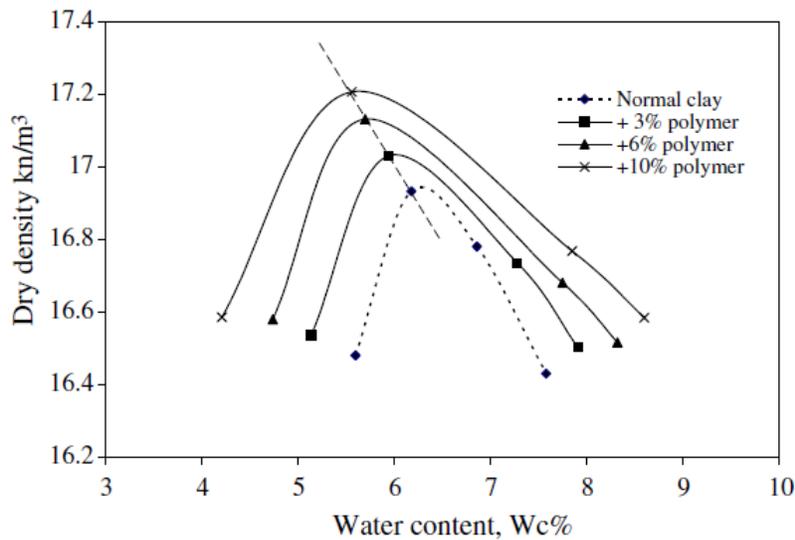


Figura 2.3.3: Curvas Proctor [37]

La Figura N<sup>o</sup> 2.3.4 muestra cómo se reducen los índices de compresión, por otra parte, el hinchamiento es prácticamente eliminado ya que el nanocompuesto actúa hidrofóbicamente, previniendo el hinchamiento de la montmorillonita.

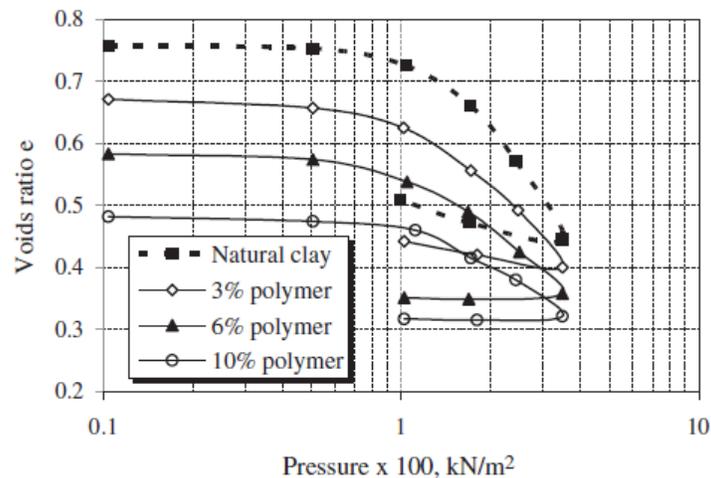


Figura 2.3.4: Curvas de compresión [37]

### Sostenimiento de excavaciones

El uso de bentonita en el campo de la construcción es muy común, ya que presenta varias ventajas. En efecto, la bentonita, mas específicamente bentonita de sodio, es una arcilla que se puede clasificar como una smectita, con alto contenido de montmorillonita, lo que le da la propiedad de absorber varias veces su peso en agua. Se usa en solución para la construcción de pilotes; se inyecta en la excavación, lo que permite asegurar la estabilidad de las paredes hasta el vertido del

hormigón, que hará subir la bentonita a la superficie por diferencia de densidades. Una empresa [3] desarrolló un polímero que se usa en lugar de la bentonita en ciertas aplicaciones. El uso de un fluido polimérico presenta varias ventajas, como, por ejemplo ser válido tanto en agua dulce como salada, a diferencia de la bentonita que no es estable en agua salada. La solución polimérica utilizada presentaba una relación agua/producto de 800:1. Además, el agregado de polímeros a la bentonita, permite aumentar la capacidad de hinchamiento de bentonitas cuyo potencial de hinchamiento es bajo, lo que representa un costo económico menor y un ahorro de material bentonítico. El hecho de agregar polímero a la bentonita permite por otra parte aumentar la resistencia de corte del suelo.

Otro aspecto concierne el proceso de vertido del hormigón; la bentonita no impide la dispersión del suelo que lleva hacia la superficie, o sea que se las partículas se separan y se mezclan en la solución bentonítica, aumentando la viscosidad y la densidad de la solución, hasta que sea difícil de usar después de varios usos. Por ese motivo, se realizaron investigaciones donde la solución acuosa de bentonita es reemplazada por una solución polimérica (sin arcilla), lo que permite disminuir la tendencia a la dispersión que tienen las partículas finas del suelo en la solución tradicional de bentonita.

## Capítulo 3

# Materiales: caracterización

Se caracterizarán los tres materiales por separado, para identificar sus propiedades físicas, mecánicas, hidráulicas. Y, al mezclarlos entre sí, comprender los efectos producidos por cada uno de ellos.

### 3.1. Caracterización suelo fino

Para realizar este trabajo se utilizó arcilla proveniente de Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina, Figura N° 3.1.1.



Figura 3.1.1: Lugar de extracción del suelo

Este material es un suelo fino de alta plasticidad, con alto contenido de mineral tipo montmorillonita. La motivación del estudio de este material es que presenta todas las características de los suelos finos con alto potencial de expansión.

La expansividad de este tipo de suelos se manifiesta debido a los cambios de humedad o contenidos de agua intersticial. La ciudad de donde proviene presenta grandes problemas de patologías en construcciones livianas debido a la climatología y la expansividad del suelo.

Estos suelos debido a la cantidad de montmorillonita, tienen la capacidad de absorber una gran cantidad de agua y retenerla debido a su estructura, el agua produce el incremento del volumen y también una drástica reducción del volumen cuando el agua que retenía se seca.

Los suelos expansivos resultan ser un gran problema para la construcción, porque los incrementos del volumen no se presentan de una manera uniforme, sino todo lo contrario, al producirse incrementos diferenciales y al momento de contraerse generan asentamientos, que pueden dañar severamente las estructuras.

Para identificar el potencial de hinchamiento se observan medidas empíricas (LL, LP, minerales de arcilla) que nos dan una primera idea, luego se mide la magnitud del hinchamiento o presión que genera:

- Presión de hinchamiento (PS). Es la presión aplicada en laboratorio sobre una muestra de suelo expansivo, se añaden cargas para no permitir el hinchamiento. La presión máxima que hay que añadir para que no haya hinchamiento, es decir se mantenga su volumen inicial, es conocida como presión de hinchamiento.
- Hinchamiento libre (Hc). Se expresa como el porcentaje de la elevación máxima, cuando hay presión nula.

### 3.1.1. Ensayos físicos

#### 3.1.1.1. Límites de Atterberg

Puede definirse la plasticidad como la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse.

Según el contenido de agua, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia:

- Estado líquido: propiedades y apariencia de una suspensión
- Estado semilíquido: propiedades de un fluido viscoso; el material escurre bajo su peso propio
- Estado plástico: suelo comportándose plásticamente
- Estado semisólido: apariencia de sólido, pero aún disminuye su volumen al secarse
- Estado sólido: el volumen no varía con el secado

La frontera entre los estados semilíquido y plástico es el límite líquido  $LL$ . Mientras que la frontera entre los estados plástico y semisólido es el límite plástico  $LP$ .

**Límite líquido** Siguiendo los lineamientos de la Norma ASTM D4318-00 , y adoptando como método de medición del límite líquido (LL) realizar cada ensayo y corregirlo según la siguiente ecuación:

$$LL = w \cdot \left( \frac{N}{25} \right)^{0,121}$$

Tras el promedio de ensayos sucesivos, se obtuvo como resultado  $LL = 80\%$ .

En la Figura N<sup>o</sup> se observa el cascador de Casagrande utilizado.



Figura 3.1.2: Cascador de Casagrande

**Límite Plástico** Se siguió los lineamientos de la Norma ASTM D4318-00.

Realizando 3 ensayos, el LP se determina como el promedio de ellos. En este caso, resulta LP=39 %

**Límite de Contracción** El límite de Contracción  $SL$  es un contenido de humedad que separa la consistencia semi-sólida de la sólida y establece el contenido máximo de humedad que el suelo tolera antes de sufrir cambios de volumen. Se procedió según las indicaciones de la Norma ASTM D427-04.

En la Figura N° 3.1.3 se observan los cambios de volumen respecto al contenido de humedad. A medida que el suelo pierde humedad, disminuye su volumen, lo que se denomina contracción.

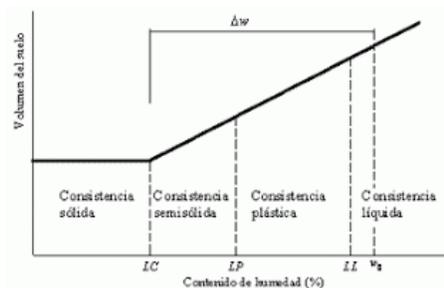


Figura 3.1.3: Variación del volumen según humedad

Para determinar el límite de contracción, se mide la variación del volumen de una muestra de suelo mediante mercurio, ya que su peso específico conocido y elevado nos permite medir con precisión volúmenes a partir de pesos. Se mide el volumen inicial de la muestra (constituida de suelo pasante al tamiz #40 con una humedad cercana a la del límite líquido) colocando mercurio en el molde utilizado inicialmente por la muestra, y se pesa. Luego, para medir el volumen final, se pesa el volumen de mercurio desplazado al ingresar la muestra de suelo seca en un pesafiltro con mercurio.

Por lo tanto, el límite de contracción se calcula como:

$$SL = \frac{W_i - W_f - (V_i - V_f)\gamma_w}{W_f} \quad (3.1.1)$$

Se obtuvo un límite de contracción de  $SL = 17,5$ .

Por otra parte se puede determinar el ratio de contracción  $R$ :

$$R = \frac{W_f}{V_f \cdot \gamma_w} \quad (3.1.2)$$

Encontramos  $R = 1,84$ . Lo que implica que a bajos contenidos de humedad el suelo comienza a aumentar su volumen cuando se hidrata. En la Figura N° 3.1.4 se puede observar el desplazamiento de mercurio debido al ingreso de la muestra de suelo.



Figura 3.1.4: Ensayo límite de contracción

### 3.1.1.2. Fracción pasante tamiz #200

Para caracterizar un suelo se realiza la granulometría, pasando el suelo mediante tamices de aperturas decrecientes, según indica la Norma ASTM D1140\_00. Un suelo se considera grueso cuando más del 50% de sus partículas son retenidas en el tamiz #200. Por el contrario, un suelo es fino cuando más del 50% de sus partículas pasan el tamiz #200. Ese ensayo permite inferir la naturaleza del suelo, con la granulometría pasante por el tamiz #200 por vía húmeda.

Se coloca una porción del suelo pasante el tamiz #10 en una solución dispersante durante 2 horas con una agitación permanente y sin calor, o durante toda la noche en reposo. La solución se compone de 4% de hexametafosfato de sodio y 3% de carbonato de sodio (permite controlar que el pH se encuentre entre 8 y 9).

Por último, se hace pasar el suelo por el tamiz #200 bajo canilla hasta que el agua que pase a través de este tamiz sea totalmente clara. Luego, se seca el suelo retenido y se pesa. De la diferencia entre el peso seco inicial y el peso seco que se retuvo en el tamiz #200, se puede obtener el porcentaje de suelo que pasa el tamiz #200. En este caso, se obtuvo que el 96% del suelo pasa el tamiz #200, lo que permite situar el suelo en la categoría de suelo fino. Para terminar de clasificarlo se hace uso de la carta de plasticidad.

### 3.1.1.3. Carta de plasticidad

Otro parámetro para medir la plasticidad es el Índice plástico, que consiste en:  $IP = LL - LP$ ; con un límite líquido de 80% y un límite plástico de 39% se da  $IP = 41$ .

Mediante la carta de plasticidad se puede situar el suelo en uno de los grupos definidos por ella.

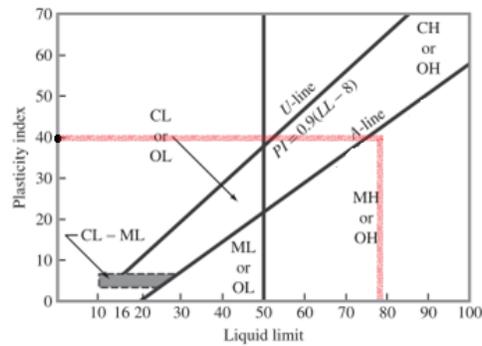


Figura 3.1.5: Carta de plasticidad

Como se puede ver en la Figura N<sup>o</sup> 3.1.5, por encima de la línea A se encuentran suelos con algún mineral de arcilla (montmorillonita, caolinita, ilita), simbolizados por la letra C (clay). Por debajo de ella están los suelos con alto contenido de materia orgánica simbolizado por O (organic) o finos de baja plasticidad, suelos inorgánicos considerados limos, con símbolo M.

En estos grupos se distinguen los suelos de alta compresibilidad ( $LL > 50$ ) de los de baja o media compresibilidad ( $LL < 50$ ). Para los primeros se añade al símbolo genérico la letra H (High compressibility), en los segundos la letra L (Low compressibility). Los suelos finos que caen sobre la línea A y con  $4 < IP < 7$  se considera como casos de frontera, asignándoles el símbolo doble CL-ML.

Ingresando a la carta de plasticidad se obtiene que el suelo es MH, es decir un limo de alta plasticidad.

Sin embargo, como el suelo en cuestión es un suelo fino y suave con alto porcentaje de partículas tamaño arcilla, comparables a arcillas localizadas arriba de la línea A. En ocasiones, estas arcillas caen en casos de frontera MH-CH dada su proximidad con dicha línea; como en este proyecto. El ensayo siguiente de hidrometría permitirá completar este análisis y definir la clasificación del suelo.

#### 3.1.1.4. Hidrometría

Este ensayo completa la granulometría para suelos finos pasantes por el tamiz #200. La ley fundamental de este ensayo es la ley de Stokes, que proporciona una relación entre la velocidad de sedimentación de las partículas del suelo en un fluido y el tamaño de esas partículas.

Este ensayo se realiza siguiendo los lineamientos de la Norma ASTM D422-63 R02.

Se ensaya 50 g de suelo pasante al tamiz #10 en solución de hexametáfosfato de sodio (dispersante) durante 24h para que se separen las partículas. La homogeneización se completa con la trituration la mezcla con un agitador durante 15 minutos. Luego colocar en una probeta de 1000 cm<sup>3</sup> la mezcla suelo+dispersante y completamos con agua destilada. La probeta se coloca dentro de un recipiente lleno de agua, manteniendo con un calentador una temperatura constante (20°C). El montaje del ensayo se ve en la Figura N<sup>o</sup> 3.1.6. La densidad se mide con un densímetro a 2, 5, 15, 30, 60, 250 y 1440 minutos, ésta disminuye a medida que avanza el tiempo, debido a que las partículas más gruesas se van depositando en el fondo de la probeta y la parte superior se vuelve más acuosa. Se realizan 3 correcciones a la lectura del densímetro:

- Corrección por menisco:  $C_m$  - Debido a que la densidad leída es menor que la densidad real porque se lee arriba del menisco.
- Corrección por dispersante:  $C_d$  - Debido a la diferencia de densidades entre el agua destilada y la mezcla acuosa de dispersante.
- Corrección por temperatura:  $C_t$  - Debido a la diferencia entre la temperatura de referencia y la de trabajo.

Además se calibran los factores  $a$  y  $K$ , que dependen respectivamente de la temperatura y la gravedad específica. Los dos ensayos dan las curvas granulométricas de la Figura N<sup>o</sup> 3.1.7.



Figura 3.1.6: Ensayo de hidrometria

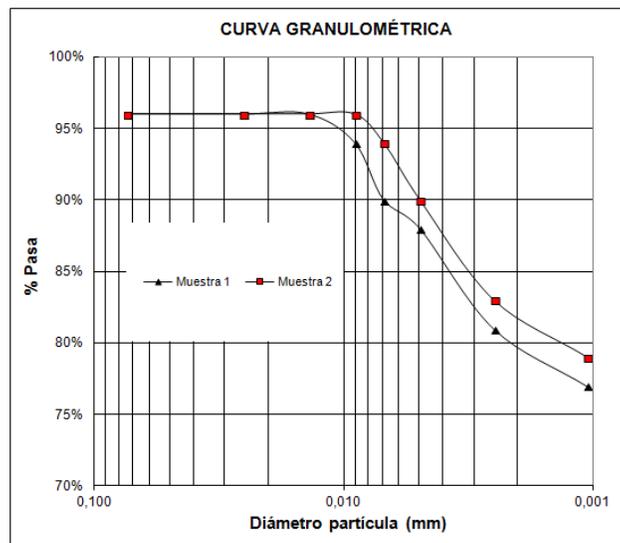


Figura 3.1.7: Curvas granulometricas

Ingresando a la curva de la Figura N<sup>o</sup> 3.1.7 con un diámetro de partícula de  $2 \mu\text{m}$  se obtiene en promedio un 80 % de contenido de arcillas. Por este motivo, determinamos que el suelo utilizado es CH.

### 3.1.1.5. Gravedad específica

Este ensayo permite determinar la gravedad específica de suelo pasante al tamiz #4. La gravedad específica se define como:

$$G_s = \frac{P_s}{V_s \cdot \gamma_w} \quad (3.1.3)$$

El ensayo utiliza un picnómetro calibrado a la temperatura de trabajo, que se llena con aproximadamente 35 gramos de suelo pasante al tamiz #4 y agua destilada. Los pesos del picnómetro vacío, lleno de agua y lleno de agua con suelo se relaciona con el peso del suelo después de secar al horno. Tras varios ensayos se encuentra que la gravedad específica de la arcilla vale  $G_s = 2,7$ , o sea que el peso específico es de  $\gamma_s = 27,0 \text{ kN/m}^3$ .

Para la realización del ensayo se procedió según la Norma ASTM D854\_02 .

### 3.1.1.6. Superficie Específica de las partículas. Absorción de Azul de Metileno.

Para determinar la superficie específica de las partículas se siguió como referencia al documento de Santamarina [[28]].

Este ensayo permite medir la superficie específica  $S_e$ , definida como la relación ente la superficie de una partícula  $A_p$  y su masa  $m$ . El valor de  $S_e$  determina el balance entre fuerzas capilares, eléctricas y gravimétricas actuantes sobre las partículas. Los cationes de AM (Azul de Metileno) son absorbidos por las cargas negativas de la superficie de las arcillas. Cuando el suelo ya no absorbe más AM, lo elimina, este fenómeno se puede observar como una aureola alrededor de una gota de mezcla suelo-azul, obteniéndose el “punto final” del ensayo. Al llegar a dicho punto se debe medir la cantidad de gotas “N” ( $1\text{mL}=2\text{N}$ ) de AM que fueron necesarias, para luego, estimar la  $S_e$  como:

$$S_e = \frac{1\text{gr}}{319,87\text{gr/mol}} \cdot \frac{1}{200\text{mL}} \cdot (N, 0, 5\text{mL}) \cdot N_{AV} \cdot A_{AM} \cdot \frac{1}{10\text{gr}} \quad (3.1.4)$$

- $N_{AV}$ : Número de Avogadro
- $A_{AM}$ : Área de catión AM

Se realizó 3 veces el ensayo según las instrucciones de Santamarina [28], obteniendo un valor promedio  $S_e = 337\text{m}^2/\text{gr}$

En la Figura N° 3.1.8 se puede apreciar los resultados de un ensayo. A  $N=550$  gotas de AM, se observa una aureola celeste que se confirma pasando  $N=580$  gotas.

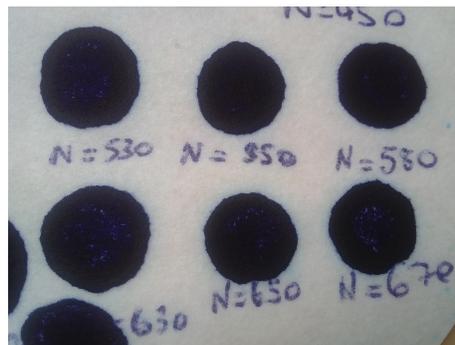


Figura 3.1.8: Ensayo Superficie Específica con Azul de Metileno

	Montmorillonite	Illite	Kaolinite	Attapulgite
Length $L_p$ (nm)	1-500	100-2000	300-3000	4000-5000
Aspect ratio	100	10	3-10	400-1000
$S_s$ (m <sup>2</sup> /g)	400-800	80-100	10-20	140-170
LL (%)	100-950	60-120	30-110	160-230
PL (%)	50-100	35-60	25-40	100-140
Activity	0.9-7.0	0.5-1.0	0.3-0.5	0.5-1.2

(data compiled from Yong and Warkentin 1975; Zelazny and Calhoun 1977; Mitchell 1993).

Figura 3.1.9: Propiedades de arcillas

En la Figura N<sup>o</sup> 3.1.9 se indican rangos de algunas propiedades físicas para diferentes tipos de mineral. En función del valor de  $S_e$  obtenido, puede determinarse un contenido predominante de montmorillonita.

### 3.1.2. Ensayos de comportamiento mecánico

#### 3.1.2.1. Ensayo Proctor Estándar

Este ensayo permite definir las propiedades del suelo en cuanto a la compactación, obteniendo como resultado la curva de compactación del material, fundamental para diversos ensayos. El objetivo es determinar el punto de compactación óptimo, es decir la humedad para la cual la densidad del suelo es máxima. La importancia de la compactación estriba en el aumento de la resistencia y disminución de la capacidad de deformación, obtenidas a partir del aumento del peso específico seco y la disminución de sus vacíos. Las condiciones de compactación son función del contenido de humedad natural del suelo, y de su sensibilidad al agua. Para realizar este ensayo se siguieron los lineamientos de la Norma ASTM D698\_00.

Consiste en compactar con una energía conocida el suelo en un molde de dimensiones definidas, y determinar a posteriori el contenido de humedad de la muestra. La energía de compactación depende del número de capas compactadas, del peso del pisón, la altura de caída y número de golpes, 25 para este ensayo.

El peso unitario seco (kN/m<sup>3</sup>) se define como:

$$\gamma_d = \frac{P_s}{V_t} = \frac{P_t/V_t}{1+w} \quad (3.1.5)$$

Donde:

$P_t$ : peso total del suelo húmedo compactado

$V_t$ : volumen de suelo húmedo compactado (igual al volumen del molde)

$w$ : humedad del suelo compactado

Luego de varios ensayos se construye la curva Proctor estándar que se observa en la Figura N<sup>o</sup> 3.1.10.

Se obtiene que, las condiciones de compactación óptimas son:  $w = 31,0\%$ , y  $\gamma_d = 13kN/m^3$ . Se analiza que la curva no es simétrica, es decir, la densidad es mayor para suelos secos que húmedos. Se define como rama seca, a los suelos cuya humedad es menor a la óptima, y rama húmeda, aquellos suelos que posean humedad mayor a la óptima.

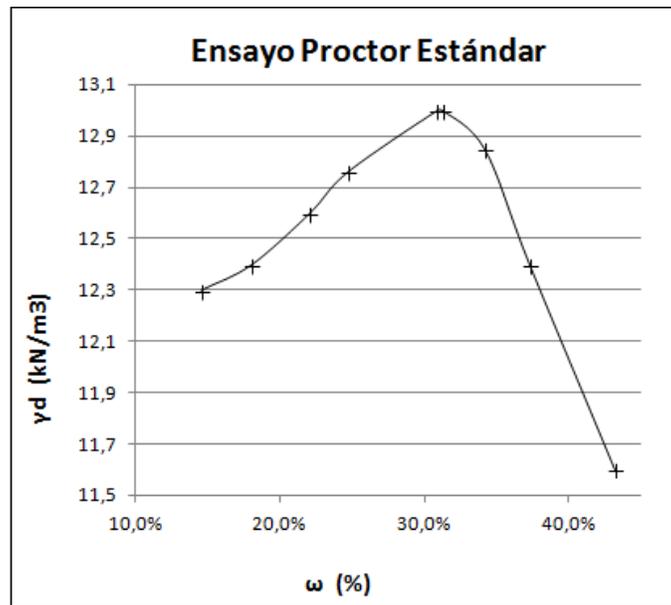


Figura 3.1.10: Curva de compactación arcilla natural

### 3.1.2.2. Índice de expansión

Este ensayo permite determinar el índice de expansión del suelo, determinando el porcentaje de hinchamiento máximo de un suelo. Por eso, según la Norma ASTM D4829\_03, se satura la arcilla con agua destilada, y se deja hinchar la muestra de suelo de manera libre, con una precarga de 6kPa.

El suelo se compacta previamente con una energía similar a la energía Proctor, tal que el contenido de humedad sea el del punto óptimo (determinado con el ensayo Proctor), y el grado de saturación se sitúe entre 40 % y 60 %. La compactación se hace con 2 capas de suelo compactadas con 15 golpes cada una. Luego se procede a la inundación de la muestra con agua destilada siendo el arrancamiento del ensayo. Tras la lectura de un flexímetro se calcula para cada medición el porcentaje de hinchamiento. La deformación final permite calcular el EI según la ecuación:

$$EI(\%) = \frac{\Delta h_f}{h_o} \quad (3.1.6)$$

Se deja de medir cuando el suelo no hincha mas, y se determina la humedad final. Las mediciones permiten construir la curva de hinchamiento de la Figura N° 3.1.11.

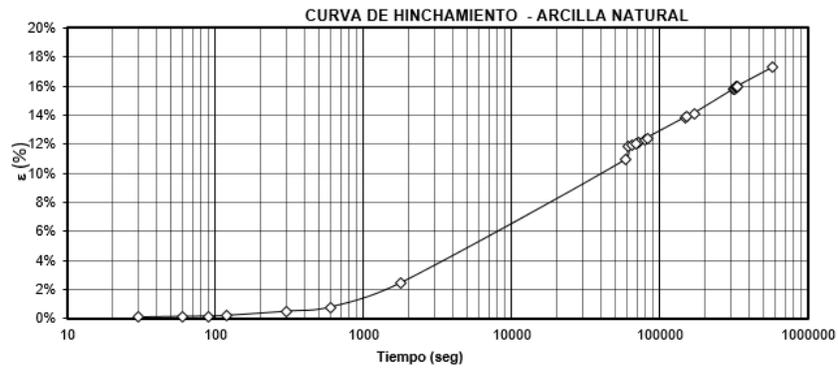


Figura 3.1.11: Curva de hinchamiento libre de la arcilla

La primer parte del ensayo, hasta 1000 segundos, corresponde al tiempo de ingreso del agua adentro del material, sería una fase de hinchamiento “primario”, por eso es que la tangente a la curva posee poca pendiente. Luego las moléculas de agua no ingresan más, debido a la saturación de la muestra, sino que, comienza el hinchamiento de la arcilla. El ingreso de agua implica un cambio de la solución presente entre las laminas, e influye sobre el material alejándo estas capas.

A partir del ensayo se define el índice de expansión corregido al 50 %:

$$EI_{50} = EI - (50 - S_r) \cdot \frac{(65 + EI)}{220 - S_r} \tag{3.1.7}$$

Al final del ensayo  $EI = 17,3$ . Comparando con valores de 16 % a 24 % encontrados para montmorillonitas [24], se ve que el suelo arcilloso se encuentra en este rango de valores.

En el caso del material arcilloso no alterado,  $EI_{50} = 21,99\%$ . Por otra parte se puede relacionar al potencial de hinchamiento al índice de plasticidad determinado en la parte Ensayos físicos/Limites de Atterberg. Con el valor de  $IP=41$  que se obtuvo, en relación con la Tabla N° 3.1.1, se admite que el potencial de hinchamiento de la arcilla es alto.

Indice de plasticidad IP	Potencial de hinchamiento
0-15	Bajo
10-35	Medio
20-55	Alto
35 o más	Muy alto

Cuadro 3.1.1: Relación entre el potencial de hinchamiento y el índice de plasticidad, según Seed, Woodward y Ludgren, 1962

**Consolidación - Hinchamiento libre** Para la realización de este ensayo se siguieron los lineamientos de la Norma ASTM D4546-03.

Cuando se somete el suelo a un incremento de esfuerzos totales, como resultado de cargas externas aplicadas, se produce un exceso de presión intersticial. Puesto que el agua no resiste al corte, la presión neutra se disipa mediante un flujo de agua al exterior, cuya velocidad de drenaje depende de la permeabilidad del suelo. Esta disipación de presión intersticial debida al flujo de agua hacia el exterior se denomina consolidación, proceso que tiene dos consecuencias:

- Reducción de volumen de poros, por lo tanto, reducción del volumen total, produciéndose un asentamiento. Se considera que en el proceso de consolidación unidimensional la posición

relativa de las partículas sobre un plano horizontal permanecen en la misma posición, el movimiento de las mismas sólo puede modificarse verticalmente.

- Durante la disipación del exceso de presión intersticial, la presión efectiva aumenta y se incrementa la resistencia del suelo.

Por lo tanto, cuando un suelo se consolida ante una carga externa se produce una disminución de la relación de vacíos y un incremento del esfuerzo efectivo.

Este ensayo sirve para determinar el comportamiento de consolidación de un suelo, y obtener valores tal como la carga de preconsolidación.

Durante su historia, un suelo conoce varios estados de tensiones, que provocan su asentamiento en valores correspondientes, y predeterminan su respuesta frente a hipotéticas cargas. Al construir sobre un suelo, es importante saber cual va a ser su magnitud de asentamiento, y el tiempo en que se produzca el mismo, a fin de dimensionar correctamente el proyecto. Un dato importante es la carga de preconsolidación  $\sigma'_p$ , definida como la tensión vertical máxima conocida por el suelo a lo largo de su historia.

- Si la tensión actual  $\sigma'_0 < \sigma'_p$ , el suelo es sobreconsolidado, es decir, las tensiones máximas históricas son mayores a las tensiones actuales.
- Si la tensión actual  $\sigma'_0 = \sigma'_p$ , el suelo es normalmente consolidado cuando las tensiones máximas históricas son similares a las tensiones actuales.

Para cada carga se lee la altura inicial y la variación de altura mediante un flexímetro, hasta que se el valor se estabilice.

Cada fenómeno de consolidación (para cada carga) se compone de un asentamiento instantáneo (contacto con la carga), una consolidación primaria (expulsión del agua contenido en los granos y ordenamiento de los granos) y una consolidación secundaria. Se podrá graficar la curva de consolidación (tensión vs  $\log(\text{tiempo})$ ) para cada carga aplicada, como se ve en el ejemplo de la Figura N° 3.1.12. Para cada escalón  $i$  de carga, el valor de la altura final (al estabilizarse la lectura del flexímetro) permite calcular el índice de vacíos correspondiente y obtener un punto de la curva de compresibilidad. Dado que la deformación es permitida solo según el eje vertical, la cuenta siguiente permite definir el índice de vacíos:

$$e = \frac{\Delta H_i}{H} \quad (3.1.8)$$

$\Delta H_i$ : variación total de altura para cada escalón de carga.

La curva de compresibilidad representa el comportamiento mecánico del suelo; la primer parte puede asimilarse a un comportamiento elástico, y la segunda de pendiente más pronunciada se corresponde al comportamiento plástico del material. Ambas pendientes de la curva permiten deducir un índice; el índice de compresión  $C_c$  y el índice de hinchamiento  $C_s$  como se ve en la Figura N°3.1.13.

En el caso de suelos expansivos un método de ensayo que se utiliza para la determinación del hinchamiento libre y la presión de hinchamiento es, una vez colocada la muestra, se aplica una carga vertical baja, que representa una tensión vertical de 6 kPa. Se satura la muestra y se deja expandir hasta que la muestra se estabiliza. Luego se inicia el proceso de carga explicada hasta lograr relación de vacíos inferiores a la inicial de la muestra.

Por otra parte se define la presión de hinchamiento corregida  $\sigma'_{sp}$  que es el valor de tensión a aplicar a la muestra para impedir su hinchamiento. Concretamente, corresponde a la tensión para la cual se encuentra el valor inicial de índice de vacíos (antes del hinchamiento libre para el caso del ensayo).

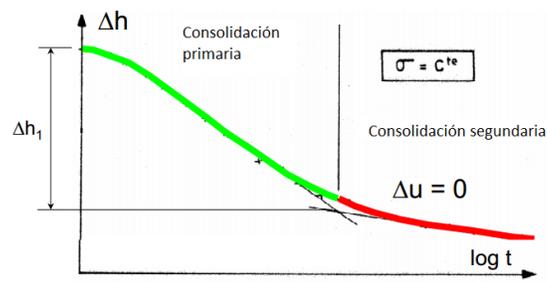


Figura 3.1.12: Curva de consolidación

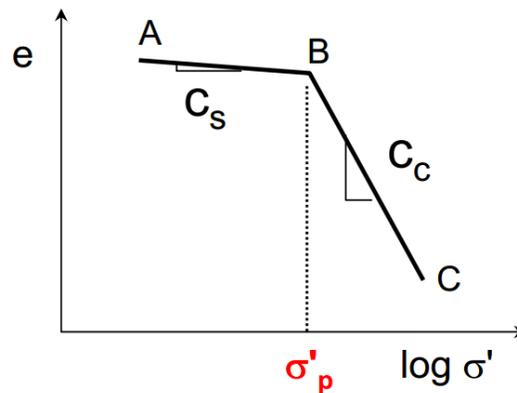


Figura 3.1.13: Resultado de ensayo de consolidación unidimensional

**Preparación de la muestra** La muestra se prepara con una humedad y una densidad precisas, tal que corresponda a un punto de la curva Proctor estándar del material. Se elijen las humedades deseadas y se calcula el peso de suelo húmedo correspondiente para alcanzar la densidad deseada en relación con el molde de preparación. Previo a la etapa de compactación se deja reposar la muestra 24 horas envuelta en papel film para asegurar una homogeneización del contenido de agua. Luego se coloca el peso de suelo adentro del molde presentado en la Figura N<sup>o</sup> 3.1.14y se compacta de manera estática mediante una prensa.



Figura 3.1.14: Molde utilizado para el ensayo de presión de hinchamiento

**Primera fase: Hinchamiento libre** Se realizan dos ensayos, con dos humedades diferentes en relación con la curva de compactación Proctor:

- Rama seca:  $w < w_{opt}$
- Rama húmeda:  $w > w_{opt}$

Ambos ensayos se realizan en paralelo, al inicio del ensayo se inundan las muestras con agua destilada.

Al inicio del ensayo se deja hinchar la muestra inundada completamente con una precarga de 5kPa. La fase de hinchamiento libre tarda 6 días, hasta que la variación de altura se estabiliza. Los valores finales de hinchamiento se ven en el Cuadro N<sup>o</sup> 3.1.2.

Rama	$w_0$	Hinchamiento final	$w_f$	$e_0$	$e_f$	$Sr_0$	$\gamma_d$
Seca	23,02 %	21,31 %	39,1 %	1,04	0,93	59,80 %	12,99 kN/m <sup>3</sup>
Húmeda	32,54 %	16,52 %	40,1	1,04	0,96	84,57	12,99 kN/m <sup>3</sup>

Cuadro 3.1.2: Características de las muestras de arcilla

**Segunda fase: Consolidación - Escalones de carga** Luego del proceso de hinchamiento libre se comienza con la etapa de carga . En el Cuadro N<sup>o</sup> 3.1.3 se observan las tensiones verticales aplicadas para cada escalón de carga.

Escalón	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Etapas	Precarga		Carga					Descarga	
Tensión vertical (kPa)	5,0	50,1	107,0	220,7	446,2	797,1	1473,8	446,2	106,5

Cuadro 3.1.3: Escalones de carga para el ensayo de presión de hinchamiento

Después del ensayo se pueden definir los siguientes parámetros:

- el índice de vacíos inicial ( $e_0$ ) y final ( $e_f$ ) con  $e = \frac{V_v}{V_s}$
- el grado de saturación inicial ( $Sr_0$ ) con  $Sr = \frac{V_w}{V_v}$

- la densidad inicial  $\gamma_d$
- el contenido de humedad inicial ( $w_0$ ) y final ( $w_f$ )

Con los resultados mencionados anteriormente, se pueden construir las siguientes curvas:

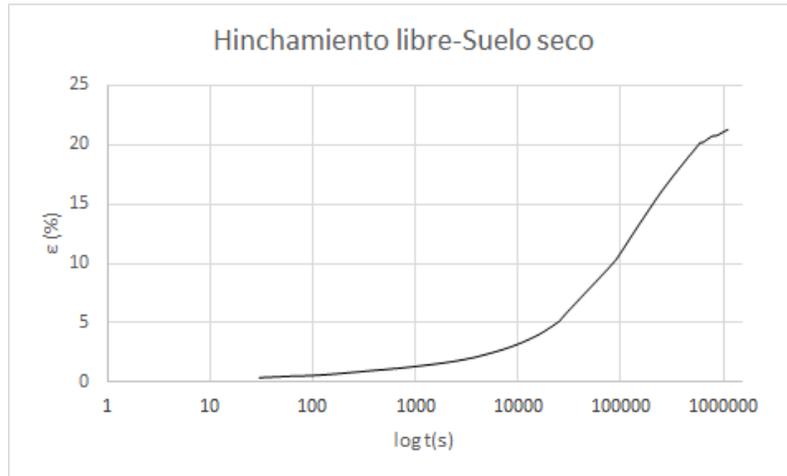


Figura 3.1.15: Curva de hinchamiento libre muestra seca - Arcilla

**Rama seca** En la Figura N° 3.1.15 se distingue el tramo 0-20 000 s del hinchamiento primario y luego la etapa de hinchamiento secundario.

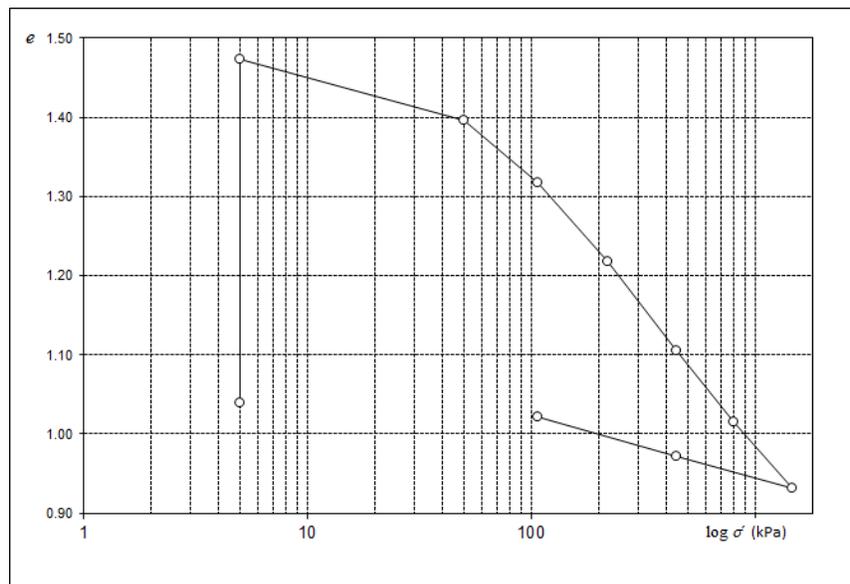


Figura 3.1.16: Curva de compresibilidad de la muestra seca - Arcilla

En la Figura N° 3.1.13 se observa la curva de compresibilidad, en ella se distinguen varias etapas; inicia con un segmento vertical, sin variación de la tensión correspondiente a la fase de hinchamiento

libre con aumento del índice de vacíos. Después, el índice de vacíos disminuye por la consolidación debida a las cargas crecientes. Por último, la descarga se traduce en un aumento del índice de vacíos.

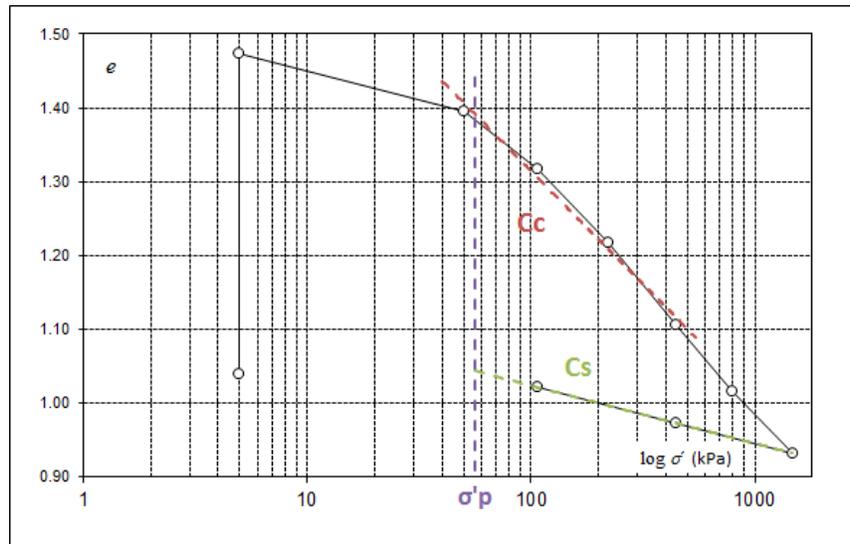


Figura 3.1.17: Identificación de las fases del ensayo - Arcilla

Determinando gráficamente los valores de índices de hinchamiento y compresión según la Figura N° 3.1.17, la tensión de preconsolidación se obtiene según el Cuadro N° 3.1.22. El detalle de la determinación gráfica de la presión de hinchamiento se ve en la Figura N° 3.1.18.

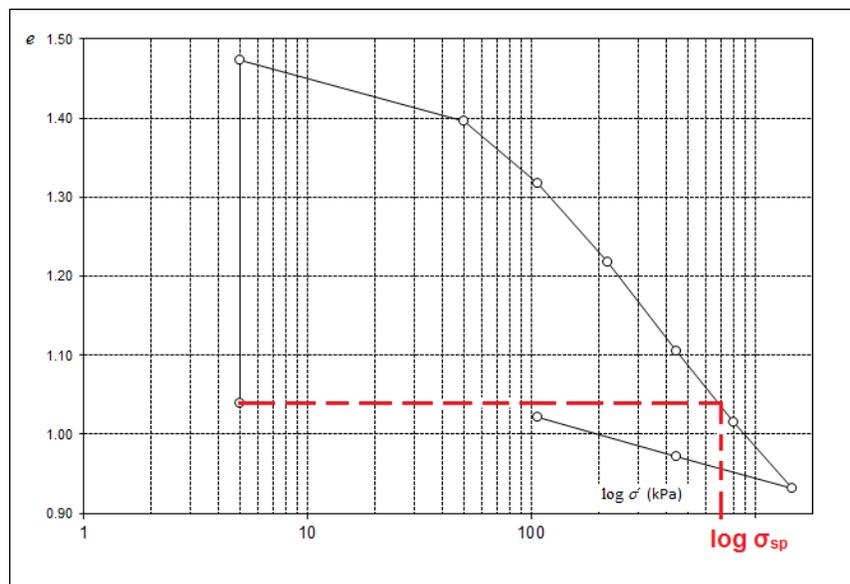


Figura 3.1.18: Determinación de la presión de hinchamiento - Arcilla

Parámetro	$C_c$	$C_s$	$\sigma'_p$	$\sigma'_{sp}$
Valor	0,32	0,08	56 kPa	660 kPa

Cuadro 3.1.4: Índices de compresión e hinchamiento para arcilla rama seca - Arcilla

**Rama húmeda** La probeta de suelo húmedo se ensaya al mismo tiempo que la muestra seca, con los mismos escalones de cargas. En la curva de la Figura N° 3.1.19 se identifican también las 2 zonas de hinchamiento, primario y secundario.

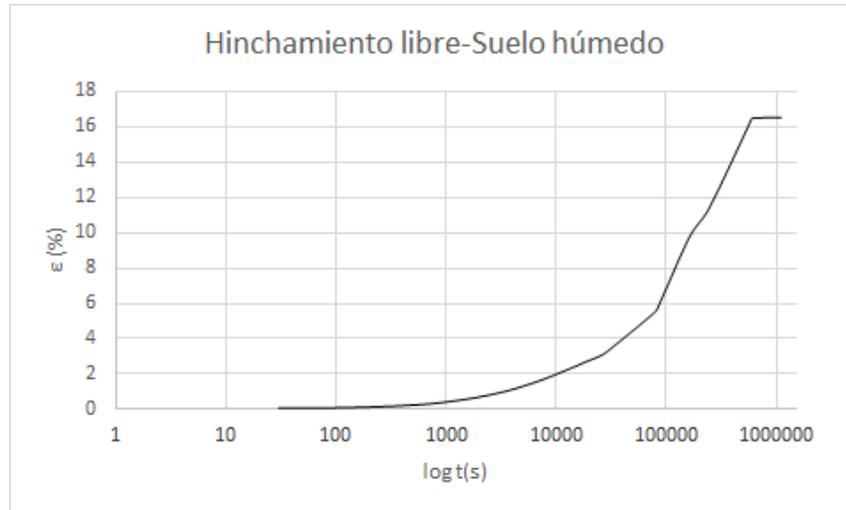


Figura 3.1.19: Curva de hinchamiento libre de la muestra húmeda - Arcilla

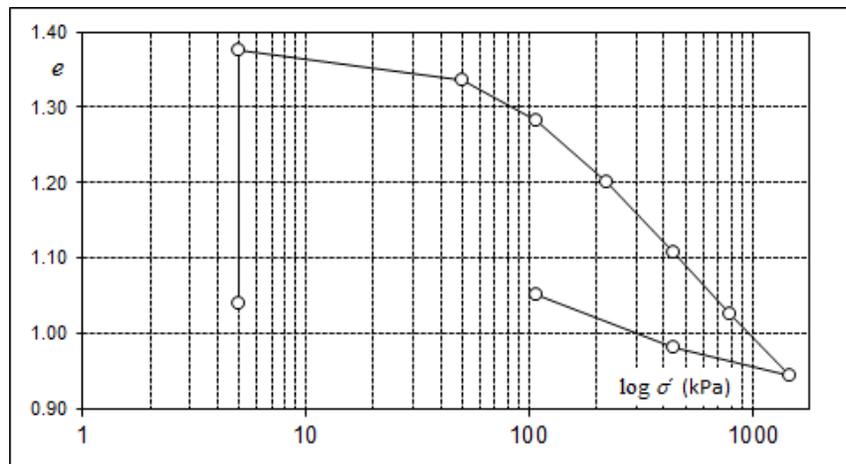


Figura 3.1.20: Curva de compresibilidad de la muestra húmeda - Arcilla

El proceso de consolidación es similar a lo de la muestra seca, la determinación de la tensión de preconsolidación se ve en la Figura N° 3.1.21.

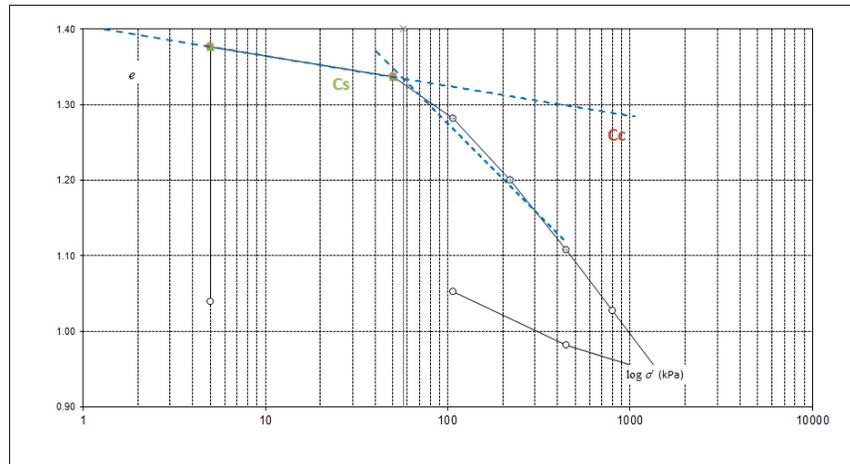


Figura 3.1.21: Identificación de las fases del ensayo- Arcilla

Parámetro	C <sub>c</sub>	C <sub>s</sub>	σ' <sub>p</sub>	σ' <sub>sp</sub>
Valor	0,27	0,10	57 kPa	710 kPa

Cuadro 3.1.5: Indices de compresión y de hinchamiento para la muestra húmeda- Arcilla

Los valores usuales de C<sub>c</sub> se encuentran entre 0,8 y 2,5 para montmorillonitas, y puede referirse a un suelo “muy compresible” si el índice C<sub>c</sub> esta entre 0,3 y 0,5. Las muestras seca y húmeda ensayadas tienen una tensión de preconsolidación similar. Sin embargo, la tensión de hinchamiento de la muestra seca es menor que la húmeda, lo que puede significar que es más compresible porque se necesita una carga menor para que vuelva a su relación de vacíos inicial.

### 3.1.3. Ensayos de caracterización hidráulica

#### 3.1.3.1. Ensayo de permeabilidad

La permeabilidad se define como la capacidad de un suelo a transmitir un flujo de agua. Tiene relación directa con la porosidad del material, es decir, su cantidad de vacíos y la forma en que se comunican entre ellos, ya que el flujo transita por la presencia de conexión entre los poros. La ley de Darcy (1856) permite relacionar un caudal a un gradiente de presión mediante la permeabilidad k:

$$u = \frac{k}{\eta} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x} = K \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x} \tag{3.1.9}$$

- u: velocidad adentro del medio poroso (m/s)
- η: viscosidad del suelo (Pa.s)
- k: permeabilidad (m<sup>2</sup>)
- ΔP/Δx: gradiente de presión a través del suelo (Pa/s)
- K: conductividad hidráulica (m/s)

**Procedimiento** Se realizó un ensayo a carga variable (Norma ASTM D5084\_00) , ya que el ensayo a carga constante de una arcilla tardaría un gran tiempo. Se supone que la ley de Darcy se puede aplicar a cada intervalo de tiempo. Se prepara una muestra de suelo compactado con la

energía Proctor correspondiente a su humedad. La muestra se coloca a dentro de papeles filtros y piedras porosas en una probeta. Esta es unida a una bureta de diámetro chico. Se mide el tiempo que tarda el agua para bajar de una altura  $h_1$  a una altura  $h_2$ . El ensayo se compone de 2 etapas; la primera es la saturación de la muestra, la segunda permite medir el coeficiente  $k$ .

En el caso estudiado, cargas hidráulicas crecientes se aplican a la muestra, y permiten graficar la curva que se ve en la Figura N° 3.1.22.

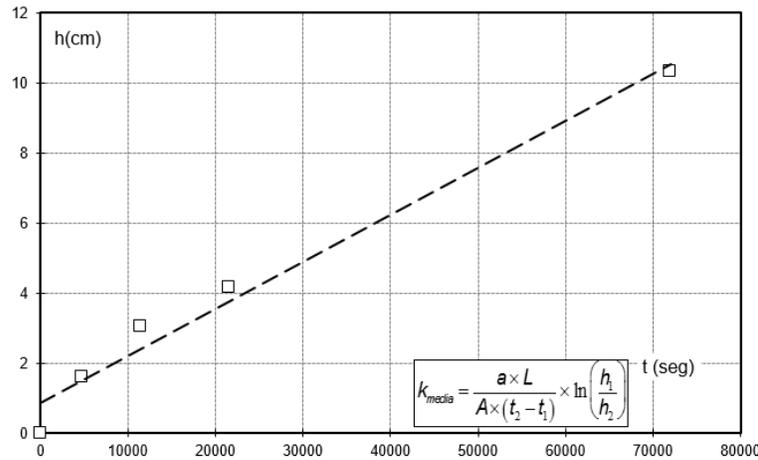


Figura 3.1.22: Curva de ensayo de permeabilidad de la arcilla

Se grafica la altura  $h$  en función del tiempo, y se obtiene el coeficiente  $k$  mediante la ecuación:

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \tag{3.1.10}$$

Las mediciones permiten calcular  $k = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ . Comparando con valores de la literatura del Cuadro N° 3.1.6, se ve que el material experimental tiene muy baja permeabilidad.

Material	Arena arcillosa	Limo	Arcilla
Conductividad hidráulica (m/día) según Fetter (1979)	0,001 a 0,1		10-6 a 10-3
Conductividad hidráulica (m/día) según Sanders (1979)		10-4 a 1	10-6 a 10-3

Cuadro 3.1.6: Valores usuales de conductividad hidráulica

### 3.1.3.2. Medición de succión con técnica de papel de filtro

La mecánica de suelos tradicional estudia los suelos totalmente saturados o totalmente secos, situaciones mutuamente excluyentes. La condición de suelo saturado es comunmente utilizada ya que se obtienen resultados con un nivel de seguridad mayor, sería la peor condición analizada. Pero, la mayoría de los suelos no presenta esta característica, los poros no estan completamente llenos de agua, sino que dentro de ellos hay dos fases: aire y agua.

En los suelos parcialmente saturados intervienen fenómenos propios que los diferencian de los suelos saturados. Se identifican 3 fases en este tipo de suelos:

- Fase sólida: partículas propias del suelo.

- Fase líquida: agua en forma líquida que existe en el suelo.
- Fase gaseosa: aire y vapor de agua contenida en los poros del suelo.

En las arcillas, el agua existe bajo varias formas: el agua adsorbida, aquella que forma una película alrededor de las partículas de suelo, el agua de constitución, presente en las moléculas propias del suelo y el agua gravitatoria, aquella que se infiltra por gravedad y recorre los poros conectados.

### Tensión superficial

La tensión superficial es consecuencia de las fuerzas intermoleculares que actúan en la interfaz aire - agua. Las moléculas ubicadas en el interior de la masa de agua experimentan fuerzas iguales en todas las direcciones, en cambio en la superficie de contacto con el aire, las moléculas se ven sometidas a fuerzas descompensadas cuya resultante es en dirección hacia el interior de la masa de agua. Para que la interfaz esté en equilibrio es necesario que se genere una fuerza de tracción a lo largo de la superficie. En la Figura N<sup>o</sup> 3.1.23 se muestra un esquema ilustrativo de lo mencionado.

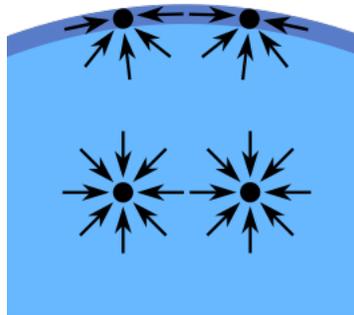


Figura 3.1.23: Fenómeno de tensión superficial

### Capilaridad

Si se sumerge parcialmente un tubo de vidrio de pequeño diámetro en agua, se observa que el líquido dentro del tubo asciende hasta una altura determinada. Éste fenómeno, conocido como ascenso capilar, se puede analizar teniendo en cuenta la tensión superficial.

La tensión superficial  $T_s$ , actúa con un ángulo de contacto  $\alpha$  que depende de las fuerzas de adhesión en la membrana y en el material del tubo. La altura del ascenso capilar puede calcularse a través del equilibrio de fuerzas verticales como:

$$2\pi r T_s \cos \alpha = \pi R^2 h_c \gamma_w g$$

Donde  $r$  es el radio del tubo capilar,  $h_c$  la altura capilar y  $g$  la aceleración de la gravedad. Considerando  $\alpha=0$ , se tiene representado en 3.1.24

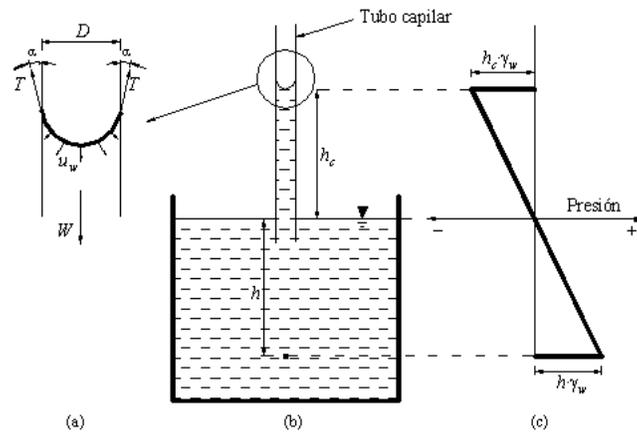


Figura 3.1.24: (a) Detalle menisco capilar. (b) Ascenso capilar. (c) Presión del agua

En un suelo parcialmente saturado, la interface agua-aire está sometida a una presión de aire  $u_a$  mayor que la presión de agua intersticial  $u_w$ . La diferencia entre estas dos presiones ( $u_a - u_w$ ) se conoce como succión matricia. En la Figura N<sup>o</sup> 3.1.25 se puede observar el menisco producido entre dos partículas sólidas.

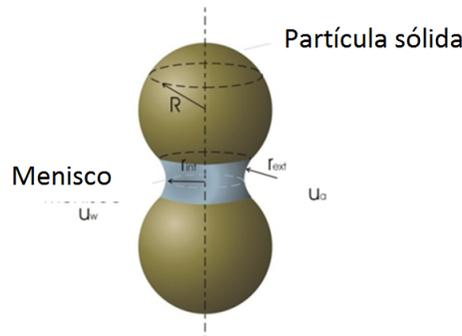


Figura 3.1.25: Esquema de la geometría del menisco formado en partículas esféricas

**Succión**

La succión total está referida a la capacidad del suelo para retener agua (Lee y Wray, 1995). Ridley (1993) la define como la energía requerida para remover una molécula de agua de la matriz de suelo por medio de la evaporación.

La energía necesaria para remover el agua del suelo o succión total tiene dos componentes, una asociada al efecto de la capilaridad denominada succión matricial ( $u_a - u_w$ ) y una componente debida a la presencia de sales disueltas en el agua, llamada succión osmótica  $\pi$ .

Por lo tanto, la succión total  $\psi$  se divide en dos componentes: *i*) la succión matricial ( $u_a - u_w$ ) y *ii*) la succión osmótica  $\pi$ , de manera que

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \tag{3.1.11}$$

Donde  $u_a$  es la presión del aire en los poros, y  $u_w$  es la presión del agua en los poros.

La succión matricial ( $u_a - u_w$ ), es la componente de la succión total asociada a la capilaridad, debida a la tensión superficial en la interfase agua-aire y a la adsorción desarrollada en la superficie de las partículas. La succión matricial se expresa como la diferencia entre la presión del agua y la presión del aire en los poros ( $u_a - u_w$ ). Se admite que cuanto más seco es el suelo, más grande es la succión.

La succión osmótica  $\pi$  es la capacidad de retención de agua por las sales presentes en el agua. La presencia de sales disueltas, reduce la presión de vapor en el espacio que se encuentra por encima de la interfase agua-aire, por lo tanto, se requiere de una mayor energía para remover una molécula de agua. Esta energía adicional requerida, es la succión osmótica, y es independiente de los efectos de capilaridad.

En general la succión osmótica es poco afectada por los cambios de humedad. Entonces las variaciones de la succión total son consecuencia de variaciones en la succión matricial.

Teniendo en cuenta la definición de succión total como un estado de energía, la succión del suelo puede ser expresada con unidades de energía por unidad de masa, en esta investigación tomaremos como unidades los kPa.

La relación existente entre el contenido de agua y la succión en un suelo, se define mediante la Curva Característica de Succión en el Suelo (SWCC, Soil Water Characteristic Curve), también conocida como curva de retención de agua.

La cantidad de agua en el suelo puede expresarse en términos de humedad gravimétrica ( $\omega$ ), grado de saturación ( $S_r$ ) o humedad volumétrica y se grafica en las ordenadas, mientras que las abscisas se grafica la succión total. En la geotécnica, se representa la SWCC en términos de la succión matricial, ya que la mayoría de los problemas ingenieriles son el resultado de cambios ambientales (succión matricial), mientras que los cambios en la succión osmótica son relevantes en el comportamiento del suelo en los casos donde se presente alteración del contenido de sales del suelo por efecto de contaminación química.

La curva de retención puede ser definida como la variación de la succión con la capacidad de retención del agua en los macro y micro poros del suelo. Los valores corresponden al tipo de suelo, con una determinada densidad, y la naturaleza de esa relación está directamente asociada a la granulometría y mineralogía del suelo. De una forma general, la geometría de los poros, la magnitud y composición mineralógica de la fracción fina son determinantes en la posición relativa, forma e inclinación de la curva, como se puede ver en la Figura N<sup>o</sup> 3.1.26.

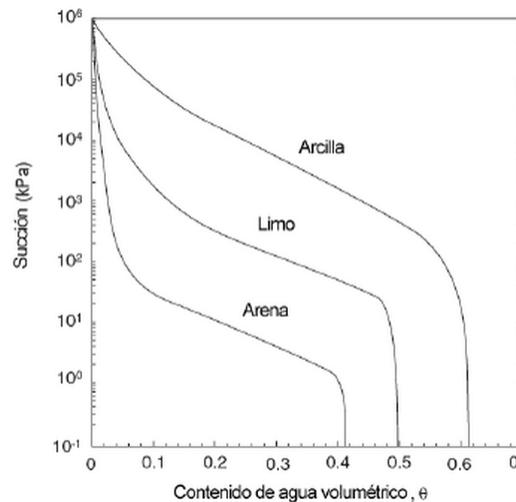


Figura 3.1.26: Curvas de retención de distintas tipologías de suelo. [20]

**Descripción del ensayo - Norma ASTM D5298\_03**

Se midió succión utilizando la técnica del papel filtro, actuando estos como sensores pasivos para medir la succión mátrica y total del suelo. Se asume que el papel filtro llegará a un equilibrio higrotérmico con el suelo, el cual posee una determinada succión. [10]. El rango de succiones que permite medir esta técnica es de 1 kPa a 100 MPa.

El método consiste en medir el contenido de agua de papeles filtro, ya se en contacto con la muestra de suelo (succión mátrica), o en equilibrio con la presión parcial de vapor en el aire dentro de un recipiente hermético (succión total). Es importante controlar la temperatura a lo largo del ensayo para asegurar el equilibrio higrotérmico. Por eso se colocan las muestras adentro de una cámara húmeda, para la cual se admite que las fluctuaciones de temperatura son tales que se mantienen en un rango de  $\pm 0,1^\circ C$ , asumiendo que variaciones mayores a  $1^\circ C$  invalidan el ensayo.

Conociendo la curva de calibración del papel filtro utilizado, se obtienen los valores de succión experimentales. Luego se pueden construir las curvas de retención mediante modelos de calibración; el modelo utilizado en este proyecto es el de Van Genuchten.

Este modelo se utiliza para describir la curva de retención del suelo. Es una expresión semi empírica que asume una variación sigmoideal e incluye tres parámetros (dos si se restringen los parámetros a ciertos valores). Presenta la ventaja de ser una formulación analíticamente cerrada que permite la obtención de la variación de la permeabilidad no saturada a partir de la curva de retención. Las ecuaciones para describir la conductividad hidráulica están basadas en el modelo de Mualem. [36]

La ecuación de la relación succión - grado de saturación de Van Genuchten es:

$$S_e = \left(1 + \left(\frac{s}{s_{ae}}\right)^{\frac{1}{1-\lambda}}\right)^{-\lambda} \quad (3.1.12)$$

Donde  $S_e$  se define como el grado de saturación efectiva,  $s$  la succión en kPa,  $s_{ae}$  el valor de entrada de aire,  $\lambda$  el índice de distribución de poros,  $k_r$  la permeabilidad relativa al agua respecto de la permeabilidad del suelo saturado.

Los parámetros necesarios para calibrar el modelo son los que figuran en la ecuación de la curva de retención del suelo:  $\lambda$ ,  $s_{ae}$ ,  $s_{res}$ . El índice de distribución de poros  $\lambda$  es gráficamente la pendiente de la curva de retención. Cuanto más uniforme es la distribución de poros, mayor será el valor de  $\lambda$ . El valor de entrada de aire  $s_{ae}$  es el valor de la succión mátrica que debe superarse para que el aire ingrese a los poros y el suelo comience a desaturarse. Gráficamente es el valor de succión a partir del cual un aumento de succión produce un cambio en el grado de saturación. Este parámetro es una medida del tamaño máximo de poros del suelo. El grado de saturación residual  $s_{res}$  se define como el grado de saturación para el cual no se produce un cambio significativo debido a un aumento de la succión.

**Medición de la succión total**

El método consiste en colocar una muestra de suelo con papeles filtro en un recipiente hermético. La muestra se deja reposar hasta que las presiones de vapor en los poros del suelo, poros del papel filtro y en el aire entren en equilibrio. La succión total se mide con papeles filtro que no están en contacto con el suelo. De esta manera, el movimiento de sales es limitado por el vapor del aire circundante.

**Medición de la succión mátrica**

La succión mátrica está asociada con el fenómeno de ascenso capilar debido a la tensión superficial en la interfaz aire-agua. Entonces para medirla correctamente es necesario que el papel filtro esté en contacto físico con el suelo, lo que permite la transferencia del fluido, sales disueltas incluidas. Al establecerse el equilibrio entre el suelo y el papel filtro, el papel se humedece y da una medida indirecta de la succión mátrica. Esto se logra intercalando un papel filtro entre dos pastillas de suelo, asegurando un buen contacto para que no haya presión de vapor ocluida, la cual agregaría un porcentaje de succión osmótica.

**Medición de la succión osmótica**

Según la definición de la succión total, la succión osmótica se determina restando la succión mátrica a la succión total.

**Procedimiento del ensayo** El procedimiento del ensayo se extrajo de la norma ASTM D 5298-03.

Los valores de succión se obtienen de una curva de correlación con la humedad del papel filtro. Dicha curva fue calibrada por diferentes autores para los papeles filtro Whatman N°42 y Schleicher & Schuell (S&S) N° 589. Se considera que los papeles filtro de la misma marca poseen la idéntica curva de calibración, por lo que se puede decir que estos son idénticos. Las calibraciones se pueden observar en la Figura N° 3.1.27.

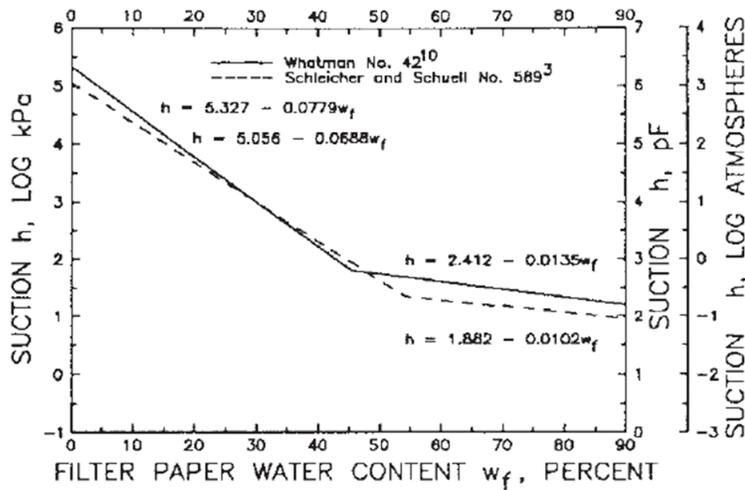


Figura 3.1.27: Curva de calibración Whatman N° 42 y Schleicher & Schuell N° 589.

Para los ensayos se utilizaron papeles filtro Schleicher & Schuell 589/2, banda blanca, de 70 mm de diámetro.

El montaje del ensayo se muestra en la Figura N° 3.1.28.

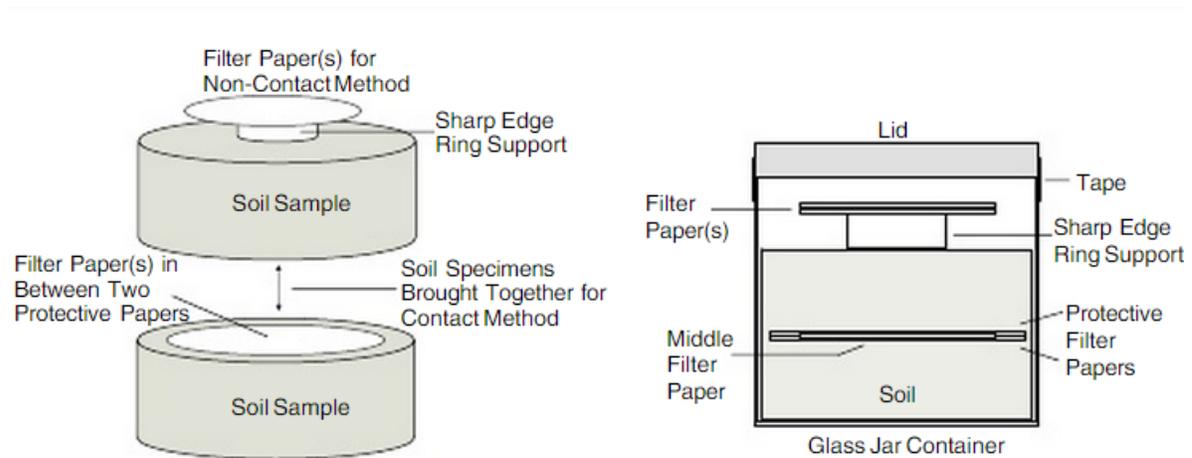


Figura 3.1.28: Esquema de la medición de succión total y mátrica. [5]

**Preparación de muestras de suelo** Se preparan muestras con suelo pasante por el tamiz #10, se las compacta al 95 % de la densidad seca óptima, es decir,  $12,4 \text{ kN/m}^3$  mediante compactación estática mediante una prensa hidráulica proporcionada por el Laboratorio de materiales y estructuras de la UBA.

Se utilizó un molde Proctor de 4" y un cabezal metálico empleado como pistón, obteniendo pastillas de 3 cm de altura y 10,2 cm de diámetro. De ésta manera se obtienen las densidad objetivos con dispersiones menores a  $0,1 \text{ kN/m}^3$ .

El equipo para la compactación se muestra en la Figura N° 3.1.29.



Figura 3.1.29: Compactación estática de las muestras.

**Papeles filtro para medición de succión mátrica y total** Previo a la utilización de los papeles filtro se los secó durante un día a  $110^{\circ}\text{C}$ . El manipuleo de éstos se realizó mediante pinzas quirúrgicas y guantes de latex.

Para medir la succión mátrica se coloca un papel filtro S&S N° 589/2 de 70 mm de diámetro, entre las muestras de suelo, junto con papeles filtro de sacrificio S&S N° 589/2 de 90mm de diámetro.

La medición de la succión total se lleva a cabo a través de dos papeles filtro separados del suelo mediante retenes.

El armado del ensayo se puede visualizar en la Figura N° 3.1.30.



Figura 3.1.30: Armado de ensayo de succión mediante papeles filtro.

Se colocan dentro de recipientes herméticos, y luego se deja reposar dentro de una heladera de poliestireno expandido, el almacenamiento se observa en la Figura N° 3.1.31. Según la norma, se debe almacenar durante un tiempo mínimo de 7 días para alcanzar el equilibrio higrotérmico. Ésta heladera se colocó en una cámara a temperatura controlada proporcionada por la sala de ensayos especiales del Laboratorio de Hormigón de la FIUBA.



Figura 3.1.31: Almacenamiento de las muestras a temperatura controlada.

Una vez cumplido el plazo mínimo, se retiran las muestras y se realiza el pesaje de los papeles filtro utilizando una balanza electrónica de alta precisión (0,1 mg) proporcionada por el Instituto de tecnología en polímeros y nanotecnología. En la Figura N° 3.1.32 se observa la balanza mencionada.



Figura 3.1.32: Balanza electrónica de alta precisión. (0,1 mg)

Para medir la humedad de los papeles filtro se realizaron los siguientes pasos:

1. Se pesan los pesafiltros metálicos anotando el peso de los mismos como Tc. Se transportan los papeles de filtro del contenedor y se colocan dentro de los pesafiltros. Es muy importante que este paso se haga rápidamente ( 3 - 5 segundos) ya que le papel podría cambiar su humedad en el trayecto. Se anota este peso como M1.
2. Los pesafiltros son llevados a un horno a 110°C con la tapa semi -abierta para permitir la salida de agua. Al otro día se retiran los recipientes del horno y se los deja enfriar en contacto con un cabezal metálico de 3kg por 30 segundos. Se obtiene el peso total M2. Se extrae el papel filtro del interior del recipiente y se obtiene el peso de Th.

**Resultados** Los resultados obtenidos son los presentados en la Cuadro N° 3.1.7.

Muestra	$\omega$ (%)	$\gamma_d$ ( $\frac{kN}{m^3}$ )	$S_r$	$\psi$ (kPa) Arriba	$\psi$ (kPa) Abajo	$(u_a - u_w)$ (kPa)
M1	18,0 %	12,40	0,44	11879,4	14572,9	12808,7
M2	24,7 %	12,95	0,67	11627,7	5573,0	1639,3
M3	34,2 %	12,41	0,85	6626,0	5840,5	283,8
M4	17,9 %	12,40	0,22	28709,7	35501,4	34056,5
M5	25,3 %	12,39	0,29	25029,4	19612,8	18813,8
M6	30,6 %	12,35	0,36	16170,0	15139,8	7724,3
M7	55,4 %	12,42	0,64	7692,8	7994,4	18,1
M8	30,2 %	12,44	0,35	16973,2	23261,4	14559,3
M9	36,8 %	12,40	0,43	17632,8	17343,0	11296,3
M10	50,7 %	12,41	0,59	13368,7	12702,1	208,8
M11	66,33 %	12,40	0,8	17632,8	17343,0	4,1

Cuadro 3.1.7: Resultados ensayo de succión - Arcilla

La curva de retención obtenida es la Figura N<sup>o</sup> 3.1.33, se puede observar que los parámetros son  $\lambda = 0,35$ ,  $Sae = 700kPa$  y  $Sres = 0,20$ .

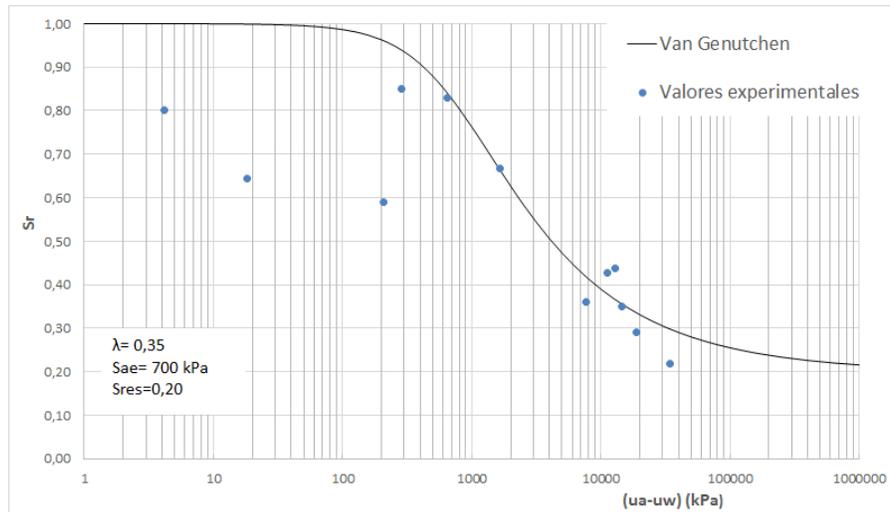


Figura 3.1.33: Curva de retención de la arcilla.

### 3.1.4. Ensayos de composición y caracterización de microestructura

#### 3.1.4.1. Difracción de rayos X - DRX

La Difracción de rayos X es una técnica fundamental para el estudio de los minerales, en especial aquellos que tienen una estructura cristalina como las arcillas. Consiste en emitir rayos X hacia una muestra y medir la intensidad de los rayos refractados en varias direcciones. Se analizó una muestra en tres condiciones diferentes: una seca al aire, otra seca en estufa a  $60^\circ\text{C}$  y la última seca a estufa a  $100^\circ\text{C}$ . Para las muestras se obtuvo un difractograma como se ve en la Figura N<sup>o</sup> 3.1.34. Por lo tanto, el proceso de secado no tuvo consecuencias en los picos de intensidad.

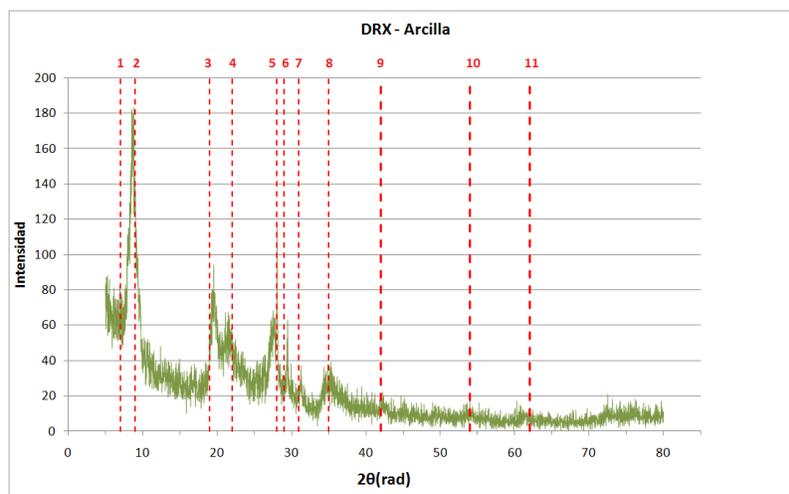


Figura 3.1.34: Difractogramas Arcilla, ejemplo Arcilla seca a  $60^\circ\text{C}$

A partir de los máximos, para cada abscisa  $2\vartheta$ , se puede calcular la distancia  $d$  correspondiente según la ley de Bragg:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \text{sen} \vartheta \quad (3.1.13)$$

$n$ : orden de difracción,  $n=1$  en el caso estudiado

$\lambda$ : longitud de onda incidente

$\vartheta$ : ángulo definido como la mitad del ángulo entre las ondas incidentes y la dirección del detector

$d$ : distancia entre 2 planos cristalográficos. Este valor es característico de cada material.

Analizando la distancia basal se puede inferir sobre los minerales predominantes presentados en la Tabla N° 3.1.8. [6]

Pico	$2\vartheta$ (°)	$d$ (Å)	Mineral
1	7	12,62	Montmorillonita
2	9	9,82	Illita, Mica
3	19	4,67	Vermiculita
4	22	4,04	Feldespato
5	28	3,18	Feldespato
6	29	3,08	Feldespato
7	31	2,88	Carbonato
8	35	2,56	Montmorillonita
9	42	2,15	cuarzo, Mica
10	54	1,70	cuarzo
11	62	1,50	Illita, caolinita

Cuadro 3.1.8: Interpretación Difractogramas - Arcilla

Según la Tabla N° 3.1.8 podemos interpretar que la arcilla en estudio tiene minerales característicos de la montmorillonita; por otra parte los feldespatos están presentes en la caolinita. Esta primera conclusión sobre el tipo de arcilla se confirmará con otros ensayos como el de medición de superficie específica. No obstante, la posible presencia de estos minerales nos indica que probablemente exista un importante fenómeno de hinchamiento por tener componentes característicos de caolinita y montmorillonita.

#### 3.1.4.2. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier: FTIR

Este ensayo se basa en la interacción de los grupos funcionales del material con las ondas electromagnéticas en el rango del Infrarrojo. Una luz monocromática ilumina la muestra y mediante la transformada de Fourier permite determinar la absorbancia para cada frecuencia y convertir los resultados brutos en datos espectrales. El ensayo permite obtener la huella química espectral del material, con una técnica no destructiva [2]. Las muestras se ensayan en forma de pastillas mezclándolas con Bromuro de potasio (KBr). El KBr no absorbe las longitudes de ondas en el espectro infrarrojo así no dará picos en el gráfico final. El radio de arcilla/KBr es de 10 %/ 90 %.

Las muestras ensayadas presentaron picos para números de ondas como se ve en la Figura N° 3.1.35.

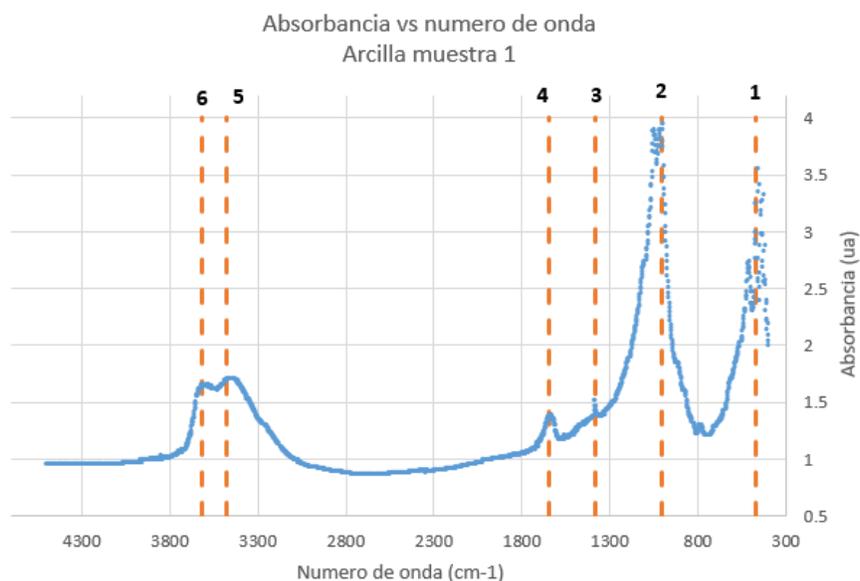


Figura 3.1.35: Espectro FTIR para la arcilla

La arcilla es constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratados. Físicamente se considera un coloide (es decir un sistema formado de dos fases o más), de partículas extremadamente pequeñas y superficie lisa. El diámetro de las partículas de la arcilla es inferior a 0,002 mm. Químicamente se compone de silicato de aluminio hidratado, (cuya fórmula es:  $Al_2O_3 \bullet 2SiO_2 \bullet H_2O$ ), silicatos de hierro o de magnesio [27].

Los elementos químicos diferentes usuales de una arcilla se ven en la Tabla N° 3.1.9.

Elemento	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	TiO2	Na2O	K2O	CaO
Nombre	Silicio	Aluminio	Hierro	Magnesio	Titanio	Sodio	Potasio	Calcio

Cuadro 3.1.9: Elementos químicos usuales de una arcilla

Los picos mayores de la Figura N° 3.1.35, que corresponden a máximos de absorbancia, se muestran en la Tabla N° 3.1.10.

Numero de onda ( $cm^{-1}$ )	468	1006	1384	1649	3480	3618
Denominación del pico	1	2	3	4	5	6

Cuadro 3.1.10: Picos experimentales de la muestra de arcilla

A continuación se interpretaran los extremos de absorbancia (de acuerdo con [32]) :

**Picos:**

1. El pico de  $468\text{ cm}^{-1}$  corresponde a la presencia de átomos de Mg en los sitios octaédricos, y ponen de manifiesto los grupos Si-O-M (Metales). También puede interpretarse como la deformación de los grupos Al-OH, Al-O-Si.

2. El fuerte pico de  $1006\text{ cm}^{-1}$  corresponde a la presencia en los sitios tetraédricos de iones trivalentes substituidos al silicio y en los sitios octaédricos de iones férricos. Ese pico puede implicar por otra parte vibraciones de tipo estiramiento de los enlaces Si-O.
3. El pico de  $1384\text{ cm}^{-1}$  corresponde a impurezas cristalinas.
4. El pico de  $1649\text{ cm}^{-1}$  corresponde a la presencia de grupos  $\text{OH}^-$  y se encuentra sobre todo en espectros de montmorillonita. Son vibraciones de los grupos  $\text{OH}^-$  del agua adsorbida entre las capas de arcilla.
5. Los picos de  $3480$  y  $3618\text{ cm}^{-1}$  también atestatan de la presencia de grupos  $\text{OH}^-$ . Pueden corresponder a la vibración de los grupos  $\text{OH}^-$  de agua de constitución o del agua adsorbida. El pico de  $3480\text{ cm}^{-1}$  puede corresponder a tensiones de grupos  $\text{OH}^-$ , y el de  $3618\text{ cm}^{-1}$  a la tensión de los enlaces Al-OH.

### 3.1.4.3. Análisis de termogravimetría: TGA

La termogravimetría es una técnica de análisis térmico que mide la variación de peso de una muestra al calentarla a una velocidad constante. Los parámetros del ensayo son: velocidad de calentamiento, atmósfera del ensayo y caudal gaseoso. La disminución de peso se debe a reacciones químicas del material. Este ensayo permite determinar los componentes del material y completar el análisis de FTIR.

Se repitieron dos ensayos sobre dos muestras de arcilla.

En el Cuadro N<sup>o</sup> 3.1.11 se observan las condiciones de ensayo.

Parámetro	Valor
Atmósfera	Nitrógeno
Caudal de gas	30 ml/min
Tipo de soporte	Platino
Peso muestra 1	9,473 mg
Peso muestra 2	6,344 mg
Velocidad de calentamiento/enfriamiento	10°C/min
Temp T0	25,0°C
Temp T1	800,0°C

Cuadro 3.1.11: Parámetros de la TGA para las dos muestras de arcilla

Los resultados se muestran en la Figura 3.1.36.

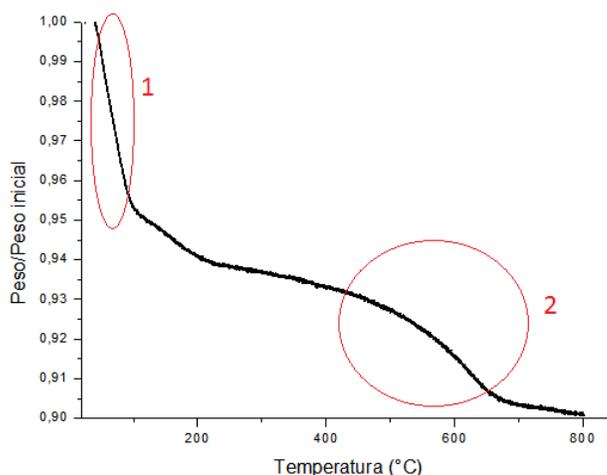


Figura 3.1.36: Pérdida de peso Arcilla

De la Figura 3.1.36 se observa que la arcilla tuvo dos pérdidas de masa significativas, la primera (1) entre 25°C y 100°C, la segunda (2), entre 400°C y 700°C. La primera pérdida es de aproximadamente el 10% de la muestra, y se atribuye a la pérdida de agua absorbida físicamente y humedad. La segunda pérdida, debida a la eliminación de los hidroxilos, es de aproximadamente el 5% [25]. Por fin, la última pérdida, de 700°C a 800°C, de 1% de peso, corresponde a la degradación del material [8].

#### 3.1.4.4. Ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio

Los ensayos de porosimetría y microscopía electrónica de barrido permiten obtener información cualitativa y cuantitativa de la microestructura de la arcilla. Para ambos ensayos se preparan previamente las muestras con la técnica de liofilización.

**Preparación de las muestras por medio de liofilización** La liofilización es un proceso de conservación de la materia que consiste en su congelación y su deshidratación completa. Es una técnica reversible ya que el agregado de agua permite que el material retorne a sus propiedades iniciales. Se repite el proceso con 3 muestras de arcilla: rama seca, punto óptimo y rama húmeda. Cada muestra se realiza en el molde del edómetro, de tal manera que corresponda a un estado descrito por la Curva Proctor estándar (humedad, densidad).

Luego, se enfría el material hasta -40°C durante 20 horas para solidificar el agua. La etapa siguiente de liofilización primaria tarda 36 horas y consiste en aplicar el vacío a la arcilla para sublimar el agua; eso permite que pase directamente del estado sólido al estado de vapor, dejando los poros anteriormente llenos de agua, inalterados. Eso evita su deterioración por ebullición. Por fin, la liofilización secundaria se alcanza con un secado a 40°C para sacar el agua residual. Las muestras de arcilla se tapan inmediatamente para impedir la entrada de aire y de humedad. Se estima que al fin del proceso el material contiene entre 1% y 5% en peso de agua.

Una vez finalizado el proceso de liofilización se obtienen las muestras de suelo libres de agua y con sus propiedades inalteradas.

La porosimetría por inyección de mercurio es una técnica utilizada en la caracterización del sistema macroporoso de los materiales. Se basa en la aplicación de presión y así forzar la entrada del mercurio en el entramado poroso del sólido. Esta técnica se utiliza en el estudio de materiales que presentan macroporos y mesoporos pudiendo llegar a medir poros de tamaño de hasta 6 nm;

con este análisis se determina el área, el volumen de macro y mesoporos y se calcula la distribución de la porosidad del material.

Se basa en los fenómenos de capilaridad generados por los líquidos que no mojan los sólidos con los que están en contacto. Así, un líquido como el mercurio que no penetra espontáneamente en los conductos capilares, precisa una presión "p" para su introducción que es inversamente proporcional al radio "r" de los mismos.

El ensayo porosimétrico consiste en inyectar mercurio a presión y registrar el volumen de mercurio absorbido. Para cada intervalo de presión considerado, el volumen de mercurio absorbido nos indica el volumen de poros de la muestra que tienen un determinado intervalo de tamaño de acceso. Las presiones aplicadas se sitúan frecuentemente entre 0,1 y 2000 Kg/cm<sup>2</sup>; se obtiene de la distribución del volumen de poros dentro del rango de acceso de poro 75 a 0,0037 μm.

A medida que la presión aumenta, el mercurio se inserta en los poros de diámetro inferior. Se puede calcular los radios de poros con la ecuación de Laplace:

$$D = \frac{4 \cdot A_{Hg} \cdot \cos\theta}{P_n} \tag{3.1.14}$$

$A_{Hg}$  :Tensión de superficie del mercurio (0,48 N/m)

$\theta$  : Angulo de contacto sólido-mercurio (obtuso para líquidos no mojantes)

$P_n$ : Presión de inyección del mercurio

A la presión  $P_n$ , los poros cuyo diámetro es mayor a D se llenan de mercurio, aquellos cuyo diámetro es inferior a D quedan vacíos. Esa relación supone considerar poros de sección circular. Durante la inyección, el menisco de mercurio toma una forma esférica convexa proporcional a P.

El equipo utilizado es un porosímetro Pascal 440 Thermo Fisher. Se realizaron dos ensayos a muestras de diferente humedad. Las muestras se conforman según cubos aproximadamente de 1 cm<sup>3</sup>. Las características se pueden analizar en el Cuadro N<sup>o</sup> 3.1.12.

Muestra	Seca	Húmeda
Humedad inicial (%)	27.69	34.45
Volumen de poros (de tamaño superior a 7,3 nm) mm <sup>3</sup> /g	113.3	187.06

Cuadro 3.1.12: Características de las muestras de porosimetría - Arcilla

El análisis se completa con la Figura N<sup>o</sup> 3.1.37 en la que se observa la distribución de volumen de poros en función del diámetro de poros.

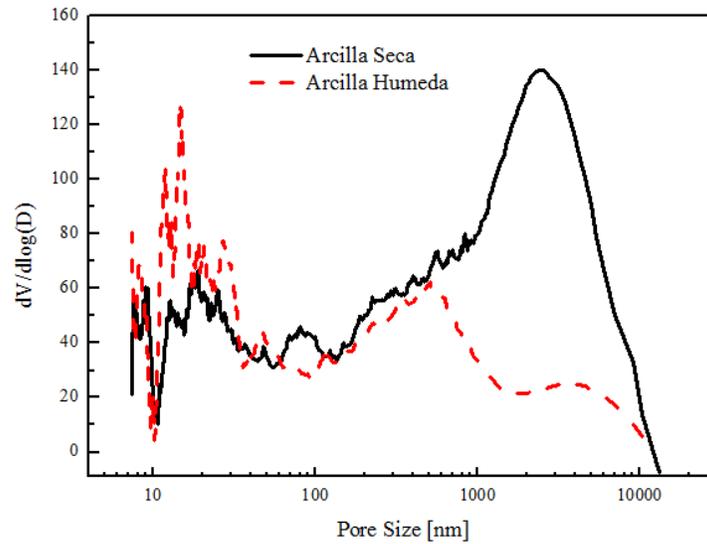


Figura 3.1.37: Volumen de poros en función de diámetro de poros muestras seca y húmeda- Arcilla

La arcilla húmeda tiene un volumen de poros mayor a la arcilla seca. Esto se debe al hecho de que, al hidratarse, la arcilla se expande y el agua ejerce presión que aleja los granos del material. Esos poros quedan vacíos cuando se extrae el agua por liofilización, lo que explica que el valor de volumen de poros sea más alto.

En el Cuadro N°3.1.13 se observa la distribución de tamaños de los poros.

Rango de diámetros (nm)	7-10	10-100	100-1000	1000-10 000
Porcentaje en volumen arcilla seca (%)	7.3	39.7	35.3	17.7
Porcentaje en volumen arcilla húmeda (%)	3.8	21.4	26.8	48.1

Cuadro 3.1.13: Repartición de los tamaños de poros- Arcilla

La arcilla seca contiene mayor cantidad de poros chicos que la arcilla húmeda, ya que hay dos veces más (en volumen) de poros cuyo tamaño es inferior a 100 nm. En cambio, la arcilla húmeda tiene poros más grandes por la misma razón que se mencionó anteriormente.

### 3.1.4.5. Microscopía electrónica de barrido - SEM

El microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscope), inventado en 1937 por Manfred von Ardenne, es aquel que utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen. El poder de resolución de la óptica convencional es limitado por las longitudes de onda de la luz visible; entonces, para ver detalles más finos se usa electrones, cuyas longitudes de onda son más bajas. Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra. También produce imágenes de alta resolución, de forma que las características más ínfimas de la muestra pueden ser examinadas con gran amplificación. La preparación de las muestras es relativamente fácil ya que la mayoría de los SEM sólo requieren que estas sean conductoras. Posteriormente, se barre la superficie con electrones acelerados que viajan a través del cañón. Un detector formado por lentes basadas en electroimanes, mide la cantidad e intensidad de electrones que devuelve la muestra, siendo capaz de mostrar figuras en tres dimensiones mediante imagen digital. Su resolución está entre 4 y 20 nm, dependiendo del microscopio.

**Procedimiento** La muestra se deposita seca sobre un soporte circular metálico, sobre la cinta de carbono bifaz. El microscopio se muestra en la Figura N°3.1.38.



Figura 3.1.38: Microscopio electrónico de barrido

Las observaciones se ven en las Figuras N° 3.1.39.

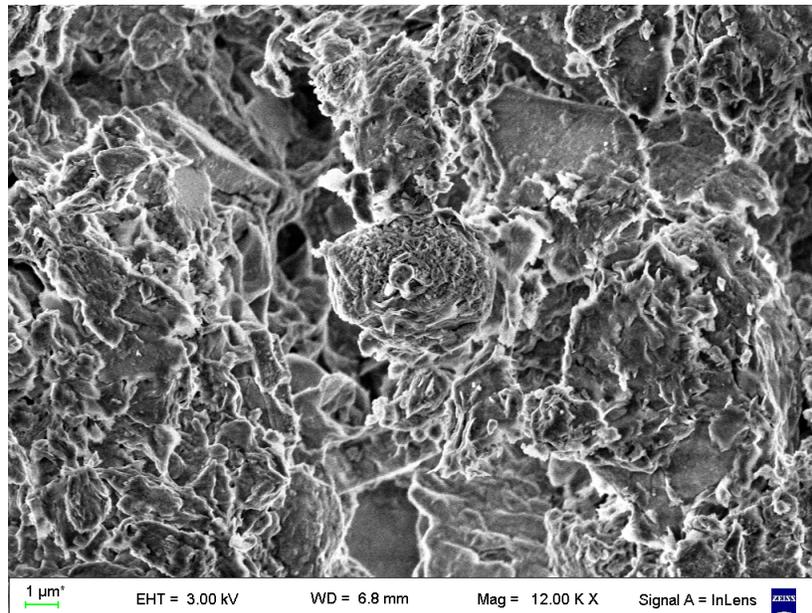


Figura 3.1.39: Vista de arcilla, muestra seca

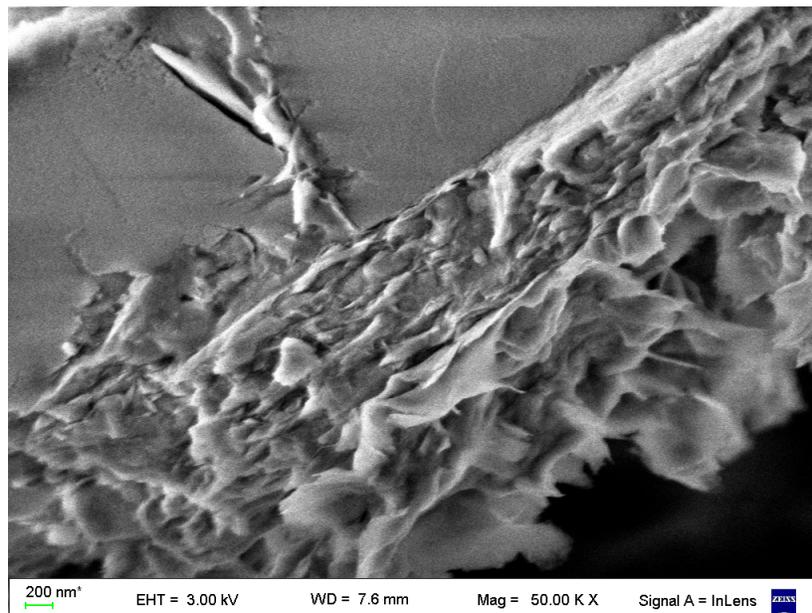


Figura 3.1.40: Vista de arcilla, muestra húmeda

La Figura N° 3.1.39 da una vista global de la superficie de la arcilla. En la Figura N°3.1.40 se observan las laminas de arcilla, situadas en varias direcciones. Se distingue una parte lisa, esto se debe a que la muestra fue compactada. Se ven, por otra parte, los poros del material, pero resulta difícil definir un único tamaño de estos. No se vieron diferencias entre las muestras seca y húmeda, que tenían características similares.

### 3.2. Caracterización suelo granular

La arena seleccionada es una arena comercial, para utilizarla como agregado grueso, ya que es un material abundante, cuyo costo es bajo y de fácil obtención. La arena utilizada, es de granulometría uniforme, mal graduada, de alta permeabilidad. Fue provista por el Laboratorio de hormigón de la Facultad de Ingeniería (UBA).

En esta sección se analizan los resultados de los ensayos básicos a la arena.

#### 3.2.1. Ensayos físicos

Para realizar el ensayo de granulometría se utilizó la norma ASTM D422-63R02, método por vía húmeda. Se presenta la curva granulométrica en la Figura N° 3.2.1, la clasificación de la arena es SP, arena pobremente graduada.

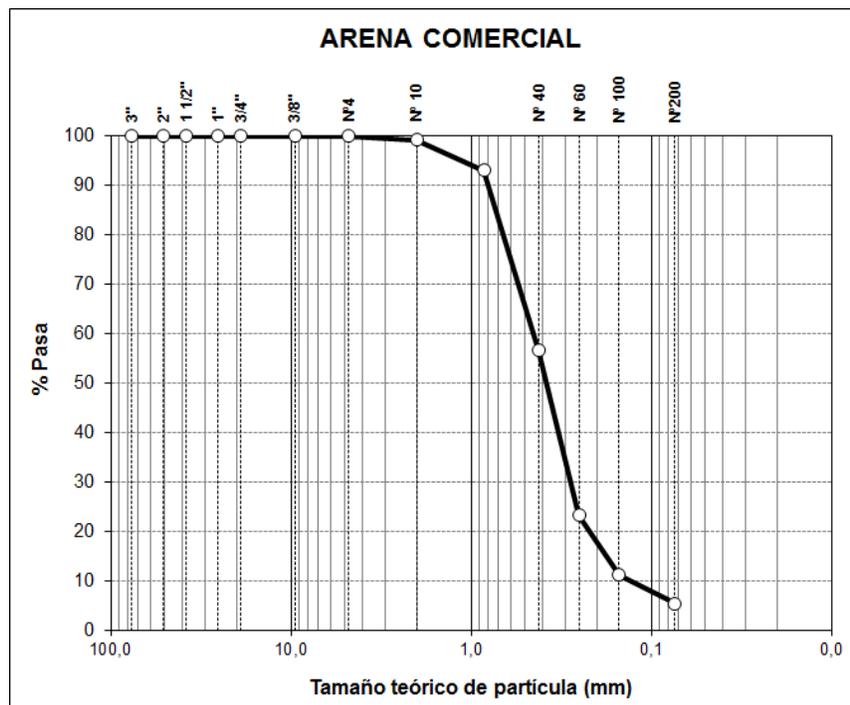


Figura 3.2.1: Curva granulométrica arena

Los parámetros se encuentran en el Cuadro N° 3.2.1.

$D_{60}$	$D_{30}$	$D_{10}$	$C_u$	$C_c$
0,45	0,32	0,18	2,5	1,3

Cuadro 3.2.1: Parámetros arena

Para determinar el ángulo de fricción interna crítica de la arena se siguieron los lineamientos del método simplificado propuesto por J. C. Santamarina, explicado en la Figura N° 3.2.2. a) Se vierte la arena en un cilindro de 1000mL lleno de agua, b) se voltea el cilindro un ángulo mayor

a  $60^\circ$  respecto al eje vertical, c) lentamente retorna el cilindro a su posición original y se mide el ángulo de reposo en la zona central de la pendiente.

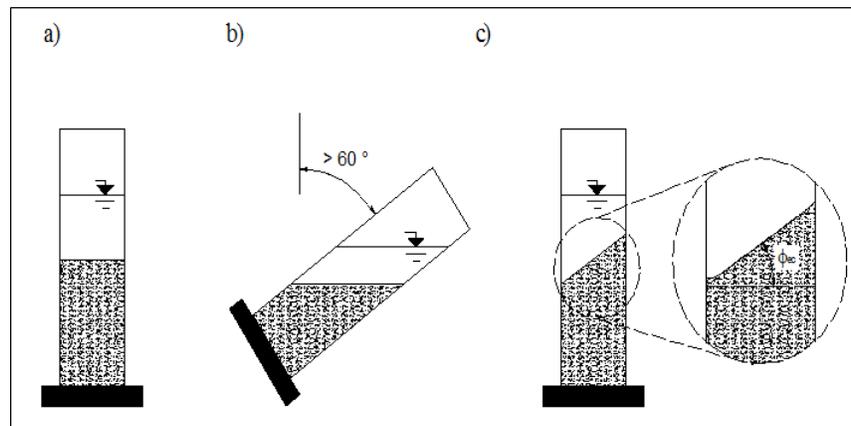


Figura 3.2.2: Método simplificado - Determinación del ángulo crítico - Arena

El ángulo crítico obtenido es de  $30,5^\circ$ , según se observa en la Figura N° 3.2.3

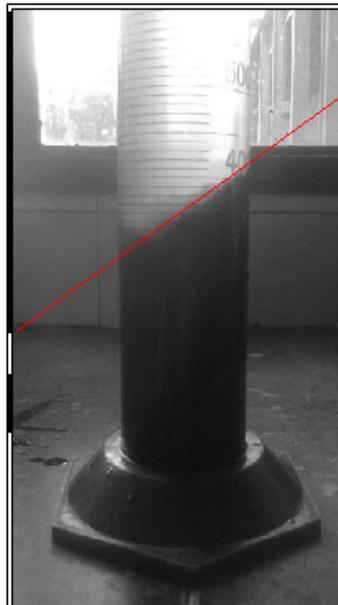


Figura 3.2.3: Ángulo de fricción interna crítico - Arena

El ensayo de gravedad específica se realizó mediante la Norma ASTM 854-02, Método B, dando como resultado  $26,1 \text{ kN/m}^3$ .

### 3.2.2. Ensayos de comportamiento mecánico

Se realizó el ensayo proctor normal, en la Figura N° 3.2.4 se puede ver la curva resultante, con una densidad máxima de 16,1kN/m<sup>3</sup> a 6% de humedad.

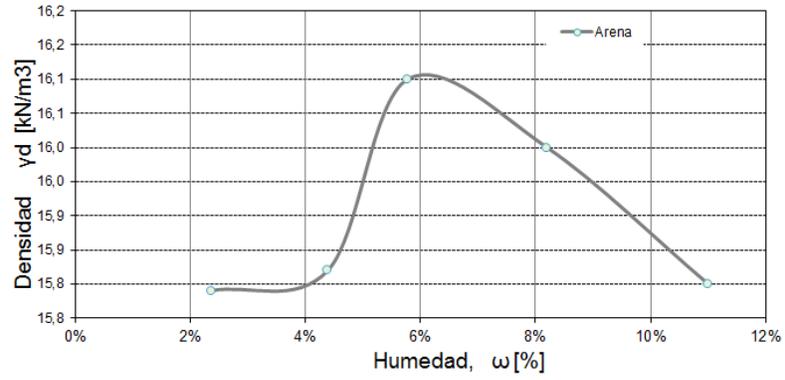


Figura 3.2.4: Proctor normal arena

### 3.3. Polímero

#### 3.3.1. Selección del aditivo

El polímero utilizado es la poliacrilamida, ésta es un polímero (-CH<sub>2</sub>-CH(-CONH<sub>2</sub>)-) constituido de una sucesión de monómeros de acrilamida. Puede ser sintetizado con una estructura lineal o ramificada. La fórmula química de la Poliacrilamida se ve en la Figura N<sup>o</sup> 3.3.1. La poliacrilamida se puede encontrar en forma de polvo o líquido (una solución de polímero). Se puede usar directamente en forma seca o como un gel que se hidrata al agregarle agua.

Los nombres posibles de este producto son poly(acrylamide), polyacrylic amide, y los acrónimos que se encuentran en la literatura son : PAm, PAAm, y PAM. En el presente trabajo lo mencionaremos como PAM.

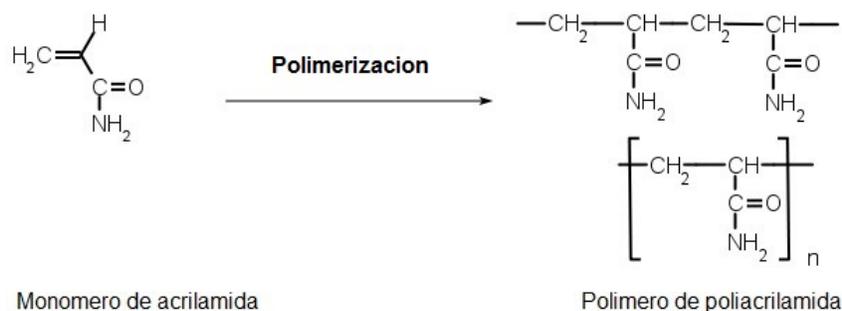


Figura 3.3.1: Fórmula química Poliacrilamida

La poliacrilamida aniónica (APAM) es un grupo de macromoléculas de alto peso molecular; se obtienen por la polimerización de la acrilamida y de un co-monomero aniónico, por ejemplo la sal de sodio del acrilato, ácido acrílico, acrilato de sodio, o por hidrólisis del grupo amida a un grupo carboxilo. [27].

La poliacrilamida catiónica (CPAM) se forma de la misma manera que la APAM, excepto que el co-monomero que se asocia a la acrilamida es cargado positivamente. Se usa menos que la aniónica por presentar riesgos para el medio ambiente. En efecto, existen estudios ([18]) que muestran posibles efectos negativos sobre la fauna. Es por este motivo, que en este trabajo se utilizará la poliacrilamida aniónica.

#### 3.3.2. Composición y propiedades

En la Figura N<sup>o</sup> 3.3.2, los dos tipos iónicos de Poliacrilamida se pueden encontrar en forma de polvo blanco. Al agregarle agua al polvo de PAM se convierte en una solución de alta viscosidad, si la concentración de PAM es mayor al 2% se tienen problemas a la hora de mezclar, debido a que la consistencia de la solución es tan viscosa que se la puede considerar como un gel.



Figura 3.3.2: Poliacrilamida

Se puede observar, en la figura N° 3.3.3 las formulas iónicas de los dos tipos de poliacrilamida.



Figura 3.3.3: Formulas iónicas poliacrilamida catiónica y aniónica

La APAM absorbe agua fácilmente, por lo que en la práctica es un hidrogel, y uno de los geles más utilizados para realizar electroforesis, las cuales tienen como objetivo realizar un análisis y/o separación por carga y tamaño molecular de los fragmentos de aminoácidos o nucleótidos que componen muestras biológicas como las proteínas o ácidos nucleicos como el ADN o el ARN respectivamente

### 3.3.3. Usos de APAM

La APAM (forma aniónica) se usa para controlar la erosión de suelos y mejorar la calidad de agua de un cauce natural, entre otros usos. Basándose en el estudio de Kurenkov y col. [18] una de las mayores aplicaciones de la poliacrilamida es la floculación de sólidos en suspensión dentro de un líquido. El producto crea cadenas con las partículas de suelo que se unen para formar partículas más grandes que resisten mejor a la erosión. En efecto, el polímero tiene afinidad con el suelo, formando fuerzas de Coulomb, de Van der Waals o fuerzas iónicas de neutralización para la PAM aniónica. La formación de partículas más gruesas permite también atraer todos los polvos en suspensión en el agua, disminuyendo su turbidez, reduciendo al mismo tiempo la cantidad de algunos nutrientes como fósforo, nitrato o por fin la demanda biológica en oxígeno, llegando a un agua más sana, [19].

El uso de la APAM para mejorar la calidad del agua fue estudiado por Green Steven y D.E Scott [12], donde explica que la aplicación superficial de una solución de APAM con una concentración

mayor a 2,5 ppm impide la erosión del cauce de un arroyo con una pendiente de 30%. Como es sabido, la erosión provoca que el suelo se descomponga en partículas finas que se limpian por la acción del agua. La ventaja que este estudio destaca es que la erosión y la pérdida de sedimentos disminuye gracias a un tratamiento de la superficie del suelo en contacto con el agua, y no de las capas más profundas.

Zhou et al [[40]] se basa en la gran capacidad de absorber agua, la fuerte retención de humedad, y elevada presión de hinchamiento, concluye que el polímero super absorbente junto con la montmorillonita puede ser utilizado como sello impermeable.

### 3.3.4. Preparación de la solución de PAM

Los dos tipos de PAM (aniónica y catiónica) se presentan como un polvo blanco (como se ve en la Figura N° 3.3.2), la mecánica de preparación es la misma para ambas.

El solvente utilizado es agua destilada para todos los ensayos del estudio. La hoja técnica aconseja una concentración entre 2 % y 4 %, o sea entre 20g/L y 40g/L de solución final. La primera solución se hace con una concentración baja, de 0.4 %, compuesta por 2g de Poliácridamida de cada versión iónica y 500mL de agua destilada. Mediante la agitación con agitador magnético (Figura N° 3.3.4) se agrega el polímero de forma pausada y de a pocas cantidades, ya que es muy coagulante y dificulta la homogeneización, siempre manteniendo la agitación. El mezclado dura aproximadamente 2 horas. Para finalizar el mezclado se coloca la solución en una baño ultrasónico para terminar de homogeneizarla durante 30 minutos.



Figura 3.3.4: Preparación de solución de PAM

### 3.3.5. Preparación de los films de APAM y CPAM

Los films se preparan por el método de casting o evaporación de solvente. Se colocan alrededor de 300g de solución polimérica a 0.40 % en un recipiente de plástico de superficie plana. El recipiente

se coloca a la estufa a 60°C durante seis días para que se evapore el agua, hasta que quede un film, como los que se ven en las Figuras N° 3.3.5 y 3.3.6.



Figura 3.3.5: Film de APAM



Figura 3.3.6: Film de CPAM

Se hacen varias muestras de APAM y CPAM. Al obtener los films, se observa que los de CPAM son mas frágiles y presentan una superficie más rugosa y menos transparente que los de APAM. Eso puede indicar que la CPAM es un polímero más cristalino que la APAM.

### 3.3.6. Ensayos de composición y caracterización de la microestructura

#### 3.3.6.1. Ensayo de absorción de humedad

Una característica importante de la Poliacrilamida es su afinidad con el agua (formación de un gel al humectar el polvo). A fin de anticipar el comportamiento de una mezcla Suelo-Poliacrilamida se realiza el ensayo de absorción de humedad para cuantificar el peso de agua absorbido por films de APAM y CPAM.

El ensayo necesita previamente recrear un ambiente controlado de humedad y temperatura dentro de una caja hermética. Para eso se utilizan sales de NaCl con gran capacidad de retención de agua que permiten alcanzar una humedad relativa de alrededor de 80% y la mantienen constante. Previo al ensayo se secan los films para comenzar las mediciones con el material seco a peso constante. Luego se colocan dentro de la caja con humedad y temperatura controladas sobre una hoja de aluminio como soporte. A intervalos regulares se mide la ganancia de peso de los films junto con la temperatura y la humedad relativa. El ensayo termina cuando la ganancia de peso con respecto a la última medición es nula. En la Figura N°3.3.7 se muestra una foto de la caja de ensayo.

Se repite el ensayo con varios films, los valores promedios finales están en la Figura N° 3.3.8.

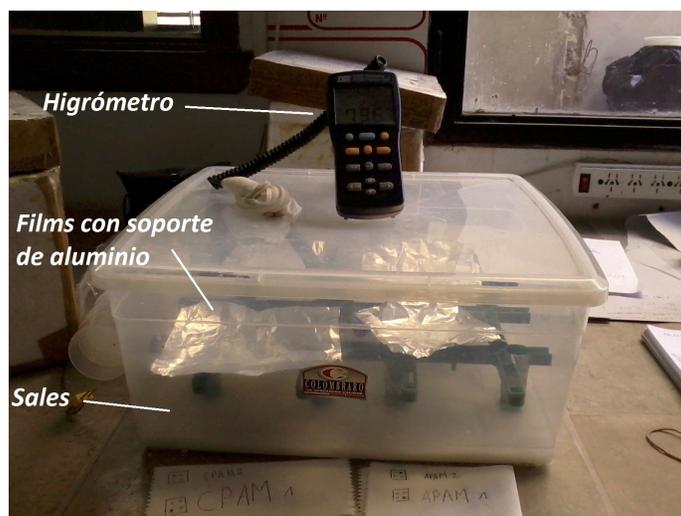


Figura 3.3.7: Dispositivo de ensayo de absorción de humedad

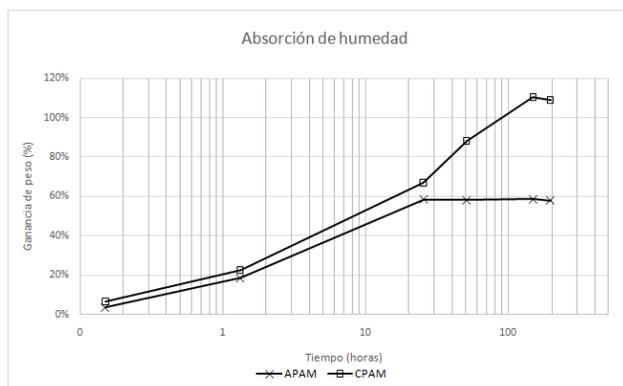


Figura 3.3.8: Absorción de humedad de los films de APAM y CPAM

Tipo de Poliacrilamida	APAM	CPAM
Aumento de peso final (promedio)	61,1 %	123,0 %
Tiempo para alcanzar el máximo (horas)	350	30

Cuadro 3.3.1: Valores finales del ensayo de absorción de humedad

De acuerdo con los resultados del Cuadro N° 3.3.1, se ve que los comportamientos de la APAM y la CPAM difieren en cuanto al tiempo de absorción y la cantidad de agua absorbida. En efecto, la CPAM absorbe el doble de agua de la APAM, con un tiempo para alcanzar su máximo en promedio diez veces más corto. Es decir que la CPAM tiene mayor afinidad con el agua que la APAM. Esta diferencia podría tener consecuencias sobre los ensayos hidráulicos que se realizarán con mezclas suelo-APAM y suelo-CPAM, el ensayo de hinchamiento libre entre otros. De todas formas, por más que CPAM tenga mejor absorción de humedad, se determinó no utilizarla en este trabajo debido a que presenta un nivel mínimo de toxicidad, con lo cual, no se puede agregar un elemento tóxico al suelo.

### 3.3.6.2. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier: FTIR

Se realiza el ensayo de espectroscopía infrarroja a las dos versiones iónicas de la Poliacrilamida. Las muestras se ensayan en forma de films, se colocan directamente en el equipo.

Se usa la técnica de FTIR con ATR (Attenuated Total Reflectance). Un cristal de Zinc en contacto con la muestra se propaga un haz infrarrojo en el cristal. Si el índice de refracción del cristal es mayor que el de la muestra, el haz se refleja varias veces hasta pasar por encima del ángulo de incidencia en la interfaz cristal/muestra, excepto para una onda evanescente que emerge del cristal y es absorbida por la muestra ([11]). Ese proceso se utiliza sobre todo para muestras de material puro (sin dilución con KBr).

Se puede visualizar el espectro FTIR del APAM en la Figura N° 3.3.9, así como el espectro del CPAM en la Figura N° 3.3.10.

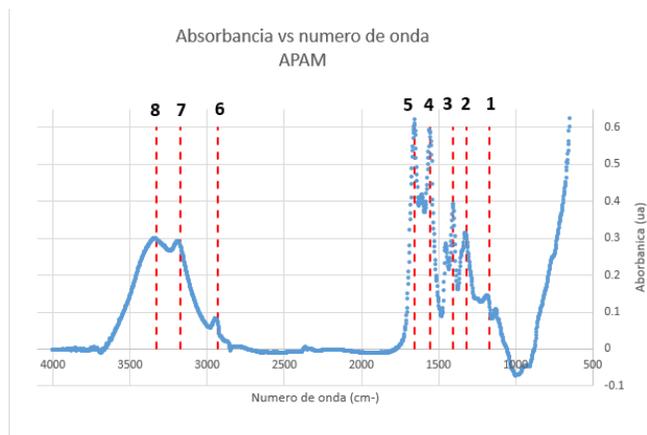


Figura 3.3.9: Espectro FTIR para un film de APAM

La identificación de los picos se encuentran en el Cuadro N° 3.3.2 y N° 3.3.3 respectivamente.

Pico	Numero de onda (cm-1)	Grupo asociado
1	1171	
2	1317	
3	1406	C-N
4	1552	N-H
5	1655	vibración de grupos carbonil C=O
6	2935	C-H
7	3177	N-H
8	3331	

Cuadro 3.3.2: Identificación de los picos experimentales de APAM

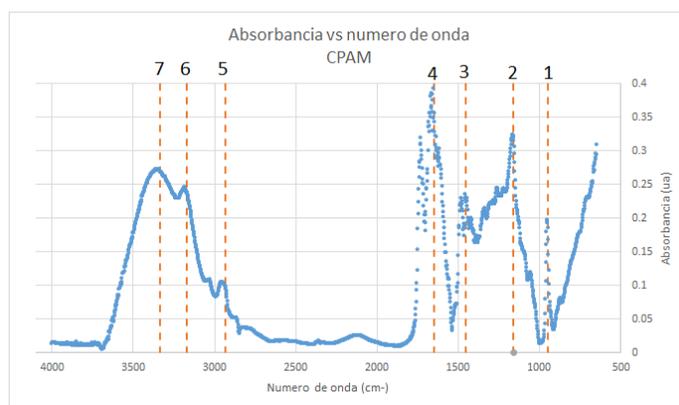


Figura 3.3.10: Espectro FTIR para un film de CPAM

Pico	Numero de onda (cm-1)	Grupo asociado
1	949	
2	1159	Flexión de grupos acil-oxigeno (O=)
3	1456	C-N
4	1651	Vibración de grupos carbonil C=O
5	2933	Estiración de los C-H
6	3169	N-H
7	3336	

Cuadro 3.3.3: Identificación de los picos experimentales de CPAM

Para la interpretación de los picos observados se utilizaron las publicaciones de Maghchichey y col. ([21]) y Sowwan ([30]). La identificación de los picos de CPAM se realizaron mediante la investigación de Sun y col. ([31]). Estos documentos indican grupos funcionales asociados a ciertos números de onda.

### 3.3.6.3. Análisis de termogravimetría: TGA

La termogravimetría (TGA) es una técnica de análisis térmico que mide la variación de peso de una muestra al calentarla con una velocidad constante.

**Poliacrilamida aniónica y catiónica** Se ensayan 3 muestras de APAM y 3 de CPAM, según las condiciones del Cuadro N° 3.3.4.

Parámetro	Valor
Atmósfera	Nitrógeno
Caudal de gas	30 mL/min
Tipo de soporte	Aluminio
Peso muestra 1	8,665 mg
Peso muestra 2	3,960 mg
Peso muestra 3	5,590 mg
Velocidad de calentamiento/enfriamiento	10°C/min
Temp T0	25,0°C
Temp T1	800,0°C

Cuadro 3.3.4: Parámetros de la TGA para las tres muestras de APAM

Se grafican el peso y la derivada del peso en función del tiempo.

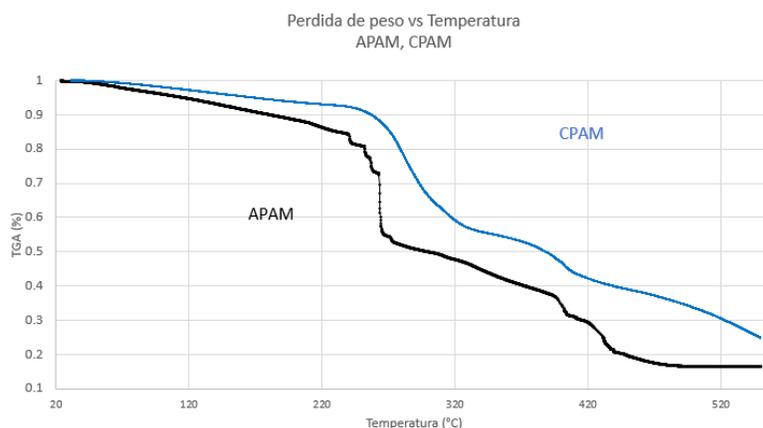


Figura 3.3.11: Gráficos de TGA para la APAM y la CPAM

La Figura N° 3.3.11 representa la curva de las variaciones obtenidas. Permite observar que la APAM tiene pérdidas de peso más rápidas que la CPAM (pendientes más importantes).

Se puede identificar precisamente los rangos de disminución de peso del APAM y CPAM en el Cuadro N° 3.3.5.

Rango de pérdida (°C)	Reacción asociada
25-260	Pérdida de agua absorbida
260-390	Descomposición térmica de los grupos $COO^-$ y $CO-NH$
390-425	Rotura de las cadenas entre los monómeros de acrilamida
425-550	

Cuadro 3.3.5: Identificación de las pérdidas de masa de la APAM

La identificación se hace en base al documento de Kaith y col. ([17]).

#### 3.3.6.4. Difracción de rayos X - DRX

La DRX permite calcular las distancias basales entre las estructuras cristalinas. No obstante, en el caso de los polímeros, el interés de este ensayo consiste en ver si el material tiene fases cristalinas, lo que se traduce por el número y la amplitud de los picos. Los gráficos se ven las Figuras N°3.3.12 y 3.3.13.

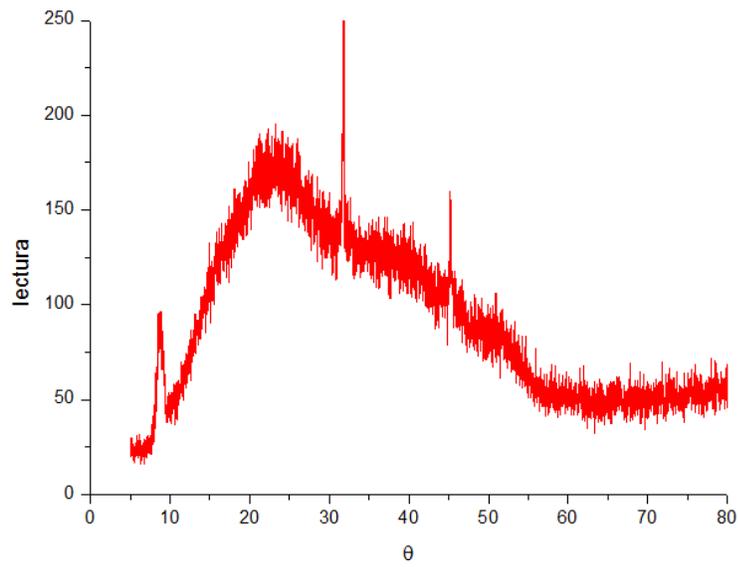


Figura 3.3.12: DRX de la APAM

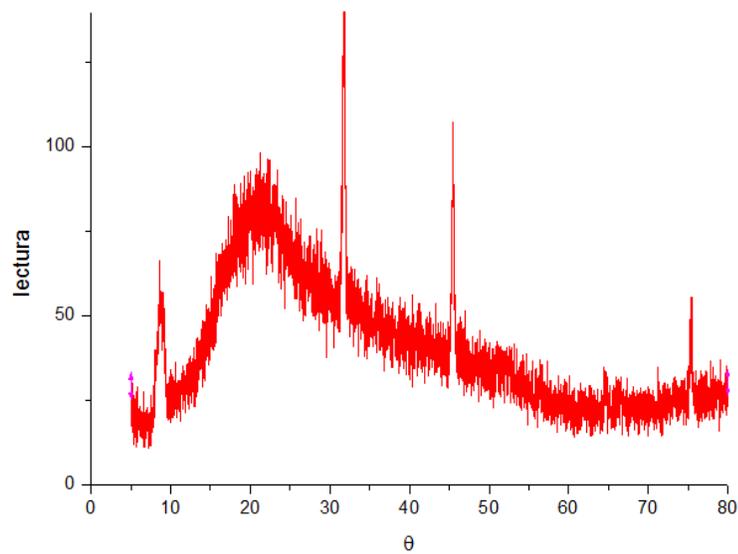


Figura 3.3.13: DRX de la CPAM

La poliacrilamida catiónica presenta mayor cantidad de picos que la aniónica, lo que indica que es más cristalina, además de la mayor intensidad observada para la CPAM. La estructura de ambas poliacrilamidas es muy parecida.

**3.3.6.5. Ensayo de Calorimetría Diferencial de Barrido: DSC**

Para realizar el ensayo de calorimetría diferencial de barrido (DSC) se colocan las muestras del polímero en pequeñas cápsulas cerradas de aluminio. El aluminio es estable hasta la temperatura final del ensayo, por lo tanto, no reacciona con el polímero. Las cápsulas se sellan con una tapa para obtener una repartición homogénea del calor. El peso debe estar entre 3 mg y 5 mg; se imponen la velocidad de calentamiento y el tiempo total de calentamiento. En el caso particular de un material polimérico, el ensayo de DSC permite identificar las temperaturas de transición vítrea  $T_g$  y de fusión  $T_f$ . Estas indican en qué rango de temperaturas se puede trabajar con el polímero. En efecto, por debajo de  $T_g$  el material se encuentra en el estado vítreo. Al pasar encima de  $T_g$ , se vuelve gomoso, es decir más deformable. En el caso del uso para un relleno sanitario, es importante conocer estos valores ya que determinan el comportamiento mecánico del polímero, con respecto a la temperatura, por ejemplo su capacidad de deformación.

Algunas referencias de literatura [30] concluyeron que la temperatura de fusión se puede encontrar a  $T_f=237^\circ\text{C}$  para muestras de Poliacrilamida no iónica. Por otra parte la  $T_g$  se encontró a un valor de  $161^\circ\text{C}$  con muestras de films de PAM.

Una investigación [21] consistió en ensayar soluciones de Poliacrilamida determinando que la transición vítrea ocurre entre  $58.05^\circ\text{C}$  y  $62.39^\circ\text{C}$ .

**Calentamiento-Enfriamiento-Calentamiento** La etapa de enfriamiento lento de la muestra permite borrar la historia térmica del material y aclarar los fenómenos que ocurren al calentamiento, por ejemplo ver si hay una fase cristalina.

**Poliacrilamida aniónica** Los datos del ensayo se encuentra en el Cuadro N° 3.3.6.

Parámetro	Valores	Etapas
Atmósfera	Nitrógeno	
Caudal de gas	30 mL/min	
Tipo de soporte	Aluminio	
Peso muestra	4,400 mg	
Velocidad de calentamiento/enfriamiento	10 °C/min	
Temp. T0	45,0°C	
Temp. T1	205,0 °C	Calentamiento 1
Temp. T2	44,0°C	Enfriamiento
Temp. T3	210,0°C	Calentamiento 2

Cuadro 3.3.6: Parámetros del DSC para la APAM

Etapas:

- T0= 25°C a T1=205°C: primer rampa de calentamiento, con una velocidad de +10°C/min
- T1=205°C a T2=44°C: rampa de enfriamiento con una velocidad de -10°C/min
- T2=44°C a T3=210°C: segunda rampa de calentamiento a +10°C/min

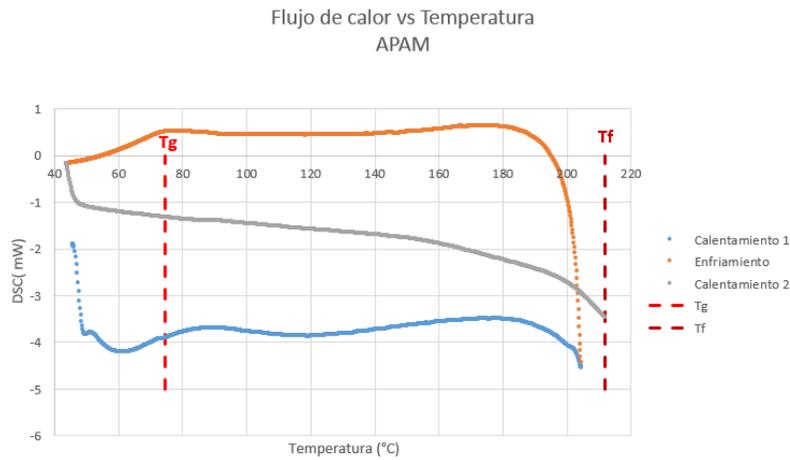


Figura 3.3.14: DSC del APAM

En los tres casos de Poliacrilamida aniónica (Figura N° 3.3.14), podemos observar la temperatura de transición vítrea Tg (indicada por un pico hacia abajo) y las etapas de calentamiento inicial y de enfriamiento. Después de haber fundido todos los cristales al someter la muestra a una temperatura igual a la temperatura de fusión (Tf), se procede al enfriamiento lento, para permitir la formación de la mayor parte de los cristales. El fenómeno de transición vítrea es menos claro durante el segundo calentamiento; una hipótesis es que la velocidad de enfriamiento permite a todos los cristales formarse, y que, debido a esto, la parte amorfa es menor que durante el primer calentamiento. Como la transición vítrea se refiere a la parte amorfa, eso explica la causa de por qué es difícil determinarla al fin del proceso.

Además la temperatura de fusión se ve más claramente durante el segundo calentamiento, denominado "Calentamiento 2" en la Figura.

Los valores experimentales se ven en el Cuadro N° 3.3.7.

Temperatura	Promedio
Tg exp (°C)	84,5
Tf exp (°C)	225,6

Cuadro 3.3.7: Valores promedios de Tg y Tf de la APAM

**Poliacrilamida catiónica** El ensayo se repite tres veces para la CPAM, se muestra uno de los resultados en la Figura N° 3.3.15.

Los datos del ensayo se encuentra en el Cuadro N°3.3.8.

Parámetro	Valores	Etapas
Atmósfera	Nitrógeno	
Caudal de gas	30 mL/min	
Tipo de soporte	Aluminio	
Peso muestra	4,400 mg	
Velocidad de calentamiento/enfriamiento	10 °C/min	
Temp. T0	25,0°C	
Temp. T1	250,0 °C	Calentamiento 1
Temp. T2	45,0°C	Enfriamiento
Temp. T3	252,0°C	Calentamiento 2

Cuadro 3.3.8: Parámetros del DSC CPAM

Etapas:

- T0= 25°C a T1=250°C: primer rampa de calentamiento, con una velocidad de +10°C/min
- T1=250°C a T2=45°C: rampa de enfriamiento con una velocidad de -10°C/min
- T2=45°C a T3=252°C: segunda rampa de calentamiento a +10°C/min

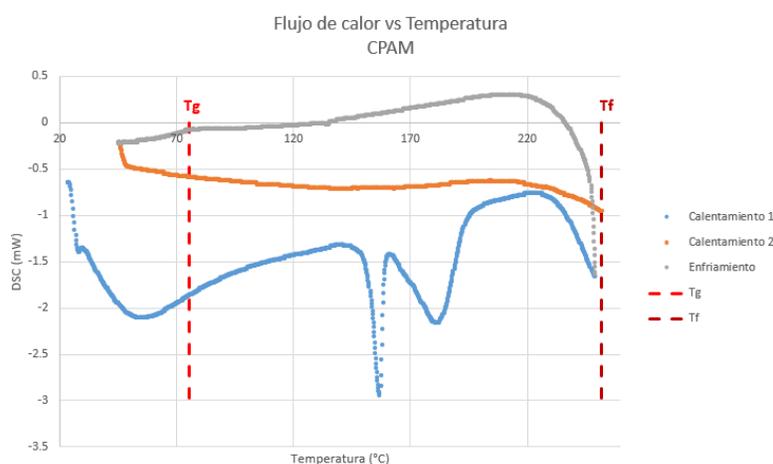


Figura 3.3.15: DSC de la CPAM

Los gráficos de CPAM presentan grandes picos durante el primer calentamiento. Las temperaturas características se encuentran durante la fase final de calentamiento.

Temperatura	Promedio
Tg exp (°C)	91,6
Tf exp (°C)	251,8

Cuadro 3.3.9: Valores promedios de Tg y Tf de la APAM

La temperatura de fusión de ambos tipos de Poliacrilamida se sitúa por encima de 250°C en promedio. Durante los ensayos con mezcla suelo-polímero, se admite que el secado al horno a 110°C no afecta el comportamiento del polímero.

# Capítulo 4

## Mezclas: Suelo - Polímero

### Introducción:

El programa experimental de este trabajo busca estudiar como la incorporación de poliacrilamida aniónica (APAM) afecta las propiedades de los suelos finos y granulares. El diseño de mezclas que puedan ser utilizadas como barreras compactadas impermeables inferiores en rellenos sanitarios y en rellenos de cobertura cuando se dispone el cierre del mismo ha sido el objetivo fundamental de este grupo de ensayos de laboratorio. En esta sesión se presentan una serie de ensayos para la caracterización física, hidráulica y mecánica de los materiales constituyentes de las mezclas diseñadas. Estas mezclas se constituyeron por una arcilla natural de origen marino, un arena de río y el polímero. El estudio de la mezclas tuvo como objetivo comprender la interacción del polímero y la arcilla y el efecto del polímero en una mezcla óptima de arena-arcilla. Todos los ensayos que se presentan tiene una breve introducción de las metodologías seguidas y los resultados obtenidos. El análisis de resultados se presenta en el capítulo siguiente.

### 4.1. Caracterización de la mezcla Arcilla + APAM

Para el estudio de la interacción de suelos finos y el polímero se adoptaron dos porcentajes en peso diferentes del polímero: 0,5 % y 1,5 %. La elección de estos porcentajes se basó en la búsqueda bibliográfica realizada. A estas dos mezclas se les realizaron ensayos físicos para caracterizar como modifica su plasticidad, la agregación de partículas, ensayos de compactación para estudiar como se modifican la densidad máxima y la humedad óptima para su colocación en campo, ensayos de hinchamiento libre y consolidación para estudiar la expansividad, la presión de hinchamiento y los parámetros de deformabilidad ante carga, ensayos de caracterización hidráulica para evaluar la conductividad hidráulica, la capacidad de retención de agua de las muestras arcilla-polímero. Por último se estudio la microestructura de las mezclas con dos técnicas que apuntan a entender los mecanismos de interacción a escala meso y microporal.

#### 4.1.1. Caracterización mezcla arcilla + APAM 0,5 %

##### 4.1.1.1. Elección y preparación de la mezcla

La primer parte del proyecto se realizó adoptando un porcentaje de 0,5 % de polímero. Este porcentaje es tomado en peso de arcilla seca a estufa. Por lo tanto para realizar la mezcla primero se debe secar a estufa la arcilla, luego pesarla y en base a ese peso se agrega el 0,5 % en peso de polímero.

La primer mezcla a analizar está compuesta como se indica en la Cuadro N<sup>o</sup> 4.1.1. Se decidió realizar el proyecto con APAM por las notificaciones de toxicidad de CPAM reportadas en

publicaciones y hoja técnica.

Material	Arcilla	APAM
Proporción en peso	99,5 %	0,5 %
Estado	seco al horno	polvo protegido de la humedad

Cuadro 4.1.1: Proporciones de la mezcla experimental

Una vez combinados los dos materiales se debe mezclar para que el polímero se difunda en toda la arcilla, luego, se agrega la cantidad de agua necesaria para llegar a la humedad objetivo, teniendo la precaución de proporcionarla en cantidades controladas y con mezclado continuo.

**Observaciones** La mezcla de arcilla y polímero es homogénea al ser seca.

Al agregarle agua, se observan hilos blancos que provienen de la hidratación de la poliacrilamida y de la formación de un gel. Al aumentar el contenido de agua, el material forma lajas resbaladizas, como se ve en la Figura N° 4.1.1. Después de un cierto contenido de humedad, el material tiene la consistencia de una espuma, aumentando su volumen. Esa consistencia se ve en la Figura N° 4.1.2.



Figura 4.1.1: Material formando lajas



Figura 4.1.2: Material con consistencia de espuma

A esta mezcla se le realizaron ensayos utilizando las Normas ASTM al igual que los demás suelos. Se tuvo el cuidado correspondiente en la utilización y limpieza de equipos y elementos de laboratorio, ya que en caso de quedar polímero en los equipos o elementos, este puede influir en los resultados de ensayos futuros.

#### 4.1.1.2. Ensayos físicos

##### Límites Atterberg

Se obtuvo  $LL = 150\%$ . Se nota un gran aumento de este valor, (para la arcilla en estado natural  $LL=80\%$ ) lo cual indica una mayor capacidad de absorción de agua.

En este caso, se obtuvo que el  $LP = 50\%$

En cuanto al índice de plasticidad:  $IP = LL - LP = 100$  Como puede verse, se incrementó el IP, lo que representa una mayor plasticidad de la mezcla en comparación con la arcilla no modificada ( $IP=40$ ). Se observan “filamentos blancos” al formar los cilindros del ensayo, como se ve en la Figura 4.1.3.



Figura 4.1.3: Material formando hilos

Los resultados de estos límites nos indican que para alcanzar una consistencia similar a la obtenida con arcilla sola, se debe agregar más agua a la mezcla, fenómeno que se puede visualizar rápidamente al realizar la mezcla y agregar agua.

Para determinar el límite de contracción se procedió de igual forma que con la arcilla sola, obteniendo  $LC = 16,3\%$

#### 4.1.1.3. Ensayos de comportamiento mecánico

##### Proctor estándar - Norma ASTM D698\_00

Siguiendo la norma ASTM D698\_00, se obtiene la curva de la Figura N° 4.1.4.

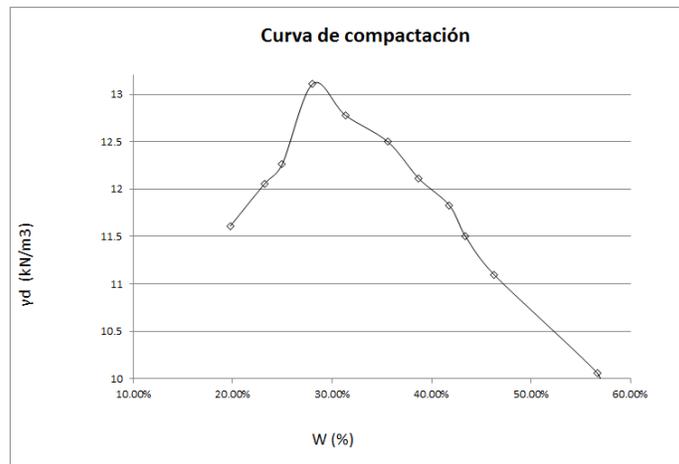


Figura 4.1.4: Curva Proctor estándar para la arcilla modificada con 0,5 % de APAM

Según los resultados experimentales, el óptimo de compactación corresponde a una humedad de  $\omega = 28,1\%$  para  $\gamma_d = 13,11\text{kN/m}^3$ .

**Consolidación - Hinchamiento libre**

Se realizan dos ensayos con humedades diferentes, tomamos una humedad en la rama seca y otra en rama húmeda, respecto de la curva proctor (Figura N° 4.1.4)

- Rama seca:  $w < w_{opt}$
- Rama húmeda:  $w > w_{opt}$

Las muestras se ensayan al mismo tiempo en edómetros en paralelo con cargas iguales. Al inicio del ensayo se las inunda con agua destilada y se espera a que las probetas se saturen, por lo que la APAM tiene tendencia a absorber una gran cantidad de agua. Se prestará atención al hecho de que permanezca agua en las probetas a lo largo del ensayo.

Antes de cargar la muestra, se la deja hinchar inundada completamente con una precarga de 5kPa. La fase de hinchamiento libre tarda 6 días, para poder comparar con la arcilla sola. Los valores finales de hinchamiento se ven en el Cuadro N° 4.1.3.

**Escalones de carga - Consolidación** Los escalones de carga se ven en el Cuadro N° 4.1.2.

Escalón	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Etapa	Precarga	Carga						Descarga	
Tensión vertical (kPa)	5,0	50,1	107,0	219,3	444,9	896	1472,5	444,9	107,0

Cuadro 4.1.2: Escalones de carga para el ensayo de presión de hinchamiento

Los resultados se muestran en la Cuadro N° 4.1.3. Después del ensayo se pueden definir:

- el índice de vacíos inicial ( $e_0$ ) y final ( $e_f$ ) con  $e = \frac{V_v}{V_s}$
- el grado de saturación inicial ( $Sr_0$ ) y final ( $Sr_f$ ) con  $Sr = \frac{V_w}{V_v}$
- la densidad inicial  $\gamma_d$

- el contenido de humedad inicial ( $w_0$ ) y final ( $w_f$ )

Rama	$w_0$	Hinchamiento final bajo precarga	$w_f$	$e_0$	$e_f$	$Sr_0$	$\gamma_d$
Seca	24,78 %	16,19 %	40,52 %	1,22	0,96	54,79 %	11,93 kN/m <sup>3</sup>
Húmeda	36,25 %	17,97 %	38,08 %	1,16	0,90	84,53 %	12,28 kN/m <sup>3</sup>

Cuadro 4.1.3: Características de las muestras de Arcilla-APAM 0,5 %

Según estos resultados se construyen las siguientes curvas:

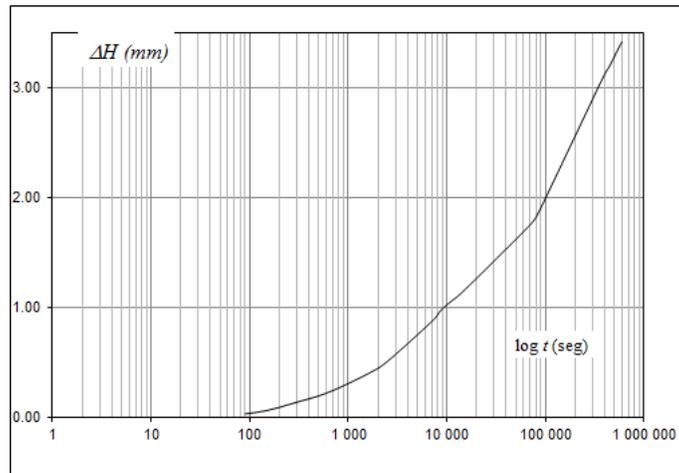


Figura 4.1.5: Curva de hinchamiento libre muestra seca - Arcilla-APAM 0,5 %

**Rama seca** En la Figura N° 4.1.5 se puede ver en el tramo 0-20.000 segundos el hinchamiento primario y luego la etapa de hinchamiento secundario.

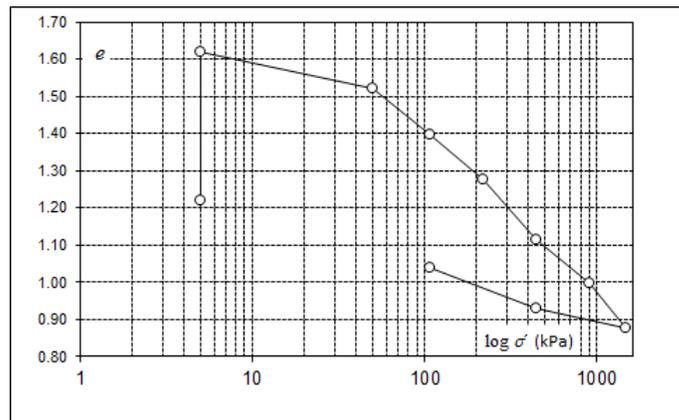


Figura 4.1.6: Curva de compresibilidad de la muestra seca - Arcilla-APAM 0,5 %

En la curva de compresibilidad de la Figura N° 4.1.6 se distinguen varias etapas; la primera rama vertical, sin variación de tensión corresponde a la fase hinchamiento libre con aumento del índice de vacíos. Después, el índice de vacíos disminuye por la compactación debida a las cargas crecientes. Finalmente, la descarga se visualiza como un aumento del índice de vacíos.

Por construcción gráfica se determinan los valores de índices de hinchamiento, compresión y la tensión de preconsolidación como se ve en el Cuadro N° 3.1.22.

Parámetro	$C_c$	$C_s$	$\sigma'_p$	$\sigma'_{sp}$
Arcilla + APAM 0,5 %	0.43	0.14	60 kPa	290 kPa
Arcilla	0.32	0.08	56 kPa	660 kPa

Cuadro 4.1.4: Índices de compresión y de hinchamiento para muestra de rama seca- Arcilla-APAM 0,5 %

**Rama húmeda** En la curva de la Figura N° 4.1.7 se identifican también las zonas de hinchamiento, primario y secundario.

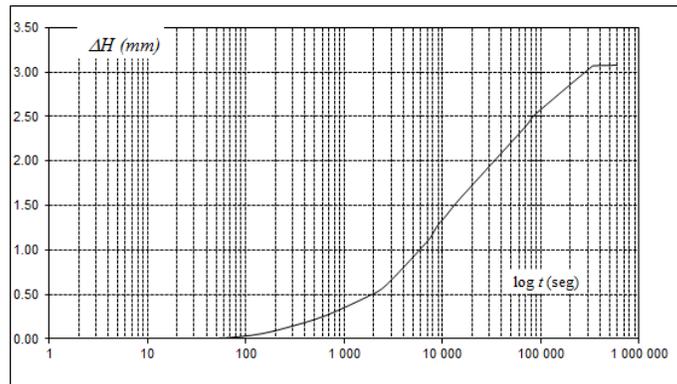


Figura 4.1.7: Curva de hinchamiento libre muestra húmeda- Arcilla-APAM 0,5 %

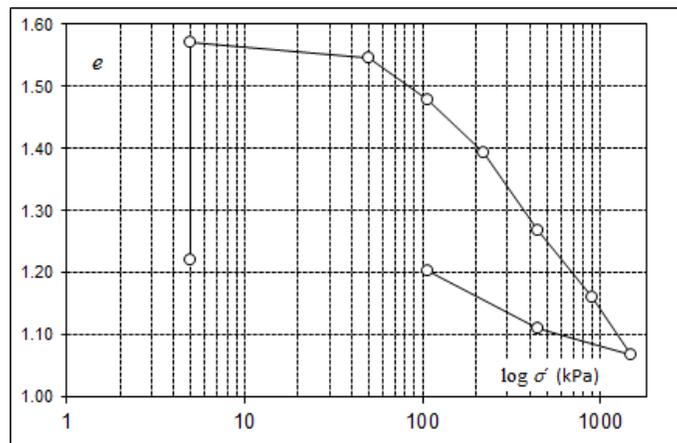


Figura 4.1.8: Curva de compresibilidad de la muestra húmeda- Arcilla-APAM 0,5 %

Parámetro	$C_c$	$C_s$	$\sigma'_p$	$\sigma'_{sp}$
Arcilla + APAM 0,5 %	0.34	0.12	70 kPa	600 kPa
Arcilla húmeda	0.26	0.10	57 kPa	710 kPa

Cuadro 4.1.5: Índices de compresión y de hinchamiento para la muestra húmeda- Arcilla-APAM 0,5 %

Se nota que la tensión de hinchamiento para la muestra húmeda es 52 % mayor a la de la muestra seca, es decir que su potencial de hinchamiento es mayor.

#### 4.1.1.4. Ensayos de caracterización hidráulica

##### Ensayo de permeabilidad - Norma ASTM D5084\_00

El valor de conductividad hidráulica de  $k = 2,10^{-11}m/s$  . Entonces el orden de magnitud de permeabilidad del suelo modificado con APAM es similar al valor sin APAM de  $k = 2,7.10^{-11}m/s$  . Eso significa que la Poliacrilamida aniónica para el porcentaje estudiado en el presente trabajo no actúa significativamente sobre la permeabilidad del material, es decir que no cambia la configuración de conexión de los poros.

##### Medición de succión con técnica de papel de filtro- Norma ASTM D5298\_03

El ensayo de succión con mezcla arcilla-polímero permite determinar si el agregado de polímero cambia las propiedades de la arcilla, sobre todo a nivel de organización de poros. El procedimiento del ensayo ya se explico en 3.1.3.2.

**Procedimiento** Se realizaron cuatro ensayos, cada muestra se compactó con una densidad y una humedad tal que corresponde a un punto del Proctor estándar.

**Calibración de las curvas de los papeles filtros** Se utiliza la curva de calibración de la Figura N° 3.1.27.

**Resultados obtenidos** En el Cuadro N° 4.1.6 se muestran los resultados, indicando la succión total  $\psi$  y la matricial  $(u_a - u_w)$  .

N°	$\omega$ [%]	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\psi$ [kPa]		$(u_a - u_w)$ [kPa]
1	26.6	12.20	7565	8760	3632
2	29.38	12.96	8758	7237	889
3	29.6	12.55	5815	67340	390
4	54.8	10.30	2698	2168	13

Cuadro 4.1.6: Datos experimentales Arcilla + APAM 0,5 %

Los datos experimentales de la arcilla con la incorporación de 0,5 % de APAM no presentan una gran dispersión con respecto a los valores experimentales de la arcilla sola. En la Figura N° 4.1.9 se muestra los datos experimentales en conjunto con el modelo de la curva de retención de Van Genuchten calibrado con los datos experimentales de la arcilla. Por lo que se considera que la incorporación de polímero en las proporciones indicadas no afecta las propiedades de retención de agua de la mezcla respecto a la arcilla sola.

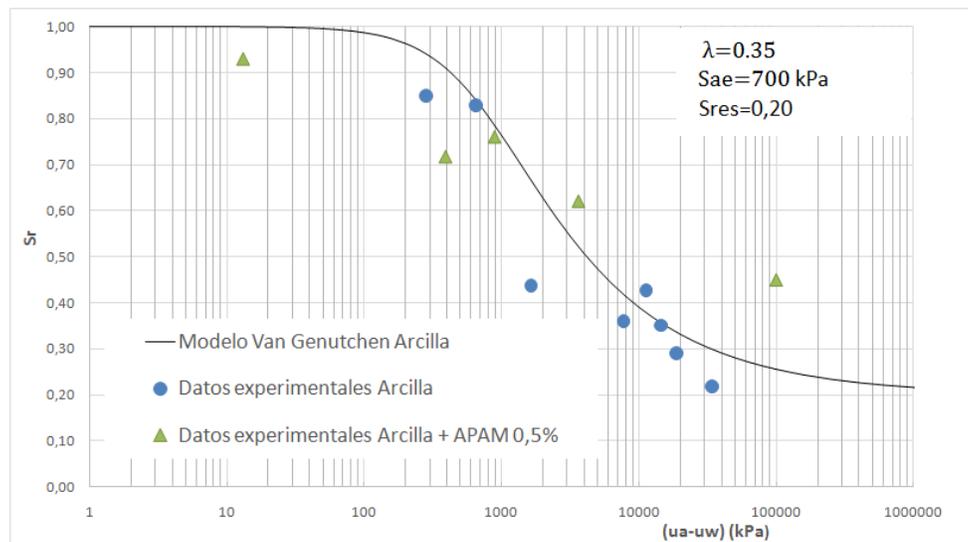


Figura 4.1.9: Curva de retención de arcilla + APAM 0,5 %

**4.1.1.5. Ensayos de composición y caracterización de la microestructura**

La preparación previa a estos ensayos es igual a la mencionada en 3.1.4.4.

**Ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio**

Se pueden ver los resultados en las Figuras N° 4.1.10 y 4.1.11.

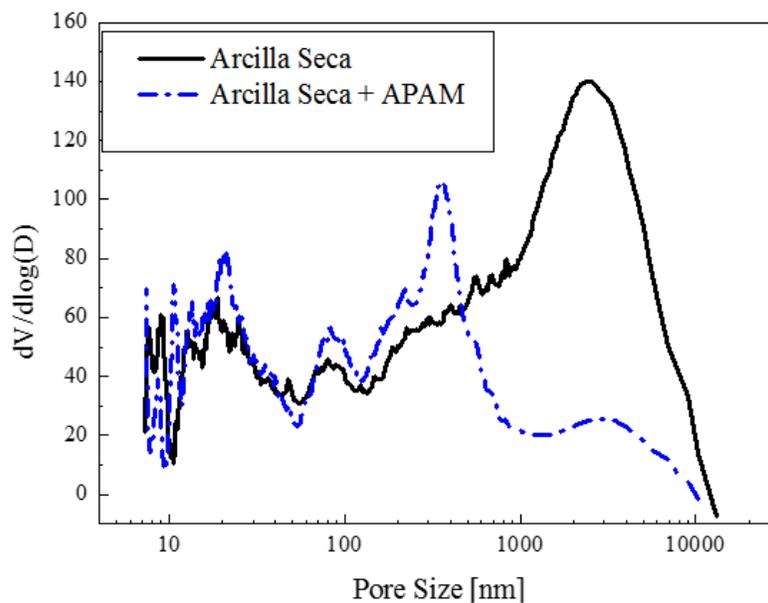


Figura 4.1.10: Porosimetría de mercurio, muestra seca.- Arcilla-APAM 0,5 % y Arcilla

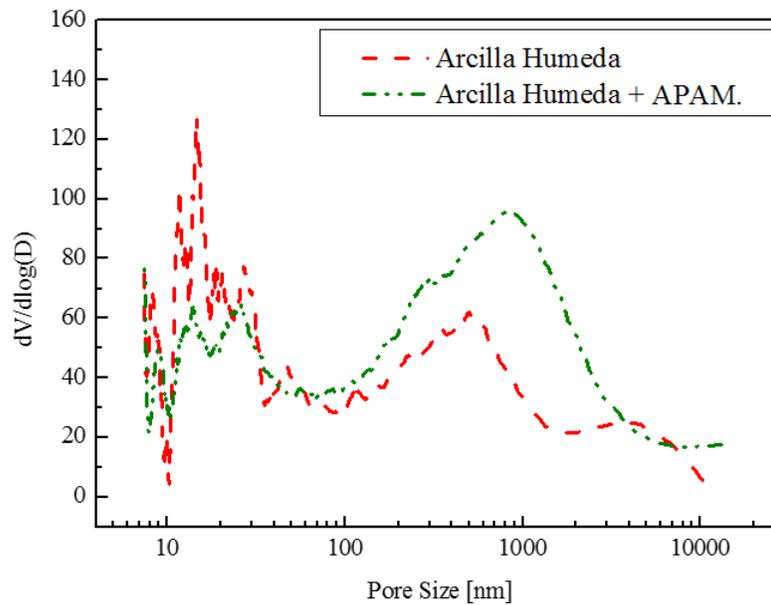


Figura 4.1.11: Porosimetría de mercurio, muestra húmeda- Arcilla-APAM 0,5 % y Arcilla .

Ambas porosimetrías poseen rangos similares, en Análisis de Resultados se compararán los resultados con la arcilla natural.

#### Microscopía electrónica de barrido (SEM)

**Procedimiento** La muestra liofilizada se deposita en un soporte circular metálico, mediante cinta de carbono. Tanto para la muestra seca (con humedad inicial antes de liofilización inferior a la humedad del punto Proctor óptimo) y húmeda (humedad inicial superior a la humedad del punto óptimo) se observan similares características en la disposición de sus láminas, (Figura N° 4.1.12).

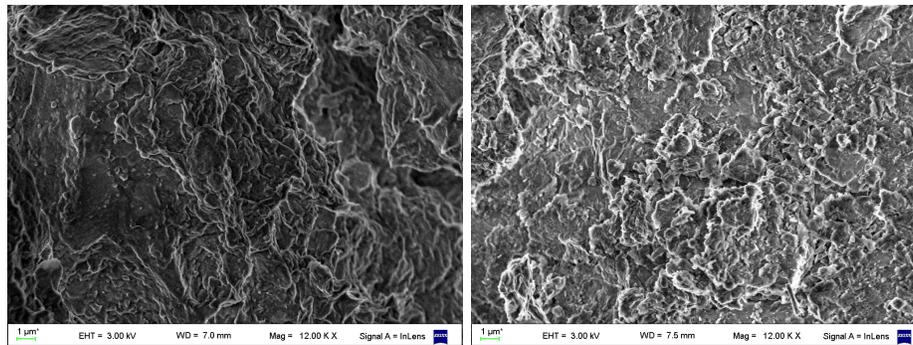


Figura 4.1.12: Arcilla con APAM 0,5 %, foto 1-seca (izquierda) y foto 2-húmeda (derecha), escala 1  $\mu\text{m}$ - Magnificación 12.00 KX

En la Figura N° 4.1.12 se observan las láminas de arcilla distribuidas según distintas direcciones. Se observa que las láminas son más suaves, es decir con contornos menos angulosos. Junto con la presencia de laminas más finas con forma de agujas, esos elementos pueden indicar la presencia del polímero.

No obstante, se vieron detalles diferentes para las muestras, que se presentan en las Figuras N° 4.1.13 (muestra seca) y 4.1.14 (muestra húmeda).

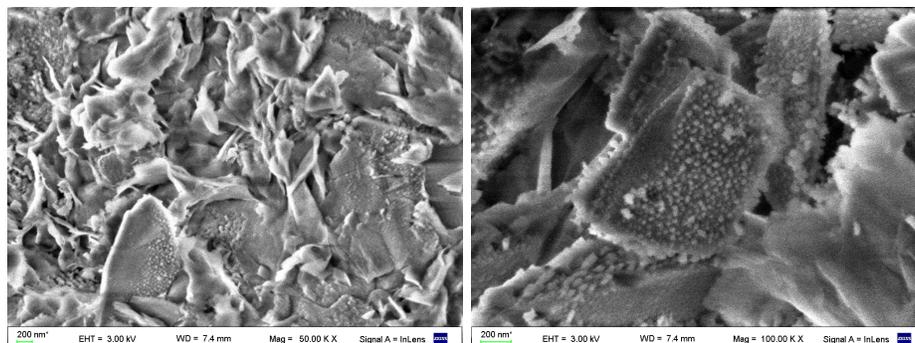


Figura 4.1.13: Arcilla Seca con APAM 0,5 %: (izquierda) Escala 200 nm- Magnificación 50.00 KX - (derecha) zoom Escala 200 nm - Magnificación 100.00 KX

**Muestra seca** Las partículas que se ven en la Figura N° 4.1.13 se encontraron en zonas puntuales de la muestra, es decir, no se las encontró distribuidas por toda la muestra. Consisten en pequeñas partículas pegadas a la superficie de la arcilla. Como éstas no se observan en toda la muestra, se pueden realizar varias hipótesis. La primera es que debido a que la arcilla es extraída de la zona de Chubut puede contener impurezas de origen natural. La segunda hipótesis es que son de tipo polimérico. En este caso, significaría que el polímero actúa pegándose a las láminas de arcilla y absorbe agua antes que alcance las láminas arcillosas, funcionando como una capa suplementaria. La presencia heterogenea de esos cuerpos se puede explicar por una mezcla irregular de la mezcla arcilla-polímero. Por otra parte, en la foto de la izquierda de la Figura N° 4.1.13 se pueden ver los contornos de las laminas.

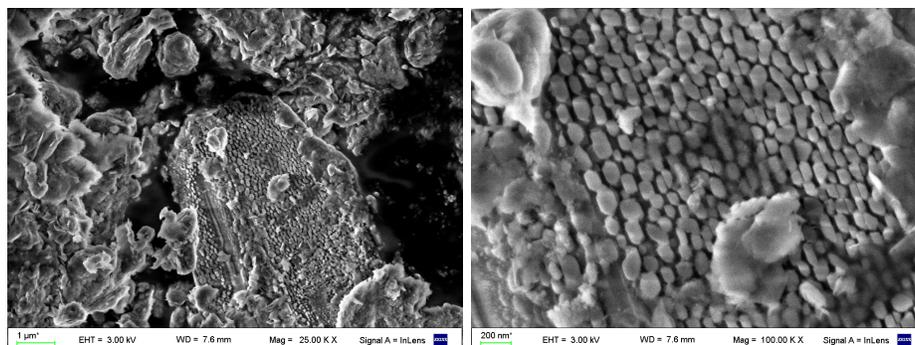


Figura 4.1.14: Arcilla húmeda con APAM 0,5 %

**Muestra húmeda** Las partículas de la Figura N° 4.1.14 están cercanas entre ellas y más organizadas, es decir que se encuentran paralelas con una forma regular

Se obtuvieron imágenes del estudio de Trispolast® [[34]], que determinó por ESEM la interacción bentonita-polímero (Figura N° 4.1.15 ). El material polimérico se nota por la presencia de hilos que destacan los enlaces entre la bentonita y el polímero.

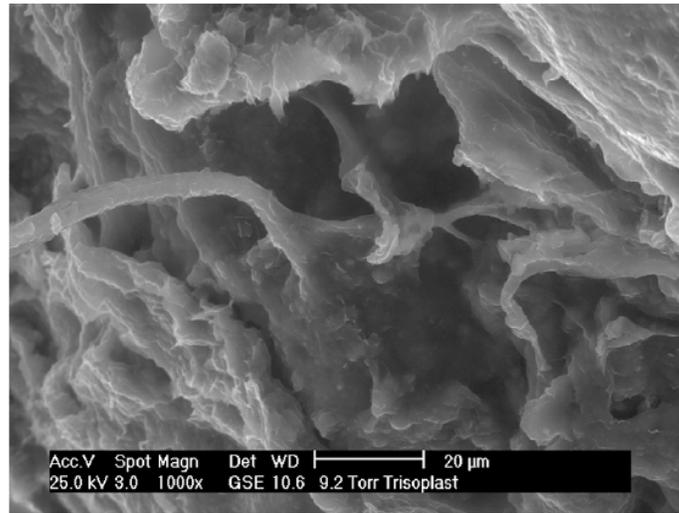


Figura 4.1.15: Imágenes de una mezcla arena-bentonita-polímero, según [34]

Para concluir, aunque se vio diferencias entre el suelo natural y el suelo mezclado con APAM, éstas se encuentran en forma puntual en algunas zonas de la muestra, con lo cual, no se puede dar una conclusión global de la muestra.

**4.1.2. Caracterización mezcla arcilla + APAM 1,5 %**

La segunda mezcla que se estudió en este trabajo en la incorporación de 1,5 % en peso de poliacrilamida anionica. La mezcla se realizará en seco con la arcilla tamizada por el tamiz N<sup>o</sup> 10. La incorporación de agua se realizó posteriormente a que se observe que ambos polvos estaban adecuadamente mezclados.

Como se explicó anteriormente, los resultados obtenidos con la mezcla Arcilla + APAM 0,5 % no eran los esperados en este trabajo, aún así, se vieron cambios positivos, por lo que se determinó aumentar el porcentaje de polímero, para analizar si finalmente se puede obtener un material con las características buscadas.

EL mezclado se realiza al igual que para arcilla y APAM en 0,5 %, se pueden ver los porcentajes de ambos materiales en el Cuadro N<sup>o</sup> 4.1.7.

Material	Arcilla	APAM
Proporción en peso	98,5 %	1,5 %
Estado	seco al horno	polvo protegido de la humedad

Cuadro 4.1.7: Proporciones de la mezcla experimental - Arcilla - APAM 1,5 %

**4.1.2.1. Ensayos físicos**

Los límites de Atterberg para este porcentaje de polímero en la arcilla resultaron:

LL: 170 %

LP: 60 %

Con lo cual el índice de plasticidad obtenido es: IP: 110.

**4.1.2.2. Ensayos de comportamiento mecánico**

**Ensayo Proctor normal**

La curva Proctor resultante se presenta en la Figura N<sup>o</sup> 4.1.16.

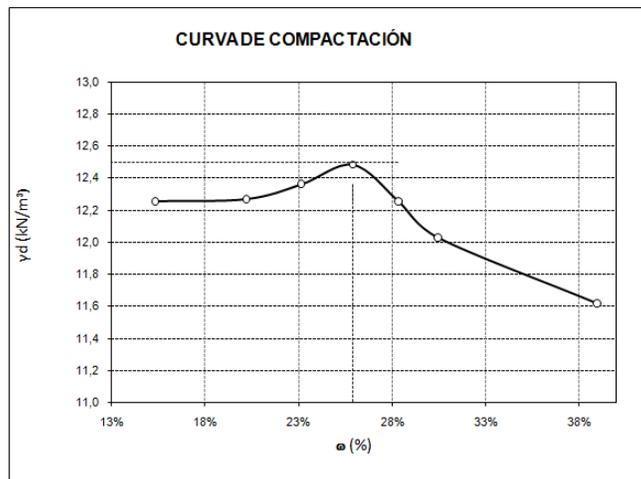


Figura 4.1.16: Curva Proctor Arcilla + APAM 1,5 %

El punto óptimo de compactación se encuentra a una densidad de 12,5 kN/m<sup>3</sup> con 25,9 % de humedad.

**Hinchamiento libre - Consolidación uniaxial**

Las características de la muestra ensayada se presentan en el Cuadro N° 4.1.8.

Muestra	$w_0$	Hinchamiento final	$w_f$	$e_0$	$e_f$	$Sr_0$	$\gamma_d$
1	28,1 %	49,34 %	49,6 %	1,01	1,26	76,14 %	13,05 $kN/m^3$

Cuadro 4.1.8: Características de las muestras de - Arcilla - APAM 1,5 %

**Hinchamiento libre**

El hinchamiento libre resultante es del 49,34 % este gran hinchamiento se debe a que ambos materiales empleados en la mezcla tienen carácter expansivo en contacto con agua, la arcilla por sus minerales de montmorillonita, y el polímero por ser hidrofílico.

**Consolidación uniaxial**

Los escalones de carga utilizados se ven en el Cuadro N° 4.1.9.

Escalón	1	2	3	4	5	6
Etapa	Precarga	Carga				
Tensión vertical (kPa)	5,0	55,1	156,6	325,8	664,2	1342,3

Cuadro 4.1.9: Escalones de carga para el ensayo de presión de hinchamiento

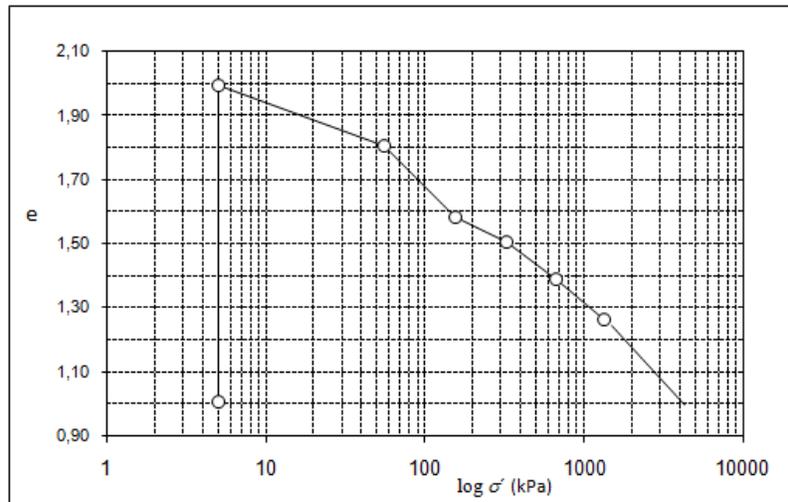


Figura 4.1.17: Curva de compresibilidad arcilla + APAM 1,5 %

Se presentan los resultados en el Cuadro N° 4.1.10.

Parámetro	$C_c$	$C_s$	$\sigma'_p$	$\sigma'_{sp}$
Valor	0,34	0,18	55 kPa	1300 kPa

Cuadro 4.1.10: Índices de compresión e hinchamiento - Arcilla - APAM 1,5 %

**4.1.2.3. Ensayos de caracterización hidráulica**

**Ensayo de permeabilidad**

Se obtuvo el coeficiente de permeabilidad  $k = 1,5 \cdot 10^{-11} m/s$ , este valor bajo indica que la mezcla es un material con alta impermeabilización.

**Medición de succión mediante la técnica del papel filtro**

Siguiendo los lineamientos explicados en 3.1.3.2, se obtuvo la curva de retención de agua para la mezcla en estudio, en el Cuadro N° 4.1.11 y Figura N° 4.1.18 se pueden visualizar los resultados:

Muestra	$\omega$ (%)	$\gamma_d$ ( $\frac{kN}{m^3}$ )	$S_r$	$\psi$ (kPa) Arriba	$\psi$ (kPa) Abajo	$(u_a - u_w)$ (kPa)
M1	26	11,8	0,58	15372	16401	8531
M2	28	11,8	0,61	16175	15557	9038
M3	30	11,8	0,66	14237	10311	4499
M4	33	11,8	0,72	11206	12210	4050
M5	38	11,8	0,83	10401	9967	2591

Cuadro 4.1.11: Datos experimentales Arcilla + APAM 1,5 %

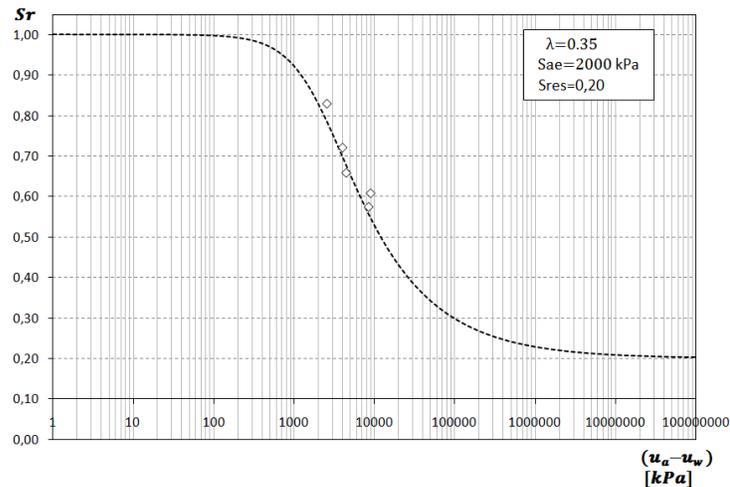


Figura 4.1.18: Curva de retención de la arcilla + APAM 1,5 %

Como se puede ver, la pendiente de la curva es pronunciada, esto se traduce en el parámetro  $\lambda=0,35$  e indica que la distribución de poros es uniforme, es decir, los poros son de tamaño constante.

También se observa un alto valor de entrada de aire  $s_{ae} = 2000kPa$ , éste es el valor de succión mátrica que debe superarse para que el aire ingrese a los poros y el suelo comience a desaturarse, con lo cual, se podría concluir que la retención del agua en el interior de los poros es mucho mayor, y la desaturación del suelo se ve aletargada. El grado de saturación residual  $S_{res}$  en este caso es de 0,2.

#### 4.1.2.4. Ensayos de composición y caracterización de la microestructura

##### Ensayo de microscopía electrónica de barrido

Se realizó el SEM de esta mezcla, para ello se compactó una muestra a densidad y humedad óptima, las imágenes obtenidas muestran claramente al polímero, tanto en forma de superficie (Figura N° 4.1.19), como en forma lineal, según la Figura N° 4.1.20.

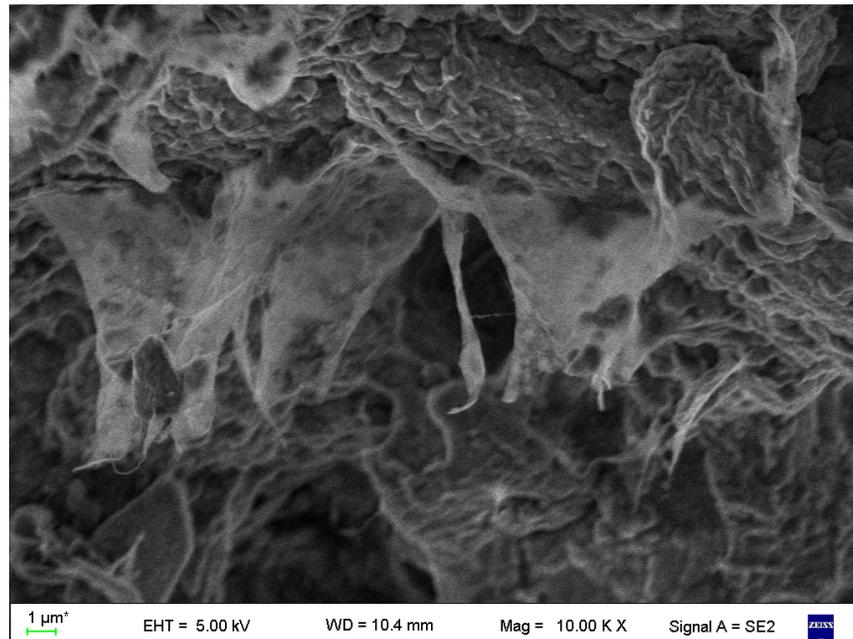


Figura 4.1.19: SEM Mezcla 1,5 % APAM

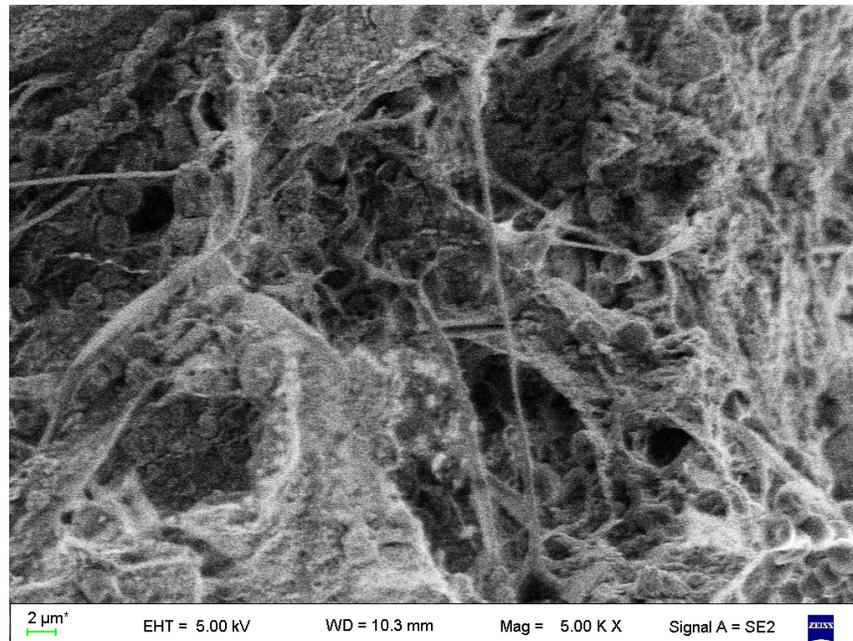


Figura 4.1.20: SEM Mezcla 1,5 % APAM

La forma en que se encuentra el polímero depende del mezclado que se le ha aplicado, cuanto más homogénea sea la mezcla, se verá como la Figura N° 4.1.19, el polímero se dispersa en toda la superficie de la arcilla.

## 4.2. Caracterización de la mezcla Arena-Arcilla-Polímero

En esta sección estudiamos dos aspectos que podrían ser de utilidad para el uso de estos materiales como barreras impermeables en rellenos sanitarios. El primero caracterizar la mezcla arena-arcilla para establecer las proporciones óptimas de ambas para el uso como material compactado en ingeniería civil. Los resultados de la sección anterior muestran que la mezcla arcilla y APAM en proporciones iguales a 1,5 % modifican claramente la capacidad de retención de agua de la arcilla, la conductividad hidráulica y sus propiedades mecánicas. El segundo aspecto es como la mezcla arena arcilla polímero modifica la deformabilidad y resistencia del material. Estos aspectos son fundamentales para el uso de estos materiales en las coberturas de los rellenos sanitarios que presentan pendientes variables según el tipo de residuo a disponer.

### 4.2.1. Estudio de optimización de mezclas

El objetivo de este estudio es buscar una mezcla arena - arcilla que en estado compactado nos de la mayor densidad seca máxima posible, incremente su resistencia al corte y tenga valores razonables de conductividad hidráulica para el uso ingenieríl que se esta buscando. El porcentaje de polímero incorporado a la arcilla se mantuvo constante e igual a 1,5 %.

Las muestras se prepararon con la siguiente secuencia: *i*) se mezcla la arcilla con el polímero *ii*) Se va agregando y mezclando a la arena para lograr homogeneidad.

Las mezclas estudiadas están discriminadas en el Cuadro N° 4.2.1. Se puede ver que la cantidad de APAM es fija (1,5 %) de la cantidad de arcilla que se agrega.

Mezcla	Arena	Arcilla + APAM 1,5 %
M1	100 %	-
M2	95 %	5 %
M3	90 %	10 %
M4	85 %	15 %
M5	80 %	20 %
M6	60 %	40 %
M7	-	100 %

Cuadro 4.2.1: Composición de las mezclas

Como se mencionó anteriormente, se desea seleccionar aquella mezcla que tenga la mayor densidad óptima. Por este motivo, se realizo el ensayo proctor normal con las mezclas mencionadas, los resultados se presentan en la Figura N° 4.2.1.

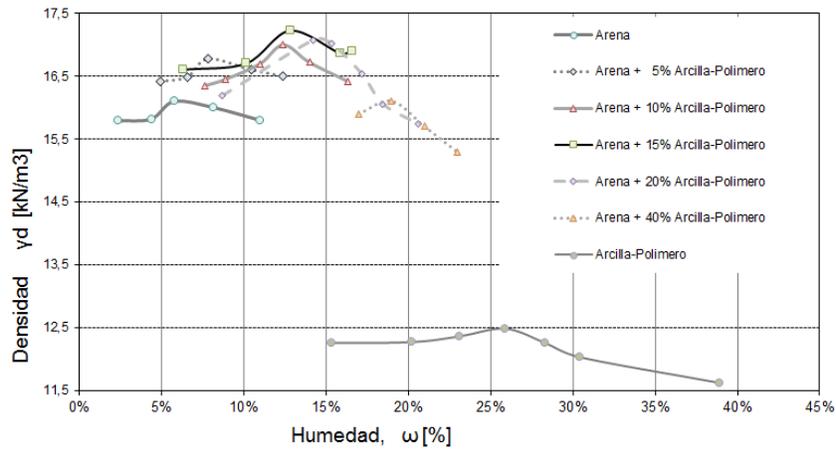


Figura 4.2.1: Estudio de mezclas

Para poder seleccionar la mezcla óptima se realizó la Figura N° 4.2.2, en la que se visualiza la máxima densidad seca según el porcentaje de mezcla arcilla y polímero adicionada a la arena.

La mezcla óptima, es decir, aquella que tiene mayor densidad seca, es la mezcla M4, compuesta por 85 % de arena y 15 % de arcilla y polímero. Esta mezcla tiene un punto óptimo con una densidad de 17,23 kN/m<sup>3</sup> y ω = 12,82 % .

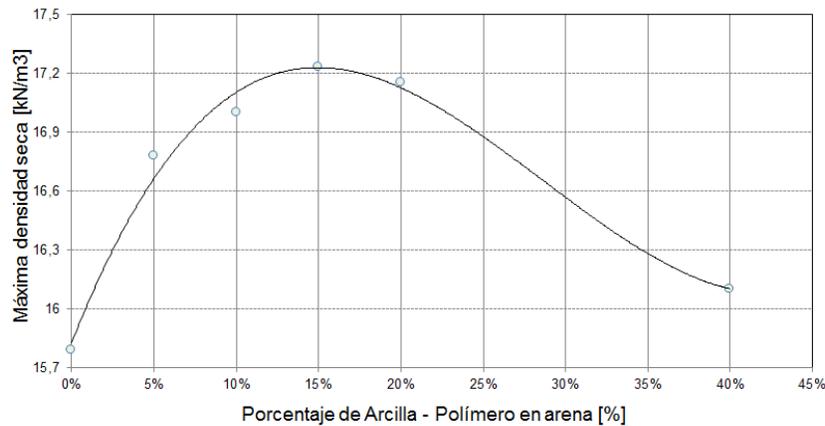


Figura 4.2.2: Densidad máxima de cada mezcla

Una vez seleccionada la mezcla óptima, se realizan los ensayos correspondientes para determinar las características de la misma.

#### 4.2.2. Ensayos físicos

Los límites de Atterberg obtenidos son:

- LL: 29 %
- LP: No presenta

### 4.2.3. Ensayos de comportamiento hidráulico

#### 4.2.3.1. Succión - Método del papel filtro

Procediendo de la misma forma que se mencionó en 3.1.3.2, se determinaron las curvas de retención de agua (Figura N° 4.2.3) de las mezclas presentadas en el Cuadro N° 4.2.2. Ambas mezclas se las ensayó con la misma relación de vacíos ( $e = 0,54$ ).

Los datos experimentales se presentan en los Cuadros N° 4.2.3 y 4.2.4.

Mezcla	Arena	Arcilla	Polímero
A	85 %	14,7 %	0,3 %
B	85 %	15 %	-

Cuadro 4.2.2: Contenido de las mezclas analizadas

Se eligieron esas mezclas para poder comparar el efecto del polímero, la mezcla A es la que ha sido seleccionada como óptima en 4.2.1, donde hay un 85 % de arena y 15 % de mezcla compuesta por arcilla y polímero (en 1,5 % de peso de la arcilla).

Muestra	$\omega$ (%)	$\gamma_d$ ( $\frac{kN}{m^3}$ )	$S_r$	$\psi$ (kPa) Arriba	$\psi$ (kPa) Abajo	$(u_a - u_w)$ (kPa)
M1	7,7	17,20	0,39	2339	4364	74
M2	8,5	17,20	0,35	5825	5688	15
M3	12,8	17,20	0,64	4415	2921	2
M4	15,0	17,20	0,75	3500	2179	3
M5	20,0	17,20	1	1547	1354	0,68

Cuadro 4.2.3: Datos experimentales mezcla B -  $e=0,54$

Muestra	$\omega$ (%)	$\gamma_d$ ( $\frac{kN}{m^3}$ )	$S_r$	$\psi$ (kPa) Arriba	$\psi$ (kPa) Abajo	$(u_a - u_w)$ (kPa)
M1	8,7	17,20	0,44	5172,7	4742,1	20,7
M2	12,8	17,20	0,64	3131	2636	9
M3	15,0	17,20	0,75	2809	1079	5
M4	20,0	17,20	1,00	1779	1280	1,23

Cuadro 4.2.4: Datos experimentales mezcla A -  $e=0,54$

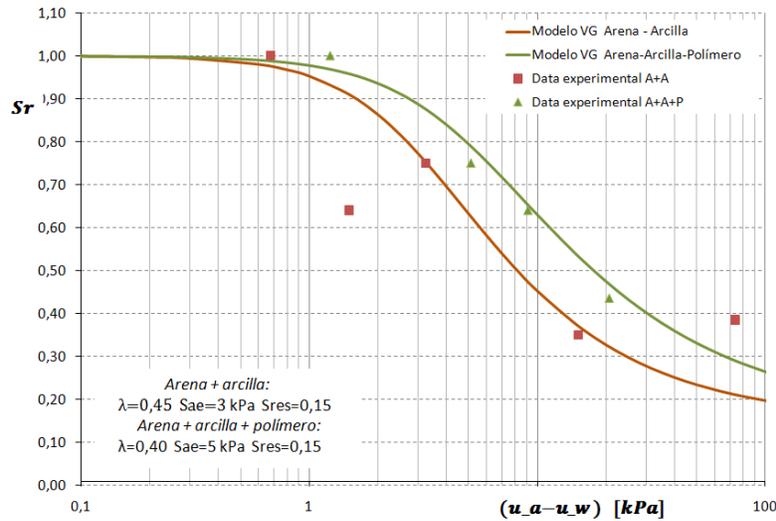


Figura 4.2.3: Curvas de retención de agua para mezclas A y B

Se observa que al agregarle polímero la distribución de poros se uniformiza ( $\lambda$  disminuye), y el valor de succión de entrada de aire aumenta, de la misma manera que sucedió con la arcilla natural al agregarle polímero. Al disminuir  $\lambda$  nos indica que el polímero ingresa en los poros, uniformizando el tamaño de éstos.

Para observar la influencia de la relación de vacíos en la curva de retención se realizaron las curvas SWCC de arena arcilla y polímero con distinta relación de vacíos, una de  $e = 0,62$  y otra  $e = 0,54$  obteniendo los resultados de la Figura N° 4.2.4.

Podemos concluir que para una relación de vacíos mayor, es decir, densidad menor, los valores de succión obtenidos para un mismo grado de saturación son menores. Esto se debe a que las muestras más densas poseen menor permeabilidad, los vacíos son de tamaño menor, lo cual implica que los meniscos del agua son más pequeños, obteniendo una curvatura mayor de éstos, las fuerzas capilares aumentan, y por lo tanto, la succión es mayor, esto responde a la Ley de Laplace:

$$h = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r}$$

Como se menciona anteriormente, a menor tamaño de poros, el radio  $r$  de estos es menor y, por lo tanto, la altura capilar alcanzada es mayor.

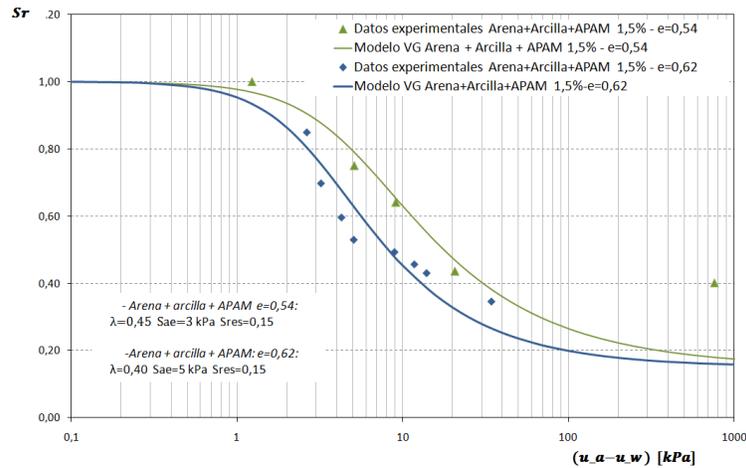


Figura 4.2.4: Curvas de retención mezcla A con relación de vacíos diferente

La tabla de datos experimentales para la mezcla A con  $e = 0,62$  es la que se presenta en el Cuadro N° 4.2.5.

Muestra	$\omega$ (%)	$\gamma_d$ ( $\frac{kN}{m^3}$ )	$S_r$	$\psi$ (kPa) Arriba	$\psi$ (kPa) Abajo	$(u_a - u_w)$ (kPa)
M1	16,0	16,37	0,70	4056	2661	3
M2	19,4	16,37	0,85	3174	3040	2,6
M3	7,9	16,37	0,34	4510	3880	34
M4	9,8	16,37	0,43	0	13	14
M5	10,0	16,37	0,46	4028	4440	12
M6	11,0	16,37	0,49	4281	1201	9
M7	12,0	16,37	0,53	4471	4578	5
M8	14,0	16,37	0,60	4538	5831	4

Cuadro 4.2.5: Datos experimentales mezcla A -  $e=0,62$

Observando los parámetros de calibración de las curvas Van Genuchten, se puede observar que el  $S_{res}$  es igual en la curva con polímero y sin polímero, esto es debido a que se tomó la hipótesis de que a grados de saturación bajos (succiones elevadas), el efecto del polímero se diluye. Esta es una hipótesis que deberá estudiarse con más detalle para poder confirmarla.

#### 4.2.3.2. Ensayo de columna de permeabilidad

Para realizar este ensayo se utiliza la mezcla de arena + arcilla y polímero óptima. El objetivo de este ensayo es averiguar la variación de permeabilidad en función del grado de saturación y succión.

El estudio de la permeabilidad en suelos parcialmente saturados puede realizarse utilizando las variadas metodologías. Estos métodos incluyen ensayos in-situ, experimentación en laboratorio y modelización numérica.

Como la permeabilidad en un suelo parcialmente saturado es un problema complejo y esencialmente no lineal, el estudio de laboratorio resulta un enfoque conveniente para verificar resultados obtenidos de modelos numéricos. La principal ventaja de los estudios hechos en el laboratorio

respecto de los ensayos in-situ radica en la posibilidad de poder controlar cuidadosamente las propiedades del suelo en estudio. [38].

Existen varios métodos de laboratorio en la actualidad para medir el coeficiente de permeabilidad. Todos ellos asumen como válida la ley de Darcy, conocida como:

$$q_{\alpha} = -\frac{k \cdot k_{r\alpha}}{\mu_{\alpha}} (\nabla P_{\alpha} - \rho_{\alpha} g)$$

Donde  $k$  es la permeabilidad intrínseca en condiciones de saturación total,  $k_{r\alpha}$  es la permeabilidad relativa,  $P_{\alpha}$  es la presión del fluido,  $\rho_{\alpha}$  es la densidad del fluido,  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Dado que el flujo se realiza en un medio no saturado, hay que incorporar la ley constitutiva para la retención de agua que relaciona el grado de saturación con la succión (por ejemplo la ecuación de van Genuchten). La resolución del balance de masa del agua en conjunto con las dos ecuaciones constitutivas (Ley de Darcy y la Ecuación de retención de agua) permite obtener la variación del grado de saturación y se conoce como Ecuación de Richard. Esta ecuación se puede resolver numéricamente.

De acuerdo a estas variables es que los ensayos se clasifican en dos grandes grupos principales: [10]

- Flujo permanente: la carga hidráulica es variable en el tiempo, el caudal se mantiene constante.
- Flujo transitorio: el caudal es variable en el tiempo, la carga hidráulica se mantiene constante.

El método utilizado será el de flujo transitorio, en el cual se aplicará una carga hidráulica constante y se medirán el contenido de agua volumétrica y la succión mátrica con sensores calibrados previamente e instalados en distintos niveles de la columna, a medida que un flujo ascendente recorre la misma.

Para ello se utilizan sensores de humedad volumétrica y de succión mátrica.

### Sensores de humedad volumétrica

Para la medición del contenido de humedad volumétrica se adquirieron sensores de la marca Decagon, modelos EC-5 (Figura N° 4.2.5a) y 5TE (Figura N° 4.2.5b).



Figura 4.2.5: Sensores de humedad volumétrica

Los sensores EC-5 miden sólo el contenido de agua en el suelo, en cambio, los 5TE miden también conductividad eléctrica y temperatura.

Su funcionamiento se basa en la medición de la permitividad dieléctrica del suelo para determinar el contenido de agua. Dos tornillos en la superficie forman un arreglo tal que permite medir la conductividad eléctrica del medio.

Se define el contenido volumétrico de agua ( $\theta$  ó VWC) como:

$$\theta = \frac{V_w}{V_T}$$

Donde  $V_w$  es el volumen de agua en el suelo, y  $V_T$  es el volumen total del suelo.

Utilizando propiedades índice se puede obtener la relación útil:

$$\theta = \omega \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \quad (4.2.1)$$

Donde  $\omega$  es la humedad gravimétrica del agua,  $\gamma_d$  es la densidad seca del suelo,  $\gamma_w$  es la densidad del agua.

Como puede verse, el contenido volumétrico de agua no depende sólo de la humedad gravimétrica, sino también de la estructura del suelo.

La permitividad dieléctrica  $\epsilon_a$  es una constante física que describe cómo un campo eléctrico es afectado por un medio. Los sensores utilizan un campo electromagnético aplicando una onda oscilante de 70MHz la cual carga los dientes del sensor. La carga almacenada es proporcional a la permitividad del suelo y al contenido volumétrico de agua.

Finalmente, los resultados de permitividad dieléctrica son captados por un adquisidor de datos (data logger), que los traducen a valores de humedad volumétrica y muestra los resultados en pantalla mediante un software.

Para tal fin, se utilizaron los data loggers de Decagon, modelos Em50y Em5b.

**Temperatura** El 5TE utiliza un termistor ubicado en la superficie para tomar lecturas de temperatura por lo tanto lee la temperatura de la superficie del diente.

**Conductividad eléctrica (CE)** La conductividad eléctrica (CE) es la capacidad de una sustancia para conducir la electricidad y se puede utilizar para deducir la cantidad de moléculas polares que están en solución. La CE se mide mediante la aplicación de una corriente eléctrica alterna entre dos electrodos, y la medición de la resistencia entre los mismos. La conductividad se calcula a continuación, multiplicando la inversa de la resistencia (conductancia) por la constante de celda (la relación de la distancia entre los electrodos y su área). Los sensores utilizan un arreglo de dos dientes para medir la CE.

**Rango de medición** Ambos sensores están preparados para medir contenidos volumétricos de humedad entre 0 y 100 %. En el caso del 5TE, puede medir conductividad eléctrica entre 0 y 23 dS/m y temperatura entre -40 y 50 °C.

**Calibración** La permitividad dieléctrica puede ser utilizada para determinar la humedad volumétrica.

Los instrumentos fueron calibrados en fábrica utilizando una relación obtenida por J.C. Topp [33], para tener una precisión de  $\pm 10\%$  0-7 dS/m. Este rango es adecuado para la mayoría de aplicaciones de campo, sin embargo, para el estudio de las propiedades del suelo se optó por una calibración propia, para obtener una mayor precisión.

**Procedimiento** Para calibrar se siguió el procedimiento recomendado por el manual Decagon Devices [23].

En primera instancia se prepararon muestras de humedad conocida entre 8 % y 30 %. Después de humectadas, cada una se dejó ecualizar 24 hs para obtener una humedad homogénea. A continuación, con cada muestra se armaron probetas, compactadas con pizón metálico en molde de PVC de peso y volumen conocido.

Conociendo peso y volumen de la probeta y midiendo la humedad del suelo  $\omega$ , se puede determinar el parámetro densidad seca  $\gamma_{dY}$  calcular la humedad volumétrica  $\theta$  utilizando la ecuación 4.7.1.

En cada probeta, se midió con el sensor la RAW data (output del data logger), y se la relacionó con la humedad volumétrica obtenida. Se realiza la calibración para cada sensor que se utilice, y se obtienen curvas de ajuste, éstas se cargan en el software, configurando los puertos donde se utilicen los sensores.

Se muestran los resultados de los sensores calibrados:

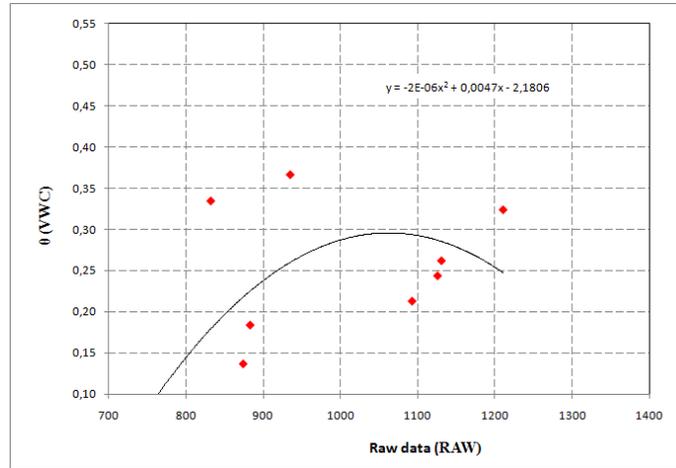


Figura 4.2.6: Curva de calibración EC-5 (A)

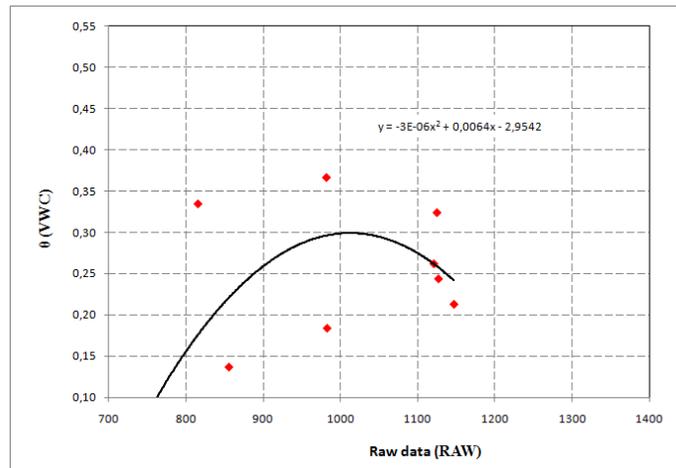


Figura 4.2.7: Curva de calibración EC-5 (B)

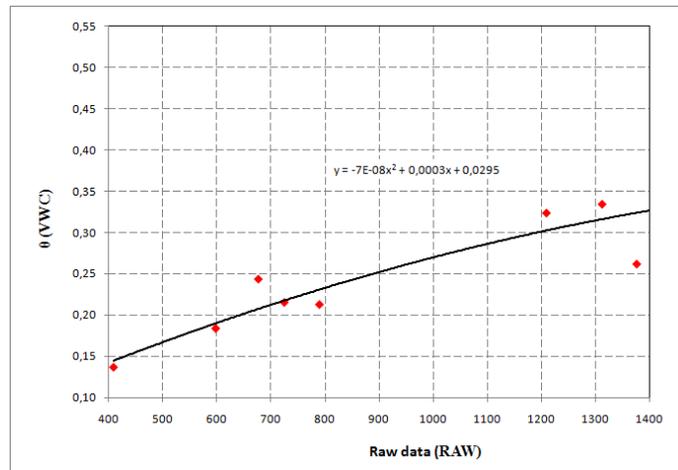


Figura 4.2.8: Curva de calibración 5TE (C)

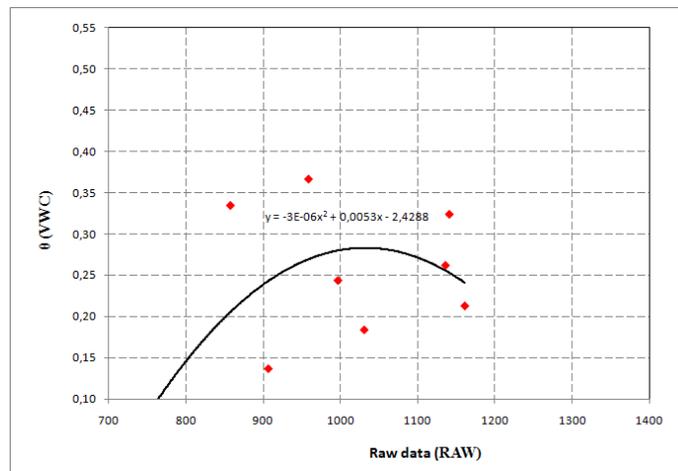


Figura 4.2.9: Curva de calibración EC-5 (D)

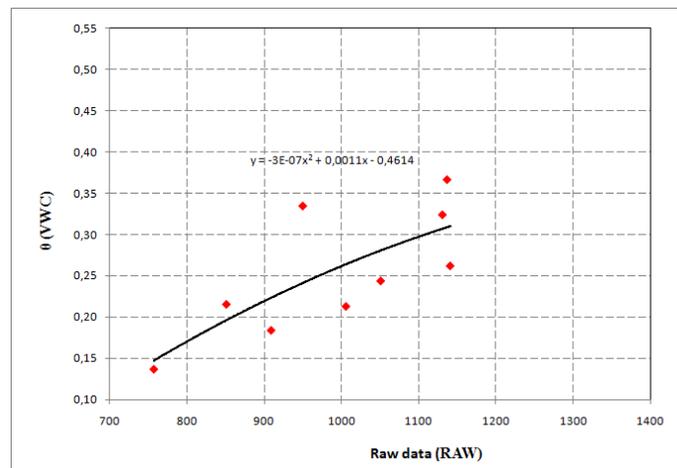


Figura 4.2.10: Curva de calibración EC-5 (E)

### Sensores de succión mátrica

Para realizar las mediciones de succión del suelo se adquirieron sensores marca Decagon, modelo MPS-2.

Este sensor mide el potencial de agua y la temperatura en materiales porosos. El funcionamiento del sensor se explica en términos del potencial de agua, pero cabe destacar que es equivalente al negativo del valor de la succión en el suelo.



Figura 4.2.11: Sensor de succión mátrica MPS-2

Hay dos parámetros básicos que describen el estado del agua en el suelo: uno es el contenido volumétrico de agua, y el otro es el potencial de agua. Éste último parámetro indica como se moverá el agua dentro del suelo.

Las técnicas de medición de potencial de agua en el suelo se basan en el Segundo Principio de la Termodinámica, el cual establece que dos sistemas conectados con diferentes niveles de energía llegarán eventualmente a un nivel de energía en equilibrio. Por lo que si un objeto está en contacto hidráulico con el suelo, el potencial de agua en el objeto llegará a un equilibrio con el potencial del agua en el suelo.

El potencial de agua total en el suelo es una suma de cuatro componentes:

$$\psi_t = \psi_p + \psi_g + \psi_o + \psi_m$$

donde los subíndices  $p$ ,  $g$  o  $m$  corresponden al potencial de presión, gravitatorio, osmótico y matricial respectivamente. De estos cuatro parámetros solo el osmótico y el matricial son los significativos y usualmente medidos en aplicaciones geotécnicas. El MPS-2 sólo mide el potencial matricial, ya que el osmótico está relacionado con el impedimento en el movimiento de sales (membranas semipermeables).

La forma de medir el potencial matricial es mediante una matriz sólida - discos porosos de cerámica - a los cuales se les mide la permitividad dieléctrica. La permitividad del aire, la cerámica y el agua son de 1, 5 y 80, respectivamente, siendo la permitividad dieléctrica muy dependiente del contenido de agua. Por lo tanto, midiendo este valor, se tiene una medida del contenido de agua en los poros de la cerámica.

La relación entre el contenido y el potencial de agua está dada por la curva de humedad característica que varía según el material. Conocida la curva característica del material cerámico se puede obtener un valor del potencial de agua dentro de la cerámica. Por lo que la calibración no depende del tipo del suelo al cual se le esté midiendo la succión.

### Medición de la temperatura

El MPS-2 utiliza un termistor de superficie para tomar lecturas de la temperatura. Se encuentra por debajo de una carcasa de plástico, y mide la temperatura en la superficie del sensor.

Un esquema con las partes componentes del sensor se muestra en la Figura N<sup>o</sup>4.2.11.

### Rango de medición y precisión

El diseño del sensor busca que los poros de la cerámica drenen para un amplio rango de potenciales. El potencial de agua en el cual el agua drena (valor de entrada de aire  $S_{ae}$ ) está definido por el tamaño del poro, por lo que la cerámica ideal debería tener una gran distribución en los tamaño de poros (de muy pequeños a muy grandes).

El rango de mediciones del sensor es de -5 kPa ( $S_{ae}$  de los poros más grandes) hasta -500 kPa.

La precisión del sensor es de  $\pm 25\%$  en el rango de -5kPa a 100 kPa. A medida que el disco se va secando y llegando a -500kPa, la sensibilidad del sensor baja perdiendo precisión. Según mediciones el sensor posee un error de  $\pm 35\%$  a los -300kPa y de  $\pm 50\%$  en los 500 kPa.

El sensor MPS-2 viene calibrado por el fabricante de los sensores (Decagon). La calibración del MPS-2 no está afectada por el tipo de suelo, ya que sólo mide el potencial hídrico de los discos cerámicos en equilibrio con el suelo. Solamente se deja ecualizar el sensor 24 hs en el suelo a ensayar.

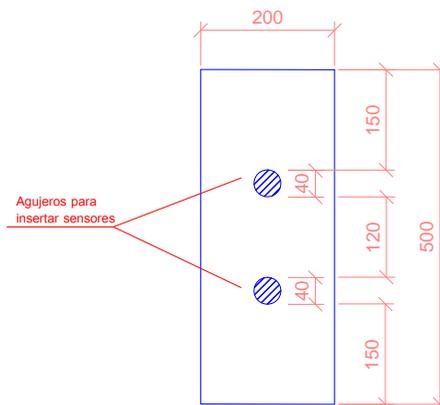
### Diseño, construcción y montaje

El permeámetro utilizado en el ensayo fue diseñado y construido en el laboratorio, adquiriendo los elementos necesarios para el caso. La columna está constituida por los siguientes elementos:

- Cañería de PVC de 200mm de diámetro y 500mm de altura.
- Tapas de PVC
- Dispositivos de fijación de los sensores
- Sensores de medición de succión
- Sensores de medición de humedad
- Tablero de circulación de agua

**Cañería de PVC** Se realizó una columna con altura 500mm.

Para realizar esta columna se tomó una cañería de PVC y se le realizaron 4 orificios, según el esquema de la Figura N° 4.2.12a. Se tuvo en cuenta las especificaciones de cada sensor, como por ejemplo, distancias a los bordes y entre sensores.



(a) Columna 1

Figura 4.2.12: Permeámetro de carga constante

**Tapas de PVC** Las tapas de dicho material se utilizan para sellar los extremos de la cañería. Las mismas debieron ser lijadas en su cara interior y perforadas para colocar el dispositivo de ingreso de flujo. En cada extremo del permeámetro se colocaron filtros para uniformizar el flujo. Conformados con una mezcla de grava y arena separadas del suelo por un geotextil.

**Dispositivos de fijación de los sensores** Para fijar los sensores de medición a la cañería de PVC, se cortaron tapas de PVC de la misma curvatura que el caño con orificios para la salida de los cables pertenecientes a los sensores. Para mantener la estanqueidad dentro del caño se le realizaron burletes en el perímetro interior, utilizando abrazaderas para fijarlas a la cañería.

**Medición de succión mátrica** Como se mencionó anteriormente para medir la succión mátrica se utilizan los sensores Decagon MPS-2. Se insertan una vez que el suelo a ensayar ha sido colocado y compactado en el permeámetro. Para colocarlos, debido a su geometría, es necesario remover el suelo en la posición correspondiente y luego insertar el sensor con una porción del mismo suelo adosado al sensor, cuidando de rellenar la abertura practicada y sin dejar vacíos que puedan acumular fluido.

**Medición de humedad volumétrica** Se utilizaron sensores Decagon 5TE y EC-5 para medición de humedad volumétrica. Al igual que los sensores de succión mátrica, los sensores de humedad volumétrica se colocan una vez que se ha llenado el permeámetro con suelo a ensayar. Al contrario de los sensores de succión, no es necesario perforar o adosarle suelo previamente, sino que únicamente se insertan cuidadosamente para que éste no se dañe.

**Tablero de circulación de agua** Se utilizó el tablero ubicado en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la FIUBA. Cuenta con un reservorio de agua con la posibilidad de realizar ensayos a carga hidráulica constante, piezómetros, una salida de agua que se conectará al permeámetro y una descarga para el excedente del reservorio.

**Columna** Se utilizó la columna de la Figura N<sup>o</sup>4.2.12a, como se puede ver se realizaron 4 orificios para insertar los sensores, por cada par de orificios a una altura determinada se colocan un sensor de humedad volumétrica y otro de succión mátrica. De esta forma se obtiene a un cierto nivel la información tanto de humedad volumétrica como de succión mátrica, a lo largo del tiempo, con distintas humedades.

Se puede ver una vista de la columna en la Figura N<sup>o</sup> 4.2.13, en la misma está la ubicación de los sensores utilizados y el ingreso de agua.

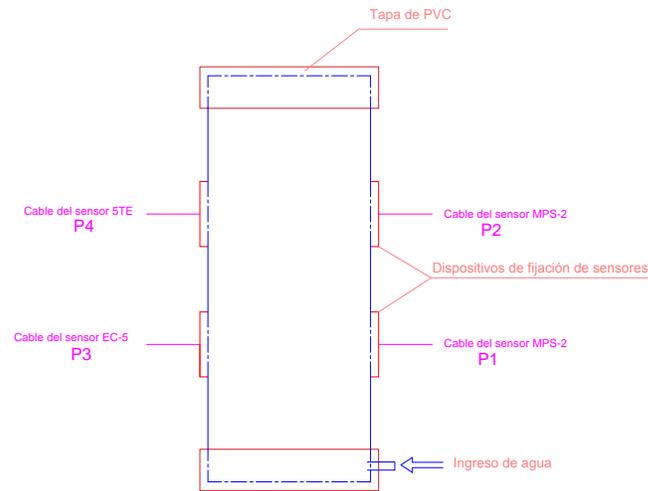


Figura 4.2.13: Columna de permeabilidad

Los puertos utilizados, conectados al data logger son:

- P1: Sensor de succión (MPS-2) a 15cm del borde inferior de la columna.
- P2: Sensor de succión (MPS-2) a 31cm del borde inferior de la columna.
- P3: Sensor de humedad volumétrica ( EC-5 ) a 15 cm del borde inferior de la columna.
- P4: Sensor de humedad volumétrica (5TE ) a 31 cm del borde inferior de la columna.

La gran diferencia entre medir la succión mediante el método del papel filtro y los sensores es que en el primero se determina la humedad de la muestra y se obtiene la succión asociada, en cambio, con el permeámetro, la humedad varía con el flujo de agua, y se observa la variación de succión. Con lo cual, se obtiene instantáneamente los valores de humedad volumétrica y succión mátrica.

Para realizar este ensayo, se preparó el suelo con los siguientes valores:

- Densidad:  $\gamma_d$  : 16,9 kN/m<sup>3</sup> - Perteneciente a rama seca.
- Humedad:  $\omega$  : 10% - Perteneciente a rama seca.
- Porcentaje de mezcla arcilla polímero: 15 %
- Porcentaje de polímero en mezcla: 1,5 %
- Volumen del permeámetro: 0,0132 m<sup>3</sup>

- Peso de arena: 19398,26g
- Peso de arcilla: 2866,09g
- Peso del polímero: 43,64g
- Peso de agua: 2230,8g
- Peso total de la muestra: 24538,80g

Una vez mezclada toda la muestra, se dividió en diez bolsas herméticas y se dejó homogeneizar 24 hs. La humedad real medida resultó ser 9,98 %.

A la hora de armar el permeámetro, se volcaba cada bolsa dentro de la columna y compactaba con un pisón la cantidad de golpes necesarios para lograr 4,3cm de altura, así se obtiene la densidad objetivo en todas las capas y por ende, en toda la columna.

La carga hidráulica se mantuvo constante a 3.25m (31.9kPa), esta carga se conectaba al permeámetro mediante una manguera con una valvula en el extremo inferior del permeámetro.

La columna se montó el 23/12/14, al día siguiente se inició el ingreso de agua y finalizó el 31/01/15. Se decidió finalizar el ensayo esa fecha ya que todos los sensores permanecieron constantes durante 29 días.

En la Figura N° 4.2.14, se puede observar la variación de succión (P1 y P2) durante todo el ensayo.

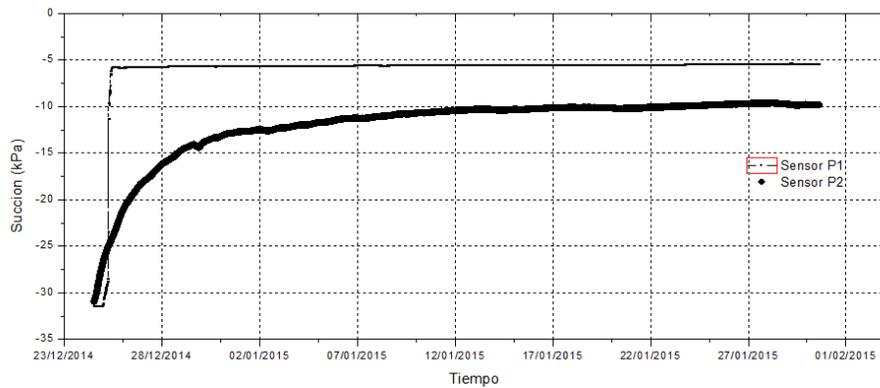


Figura 4.2.14: Variación de succión durante todo el ensayo

Se inicia el ensayo con una succión de -31 kPa, y humedad  $\omega = 10\%$ . A esta humedad se tiene un grado de saturación:

$$S_r = \frac{\omega \cdot g_s}{e} = \frac{0,1,2,7}{0,66} = 0,4$$

Esto tiene coherencia con la curva de retención de agua de la arena - arcilla y polímero, en la Figura N° 4.2.3, nos evidencia que para  $S_r = 0,4$  la succión es de -30kPa.

Para observar más detalladamente la variación, se graficó en el período donde se observaron cambios, Figura N° 4.2.15.

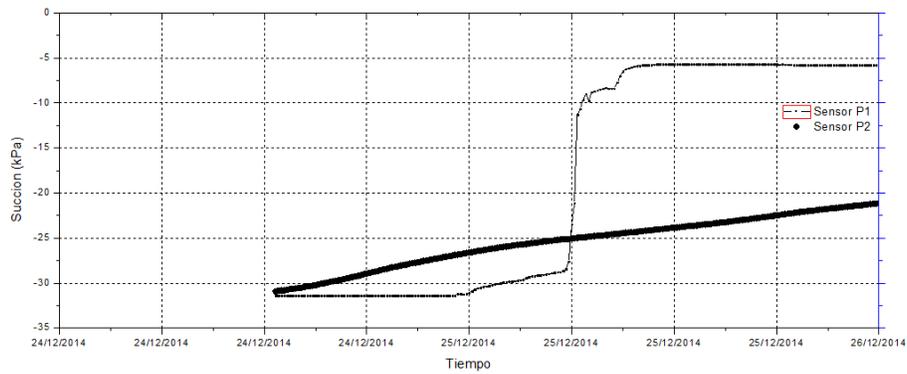


Figura 4.2.15: Detalle de la variación de succión

Al igual que para la succión mátrica, se obtuvo la variación de humedad volumétrica (P3 y P4) en el tiempo, Figura N<sup>o</sup> 4.2.16.

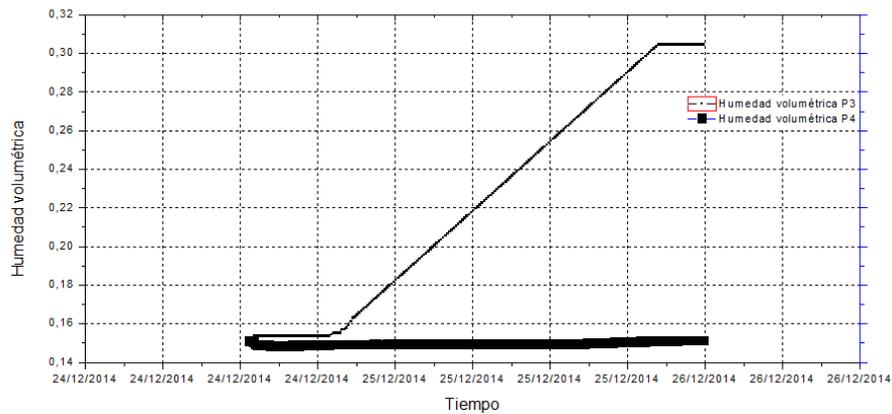


Figura 4.2.16: Variación de la humedad volumétrica en el tiempo

Se ven variaciones en los puertos P1y P3, ambos sensores ubicados a 15 cm del borde inferior del permeámetro, esto quiere decir que sólo éstos tuvieron contacto con el agua en ascenso, con lo cual se podría decir que el material funciona como impermeable.

A continuación se presenta el gráfico de succión y humedad volumétrica de los sensores afectados por el agua, Figura N<sup>o</sup> 4.2.17.

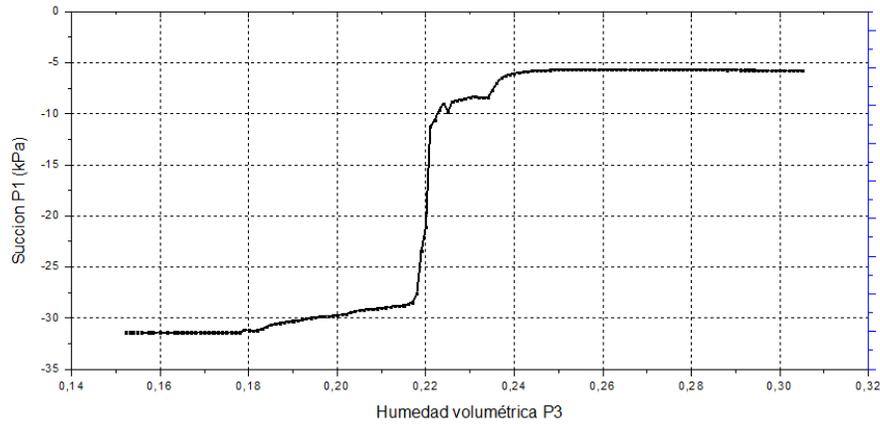


Figura 4.2.17: Humedad volumétrica vs succión

Por último, se puede ver el diagrama de humedades finales, para visualizar cómo fue el ascenso del agua por la columna. Figura N° 4.2.18. Éste se obtuvo midiendo la humedad en distintos puntos al finalizar el ensayo.

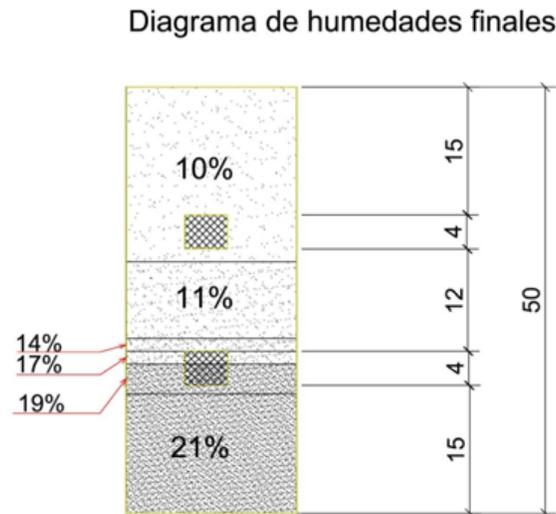


Figura 4.2.18: Diagrama de humedades finales

El nivel inferior de la columna alcanza  $\omega = 21\%$  y Succión:  $-5\text{ kPa}$ , para corroborar estos valores en la curva SSWW del material calculo su  $S_r$  final.

$$S_r = \frac{\omega \cdot g_s}{e} = \frac{0,21,2,7}{0,66} = 0,85$$

Ingresando a la curva SWCC del material (Figura N° 4.2.3) con  $S_r = 0,85$ , arroja una succión de  $3\text{ kPa}$  aproximadamente. La diferencia es insignificante, con lo cual, este resultado se condice con la curva SWCC parametrizada.

Además, se confirma que los sensores superiores no presentaron variación de succión o humedad volumétrica debido a que no hubo cambios de humedad, estos tienen  $\omega = 10\%$  igual que al comienzo del ensayo.

Como observación se agrega que al desmontar la columna, al nivel que llegó el agua, se vió la solución de polímero inundando toda la zona.

#### 4.2.3.3. Ensayo de permeabilidad

El ensayo de permeabilidad con carga variable determinó que el coeficiente de permeabilidad para la arena arcilla y polímero es de  $k = 2,4 \cdot 10^{-11} m/s$ , siendo para la arena y arcilla de  $k = 5,9 \cdot 10^{-11} m/s$ .

#### 4.2.4. Ensayos de comportamiento mecánico

##### 4.2.4.1. Hinchamiento libre - Consolidación uniaxial

Las características de las muestras ensayadas se presentan en el Cuadro N° 4.2.6.

Muestra	$w_0$	Hinchamiento final	$w_f$	$e_0$	$e_f$	$Sr_0$	$\gamma_d$
Arena + Arcilla	10,8 %	2,68 %	17,6 %	0,50	0,54	57,7 %	17,17 $kN/m^3$
Arena + Arcilla + APAM	11,52 %	6,35 %	18,30 %	0,51	0,61	60,42 %	17,07 $kN/m^3$

Cuadro 4.2.6: Características de las muestras A y B

##### Hinchamiento libre

El hinchamiento libre resultante es de 2,68 % para la muestra sin polímero, siendo de 6,35 % al agregar polímero, ambos valores de hinchamiento son bajos, se observa un aumento en la muestra con polímero debido a la expansividad del mismo.

##### Consolidación uniaxial

Los escalones de carga utilizados para ambas muestras se ven en el Cuadro N° 4.2.7.

Escalón	-	1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Precarga	Carga							
Tensión vertical (kPa)	5,0	55,1	106,5	219,3	444,9	896,0	1472,5	444,9	106,5

Cuadro 4.2.7: Escalones de carga para el ensayo de presión de hinchamiento

Las curvas de compresibilidad de ambas muestras se presentan en las Figura N° 4.2.19.

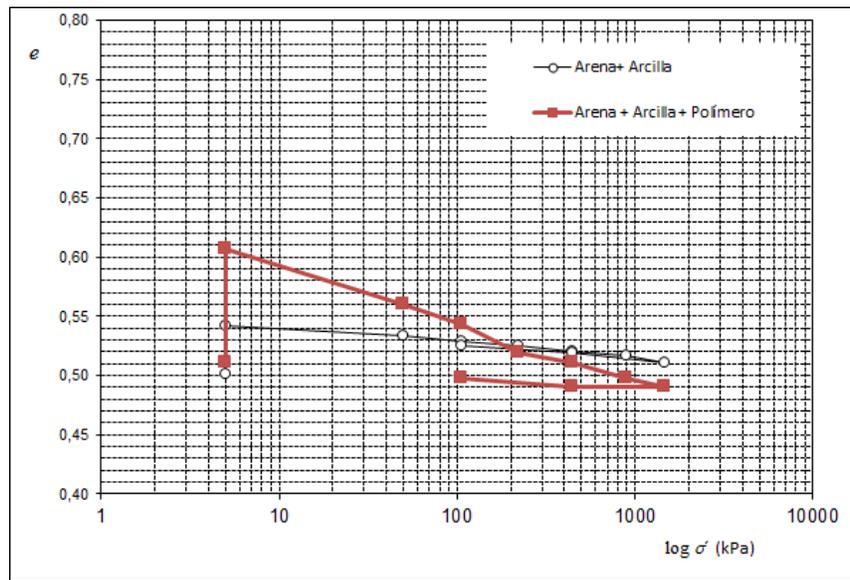


Figura 4.2.19: Curva de compresibilidad Mezcla A y B

Se presentan los resultados en el Cuadro N<sup>o</sup> 4.2.8.

Parámetro	$C_c$	$C_s$	$\sigma'_p$	$\sigma'_{sp}$
Arena + Arcilla	0,01	0,01	1200 kPa	-
Arena + Arcilla + APAM	0,05	0,01	450 kPa	-

Cuadro 4.2.8: Indices de compresión e hinchamiento - Mezcla A y B

Observando los parámetros obtenidos, notamos que la muestra de arena y arcilla es menos compresible que la mezcla que posee polímero, esta última además posee un hinchamiento mayor, luego, al recibir una carga asentará con mayor rapidez.

#### 4.2.4.2. Ensayo de compresión simple - UCS

El ensayo de compresión simple o uniaxial se realizó para evaluar la resistencia no confinada del suelo en estudio. Esta resistencia, estará siempre del lado conservador, ya que no se tiene en cuenta el confinamiento lateral otorgado por la masa de suelo. Se siguieron los lineamientos de la Norma ASTM D-2166.

Este ensayo se realiza con el fin de determinar la resistencia o esfuerzo último ( $q_u$ ) de un suelo cohesivo a la compresión no confinada, mediante la aplicación de una carga axial con control de deformación, utilizando una muestra de suelo moldeada en forma de cilindro con compactación dinámica, de diámetro 10 cm y altura 20cm, cuya relación altura/diámetro es igual a 2. La compresión uniaxial es un caso especial del ensayo triaxial, en el cual solamente se le aplica a la probeta la tensión longitudinal. Puesto que no es necesario el dispositivo para aplicar la presión lateral, y como, además, la muestra no necesita estar confinada en una membrana, este ensayo es sencillo y rápido. Con el esfuerzo último se puede obtener la resistencia al corte del suelo de la siguiente manera:  $S_u = q_u/2$

El equipo utilizado es la prensa perteneciente al Laboratorio de Mecánica de Suelos, se le colocó un aro dinamométrico para medir la carga a la cual se está comprimiendo la probeta, y se controla

la velocidad de avance de la plataforma del equipo.

Se ensayaron dos tipos de muestras, como se mencionó en el Cuadro N° 4.2.2, con 3 humedades distintas según la curva proctor, en rama seca, óptima, y rama húmeda, el detalle y resultado de las muestras se puede ver en el Cuadro N° 4.2.9.

En las Figuras N° 4.2.20 y 4.2.21 se presentan las curvas esfuerzo- deformación de ambas mezclas, donde se puede visualizar cómo la carga última es mayor para la humedad óptima en todos los casos, y, a su vez, es mayor aún para la mezcla de arena + arcilla y apam.

Mezcla		Rama seca	Óptimo	Rama húmeda
A: Arena 85 % + (Arcilla + APAM 1,5 %) 15 %	$\gamma_d [kN/m^3]$	16,9	17,1	16,9
	$\omega [ % ]$	10,0	12,0	15,0
	$q_u [kPa]$	14,6	32,5	24,7
B: Arena 85 % + Arcilla 15 %	$\gamma_d [kN/m^3]$	16,6	17,2	17,05
	$\omega [ % ]$	9,0	12,8	13,5
	$q_u [kPa]$	13,5	27,9	17,7
DIFERENCIA	$\Delta q_u$	1,1	4,6	7

Cuadro 4.2.9: Muestras ensayadas a compresión uniaxial - Mezclas A y B

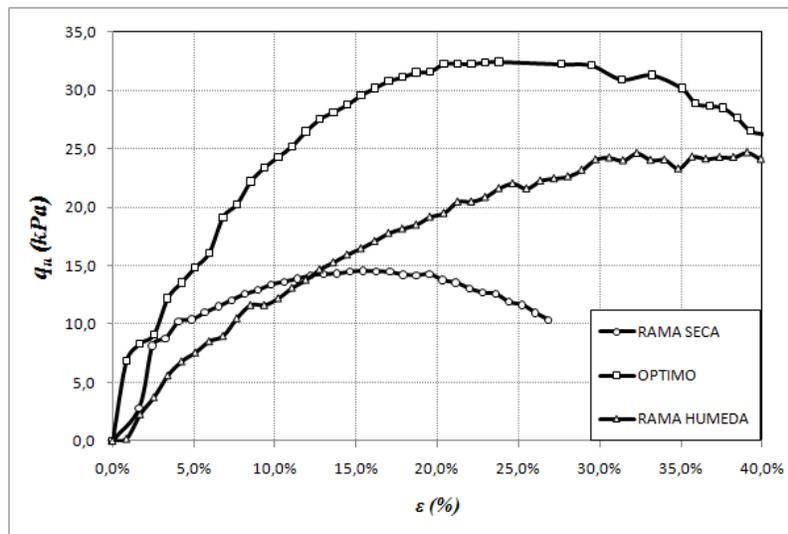


Figura 4.2.20: Curva esfuerzo - deformación mezcla A

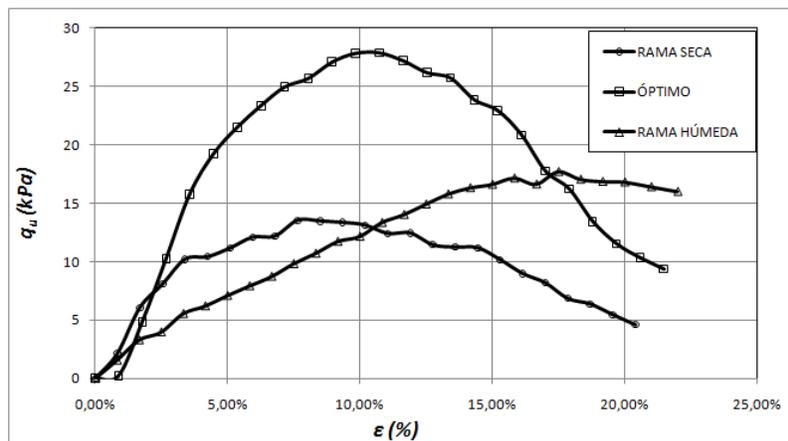


Figura 4.2.21: Curva esfuerzo - deformación mezcla B

Se puede decir que la mezcla A posee un mejor comportamiento dúctil, ya que al llegar a la carga máxima esta se mantiene deformando la muestra, luego el material no puede seguir tomando esa carga máxima y disminuye, en cambio, la mezcla B, una vez alcanzada su carga máxima, cae inmediatamente, esto nos indica que estamos hablando de una rotura frágil.

Por lo tanto, el polímero otorga a la mezcla características de ductilidad. En la Figura N<sup>o</sup> 4.2.22 observamos las diferencias entre una rotura frágil y dúctil.

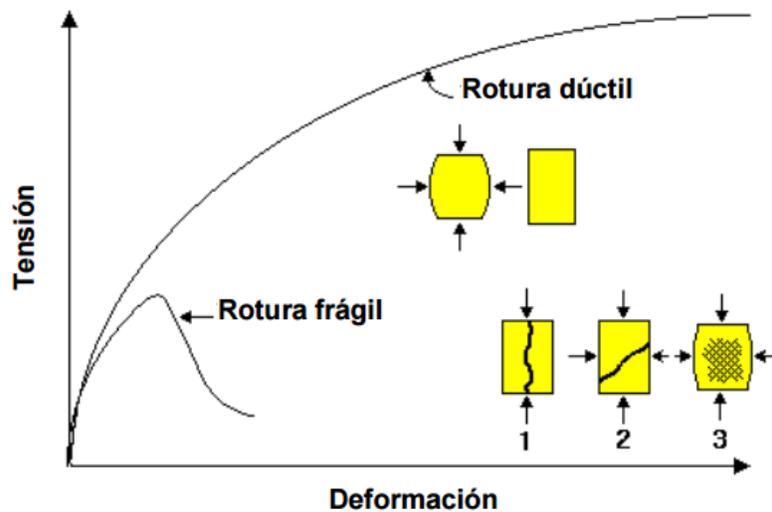


Figura 4.2.22: Tipos de roturas

Además, del Cuadro N<sup>o</sup> 4.2.9, se puede analizar el  $\Delta q_u$  entre las muestras sin APAM y con APAM, se observa que la diferencia se incrementa cuando la humedad de las muestras aumenta.

La variación observada podría indicar que a mayor humedad de la muestra, el polímero está más hidratado y por lo tanto su efecto en la microestructura es mayor. Como observamos en los ensayos de porosimetría de mercurio, el polímero hidratado forma una estructura de hilos en los poros, que estaría ayudando a la resistencia al corte del material. El incremento de la resistencia al

corte uniaxial en la rama húmeda es de 7kPa. Es claro que esta ganancia no representa una clara tendencia a los efectos prácticos.

En cambio, al estar poco hidratado, los hilos se formarán en menor cantidad, y su estructura será débil, casi insignificante. Agregando polímero a la muestra perteneciente a rama seca sólo se tuvo un aumento de la carga última de 1,1 kPa.

Esto se condice con la hipótesis propuesta en 3.1.3.2, enunciando que a grados de saturación bajos el efecto del polímero se ve disminuído.

#### 4.2.5. Ensayos de caracterización de microestructura

##### 4.2.5.1. Ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio

Se realizó este ensayo estudiando muestras de rama seca y rama húmeda de arena y arcilla 15 %, y arena - arcilla y APAM. Los graficos obtenidos se presentan en las Figuras N<sup>o</sup> 4.2.23 y 4.2.24.

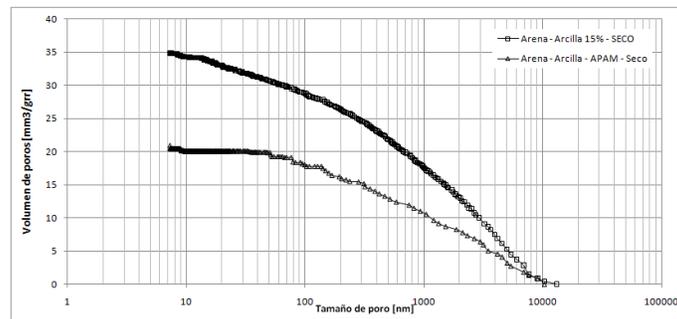


Figura 4.2.23: Porosimetría para muestras secas - Mezclas A y B

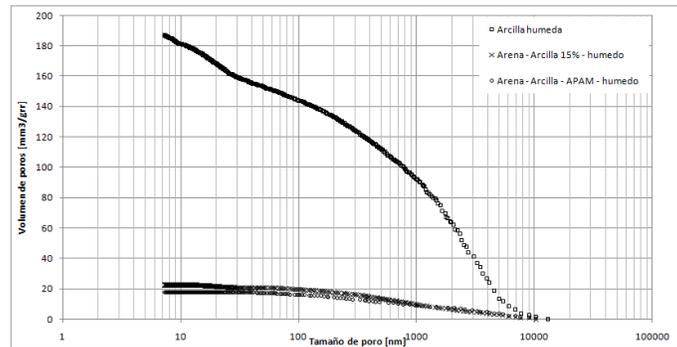


Figura 4.2.24: Porosimetría para muestras húmedas - Mezclas A y B

Se puede apreciar que tanto para muestras húmedas y secas la mezcla compuesta por arena y arcilla posee mayor volumen de poros de diámetro de 7 a 1000 nm. En cuanto a la diferencia de humidades, estas evidencian que las muestras húmedas tienen menor volumen de poros, siendo el máximo de 23 mm<sup>3</sup>/gr, cuando el máximo para muestras secas es de 35 mm<sup>3</sup>/gr.

Al agregar polímero a la mezcla la cantidad de poros disminuye y también se uniformiza su tamaño.

**4.2.5.2. Ensayo de microscopía electrónica de barrido**

Se realizó este ensayo las muestras presentadas en el Cuadro N° 4.2.1, al igual que para UCS.

- Arena + Arcilla

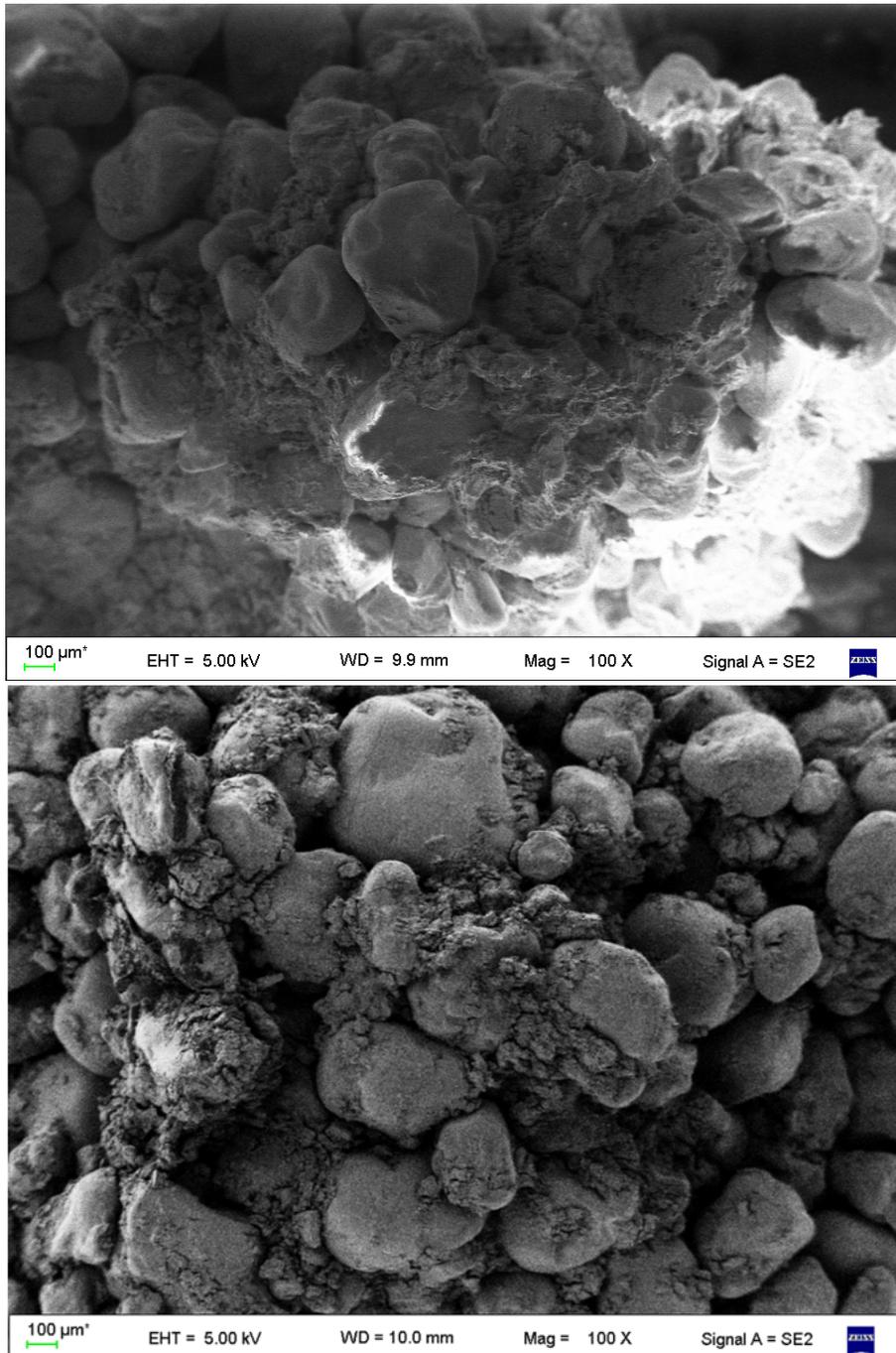


Figura 4.2.25: SEM de arena y arcilla

En la Figura N<sup>o</sup> 4.2.25 se pueden ver los granos de arena mal graduada rodeados por arcilla, tapando los poros existentes resultando un material más compacto.

No se vieron diferencias entre las distintas humedades estudiadas.

- Arena + Arcilla + APAM - Mezcla óptima

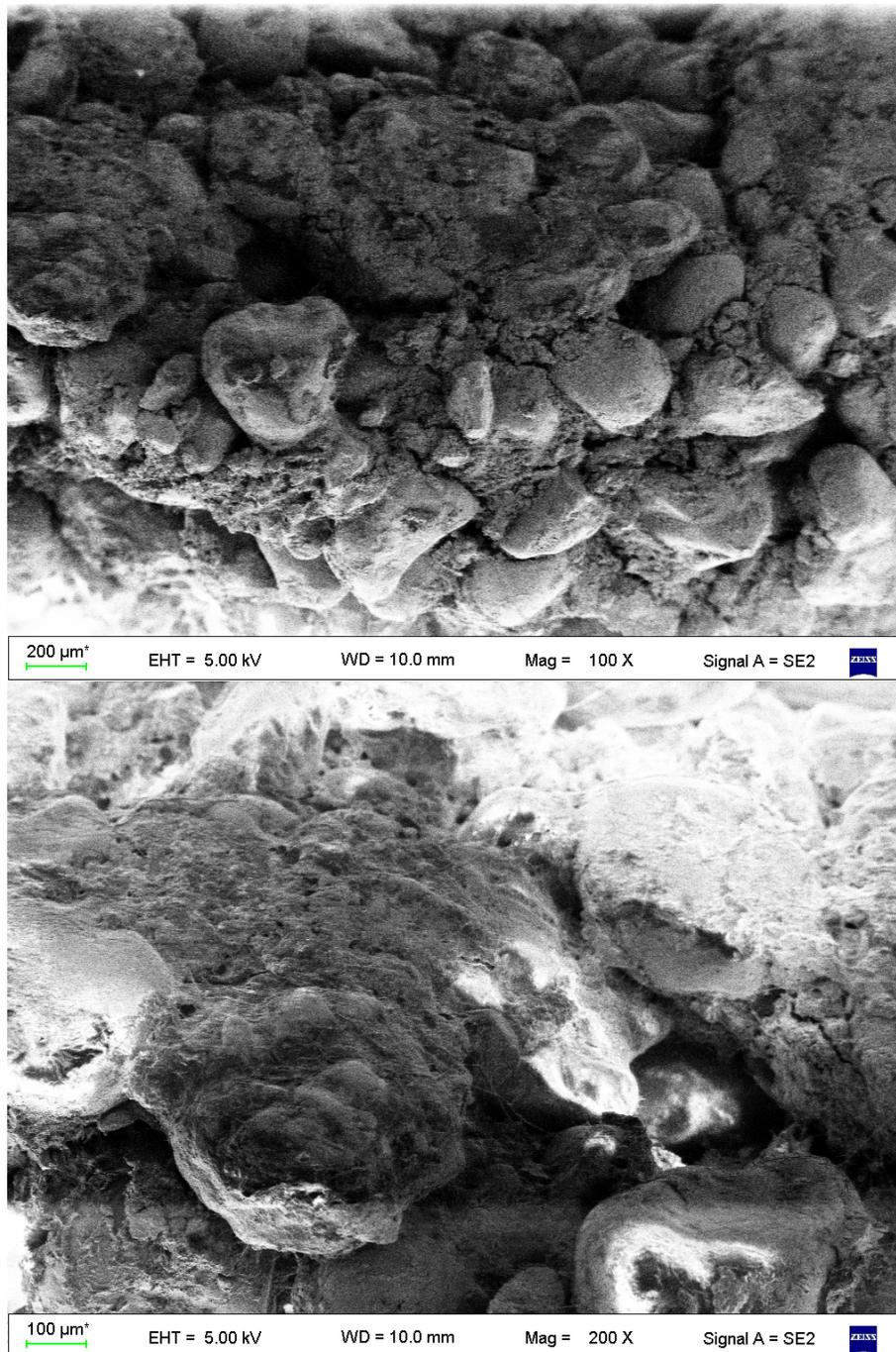


Figura 4.2.26: SEM de arena arcilla y polímero

En la Figura N<sup>o</sup> 4.2.26, al igual que la imagen anterior, se ven los granos de arena con arcilla alrededor y polímero en forma de hilos entre la arena y arcilla . A diferencia de las imágenes obtenidas sin polímero se observa una mayor compacidad debida a la acción del polímero.

Durante el ensayo se pudo detectar al polímero en distintas formas:

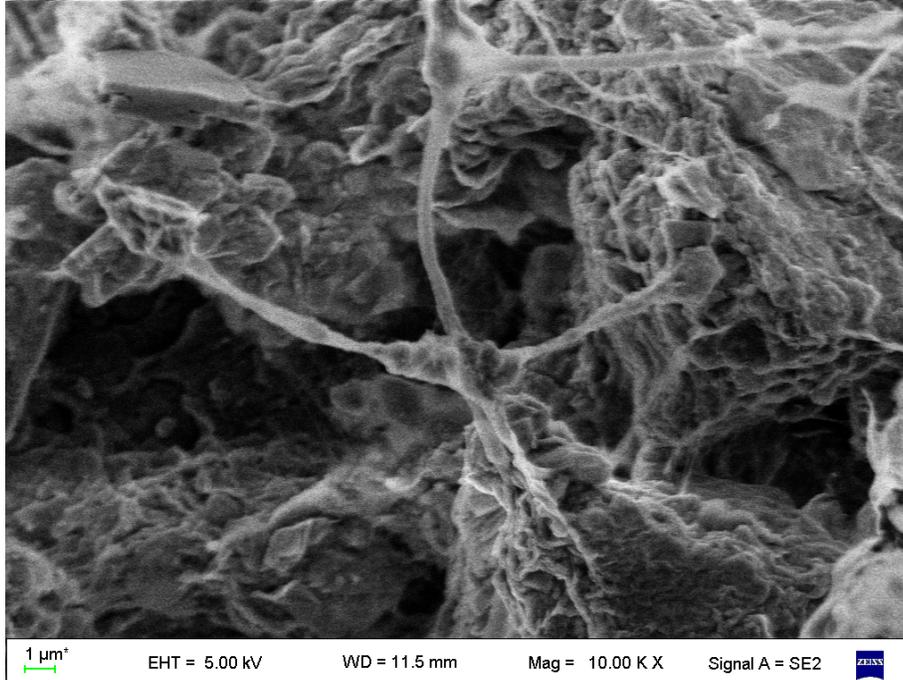


Figura 4.2.27: Polímero formando un nudo

La imagen N<sup>o</sup> 4.2.27 evidencia al polímero adherido a la arcilla, formando un nudo en sus extremos. Se debe destacar que estos hilos de polímero han soportado un proceso de liofilizado previo al ensayo, con lo cual, se puede decir que estos son resistentes. En esta imagen se puede ver un laja de arcilla en el borde superior izquierdo.

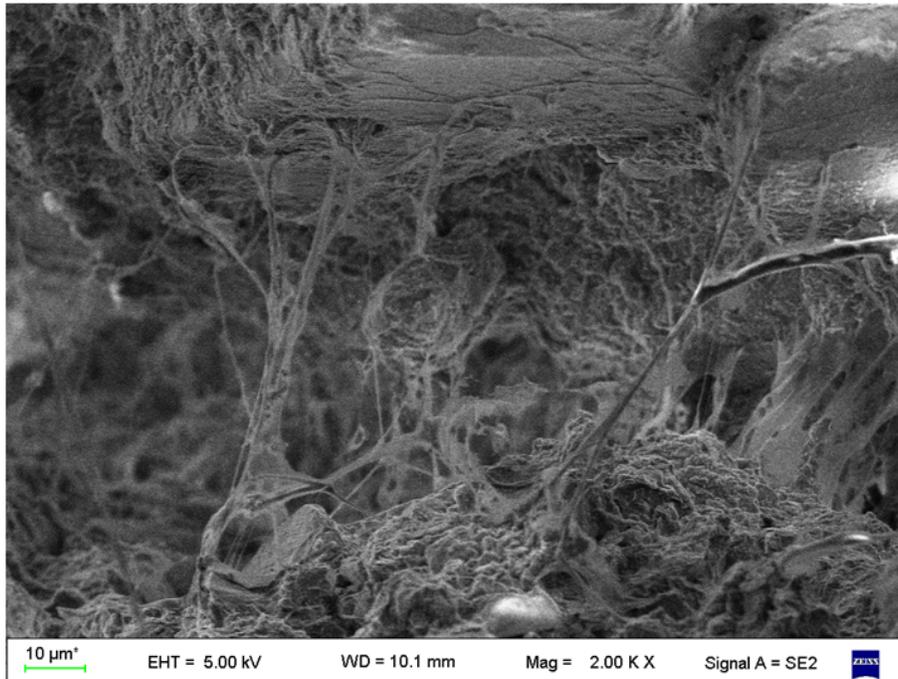


Figura 4.2.28: Hilos de polímero

En la Figura N<sup>o</sup> 4.2.28 se ven los hilos de polímero interactuando con la arcilla. No se encontraron diferencias entre las distintas humedades estudiadas.

- Arena 60 % + Mezcla 40 %

En esta muestra se observa una mayor cantidad de polímero, se aclara que no es la mezcla óptima estudiada, pero se realizó este ensayo para visualizar los cambios producidos en el material al agregar más polímero.

Al estudiar esta muestra se observa que el polímero ya se presenta en superficie, ya no en forma lineal como se veía en la muestra anterior, esto se debe al mayor porcentaje de polímero en la muestra.

Mediante estas imágenes se puede explicar la causa de la disminución de la densidad óptima al agregar más polímero, estando éste en forma de superficie provoca un efecto de deslizamiento entre las partículas al querer compactarlas, es por ello que la densidad obtenida es menor.

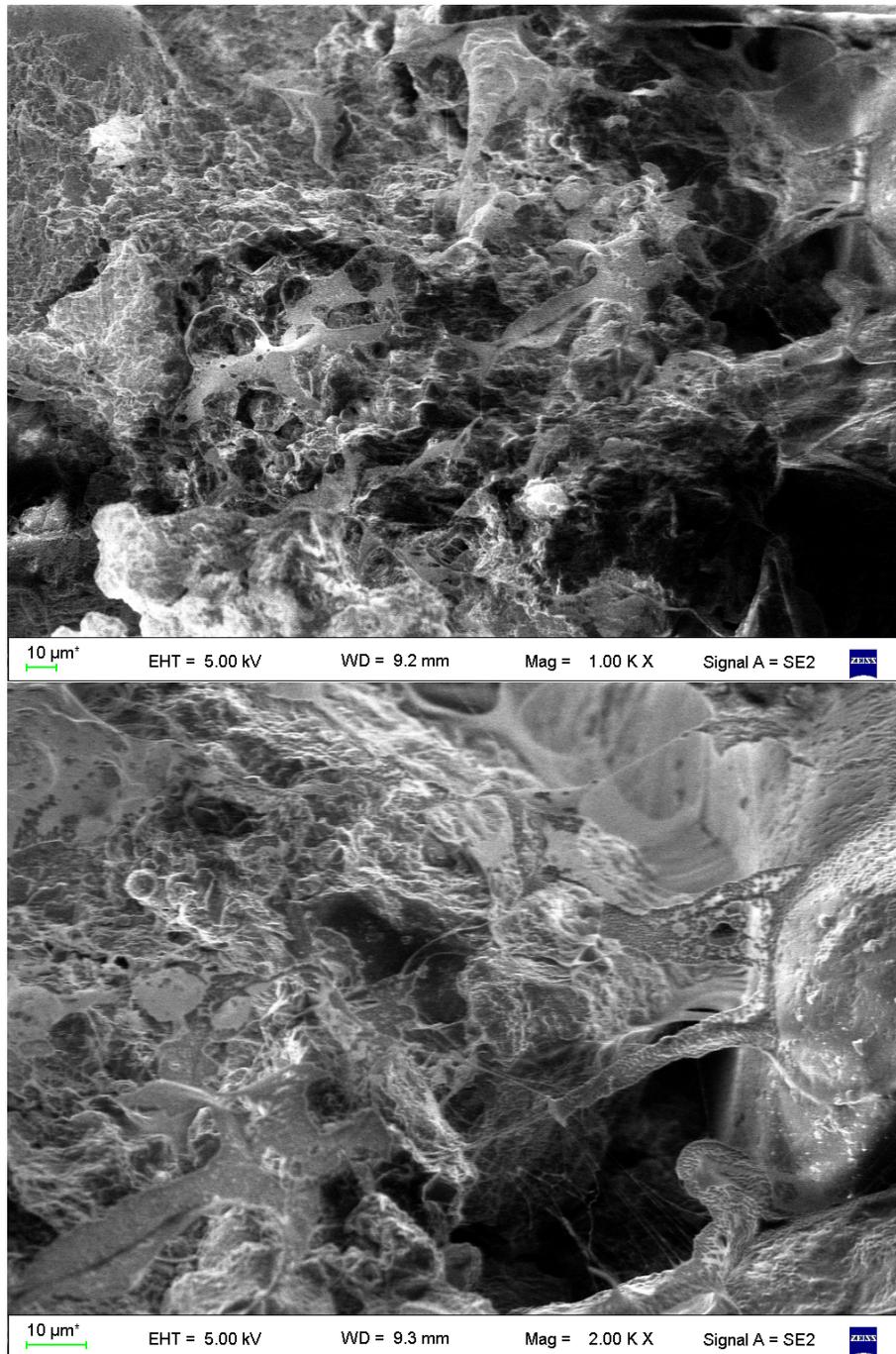


Figura 4.2.29: SEM de Mezcla no óptima

Luego de estas imágenes se puede hacer un esquema de la interacción del polímero con la arena y arcilla. Figura N<sup>o</sup> 4.2.30.

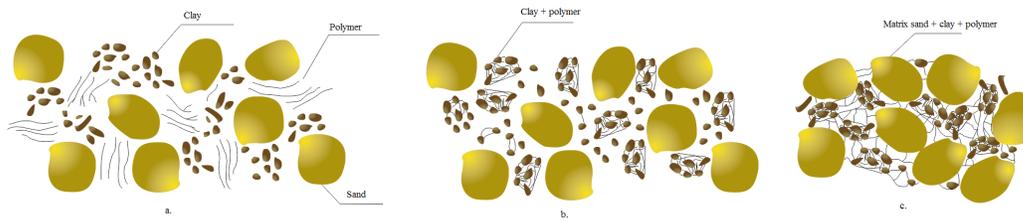


Figura 4.2.30: Interacción suelo - polímero

a) Se observan los materiales por separado cuando la muestra se mezcla sin agua, los granos grandes representan la arena mal graduada, los hilos el polímero y las partículas más pequeñas en forma de láminas representan la arcilla.

b) Una vez humedecida la muestra, el polímero comienza a interactuar con la arcilla, formando hilos y pequeñas aglomeraciones de suelo.

c) El material se aglomera formando una matriz compacta, disminuyendo la cantidad de vacíos.

# Capítulo 5

## Análisis de resultados

### 5.1. Comparación de arcilla y mezclas

En este capítulo se compararán los resultados según cada ensayo, de las mezclas involucradas, para luego, realizar conclusiones de su comportamiento.

#### 5.1.1. Ensayos físicos

En el Cuadro N° 5.1.1, se observa el aumento del límite líquido a medida que el porcentaje de polímero involucrado es mayor, esto indica una mayor capacidad de absorción de agua en aquellas mezclas que tienen más cantidad de polímero.

En cuanto al índice de plasticidad:  $IP = LL - LP$ , puede verse que también se incrementó el, lo cual representa una mayor plasticidad de las mezclas en comparación con la arcilla no modificada ( $IP=41$ ).

Los resultados de estos límites nos indican que para alcanzar una consistencia similar a la obtenida con arcilla, se debe agregar más agua a la mezcla, fenómeno que se puede visualizar rápidamente al realizar la mezcla y agregar agua.

	Arcilla	Arcilla + APAM 0,5 %	Arcilla + APAM 1,5 %	Arena + mezcla 1,5 %
LL	80 %	150 %	170 %	29 %
LP	39 %	50 %	60 %	-
IP	41	100	110	-

Cuadro 5.1.1: Comparativa Límites de Atterberg

#### 5.1.2. Ensayos de comportamiento mecánico

##### 5.1.2.1. Ensayo Proctor Normal

Los resultados experimentales se presentan en el Cuadro N° 5.1.2.

	Arcilla	Arena	Arcilla + APAM 0,5 %	Arcilla + APAM 1,5 %	Arena + Mezcla 1,5%
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	13,0	16,1	13,1	12,5	17,2
$\omega$ %	31,0	6,0	28,1	25,9	12,8

Cuadro 5.1.2: Comparación de puntos óptimos de compactación

Comparando la arcilla con la primera mezcla, se podría decir que el agregado de APAM no modifica significativamente las propiedades de compactación del suelo ya que la densidad máxima no aumenta comparada al valor de  $13,11 \text{ kN/m}^3$  encontrada para la arcilla sin polímero.

En cambio, para la mezcla de arcilla y polímero en 1,5% se observa una disminución de la densidad máxima y humedad correspondiente. Esto se puede explicar debido a la acción del polímero insertándose entre las capas de la arcilla, como este material es de consistencia gelatinosa, puede provocar que, al compactar la mezcla, las capas de arcilla “patinen” unas con otras, obteniendo una densidad de compactación menor. Aunque la disminución de la densidad máxima no es significativa ( $0,5 \text{ kN/m}^3$ ). En cambio la disminución de la humedad óptima es algo más apreciable con la presencia del polímero (5%)

Se puede superponer las curvas para ver claramente las diferencias, como se ve en la Figura N° 5.1.1.

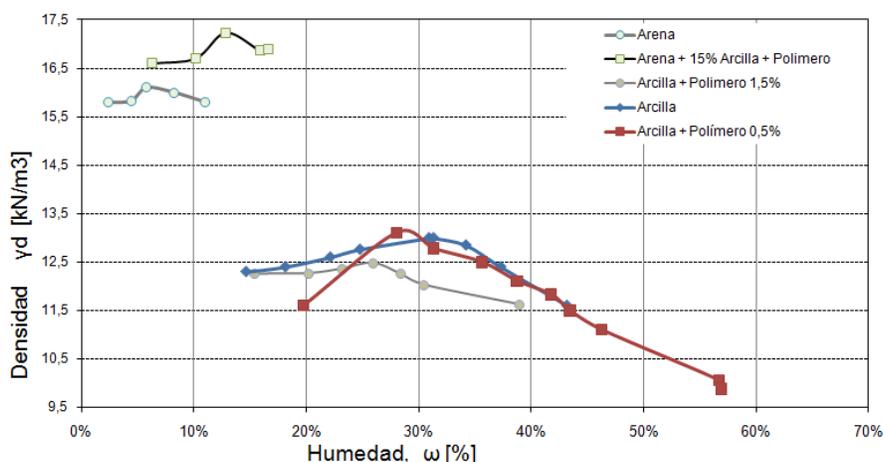


Figura 5.1.1: Curvas Proctor estándar arcilla sola y arcilla modificada

Además de la variación de la localización de los máximos, la curva Proctor de la arcilla con polímero en 0,5% indica un rango de valores óptimos más estrechos que la arcilla sola, es decir, la zona de máximos es más pequeña; se traduce gráficamente por un pico más estrecho, esto implica condiciones de compactación óptimas más restringidas.

En cambio, para la mezcla de arcilla y polímero en 1,5%, el pico es suave, y poco pronunciado, teniendo como significado que las condiciones de compactación son más uniformes.

Para la arena, arcilla y polímero se obtuvo un aumento de la densidad seca óptima, respecto de la arena, y además un aumento de la humedad óptima, la curva tiene la forma característica de la arena, pero con los cambios anteriormente mencionados.

#### 5.1.2.2. Hinchamiento libre - Consolidación uniaxial - Presión de hinchamiento

Se presenta el Cuadro N° 5.1.3 con la comparativa de los ensayos:

Parámetro	$C_c$	$C_s$	$\sigma'_p$	$\sigma'_{sp}$
Arcilla rama seca	0.32	0.08	56 kPa	660 kPa
Arcilla+APAM 0,5 % rama seca	0.43	0.14	60 kPa	290 kPa
Arcilla rama húmeda	0.26	0.10	57 kPa	710 kPa
Arcilla+APAM 0,5 % rama húmeda	0.34	0.12	70 kPa	600 kPa
Arcilla + APAM 1,5 % óptimo	0,34	0,18	55 kPa	1300 kPa
Arena + Arcilla	0,01	0,01	1200 kPa	-
Arena + Arcilla + APAM	0,05	0,01	450 kPa	-

Cuadro 5.1.3: Índices de compresión e hinchamiento para las muestras de suelo y suelo-polímero

En general, la presión de pre-consolidación aumenta con el agregado de APAM. Esto indica que el rango de comportamiento elástico del material es mayor. Si comparamos la rama húmeda y la seca observamos que cuando más humedad el polímero se activa y este rango aumenta. Este comportamiento requiere verificarse con mayores ensayos.

El índice de compresión es más alto con polímero; se obtiene de la pendiente de la curva de compresibilidad una vez superada la presión de preconsolidación. Es decir que cuando se supera  $\sigma'_p$ , un aumento de carga dado provocará un cambio del índice de vacíos mayor para el suelo modificado. La presión de hinchamiento disminuye para la mezcla en ambos casos, seco y húmedo.

### 5.1.3. Ensayos de caracterización hidráulica

#### 5.1.3.1. Ensayo de permeabilidad

El orden de magnitud de permeabilidad del suelo modificado con APAM 0,5 % ( $k = 2,0 \cdot 10^{-11} m/s$ ) es similar al valor sin APAM de  $k = 2,7 \cdot 10^{-11} m/s$ . Eso significa que la Poliacrilamida aniónica en el porcentaje de 0,5 % no influye significativamente sobre la permeabilidad del material, es decir que no cambia la configuración de conexión de los poros. Se podría concluir que habrá que agregar más polímero para obtener diferencias significativas.

Por ese motivo se realizó la permeabilidad de la mezcla de arcilla con 1,5 % de APAM, obteniendo el coeficiente de permeabilidad  $k = 1,5 \cdot 10^{-11} m/s$ , esto nos indica que el material, en esta proporción de polímero, aumenta la impermeabilidad de la arcilla.

Para la arena con arcilla se obtuvo  $k = 5,9 \cdot 10^{-11} m/s$ , mientras que la mezcla arena arcilla y polímero presenta una permeabilidad de  $k = 2,4 \cdot 10^{-11} m/s$ .

#### 5.1.3.2. Ensayo de succión con papeles filtro

Comparando las curvas de retención presentadas en la Figura N° 5.1.2, con sus parámetros (Cuadro N° 5.1.4), se observa que para la arcilla, y arcilla con polímero el parámetro de distribución de poros  $\lambda$  no cambia, esto se ve reflejado en las pendientes de las curvas correspondientes a esas muestras. Pero, en cambio, al analizar el valor de entrada de aire  $S_{ae}$  observamos que la mezcla con polímero aumentó su valor a 2000 kPa, es una succión muy elevada que el aire deberá vencer para comenzar la desaturación, esto nos asegura que la desaturación de la mezcla será muy leve, con lo cual, una vez ingresada agua a los poros será muy difícil eliminarla.

Para el caso de las muestras de arena con arcilla y arena, arcilla con polímero, observamos que el parámetro de distribución de poros  $\lambda$  disminuye en la mezcla de arena + arcilla + APAM. Esto se explica ya que al agregar polímero, este se inserta en los poros, obteniendo una estructura de poros más uniforme. Además se ve el efecto que produce el polímero en la mezcla de arena, arcilla y polímero, de aumentar el valor de entrada de aire  $S_{ae}$ , haciendo que la muestra sea más difícil desaturarla.

A valores elevados de succión se adoptaron parámetros donde el efecto del polímero se diluye, es decir, cada par de curvas convergen en igual grado de saturación residual  $S_{res}$ . Esto requiere un estudio en profundidad del comportamiento a altos valores de succión para confirmar esta hipótesis.

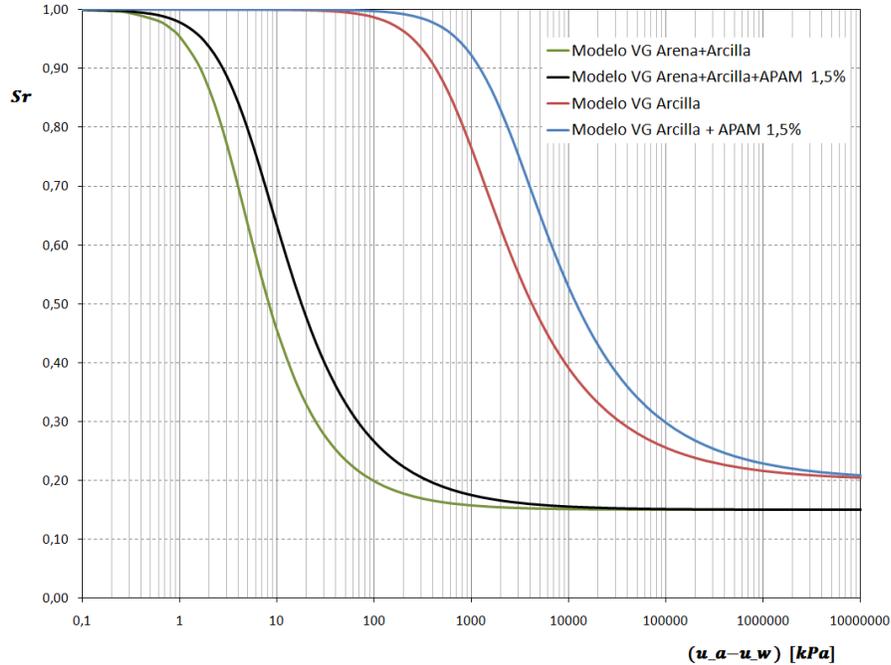


Figura 5.1.2: Curvas de retención de las muestras

	Arcilla	Arcilla + APAM 0,5 %	Arcilla+APAM 1,5 %	Arena+Arcilla	Arena+Arcilla+APAM
$\lambda$	0,35	0,35	0,35	0,45	0,40
$S_{ae}$	700kPa	700kPa	2000kPa	3 kPa	5kPa
$S_{res}$	0,20	0,20	0,20	0,15	0,15

Cuadro 5.1.4: Parámetros de las curvas de retención

### 5.1.4. Ensayos de composición y caracterización de la microestructura

#### 5.1.4.1. Porosimetría por intrusión de mercurio

En el Cuadro N°5.1.5 se observa un resumen del volumen de poros para las muestras ensayadas:

Muestra	Rama seca	Rama húmeda
Humedad (%)	25.15	32.50
Volúmen de poros Arcilla-APAM ( $mm^3/g$ )	112.63	151.8
Volúmen de poros Arcilla sola ( $mm^3/g$ )	113.3	187.06
Volumen de poros Arena + Arcilla ( $mm^3/g$ )	34,8	22,5
Volumen de poros Arena + Arcilla + APAM ( $mm^3/g$ )	20,9	17,6

Cuadro 5.1.5: Características de las muestras arcilla-APAM

Se observa que para las muestras provenientes de rama secas no hay diferencias grandes en el volumen de poros entre la muestra de arcilla y la muestra de arcilla y polímero. En cambio, para las muestras de rama húmeda ocurrió una disminución de 19 % del volumen de poros de tamaño superior a 400 nm al agregar polímero. La hipótesis, a diferencia del ensayo de succión, es que el polímero se inserta en los poros de la arcilla, absorbe agua cuando se le agrega y queda en los poros cuando se realiza la liofilización. De esta manera la APAM llena parcialmente los poros de tamaño mayor a 400nm de la arcilla. Probablemente, la diferencia de poros es tan pequeña ( $0,67 mm^3/g$ ) que al hacer la curva de retención de agua del material no se observaron estos cambios en el parámetro  $\lambda$  (índice de distribución de poros).

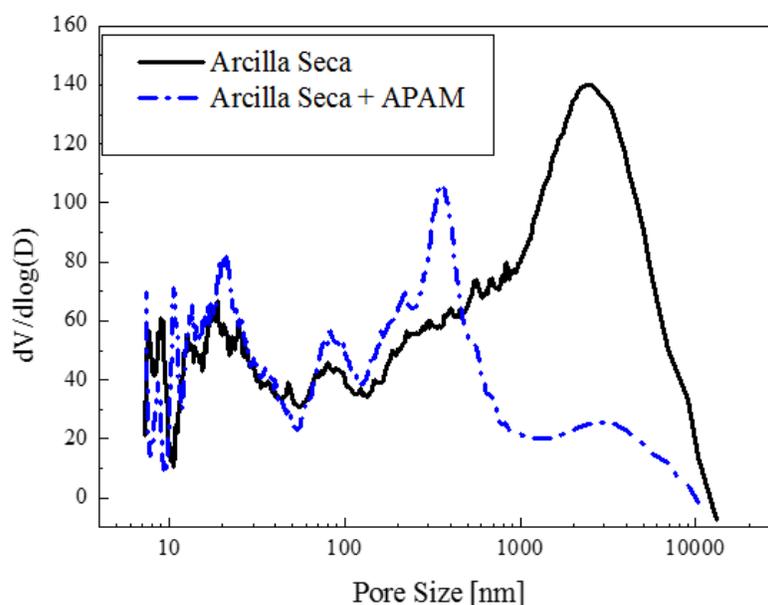


Figura 5.1.3: Volúmen de poros en función del diámetro de poros, muestra de rama seca

La Figura N<sup>o</sup> 5.1.3 permite comparar la distribución de tamaños de los poros para los casos Arcilla /Arcilla modificada con polímero, ambas con la misma humedad correspondiente a la rama seca (25,15 %). Se ve que la cantidad de poros es similar para los dos casos, y las distribuciones de poros se mantienen sin cambios significativos para los poros de tamaño menor a 100 nm.

Aún se nota que el material con APAM tiene mayor cantidad de poros de diámetro inferior a 400 nm y menor con diámetro superior a 400 nm comparado a la arcilla sola.

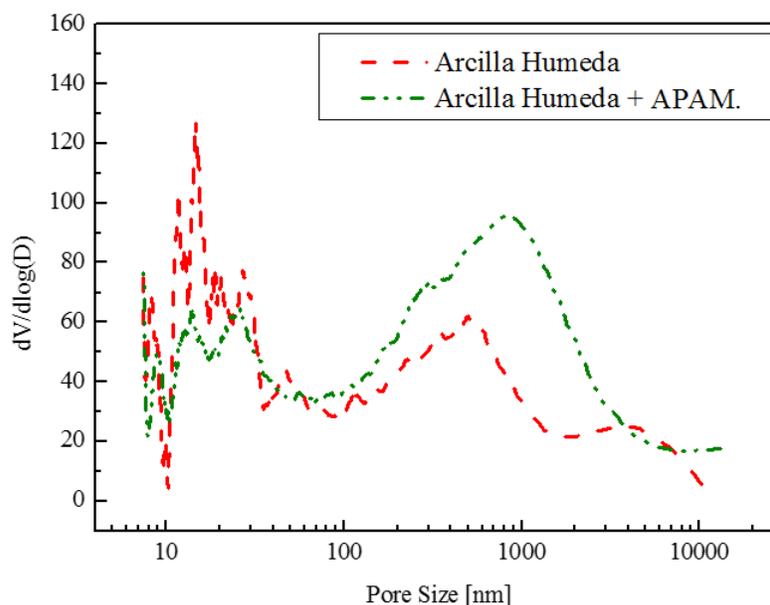


Figura 5.1.4: Volúmen de poros en función del diámetro de poros; muestra rama húmeda

Comparando las curvas de la Figura N° 5.1.4 se ve que la mezcla suelo/polímero modifica la configuración inicial de los poros de arcilla. La primera observación es que el volumen de poros disminuye, lo que se constata también con el valor del volumen total de poros, mayor para el caso de arcilla sola. Además, cambia la distribución de tamaño de poros, se ve, en la mezcla con polímero, un aumento de los poros entre 100nm y 3000nm. La hipótesis es que una parte de los poros iniciales se llenan parcialmente por el polímero que al hidratarse se expandió y aumentó su porosidad.

Para tener una idea de la estructura de poros debida a mezclas se puede citar el trabajo de M. Hajnos [[13]], donde realizó el ensayo de porosimetría en una arcilla de tipo caolinita, y luego en una mezcla arcilla/ácido húmico con concentraciones de 0.05 a 0.4 % en peso de polvo de ácido. La conclusión es que el agregado de ácido húmico aumenta la cantidad de poros y cambia la distribución de sus tamaños, con la aparición de tres rangos de diámetros de poros que no existen sin el polímero.

En otro trabajo, de D. Rajnovic [[26]] se estudió la influencia del agregado de Polietilenglicol (de concentraciones de 1 % y 5 % en peso) en la configuración de poros de una arcilla (con alto contenido de illita y cuarzo). La presencia de polímero disminuye el tamaño de los poros grandes, y aumenta el diámetro de los poros chicos. Eso se debe a que el polímero aumenta la distancia basal de la arcilla, y su afinidad con agua.

A continuación se comparan cuatro muestras: arcilla natural, arcilla + APAM, arena y arcilla 15 %, y arena - arcilla - APAM, a cada una de estas se las estudia en rama seca y rama húmeda, según la curva proctor.

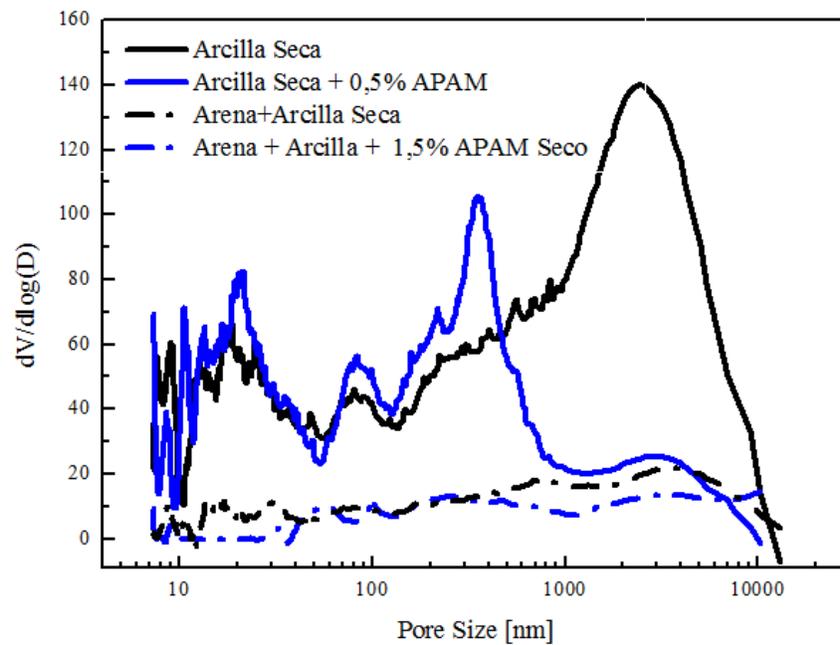


Figura 5.1.5: Porosimetría para muestras de rama seca

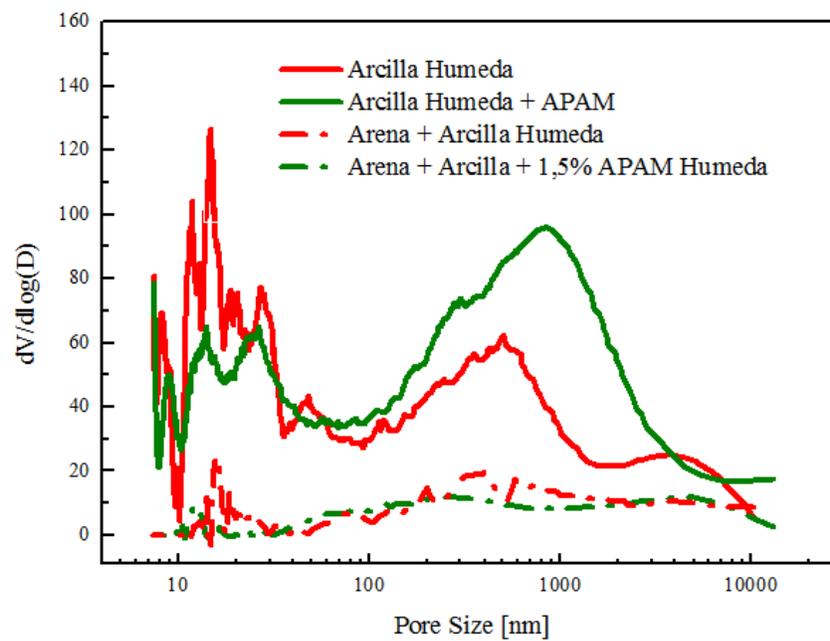


Figura 5.1.6: Porosimetría para muestras de rama húmeda

Del análisis de ambas figuras se puede generalizar que la arcilla natural posee mayor volumen de poros de diámetros menores, este volumen disminuye drásticamente cuando se estudia la arena con un 15% de arcilla y más aún para el caso de arena arcilla y polímero, siguiendo el mismo

razonamiento indicado en el caso anterior, el polímero ingresa a los poros por ello disminuyen su tamaño.

La disminución de cantidad de poros y la leve uniformidad en la distribución del tamaño de los mismos, tiene correlación con los resultados de succión. Cuando analizamos las curvas SWCC de arena + arcilla y arena + arcilla + polímero, obtuvimos que el parámetro de distribución de poros  $\lambda$  disminuye al agregarle polímero, el mismo resultado es al que llegamos analizando la porosimetría.

## Capítulo 6

# Barreras hidráulicas para depósitos de residuos sólidos

### 6.1. Introducción

En este capítulo se evaluará la utilización del material estudiado en este trabajo como parte de la cobertura final para rellenos de residuos urbanos. El material debe cumplir con requerimientos de impermeabilización, estabilidad física frente al deslizamiento sobre el relleno, y estabilidad volumétrica frente a cambios de humedad.

### 6.2. Residuos sólidos urbanos

La disposición final de los residuos sólidos es, hoy en día, uno de los problemas más importantes que afectan a las sociedades del mundo en términos ambientales. En la mayoría de las grandes ciudades el acelerado crecimiento demográfico ocasiona un incremento en la generación de elevadas cantidades de residuos sólidos urbanos (RSU), para éste se destinan lugares de disposición denominados rellenos sanitarios.

Un relleno sanitario es una obra de ingeniería, en la que se emplean técnicas y maquinaria de movimiento de tierras para construir rellenos artificiales. Los residuos sólidos empleados como material principal del relleno, tienen un elevado potencial contaminante que se refleja principalmente en la producción de lixiviados y biogas.

La necesidad de proteger el entorno del potencial contaminante obliga a confinar el vertedero de manera que no se produzca ningún tipo de migración de gases o lixiviados por el fondo, paredes laterales o por la superficie, para lograr esto se colocan dos capas de suelo o una combinación de suelo y geomembranas, una de ellas se encuentra en la parte inferior del relleno y la otra es una cobertura final, que se realiza en la etapa de cierre del relleno sanitario.

La capa inferior comprende el fondo y taludes, debe ser impermeabilizante previniendo la contaminación de suelos y aguas superficiales y subterráneas. Para ello se debe contar con una capa de suelo de baja permeabilidad. Si en el sitio elegido no existe ese tipo de suelo, será necesario crear la barrera artificialmente. Sobre la barrera geológica se debe colocar una membrana flexible impermeable para completar el cierre hidráulico.

La cobertura superior es el componente final en la construcción de un relleno de seguridad. Constituye la cubierta protectora final de los residuos depositados una vez que el relleno ha sido completado. La cobertura debe ser diseñada para minimizar la infiltración de aguas pluviales, por tanto minimizar la migración de líquidos y la formación de lixiviados, además de evitar la emanación de olores, proliferación de vectores como insectos y roedores y posibilitar que comience la etapa de

descomposición anaeróbica de los residuos. Se debe diseñar y construir una cobertura con un sistema multicapa. En general este sistema debe incluir las siguientes capas desde el nivel de superficie:

- Una capa de suelo vegetal para permitir el crecimiento de vegetación, favoreciendo la evapotranspiración y evitando la erosión.
- Una capa drenante. Lugar por el que los líquidos se dirigen llevándolos fuera del relleno.
- Una capa compuesta por dos materiales de baja permeabilidad, por ejemplo: una geomembrana (de espesor no inferior a 20.000, es decir 0,51 mm.), más una capa de suelo de baja permeabilidad.
- Una capa de suelo para corrección y emparejamiento de la superficie de los residuos.

Esto se completa con pendientes adecuadas para minimizar la infiltración y dirigir la escorrentía superficial alejando las aguas pluviales hacia colectores perimetrales del relleno.

Esta capa generalmente está integrada a un proyecto más general para la naturalización del terreno y su rehabilitación junto con los terrenos aledaños existentes.

En el presente trabajo se desarrollará la aplicación de la cobertura final del relleno, utilizando una capa del material estudiado en reemplazo de los materiales tradicionales utilizados en la capa.

### 6.3. Requerimientos físicos de barreras hidráulicas

Los requerimientos físicos de estas barreras están asociados a:

- Impermeabilidad
- Estabilidad volumétrica
- Estabilidad frente al deslizamiento

#### 6.3.1. Impermeabilidad

La cobertura final es una composición de cuatro capas, una de ellas es altamente impermeable, para evitar el ingreso de agua a los RSU.

Las normativas nacionales (Resolución N° 1143/02 de la Ley 12856) e internacionales (Normas EPA (Environmental Protection Agency)), establecen que la capa impermeabilizante debe tener un espesor mínimo de 1,0 m, con una permeabilidad  $k \leq 1,10^{-7} \text{ cm/s}$ . Esto se traduce en valor de permisividad menor a  $T = 1,10^{-9} \text{ 1/s}$ .

#### 6.3.2. Estabilidad volumétrica

Este requerimiento está asociado a la necesidad de evitar la formación de fisuras en la capa de material impermeabilizante, lo que conduciría a valores de permeabilidad secundaria elevados, afectando la funcionalidad de la capa.

La expansión y contracción de los suelos, originadas por los cambios de humedad, se pueden presentar en forma rápida o acompañando a las variaciones estacionales. Por tanto, si las expansiones que se desarrollan debido a un incremento de humedad no se controlan en alguna forma, estas presiones pueden ocasionar graves deformaciones y rupturas.

El mecanismo de formación de estas fisuras se ilustra en la Figura N° 6.3.1, y puede resumirse en la siguiente secuencia:

1. El material compactado aumenta su humedad debido a la acumulación de agua de lluvia en superficie. Este aumento de humedad provoca una expansión volumétrica que se traduce en un incremento de espesor, ya que el material está restringido a deformarse en dirección horizontal.

- Este material pierde humedad por secado en condiciones naturales. La pérdida de humedad se induce una contracción volumétrica. En estas condiciones el material sólo está restringido a contraerse en dirección horizontal por la resistencia no drenada del material. Si las tensiones inducidas por este cambio volumétrico superan la resistencia del material se formarán fisuras. Dependiendo de la magnitud de estas deformaciones podrán formarse fisuras en todo el espesor de la capa. Estas fisuras aumentarán la permeabilidad secundaria del material y dejará de cumplir su función impermeabilizante.

Para evitar este fenómeno es necesario que el material no experimente deformaciones volumétricas elevadas frente a cambios de humedad, o que tenga la flexibilidad suficiente para soportar estas deformaciones sin fisurarse.

El resultado de la inestabilidad volumétrica puede verse en la Figura N° 6.3.2

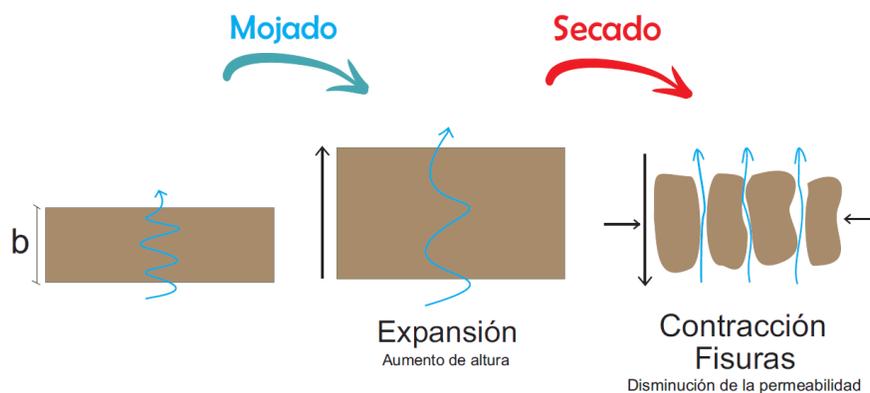


Figura 6.3.1: Esquema de cambios volumétricos



Figura 6.3.2: Fisuras en arcilla

La contracción puede verse influida por la facilidad al secado que tiene el suelo, es decir, cuanto mayor tiempo permanezca húmedo la contracción será controlada.

Esto se puede medir a partir del ensayo de succión, el valor  $S_{ae}$  indica la succión mátrica que debe superarse para que el aire ingrese y comience a desaturar el suelo. Notamos que al incorporar polímero este valor aumenta, con lo cual es beneficioso para controlar la contracción.

### 6.3.3. Estabilidad frente al deslizamiento

Los materiales de la capa superior deben tener resistencia mecánica suficiente para evitar que se deslicen sobre la superficie del RSU. Para evaluar la estabilidad de esta capa frente al deslizamiento se recurre al método de equilibrio límite de talud infinito. Cuyas principales hipótesis son: *i*) Suelo isotrópico y homogéneo, *ii*) Talud infinitamente largo y, *iii*) Superficie de falla paralela al talud. La evaluación de la falla de estabilidad global de RSU depende de las propiedades mecánicas del residuo y escapa el alcance de este trabajo.

Para un talud uniforme y relativamente largo, en el cual el mecanismo de falla esperado no es muy profundo, los efectos de borde son despreciables y el factor de seguridad puede calcularse por unidad de área, utilizando el criterio de falla de Mohr-Coulomb y realizando el equilibrio de fuerzas que se ilustra en la Figura N° 6.3.3:

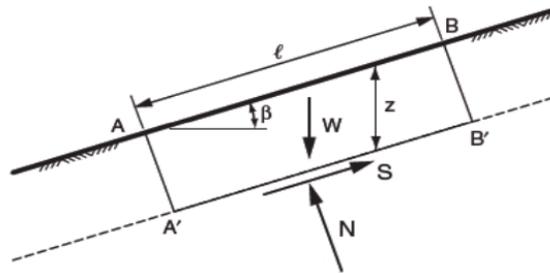


Figura 6.3.3: Talud infinito

La expresión general para el cálculo del coeficiente de seguridad  $FS$ , utilizando el método de talud infinito, es:

$$FS = \frac{c + (\gamma z \cdot \cos^2 [\beta] - \tan [\phi]) \tan [\beta]}{\gamma z \cdot \cos [\beta] \sin [\beta]}$$

Donde  $\beta$  es la inclinación del talud,  $c$  es la cohesión efectiva del suelo,  $\phi$  el ángulo de fricción interna del suelo,  $\gamma$  es el peso unitario del suelo y  $z$  es la profundidad del plano de falla respecto del nivel de superficie.

Para suelos cohesivos, en condiciones no drenadas, puede escribirse:

$$FS = \frac{s_u}{\gamma z \sin [\beta] \cos [\beta]} \tag{6.3.1}$$

Donde  $S_u$  es la resistencia al corte no drenada del suelo.

Para suelos granulares o suelos cohesivos a largo plazo, se obtiene:

$$FS = \frac{\tan [\phi]}{\tan [\beta]} \tag{6.3.2}$$

Para suelos cohesivos debe evaluarse la estabilidad en condiciones drenadas según la ecuación 6,3,2, y en condiciones no drenadas según la ecuación 6,3,1.

## 6.4. Desarrollo

A continuación se evaluarán distintas mezclas de materiales para cumplir con los requisitos indicados:

- Caso base (CB): Capa de arena y suelo vegetal (50cm) + capa de arcilla (50cm)
- Mezcla arcilla-polímero (MAP): Capa de arena y suelo vegetal (50cm) + Capa de arcilla con polímero (50cm)
- Mezcla arena-arcilla (MAA): capa de arena y suelo vegetal (50 cm) + Capa de mezcla de 85 % de arena y 15 % de arcilla (50cm)
- Mezcla arena-arcilla-polímero (MAAP): Capa de arena y suelo vegetal (50cm) + Capa de mezcla de 85 % de arena + 15 % de arcilla con polímero(50cm)

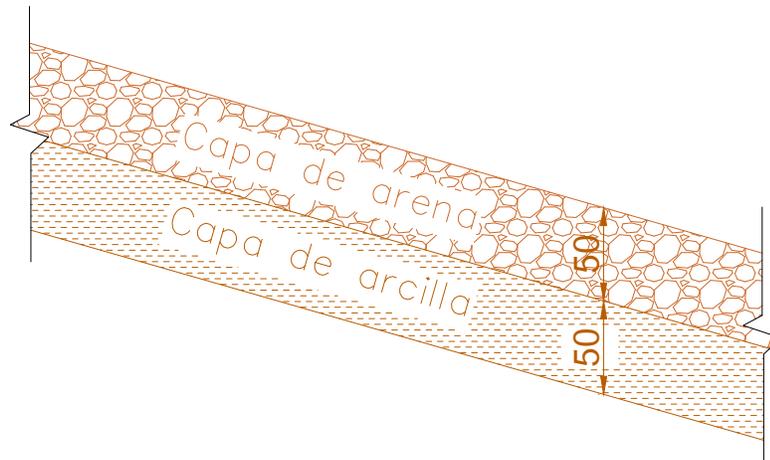


Figura 6.4.1: Esquema del caso base

### 6.4.1. Estabilidad volumétrica

Para evaluar la estabilidad volumétrica de los distintos casos propuestos se recurre a los ensayos de hinchamiento libre ejecutados en el LMS. Se calcula la deformación volumétrica que experimenta la muestra durante el ensayo como:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta e}{1 + e_o}$$

Donde  $e_o$  es la relación de vacíos inicial de la muestra compactada y  $\Delta e$  es la variación de relación de vacíos que experimenta la muestra durante la etapa de saturación.

Para cualquiera de los casos analizados la capa de arena es volumétricamente estable, por lo que no forma parte del análisis.

6.4.1.1. Caso base

- Como hemos confirmado en el ensayo de presión de hinchamiento, la arcilla no es estable volumétricamente, esto se puede analizar observando el cambio de relación de vacíos al humedecer la muestra. Para una relación de vacíos inicial  $e_o = 1,0$ , la muestra experimenta una variación de  $\Delta e = 0,427$  durante la etapa de saturación.. Esto se traduce en una deformación volumétrica  $\varepsilon_v = 21,3\%$ .

En la Figura N°6.4.2 se muestra la curva de variación de relación de vacíos en función de la presión para todo el ensayo de hinchamiento libre y consolidación. En la misma figura se indica el cambio volumétrico que ocurre durante la etapa de saturación.

El material presenta un grado de inestabilidad volumétrica medio, pero no lo suficiente para descartar su uso de manera directa.

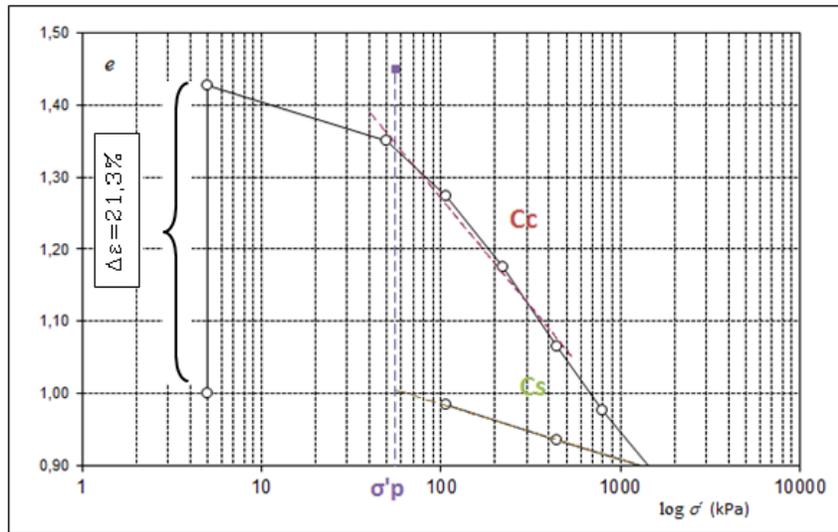


Figura 6.4.2: Curva de compresibilidad arcilla

6.4.1.2. Mezcla arcilla - polímero (MAP)

La mezcla de arcilla con polímero presenta mayor inestabilidad volumétrica ya que suma la inestabilidad volumétrica de ambos componentes. Tanto la arcilla como el polímero son expansivos al entrar en contacto con agua, ambos tienen gran capacidad de absorber agua, y en consecuencia expanden. Para una relación de vacíos inicial  $e_o = 1,0$ , la muestra experimenta una variación  $\Delta e = 1,0$ , durante la etapa de saturación. Esto se traduce en una deformación volumétrica  $\varepsilon_v = 50,0\%$ . Utilizar este material sin ningún estabilizante sería un gran error.

En la Figura N° 6.4.3 se muestra la curva de variación de relación de vacíos en función de la presión para todo el ensayo de hinchamiento libre y consolidación. En la misma figura se indica el cambio volumétrico que ocurre durante la etapa de saturación.

Debido a la inestabilidad volumétrica de este material se descarta su uso como componente de la capa de recubrimiento en esta configuración.

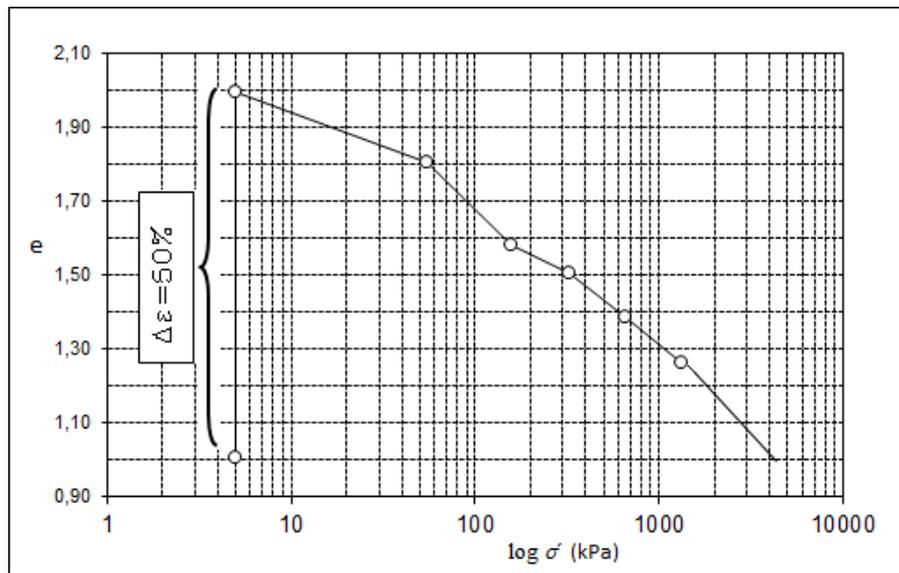


Figura 6.4.3: Curva de compresibilidad arcilla + APAM 1,5 %

#### 6.4.1.3. Mezcla arena - arcilla (MAA)

La mezcla de arcilla con arena en una relación 15 %-85 %, contribuye a mejorar su estabilidad volumétrica. Para una relación de vacíos inicial  $e_o = 0,502$ , la muestra experimenta una variación  $\Delta e = 0,04$  durante la etapa de saturación. Esto se traduce en una deformación volumétrica  $\varepsilon_v = 2,7\%$ .

En la Figura N° 6.4.4 se muestra la curva de variación de relación de vacíos en función de la presión para todo el ensayo de hinchamiento libre y consolidación. En la misma se indica el cambio volumétrico que ocurre durante la etapa de saturación.

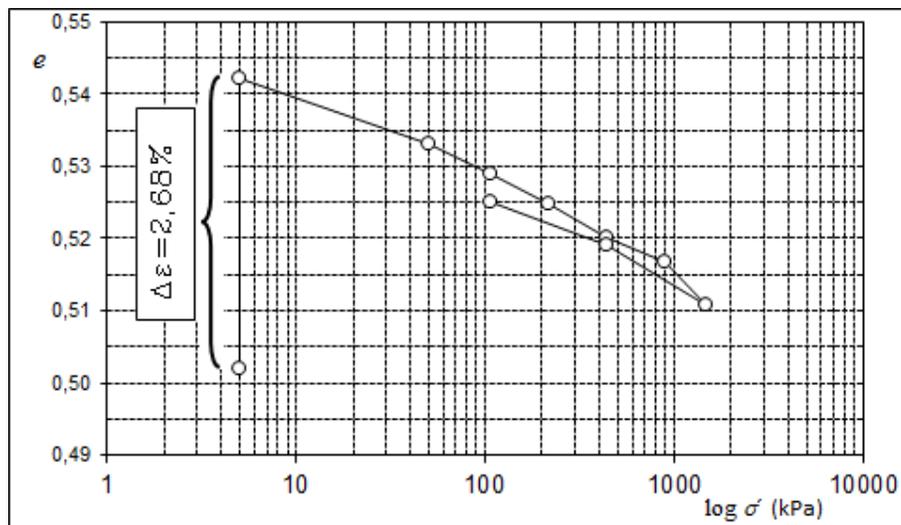


Figura 6.4.4: Curva de compresibilidad de arena y arcilla

**6.4.1.4. Mezcla arena - arcilla - polímero (MAAP)**

La mezcla de arcilla y polímero con arena, en una relación 15 %-85 %, aumenta la estabilidad volumétrica de la mezcla arcilla - polímero de manera considerable. Para una relación de vacíos inicial  $e_o = 0,511$ , la muestra experimenta una variación  $\Delta e = 0,096$  durante la etapa de saturación.

Esto se traduce en una deformación volumétrica  $\varepsilon_v = 6,25 \%$ .

Notamos nuevamente que al agregarle polímero el material se comporta con una mayor expansividad, pero, a pesar de ello, sigue siendo un material estable volumétricamente.

En la Figura N° 6.4.5 se muestra la curva variación de relación de vacíos en función de la presión para todo el ensayo de hinchamiento libre y consolidación. En la misma se indica el cambio volumétrico que ocurre durante la etapa de saturación.

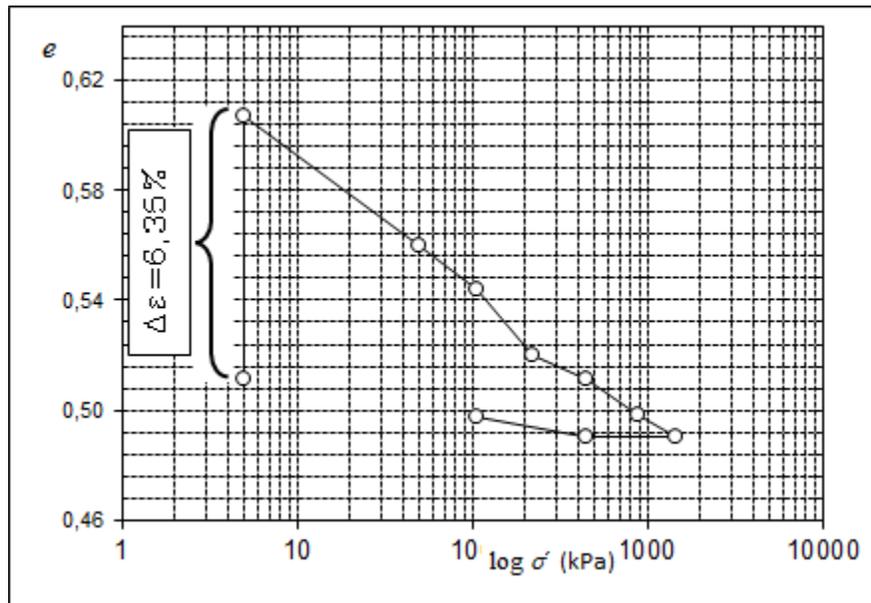


Figura 6.4.5: Curva de compresibilidad de arena arcilla y polímero

Como se mencionó anteriormente, el valor de entrada de aire tiene influencia en la contracción, y, por ende en la estabilidad volumétrica del material, podemos analizar los resultados de cada material en el Cuadro N° 6.4.1.

Material	$\varepsilon_v$	$S_{ae}$ [kPa]
CB	21,3 %	700
MAP	50 %	2000
MAA	2,68 %	3
MAAP	6,35 %	5

Cuadro 6.4.1: Valor de entrada de aire

**6.4.1.5. Resumen de resultados**

En el Cuadro N° 6.4.2 se resumen los resultados obtenidos para cada una de las mezclas analizadas. Debido a la elevada inestabilidad volumétrica de la mezcla de arcilla y polímero (MAP) se descarta su uso como parte de la capa de cierre.

Caso	CB	MAP	MAA	MAAP
$\varepsilon_v$	21,3	50	2,7	6,4

Cuadro 6.4.2: Expansión volumétrica para cada mezcla

### 6.4.2. Estabilidad frente al deslizamiento

A continuación se calcula el coeficiente de seguridad frente al deslizamiento de la capa de cobertura de acuerdo a lo indicado en el título 6.3.3. El plano de deslizamiento adoptado es el plano inferior de la capa impermeabilizante. Para el desarrollo de este trabajo se evalúa la estabilidad sólo en condiciones no drenadas. Para evaluar la estabilidad en condiciones drenadas sería necesario ejecutar una batería de ensayos de compresión triaxiales, lo cual escapa del alcance del trabajo realizado.

Los valores de resistencia al corte no drenada  $S_u$  de las mezclas MAA y MAAP se obtienen de los ensayos de compresión simple ejecutados en el LMS. De esta manera, se calculan los valores de  $S_u$  en función de los valores de resistencia a la compresión simple  $q_u$  como:

$$S_u = q_u / 2$$

La resistencia al corte no drenada de la arcilla compactada del caso base, puede estimarse como

$$S_u \approx 0,23 \cdot \sigma'_v \cdot OCR^{0,8}$$

Donde  $\sigma'_v$  es la presión vertical efectiva y  $OCR = 2,0$  es la relación de sobreconsolidación adoptada debido al efecto de compactación del material.

Para todos los casos se consideró una capa de arena y suelo vegetal de 50cm de espesor con un peso unitario  $\gamma = 19,0 kN/m^3$ , y un espesor de capa impermeabilizante de 50cm. En el Cuadro N° 6.4.3 se resumen los resultados obtenidos del coeficiente de seguridad para distintos valores del ángulo  $\beta$  de inclinación del talud menores a  $30^\circ$ . El estudio de inclinaciones mayores a  $30^\circ$  pierde interés práctico ya que el limitante es la estabilidad del RSU frente a fallas de estabilidad global. El valor mínimo recomendado del coeficiente de seguridad es  $FS_{min} = 1,50$ . Se descartó la mezcla MAP debido a la inestabilidad volumétrica de la mezcla arcilla - polímero.

Se observa que para el caso base (CB) no se cumplen los requerimientos de factor de seguridad mínimos para inclinaciones superiores o iguales a  $\beta = 20^\circ$ . En estas condiciones se descarta su uso como material de cobertura.

Tanto los casos MAA como MAAP presentan valores elevados de coeficiente de seguridad para inclinación hasta  $\beta = 30^\circ$ . Si bien, inclinaciones de  $30^\circ$  resultan algo elevadas como pendientes definitivas para depósitos de residuos sólidos, este mismo procedimiento es aplicable para otro tipo de coberturas como el caso de escombreras de material proveniente de actividades mineras en las que pueden alcanzarse pendientes mayores.

Se observa que en el caso MAAP se obtienen mayores valores de coeficiente de seguridad que para el caso MAA. Esta mejora puede ser aprovechada realizando variaciones en las proporciones de arcilla, polímero y arena utilizados, en función de la disponibilidad y costo de los materiales.

Este análisis requiere de estudios adicionales que escapan del alcance de este trabajo.

Material	$\gamma [kN/m^3]$	$S_u [kPa]$	$\beta = 15^\circ$	$\beta = 20^\circ$	$\beta = 25^\circ$	$\beta = 30^\circ$
CB	13,0	5,9	1,8	1,4	1,1	1,0
MAP	-	-	-	-	-	-
MAA	19,0	14,0	2,9	2,2	1,9	1,6
MAAP	19,0	16,0	3,3	2,6	2,1	1,9

Cuadro 6.4.3: Factores de seguridad para los materiales propuestos

### 6.4.3. Impermeabilización

Los valores de permeabilidad de las mezclas de arena-arcilla y arena-arcilla-polímero fueron determinados a partir de ensayos de consolidaciones realizados en el LMS. Con esto, puede calcularse la transmisividad de la capa impermeable como:

$$T = \frac{k}{b}$$

donde  $k$  es la permeabilidad del material y  $b$  es el espesor de la capa (50cm)

En el Cuadro N° 6.4.4 se indican los valores de permisividad calculados para ambos casos. Tanto el caso base (CB) como la arcilla-polímero (MAP) han sido descartados en las etapas anteriores de diseño.

Se observa que ambas mezclas cumplen con los valores de permisividad mínima  $T = 1,0 \times 10^{-9} 1/s$ . Se observa que el caso MAAP presenta menores valores de permisividad que el caso MAA.

Caso	Permeabilidad [ $cm/s$ ]	Permisividad [ $1/s$ ]
MAA	$5,1,10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-10}$
MAAP	$2,4,10^{-9}$	$4,8 \times 10^{-11}$

Cuadro 6.4.4: Valores de permisividad calculados

## 6.5. Conclusiones

En este capítulo se evaluó el comportamiento del material estudiado en este trabajo para ser utilizado como material de cobertura en rellenos sólidos urbanos. Se evaluaron distintas mezclas para la capa impermeable: arcilla (CB); arcilla y polímero (MAP); arena y arcilla (MAA); arena, arcilla y polímero (MAAP).

Se evaluó la estabilidad volumétrica, la estabilidad física frente al deslizamiento y el grado de impermeabilización de cada caso.

La mezcla de arcilla y polímero (MAP) fue descartada debido a su propia inestabilidad volumétrica. Se midió una expansión volumétrica  $\varepsilon_v = 50\%$  durante el ensayo de hinchamiento libre. Este elevado valor de hinchamiento sugiere que la capa de este material experimentará fisuras cuando sea sometido a ciclos de humedecimiento y secado. De esta manera dejará de cumplir con sus funciones de impermeabilización.

La capa de material compuesta sólo por arcilla (CB) se descartó debido a los bajos valores de coeficiente de seguridad frente al deslizamiento para taludes con inclinaciones mayores o iguales a  $\beta = 20^\circ$ .

Tanto las mezclas de MAA y MAAP cumplieron con todos los requisitos establecidos, incluyendo el valor de permisividad mínima  $T = 1,0 \times 10^{-9} 1/s$ .

La mezcla MAAP, con inclusión de polímero, presentó un mejor comportamiento respecto de la estabilidad frente al deslizamiento y del grado de impermeabilización alcanzado. Además, la incorporación de polímero presenta la ventaja de que aumenta el  $S_{ae}$ , con lo cual, la mezcla será más dúctil y previene las fisuras debidas a la contracción del suelo. Esto último sugiere que es posible optimizar la mezcla de arena-arcilla, para iguales requerimientos técnicos.

En la Figura N° 6.5.1 se resumen las características de cada mezcla y su cumplimiento frente a los requerimientos.

Característica	Arcilla	Arena	Arcilla + APAM	Arcilla + Arena	Arcilla + Arena + APAM
Permeabilidad					
Resistencia al corte					
Estabilidad volumétrica					
Conclusión	No verifica	No verifica	No verifica	Verifica	Verifica

Figura 6.5.1: Resumen características de cada mezcla

Por lo tanto, la capa de MAAP tiene ventajas frente a MAA, en consecuencia, esta capa será la elegida para sustituir la forma tradicional de realizar la cobertura final en un relleno sanitario.

## Capítulo 7

# Conclusiones

El presente trabajo focaliza el estudio de agregado de polímeros en suelos con el objeto de mejorar el comportamiento hidro-mecánico de barreras hidráulicas en rellenos de almacenamiento de residuos domiciliarios. El programa desarrollado estudió como la incorporación de poliacrilamida anionica (APAM) afecta las propiedades de los suelos finos y granulares. El diseño de mezclas que puedan ser utilizadas como barreras compactadas impermeables inferiores en rellenos sanitarios y en rellenos de cobertura cuando se dispone el cierre del mismo ha sido el objetivo fundamental de esta tesis. Se presentaron una serie de ensayos para la caracterización física, hidráulica y mecánica de los materiales constituyentes de las mezclas diseñadas. Estas mezclas se constituyeron por una arcilla natural de origen marino, un arena de río y el polímero. El estudio de la mezclas tuvo como objetivo comprender la interacción del polímero y la arcilla y el efecto del polímero en una mezcla óptima de arena-arcilla. Para el estudio de la interacción de suelos finos y el polímero se adoptaron dos porcentajes en peso diferentes del polímero: 0,5 % y 1,5 %. La elección de estos porcentajes se basó en la búsqueda bibliográfica realizada. A estas dos mezclas se les realizaron ensayos físicos para caracterizar como se modifica su plasticidad, la agregación de partículas, ensayos de compactación para estudiar como se modifican la densidad máxima y la humedad óptima para su colocación en campo, ensayos de hinchamiento libre y consolidación para estudiar la expansividad, la presión de hinchamiento y los parámetros de deformabilidad ante carga, ensayos de caracterización hidráulica para evaluar la conductividad hidráulica, la capacidad de retención de agua de las muestras arcilla-polímero. Por último se estudio la microestructura de las mezclas con dos técnicas que apuntan a entender los mecanismos de interacción a escala meso y microporal como son el porosímetro de intrusión de mercurio y el microscópio de barrido electrónico. De todos estos ensayos se puede concluir:

### Conclusión Mezcla Arcilla - APAM 0,5 %

- La adición de APAM a la arcilla generó un aumento de la capacidad de absorción de agua, evidenciado por el aumento de los límites de Atterberg, originalmente la arcilla posee un  $IP = 41$ , mientras que la mezcla  $IP = 100$ . Esto se debe a la capacidad de absorber agua que tiene el polímero del (61,1 %, obtenido por el ensayo de absorción de humedad).
- La conductividad hidráulica del suelo no sufrió cambios por el agregado de APAM en un 0,5 % en peso, al igual que las curvas de retención de agua no han cambiado sus parámetros.
- No modifica sustancialmente la expansividad del suelo, por medio de hinchamiento libre se determinó que el aumento de expansividad de la mezcla respecto de la arcilla es sólo del 0,74 %.

- La densidad máxima no se ve afectada por la incorporación del polímero pero si se observa una disminución de la humedad óptima del orden 3 %.
- Del ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio se destacó la disminución de la cantidad de poros pequeños por el agregado de APAM en la muestra húmeda. En cambio; para la muestra perteneciente a rama seca; no se han visto cambios. Esto es coherente con la hipótesis adoptada de que los valores residuales del grado de saturación para suelos con y sin polímero son iguales.
- En las imágenes obtenidas por medio de microscopia electrónica de barrido (SEM) del suelo modificado con APAM, se pudieron ver partículas de forma redondeada adheridas a las láminas de arcilla del suelo natural. Estas podrían ser el polímero. Para confirmarlo, habría que efectuar una mezcla con alto porcentaje de polímero a fin de estudiar el caso extremo de la configuración suelo - APAM.
- Se puede decir que la primer mezcla analizada no modifica sustancialmente las propiedades de la arcilla.

## Conclusión Mezcla Arcilla - APAM 1,5 %

La segunda mezcla que se estudió en este trabajo en la incorporación de 1,5 % en peso de APAM.

- Se obtuvo un aumento de la capacidad de absorción de agua, traducido en el aumento de los límites de Atterberg,  $IP = 110$ , este valor elevado se debe a la gran capacidad de absorción del polímero.
- La permeabilidad disminuye a  $k = 1,5,10^{-11}m/s$ , debido a que el polímero se inserta en los poros de la arcilla, ocluyéndolos o bien achicando su tamaño, esto provoca una disminución de la porosidad de la arcilla. Esto se corrobora con las imagenes provistas por la microscopía electrónica de barrido, en las cuales se observa cómo el polímero forma una microestructura de “hilos” en los poros, ligando los granos de arcilla entre sí. Gracias a este último efecto mencionado del APAM la mezcla resulta más cohesiva.
- La densidad máxima de las muestra con polímero disminuye levemente ( $0,5KN/m^3$ ) y La humedad óptima disminuye en forma apreciable (6 %) con respecto al valor obtenido con la arcilla sola.
- A partir del ensayo de hinchamiento libre se observa que al agregar 1,5 % de APAM, el suelo se hace altamente expansivo, se obtuvo un hinchamiento del 50 %. Este gran hinchamiento se debe a que ambos materiales empleados tienen carácter expansivo al tener contacto con agua, la arcilla por sus minerales de montmorillonita, y el polímero por ser hidrofílico. Esta característica evidencia que el material no es estable volumétricamente.
- Analizando la curva de retención se observa un alto valor de entrada de aire  $S_{ae} = 2000kPa$ , éste es el valor de succión mátrica que debe superarse para que el aire ingrese a los poros y el suelo comience a desaturarse, con lo cual, se podría concluir que la retención del agua en el interior de los poros es mucho mayor, y la desaturación del suelo se ve aletargada. Nuevamente la retención de agua adicional observada es debido al polímero por su característica de super absorbente.
- Con lo cual, esta mezcla es impermeable, pero posee malas condiciones de estabilidad volumétrica debido a su potencial hinchamiento, con lo cual, para utilizarla se debería agregar un elemento que la estabilice.

## Conclusión Mezcla Arena - Arcilla - APAM

La caracterización de la mezcla arena arcilla requirió establecer las proporciones óptimas de ambos materiales para el uso como material compactado en ingeniería civil, para ello se realizó un estudio de mezclas, variando la cantidad de arena y arcilla con polímero (1,5 %) para seleccionar como mezcla óptima aquella que posea la máxima densidad seca. El resultado de este estudio arrojó que la mezcla óptima es combinando 85 % de arena con un 15 % de mezcla arcilla con polímero en 1,5 %. También se analizó las características de la mezcla arena 85 % y arcilla 15 %, para comparar los resultados al agregar polímero.

Otro aspecto que se estudio para esta mezcla es el efecto del polímero en la deformabilidad y la resitencia del material. Estos dos elementos son fundamentales para el uso de la mezcla en la cobertura de rellenos sanitarios que presentan pendientes variables según el tipo de residuo a disponer.

- Se obtuvo una mezcla impermeable, cuyo  $k = 2,4 \cdot 10^{-11} m/s$  para la mezcla arena + arcilla + APAM, mientras que para arena + arcilla es de  $k = 5,9 \cdot 10^{-11} m/s$ , se observa una disminución de la permeabilidad al incorporar polímero a la mezcla. La permeabilidad se ve con una gran influencia del material fino, ya que la arena sola posee valores de permeabilidad altos, aproximadamente  $k = 1 \cdot 10^{-5} m/s$ . Al realizar el ensayo de columna de permeabilidad se observó que el agua no pudo infiltrarse hacia los sitios más elevados de la columna.
- Es estable volumétricamente, el hinchamiento de la mezcla sin polímero es de 2,68 %, mientras que, al agregar polímero este hinchamiento aumenta a 6,35 %. Este aumento de expansividad se observa en todas las mezclas y es debido a las características expansivas del polímero.
- Del ensayo de compresión simple, se observa que al agregar polímero la mezcla se hace más dúctil, teniendo mayores deformaciones al alcanzar el esfuerzo último.
- Además, se observa un aumento del esfuerzo último debido a la presencia del polímero. La diferencia entre la carga última de la mezcla arena + arcilla y arena + arcilla + APAM se incrementa cuando la humedad de las muestras aumenta, Cuadro N° 4.2.9. Esto puede deberse a que cuanto más hidratado esté el polímero, mayor serán sus efectos, es decir, será mayor la estructura de hilos formada, entrará más en contacto con la arena y arcilla, aumentando su resistencia, y haciendo más deformable al suelo. En cambio, al estar poco hidratado, los hilos se formarán en menor cantidad, y su estructura será débil, casi insignificante. Esto se condice con la hipótesis propuesta en 3.1.3.2, enunciando que a grados de saturación bajos el efecto del polímero se ve disminuído.
- Del análisis de las curvas SWCC se observa que el valor de  $S_{ae}$  aumenta al agregar polímero, esta característica puede prevenir la fisuración, ya que al aumentar  $S_{ae}$  la mezcla comenzará desaturarse muy levemente, debido a que para que el aire ingrese a los poros deberá superar esa succión  $S_{ae}$ , por lo tanto, las tensiones generadas por el suelo al contraerse serán menores. Este parámetro es de gran importancia a la hora de hablar de permeabilidad secundaria.
- Del ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio, se observa una leve disminución de los poros en la mezcla con polímero debido a que este se aloja en ellos. Esta conclusión se aborda también desde la curva SWCC, ya que en la mezcla con polímero se observó una disminución de  $\lambda$ (parámetro de distribución de poros).
- Luego de haber estudiado las propiedades y observado mediante SEM se puede hacer un esquema de la interacción del polímero con la arena y arcilla. Figura N° 7.0.1.

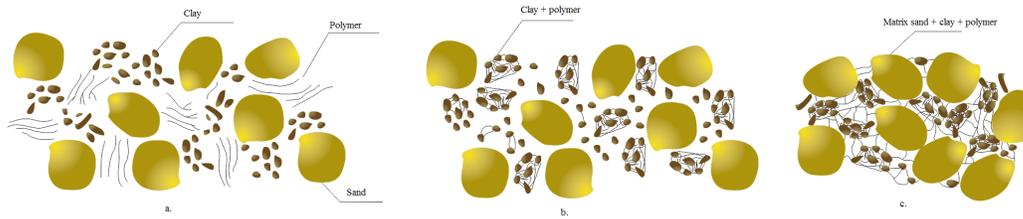


Figura 7.0.1: Interacción suelo - polímero

a) Se observan los materiales por separado cuando la muestra se mezcla sin agua, los granos grandes representan la arena mal graduada, las líneas el polímero y las partículas mas pequeñas en forma de lajas representan la arcilla. En seco los materiales no se vinculan entre sí.

b) Una vez humedecida la mezcla, el polímero comienza a interactuar con la arcilla, formando hilos y pequeñas aglomeraciones de suelo difícil de desvincular.

c) El material se aglomera formando una matriz compacta.

- Esta mezcla posee un bajo costo debido al gran porcentaje de arena involucrada. El polímero se utiliza en muy poca cantidad, y su costo es de \$300/kg.
- La condición de impermeabilidad, estabilidad volumétrica y el aumento de la resistencia evidencian un material apto para utilizarlo en rellenos sanitarios (Capítulo 6).
- En todas las mezclas con polímero se observó la particularidad de que cuanto más hidratado esté el polímero, mayor serán sus efectos. En cambio, para grados de saturación bajos, el polímero no llega a reaccionar y formar su estructura de hilos.

## Futuros trabajos

- Para determinar la veracidad de algunas hipótesis se deberían hacer más ensayos de succión mediante papel filtro y así determinar con mayor exactitud los parámetros de calibración de las curvas de retención.
- Analizar la durabilidad de las mezclas, la evolución de sus propiedades en el tiempo.
- Evaluar en detalle la incorporación del polímero en solución.
- Estudiar la influencia de otros polímeros en búsqueda de mejores mezclas.
- Ensayos de congelamiento y deshielo.

# Bibliografía

- [1] Awad M. Helalia y J. Letey, Polymer Type and water quality effects on soil dispersion.
- [2] ATR- Theory and Applications, Pike Technologies, disponible en [[www.piketech.com](http://www.piketech.com)]
- [3] Bachy-Soletanche, Examples and benefits of using polymer support fluids as an alternative to bentonite, Hoja técnica, Bachy-Soletanche, disponible en [www.soletanche-bachy.com.ar](http://www.soletanche-bachy.com.ar)
- [4] Bakass y col, Absorption and desorption of liquid water by a superabsorbent polymer: Effect of polymer in the drying of the soil and the quality of certain plants, *Journal of Applied Polymer*, (2001).
- [5] Bulut, R., Choon Leong, E. “Indirect measurement of suction”, (2007).
- [6] Carroll, Clay minerals: a guide to their X - Ray identification, (1970).
- [7] Concetta Tomei y col, Ex situ remediation of polluted soils by absorptive polymers, and a comparison of slurry and two-phase partitioning bioreactors for ultimate contaminant degradation, (2013).
- [8] Clase “Chapitre II: Protocole expérimental et techniques d’analyse”, descargable en [[http://alirachini.chez-alice.fr/files/these/Chapitre\\_II.pdf](http://alirachini.chez-alice.fr/files/these/Chapitre_II.pdf)]
- [9] Daughlon Christian G, Quantitation of acrylamide (and polyacrylamide), critical review of methods for trace determination/formulation analysis and future research recommendations, (2010).
- [10] Fredlund D. G. & Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons, INC, (1993).
- [11] IUT Annecy. Spectrométrie du moyen Infrarouge, Mesures Physiques, [[www.iut-acy.univ-savoie.fr](http://www.iut-acy.univ-savoie.fr)].
- [12] Green Steven y D.E Scott . Polyacrylamide, a review of the use, effectiveness and cost of a soil erosion amendment, (1999).
- [13] Hajnos, M. Influence of Humic Acid on the structural properties of kaolin - Mercury Porosimetry Studies, (1998).
- [14] Jefferis y C.Lam, Polymer support fluids: use and misuse of innovative fluids in geotechnical works. ( 2013 ).
- [15] John L. Daniels and Hilary I. Inyang. Contaminant barrier material textural response o interaction with aqueous polymers.
- [16] John Derec, Utilización de polímeros en la estabilización de suelos para su uso en carreteras, ejecución de un tramo experimental en el enlace de jédula de la A-382, (2007).

- [17] Kaith y col. Temperature, pH and electric stimulus responsive hydrogels from Gum ghatti and polyacrylamide-synthesis, characterization and swelling studies, (2010).
- [18] Kurenkov V.F. y col, Application of Polyacrylamide flocculants for water treatment, (2002).
- [19] Lentz, R.E Sojka, Field Results Using Polyacrylamide to Manage Furrow Erosion and Infiltration, (1994).
- [20] Lu Ning y Likos W. J. Unsaturated Soils Mechanics. Jhon Wiley & Sons Inc, New Jersey, (2004).
- [21] Maghchichey col. Use of polymers and biopolymers for water retaining and soil stabilization in arid and semiarid regions, (2010).
- [22] Montalban, Sanchez-Soto, Fabricación y caracterización de aerogeles de arcilla\polímero, (2011).
- [23] Operator's Manual (version 8), 5TE Water content, EC and temperature sensors. Decagon Devices.
- [24] P.G Marinos y col, Balkema, Engineering Geology and the Environment, (1997).
- [25] Pizzon Bello, Requena Blamaseda. Caracterización y estudio reologico de una bentonita colombiana. Universidad Nacional de Colombia, (1996).
- [26] Rajnovic y col. The influence of polymer addition on flexural strength, fracture mode and porosity of traditional ceramics, (2011).
- [27] Razakamanantsoa A.R., Etudes du comportement hydromécanique, chimique et de la durabilité des géomatériaux d'étanchéité renforcés par ajout de polymères, (2009).
- [28] Santamarina J.C, "Specific surface: determination and relevance".
- [29] Shafer A. L., Hargrove J.Q., Harris J.M., "Stability analysis for Bioreactor Landfill Operations", (2000).
- [30] Sowwan y col. Analysis, characterization and some properties of polyacrylamide-ni(ii) complexes, (2011).
- [31] Sun y col. Synthesis, characterization, and flocculation properties of branches cationic polyacrylamide, (2012).
- [32] Tables de fréquence des vibrations de valence caractéristiques en IR, descargable en [<http://www.fsr.um5a.ac.ma/cours/chimie/zaydoun/master0708/TablesIR.pdf> ].
- [33] Topp, J.C. David J.L. "Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines", Water resources research, Vol 16 N<sup>o</sup> 3,(1980).
- [34] S.S. Agus, Y.F. Arifin, T. Schanz, Hydro-mechanical characteristics of a polymer - enhanced bentonite-sand mixture for landfill applications, (2005).
- [35] Uretek, Leader Français de l'injection de résine expansive, Procédés et Références, Documento PDF.
- [36] Van Genuchten , M. Th. " A closed-form equation for predicting thehydraulic conductivity of unsaturated soils", (1980).
- [37] Waseim Ragab Azzam, Utilization of polymer stabilization for improvement of clay microstructures, (2014).

- [38] Yang H, Rahardjo H, Wibawa B and Leong E. "A soil column apparatus for laboratory infiltration study", *Geotechnical Testing Journal* Vol 27 N<sup>o</sup>4, (2004).
- [39] Zekkos et al. "Unit weight of municipal solid waste". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*, (2006).
- [40] Zhou et al., *Polymer modified clay as impermeable barriers for acid mining tailings*, (1993).