



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y GEOLOGÍA

TESIS DE GRADO EN INGENIERÍA CIVIL (84.00)

---

# CARACTERIZACIÓN DE SUELO-POLÍMERO PARA USO EN BARRERAS HIDRÁULICAS EN RELLENOS SANITARIOS

---

Autor:

Camilo CASAGRANDE

Director:

Dr. Ing. Diego Guillermo MANZANAL

Co-Directores:

Ing. Mauro CODEVILLA

Dr. Ing. Teresa M. PIQUÉ

Diciembre, 2019

*Dedicado a  
la Universidad de Buenos Aires, a mi familia, amigos y profesores*

# Agradecimientos

Al estudiante Nicolás Tasso por su compañerismo en los trabajos en el LMS. Al Ing. Gaston Fernandez por su ayuda al comienzo de los ensayos experimentales y el uso del LMS.

A la Dr. Ing. Maria Teresa Pique por sus sugerencias y ayuda en la realización de este trabajo.

Al Ing. Mauro Codevilla por su ayuda, recomendaciones, consejos y asistencia para la ejecución del programa experimental en laboratorio.

Al Dr. Ing. Diego Manzanal por sus sugerencias y dirección en la realización de esta tesis.

## Resumen

El empleo de polímeros como aditivo de suelos naturales es una técnica en pleno desarrollo y estudio desde hace varias décadas por numerosos investigadores. Los polímeros modifican las propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas de los suelos naturales para distintas aplicaciones ingenieriles. En el presente trabajo se analiza el comportamiento de mezclas de arcilla y arena-arcilla con incorporación de poliacrilamida aniónica (APAM) en diferentes porcentajes. El objetivo principal del programa experimental es la evaluación de dichas mezclas como una alternativa de las barreras hidráulicas convencionales de residuos sólidos urbanos (RSU). Los resultados experimentales mostraron al APAM como un polímero hidrofílico y súper absorbente que incrementa el índice de plasticidad del suelo. Se observó un importante incremento en la resistencia a la compresión simple en las mezclas de arena-arcilla-APAM. El hinchamiento libre y la presión de hinchamiento aumentaron con la concentración de APAM. El comportamiento hidráulico en condiciones saturadas y no saturadas presentó diferencias bajo la interacción de fluidos de distinta naturaleza química como el agua destilada, la salmuera y el kerosene. El estudio de la microestructura puso en evidencia que la incorporación de APAM reduce levemente el volumen de poros. Los resultados obtenidos permitieron caracterizar a la mezcla arena-arcilla-APAM como una posible alternativa de barrera hidráulica superior de relleno sanitario. Un estudio numérico de infiltración y resistencia mecánica de una barrera hidráulica superior se realizó con los resultados de las distintas mezclas estudiadas experimentalmente. Los resultados permiten establecer valores razonables de espesores, tasas de infiltración y estabilidad mecánica.

## Abstract

The use of polymers as an additive of natural soils is a technique in full development and studied for decades by many researchers. Polymers modify the physical, hydraulic and mechanical properties of natural soils for different engineering applications. The present work analyzed the behavior of clay and sand-clay mixtures with anionic polyacrylamide (APAM) in different quantities. The main objective of the experimental program was the evaluation of mixed mixtures as an alternative to the hydraulic barriers of urban solid waste (RSU). The experimental showed to APAM as a hydrophilic polymer and super water absorbent that increased its plasticity index. A significant increase in resistance to unconfined compression was detected in the sand-clay-APAM mixtures. Free swelling and swelling pressure increased with the concentration of APAM. The hydraulic behavior in a saturated and unsaturated condition presented differences under the interaction of fluids of different chemical nature such as distilled water, brine and kerosene. The microstructure showed that the implementation of APAM reduces the volume of pores with a decrease in infiltration and soil erosion. The permitted results characterized the sand-clay-APAM mixture as a alternative of a top hydraulic barrier for landfill.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>6</b>
1.1. Planteo del problema . . . . .	6
<b>2. Estado del arte</b>	<b>7</b>
2.1. Rellenos sanitarios. Aspectos generales . . . . .	7
2.1.1. Requerimientos . . . . .	11
2.2. Interacción fluido-partícula . . . . .	12
2.2.1. Doble capa difusa . . . . .	14
2.3. Suelo-polímero . . . . .	18
2.3.1. Aplicaciones en lodos de perforación . . . . .	18
2.3.2. Aplicaciones en sistemas de riego . . . . .	19
2.3.3. Estabilización de suelos . . . . .	19
2.3.4. Aplicaciones ecológicas . . . . .	21
2.3.5. Poliácridamida aniónica (APAM) . . . . .	22
<b>3. Programa experimental</b>	<b>27</b>
3.1. Materiales . . . . .	27
3.1.1. Arena . . . . .	27
3.1.2. Arcilla . . . . .	28
3.1.3. Fluidos . . . . .	31
3.2. Métodos experimentales . . . . .	32
3.3. Ensayos realizados . . . . .	34
3.3.1. Límites de Atterberg . . . . .	34
3.3.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM) . . . . .	36
3.3.3. Ensayos de hinchamiento libre . . . . .	38
3.3.4. Ensayos de consolidación . . . . .	38
3.3.5. Ensayos de compresión simple . . . . .	40
3.3.6. Ensayos de succión . . . . .	41
3.3.7. Ensayos de conductividad hidráulica saturada . . . . .	44
3.3.8. Ensayos de conductividad hidráulica no-saturada . . . . .	46
3.4. Resultados del programa experimental . . . . .	49
3.4.1. Límites de Atterberg: efecto del tipo de fluido . . . . .	49
3.4.2. Proctor estándar . . . . .	50
3.4.3. Hinchamiento libre y consolidación . . . . .	51
3.4.4. Compresión no confinada . . . . .	54
3.4.5. Curva de retención . . . . .	57
3.4.6. Conductividad hidráulica saturada . . . . .	59
3.4.7. Conductividad hidráulica no saturada . . . . .	60
<b>4. Análisis y discusión de resultados</b>	<b>63</b>
4.1. Incorporación de APAM en mezclas de arena-arcilla . . . . .	63
4.1.1. Cambios en la curva de retención . . . . .	63
4.1.2. Conductividad hidráulica . . . . .	64
4.1.3. Rigidez y resistencia . . . . .	66
4.2. Efectos del fluido permeante . . . . .	71
4.2.1. Límites de Atterberg . . . . .	71

4.2.2.	Resistencia . . . . .	73
4.2.3.	Conductividad hidráulica . . . . .	74
<b>5.</b>	<b>Aplicación tecnológica</b>	<b>76</b>
5.1.	Capas drenantes . . . . .	77
5.2.	Manto vegetal . . . . .	77
5.3.	Barrera hidráulica superior . . . . .	77
5.3.1.	Análisis hidrológico . . . . .	78
5.3.2.	Análisis de infiltración . . . . .	79
5.3.3.	Hydrus 1D . . . . .	80
5.3.4.	Estabilidad de taludes . . . . .	82
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>85</b>
6.1.	Trabajos futuros . . . . .	86
<b>7.</b>	<b>Anexos</b>	<b>87</b>
7.1.	Publicaciones en congresos nacionales e internacionales . . . . .	87
7.2.	Imágenes . . . . .	90
7.3.	Resultados . . . . .	92
7.4.	Miscelaneos . . . . .	99

# 1. Introducción

El presente trabajo profundiza el análisis del comportamiento experimental de mezclas de suelos con polímeros para su uso como barreras hidráulicas y/o como recubrimientos de rellenos sanitarios. Esta línea de investigación se viene llevando a cabo desde el año 2015 en la Facultad de Ingeniería de la UBA y el ITPN [1][2].

El uso de polímeros en la ingeniería civil para mejorar propiedades de materiales: suelos, cementos, hormigones, se ha desarrollado en las últimas décadas.

El uso de polímeros en el ámbito de la ingeniería geotécnica es un área en creciente desarrollo e interés. La incorporación de polímeros a suelos naturales 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 y regado.

El uso de materiales artificiales en suelos debe ser considerado con la responsabilidad medioambiental correspondientes. Este tema largamente ignorado puede ser actualmente un factor determinante para su aplicación. El polímero debe elegirse correctamente para que no se lave e infiltre en las napas, para que no produzca reacciones indeseadas ni genere ciclos perjudiciales para la vida y el ecosistema que los rodea.

## 1.1. Planteo del problema

La deposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) ha sido una problemática importante desde el advenimiento de los grandes centros urbanos. El mal olor, suciedad, enfermedades y graves problemas de sanidad pública a lo largo de la historia llevaron a desarrollar soluciones a su deposición. Actualmente, las ciudades del mundo poseen sistemas de recolección de los RSU pero muchas carecen de métodos sustentables de deposición. En Argentina en el año 2010 el 54% de los RSU son depositados en basurales a cielo abierto, solución que genera impactos ambientales negativos [3].

Ante esto, la solución actual más sustentable es la creación de vertederos hidráulicos comúnmente llamados rellenos sanitarios. Los mismos consisten en la creación de recintos estancos e independientes donde se depositan los RSU, facilitando así su degradación y evitando mayores impactos en el ecosistema.

El empleo de barreras hidráulicas es necesario para la estanqueidad. Es una práctica tradicional ejecutarlas mediante la colocación de suelos compactados. Esto requiere del uso de materiales con alto contenido de arcillas, preferentemente cercanos al lugar de ejecución del relleno. Esta técnica presenta como problemática que frente a las condiciones climáticas como cambios de humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, estos materiales experimentan variaciones en su contenido de humedad, asociados a cambios volumétricos y por consiguiente la formación de macro fisuras o grietas que facilitan el proceso de percolación de fluidos contaminantes hacia el exterior o la migración del suelo fino hacia el interior de la barrera impermeable. Esta problemática ha sido estudiada por numerosos autores [4][5][6][7][8][9][10][11][12][13][14][15][16][17][18].

En virtud de los antecedentes aquí presentados, este trabajo tiene por objetivo la evaluación de mezclas de suelo-polímero para uso como alternativas de barrera hidráulica tradicionales.

## 2. Estado del arte

Para evaluar la aplicabilidad de mezclas de suelos-polímero para rellenos sanitarios, se deben estudiar los requerimientos hidromecánicos que las mezclas deben cumplir. El polímero debe demostrar ser estable frente a las condiciones expuestas en un relleno y a lo largo del tiempo.

Los rellenos sanitarios generan productos subsidiarios de la degradación de los residuos. Estos subproductos pueden ser líquidos lixiviados de distinta naturaleza química, gases como el metano o propano, etc. Para reproducir estas condiciones, se estudió el comportamiento de las distintas mezclas de suelo-polímero frente a flujos y humedecimientos de las mezclas con fluidos de distinta naturaleza química.

### 2.1. Rellenos sanitarios. Aspectos generales

Los residuos sólidos de la actividad humana suelen ser clasificados según su composición y riesgo: los residuos sólidos urbanos (RSU), los desechos radioactivos y los residuos infecciosos o con riesgo biológico. Todos ellos presentan un cierto riesgo a la salud humana o al medio ambiente. El EPA (Agencia de Protección Ambiental) divide los residuos sólidos urbanos en 3 categorías: residuos sólidos urbanos residenciales, residuos sólidos urbanos de la actividad comercial y residuos sólidos urbanos industriales. Se consideran residuos sólidos urbanos (RSU) a todo desecho derivado de los hogares, hoteles, oficinas, tiendas, restaurantes, almacenes y otras actividades manufactureras. El EPA en 1994 estimó que solo en los Estados Unidos en 1993 se generaron 162 millones de toneladas de RSU. En Argentina el CEAMSE estimó en el 2015 que la ciudad de Buenos Aires generó 37631 Toneladas por día [3].

El Art 41 de la constitución nacional Argentina establece que: "Todos los habitantes gozan del derecho a un ambiente sano, equilibrado, apto para el desarrollo humano y para que las actividades productivas satisfagan las actividades presentes sin comprometer las de las generaciones futuras; y tienen el deber de preservarlo. El daño ambiental generará prioritariamente la obligación de recomponer."

Un relleno sanitario es una construcción que sirve de deposición final para los residuos sólidos en el suelo. Es un sistema no peligroso para la salud, o la seguridad pública. Su impacto sobre el ambiente durante su uso o después de su clausura son considerados social y económicamente aceptables y sustentables.

Los residuos son confinados en un espacio estrecho, y las capas de desechos son compactadas a lo largo para reducir su volumen y mejorar su estabilidad [19]. La problemática de la contención de los RSU en descomposición provoca que las coberturas del relleno se vean sometidos a gradientes hidráulicos de fluidos de distinta naturaleza o que las coberturas con el tiempo se saturen parcialmente de dichos fluidos. Este fenómeno puede provocar sensibles cambios en los comportamientos de los suelos compactados que la conforman, tanto hidráulicos como mecánicos [20]. Estos cambios deben ser analizados para el correcto funcionamiento del vertedero en el tiempo. En la figura 2.1 se esquematiza la construcción de un relleno sanitario convencional.

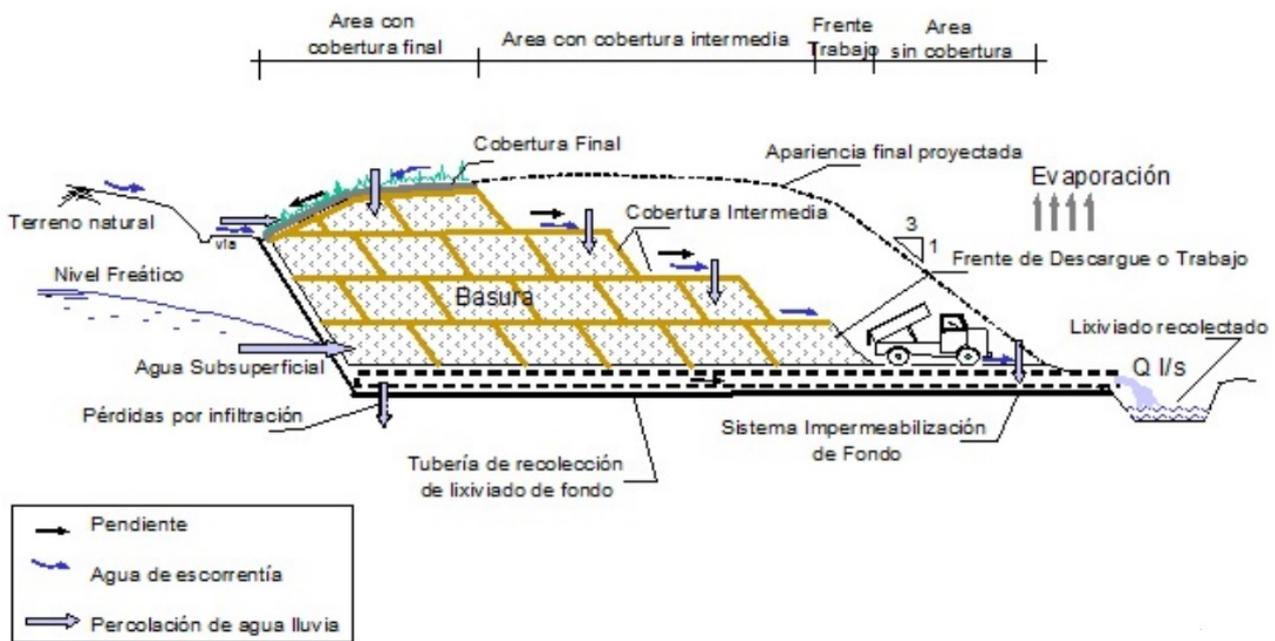


Fig. 2.1: Esquema y funcionamiento típico de rellenos sanitarios.

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 esto se utilizan capas de suelo, geomembranas o una combinación de ambas, una de ellas en la parte inferior del relleno y la otra es una cobertura final, que se realiza en la etapa de cierre del relleno sanitario. En la figura 2.2 se muestran los cambios producidos por la naturaleza de los fluidos en la permeabilidad arcillas tipo kaolinitas.

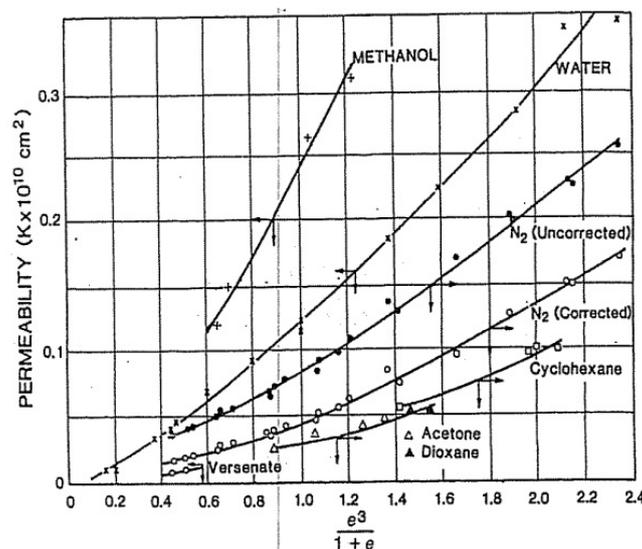


Fig. 2.2: Variación de la permeabilidad de kaolinitas en función de la relación de vacíos  $e$  y naturaleza de los fluidos permeantes (Michaels and Lin, 1954).

Los rellenos sanitarios pueden ser de dos tipos: pasivos o activos. Los primeros son constituidos para formar un espacio aislado entre el suelo y el medio ambiente, con materiales de conductividad hidráulica baja. En cambio, los rellenos activos tienen además un sistema de

drenaje y colecta de los lixiviados, lo que impide la permanencia de bacterias en el fondo del relleno.

La capa inferior del relleno comprende la base y taludes. Debe ser impermeable 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 final o superior es el componente final en la construcción de un relleno. 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 o gases, proliferación de vectores como insectos y roedores y posibilitar que comience la etapa de descomposición anaeróbica de los residuos. Se debe diseñar y construir dicha cobertura con un sistema multicapa. En general este sistema debe incluir las siguientes capas desde el nivel de superficie [21]:

- Una capa de suelo vegetal que favorece la evapotranspiración y evita la erosión.
- Una capa drenante por la que los líquidos se redirigen dirigiéndose fuera del relleno.
- Una barrera hidráulica que consiste en capa compuesta generalmente por dos materiales de baja permeabilidad, por ejemplo: una geomembrana más una capa de suelo de baja permeabilidad.
- Una capa de suelo permeante que permita el escurrimiento de los gases formados en el relleno de forma controlada.
- Una capa de suelo para corrección y emparejamiento de la superficie donde se colocarán 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 las figuras 2.3 y 2.4 se esquematiza el funcionamiento de las coberturas superiores de rellenos sanitarios convencionales.

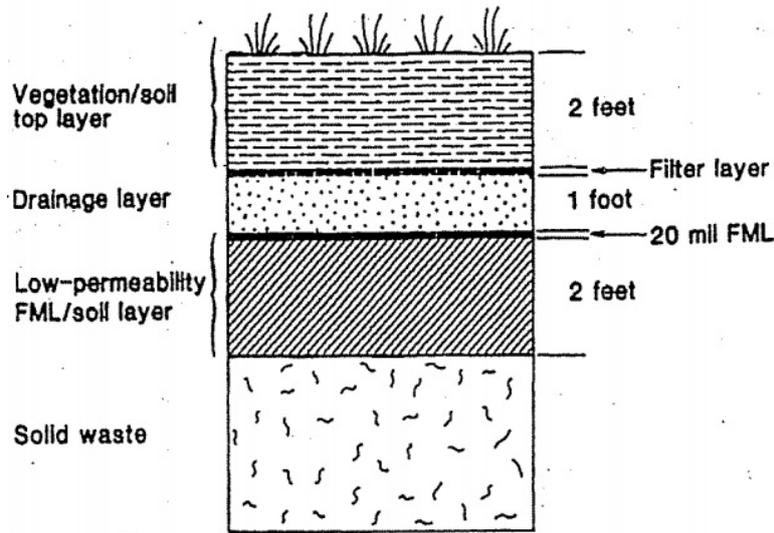


Fig. 2.3: Esquema de barrera superior de cobertura de vertederos (Landreth, 1990).

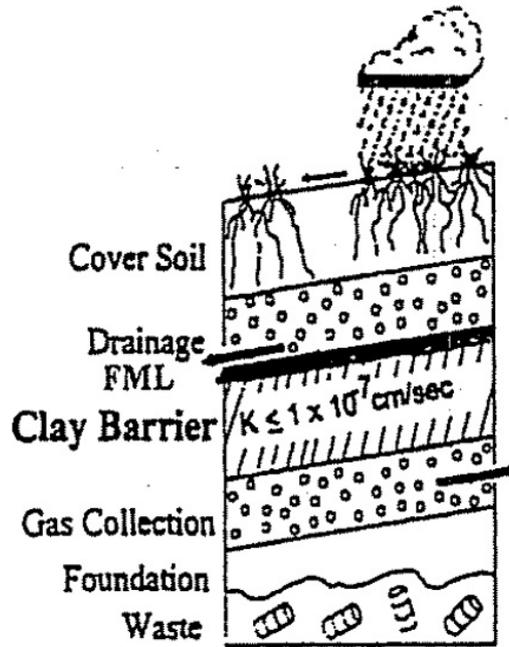


Fig. 2.4: Funcionamiento convencional de una barrera superior para rellenos de alto riesgo (Sharma H, 2004).

La instalación de sistemas de canales y drenajes impide el ingreso del agua de lluvia en el relleno sanitario y permite obtener un sistema cerrado. Es necesario poner en práctica una supervisión constante de la barrera, tanto de los administradores como de las organizaciones comunales [20]. Los rellenos tienen además un sistema de drenaje y colecta de los lixiviados, lo que impide la permanencia de bacterias en el fondo y la generación de un permanente gradiente hidráulico sobre la barrera inferior.

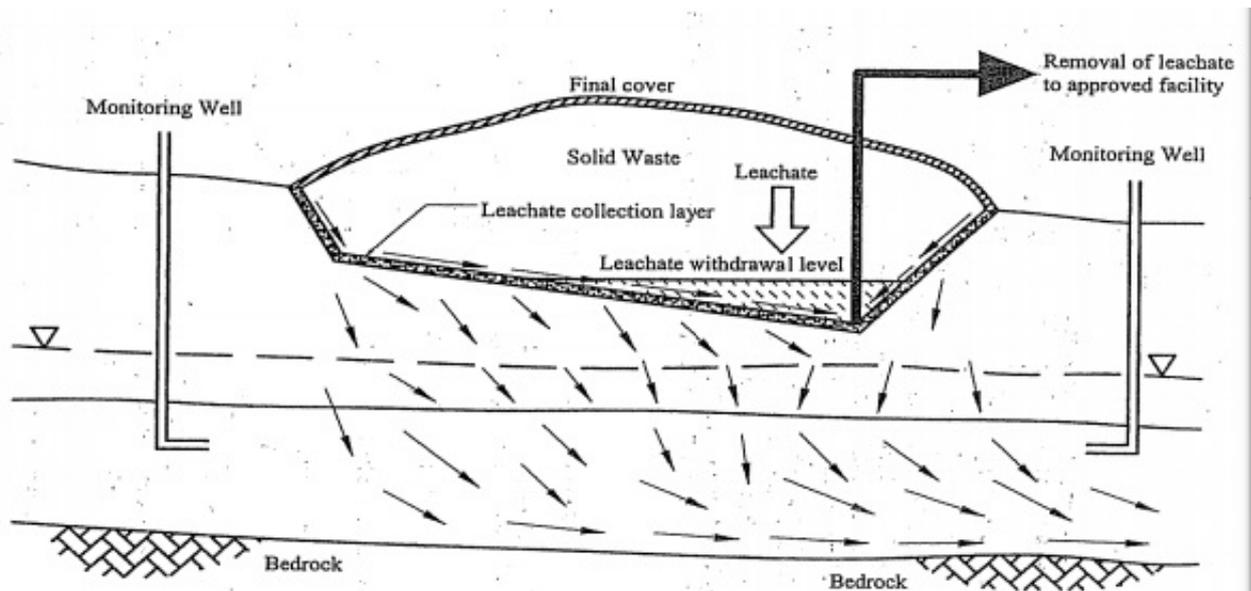


Fig. 2.5: Esquema de funcionamiento general de vertederos (Sharma H, 2004).

### 2.1.1. Requerimientos

Los requisitos de la cobertura inferior varían en distintas bibliografías, pero se destacan la flexibilidad, la capacidad de recolección de lixiviados y una permeabilidad  $K < 10^{-9} \text{ m/seg}$ .

Entre los requisitos de la cobertura superior o final se destacan la resistencia a la erosión superficial, flexibilidad y una baja permeabilidad. Las normativas nacionales (Resolución N° 1143/02 de la Ley 12856) e internacionales (Normas EPA), establecen que la capa impermeabilizante debe tener un espesor mínimo de 1,0 m y una permeabilidad  $k \leq 1,10^{-7} \text{ cm/seg}$ .

Los materiales de la capa superior deben tener resistencia mecánica suficiente para evitar asentamientos diferenciales suficientes para fisurar la barrera o que se deslicen sobre la superficie del RSU. 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, rupturas o un considerable aumento de la permeabilidad secundaria del material. Para evitar este fenómeno es necesario que el material no experimente deformaciones volumétrica elevadas frente a cambios de humedad, o que tenga la flexibilidad y ductilidad suficiente para soportar estas deformaciones sin fisurarse. 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.

## 2.2. Interacción fluido-partícula

En un relleno sanitario, como producto de la degradación de los residuos, pueden generarse fluidos de distinta naturaleza química o mismo, pueden alterar la química del agua de infiltración. La interacción fluido-partícula es clave en la interacción de los suelos frente fluidos. En particular cuando los fluidos son de distinta naturaleza, teniendo polaridades y cargas iónicas diferentes.

El flujo de líquidos y la estructura de los suelos como medios porosos están controlados por las características fisicoquímicas de las fases líquida y sólida que constituyen el medio (suelo-fluido), y por los mecanismos de interacción entre estas fases [22][23][24].

Las principales propiedades que influyen en el flujo de un fluido por tuberías o canales, son la densidad y la viscosidad. La densidad se define como la cantidad de masa de materia por unidad de volumen, mientras que la viscosidad es una medida de la capacidad del fluido de oponer resistencia a un esfuerzo de corte. En los poros de los suelos se pueden encontrar fluidos y contaminantes de diferente naturaleza química, ya sea en forma natural o como consecuencia de actividades antrópicas [22][24]. Los fluidos que se pueden encontrar en los poros del suelo y pueden ser clasificados químicamente en dos grandes grupos, inorgánicos (agua, salmuera) y orgánicos (petróleo y derivados).

El agua subterránea tiene una cantidad de iones disueltos que afectan sus características, variando las concentraciones desde valores bajos como 100 ppm, hasta valores tan altos como 500000 ppm [22][25]. En presencia de iones, las moléculas de agua los rodean orientando hacia ellos los átomos de oxígeno (para el caso de cationes), o los de hidrógenos (en caso aniones). El número de moléculas de agua atraídas por un catión depende del tamaño y la carga eléctrica del mismo [25]. En la figura 2.6 se muestra en forma esquemática el mecanismo de hidratación de cloruro de sodio (NaCl) puesto en solución acuosa. Los iones hidratados no son eléctricamente neutros, por lo que en presencia de un campo eléctrico los cationes se movilizan hacia el cátodo y los aniones hacia el ánodo.

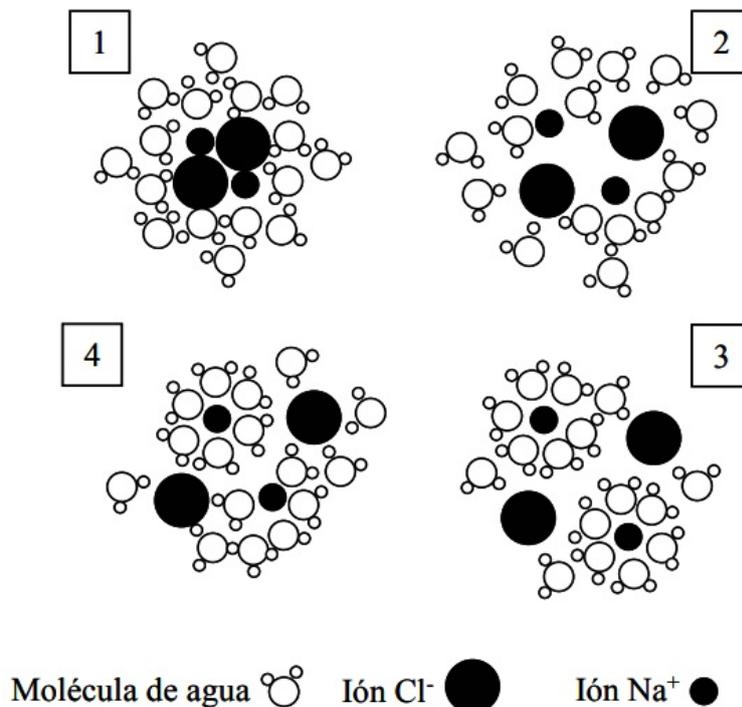


Fig. 2.6: Esquema de disolución de cloruro de sodio (sal de mesa) en agua (Santamarina, 2001).

Los compuestos orgánicos son aquellos que tienen una estructura formada de carbono e hidrógeno, es decir, en general se trata de hidrocarburos y sus derivados. Estos compuestos pueden ser de origen natural o artificial. Hoy en día se conocen más de un millón de compuestos de carbono, esto se debe a la capacidad del átomo de carbono para formar cuatro enlaces covalentes sencillos muy estables, aunque también tiene capacidad para formar enlaces múltiples con otros átomos de carbono u otros elementos. Esto también le permite formar moléculas con cadenas largas [26]. Un caso particular de compuestos orgánicos son los productos derivados de la destilación del petróleo, los que en general son fluidos no polares, menos densos que el agua, muy poco solubles y algo volátiles [27][28]. Las propiedades de estos compuestos cambian de productor a productor e incluso cambian de acuerdo a las características del petróleo que les dio origen [29].

Los suelos que participan de la interacción fluido-partícula pueden estar formados por diferentes cantidades de minerales de arcilla, minerales no arcillosos, materia orgánica y sales precipitadas.

La mayoría de los minerales arcillosos son, por composición química, aluminosilicatos [30]. Estos minerales se presentan en partículas de pequeños tamaños, usualmente menores a  $2 \mu\text{m}$ . La estructura cristalina de estos minerales se origina mediante la combinación de dos unidades estructurales simples, el tetraedro de silicio y los octaedros de aluminio y magnesio. Las diferentes formas de asociación de estas unidades dan origen a las diversas clases de minerales arcillosos, cada uno con sus propiedades específicas [31]. En la Figura 2.7 se muestran las diferentes estructuras posibles para la formación de los principales grupos de arcillas comúnmente encontrados en suelos.

Existen cinco tipos posibles de enlaces entre capas [32]. Las láminas eléctricamente neutras se unen entre sí mediante fuerzas de van der Waals. Cuando una lámina que presenta átomos de oxígeno y está enfrentada a otra que presenta oxidrilos, o se enfrentan dos láminas que presentan oxidrilos, se producen enlaces tipo puente hidrógeno. Otra posibilidad es la presencia de moléculas de agua entre dos láminas neutras, produciendo enlaces tipo puente hidrógeno entre ellas. La presencia de cationes, necesarios para garantizar la electroneutralidad del sistema, actúa como enlace entre dos capas. Cuando la densidad de carga superficial es moderada, las láminas adsorben moléculas polares y cationes resultando esto en un enlace débil.

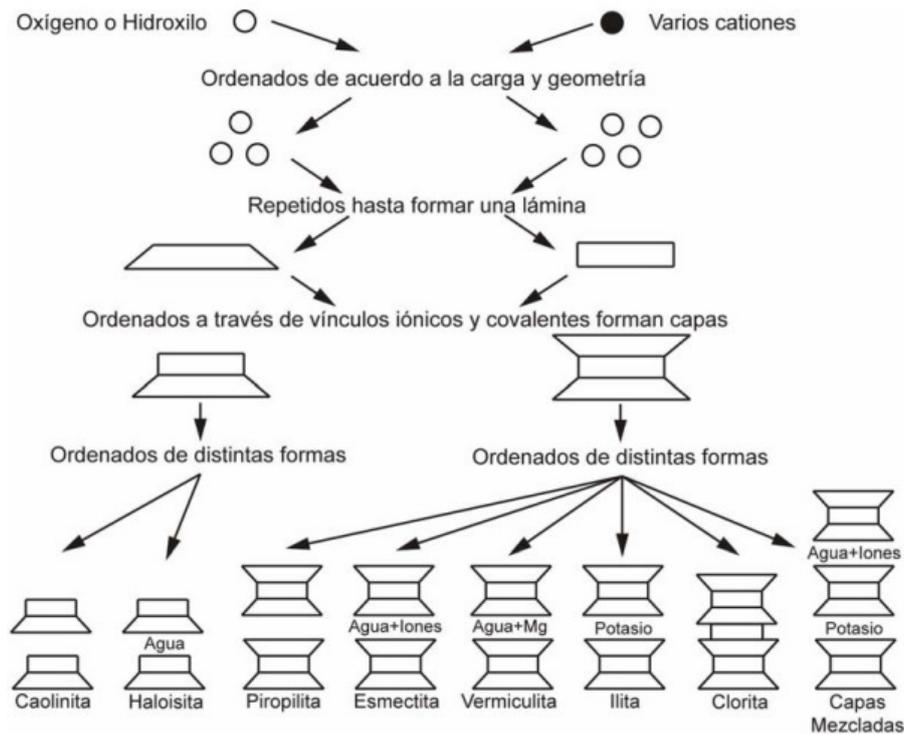


Fig. 2.7: Minerales Arcillosos (Mitchell, 1993).

La mineralogía de las partículas es el factor principal que controla el tamaño y la forma de la partícula como así también tiene influencia en la permeabilidad y resistencia [23][33]. Una característica importante de los minerales arcillosos es el desbalance en la carga eléctrica, resultando partículas con carga eléctrica negativa. Este desbalance se debe a la sustitución isomorfa [30]. Los bordes de las partículas en general presentan cargas eléctricas netas positivas. Sin embargo, como la superficie de los bordes es muy baja en relación a la superficie de la cara, su efecto en la distribución de iones suele ser despreciable. Esto provoca que los efectos de interacción fluido-partícula sean gobernados por fuerzas de origen eléctrico y las mismas tienen relevancia en suelos con partículas de tamaño inferior a  $10 \mu\text{m}$  [24].

La carga neta negativa de las partículas de arcilla y las características polares de la molécula de agua permiten la existencia de una interacción entre estas dos sustancias. Los posibles mecanismos de interacción suelo arcilloso-agua son la unión puente hidrógeno, la hidratación de iones de intercambio presentes en la estructura de los minerales de arcilla, atracción entre partículas por ósmosis, atracción entre superficies con cargas eléctricas y dipolos eléctricos y atracción debida a fuerzas de London [23].

### 2.2.1. Doble capa difusa

En proximidad de las caras de las partículas de arcillas se adsorben cationes para garantizar la electroneutralidad del sistema. En los suelos arcillosos secos, estos cationes están fuertemente atraídos a las superficies de las partículas por fuerzas de Coulomb [24]. En la figura 2.7 se esquematiza la formación de la doble capa difusa y la distribución iónica en las cercanías de la partícula de arcilla.

Las moléculas de agua libre son también atraídas y orientadas por la presencia del campo eléctrico debido a las cargas de las partículas sólidas. La orientación de las moléculas de agua con los átomos de hidrógeno alineados hacia las partículas disminuye a medida que aumenta la distancia al mineral. Estas moléculas de agua fuertemente orientadas por los campos eléctricos

de las partículas forman lo que se conoce como agua adsorbida [33]. Las características físicas del agua adsorbida son intermedias entre las del agua en estado líquido y las del agua en estado sólido [24][31].

Cuando ingresa agua a los suelos arcillosos, las sales precipitadas forman solución y los cationes adsorbidos tienden a ser hidratados por las moléculas de agua. Por la ubicación de los cationes de intercambio, se producen mayores concentraciones salinas en las cercanías de la superficie de las partículas. Existe entonces una tendencia a la difusión de los cationes alejándose de las partículas, sin embargo, éstos no son completamente libres de hacerlo por el efecto de la presencia del campo eléctrico de las partículas de arcilla [34].

Algunos iones son completamente hidratados y permanecen en las cercanías de las partículas sólidas por efecto de la interacción tipo puente de hidrógeno entre los minerales y las moléculas de agua, o bien son parcialmente hidratados pero permanecen adsorbidos a la superficie minera. En la figura 2.9 se gráfica la distribución de cargas en las cercanías de la superficie de arcilla.

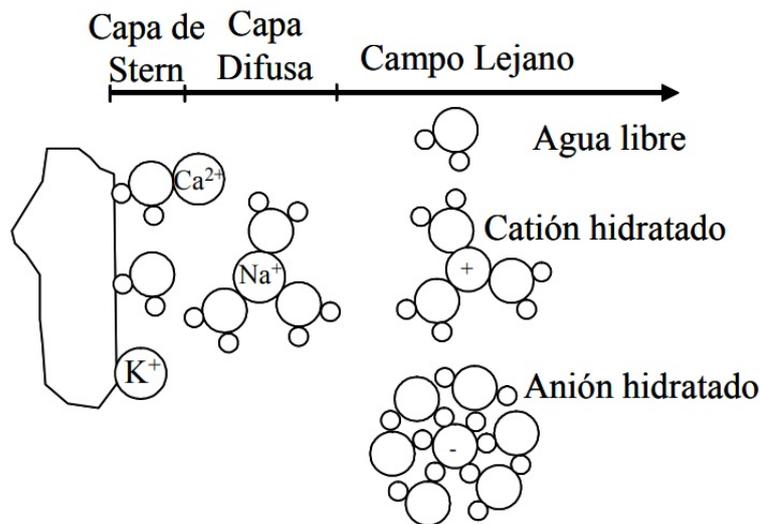


Fig. 2.8: Esquema de formación de la doble capa difusa y la distribución iónica en cercanía a la partícula de arcilla (Santamarina, 2001).

La formulación matemática clásica para describir la doble capa difusa asume las siguientes simplificaciones [23]:

- Los iones en la doble capa difusa son considerados como cargas puntuales y no existe interacción alguna entre ellos.
- La carga eléctrica en la superficie de las partículas está distribuida en forma uniforme.
- La superficie de la partícula es plana y su superficie mucho mayor que el espesor.
- La permitividad del medio es una propiedad independiente de la posición.

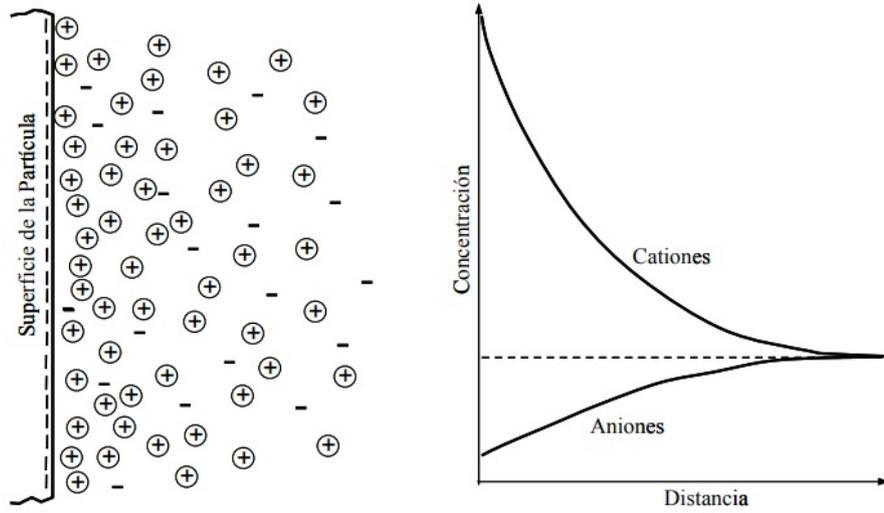


Fig. 2.9: Distribución de cargas en las cercanías de la superficie de arcilla (Mitchell, 1993).

Mediante la ecuación de Poisson se puede computar la distribución del exceso de carga a partir de la variación del potencial eléctrico con la distancia, resultando:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x^2} = -\frac{\sigma_x^{ex}}{\epsilon_0 K'} \quad (2.1)$$

En donde  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  F/m es la permitividad del vacío y  $K'$  es la permitividad real relativa del fluido. Por otro lado, la densidad de carga se puede calcular a partir de la valencia iónica y la concentración de manera tal que:

$$\sigma_x^{ex} = \sum z_i c_{ix} F \quad (2.2)$$

Combinando las ecuaciones (2.1) y (2.2), asumiendo que se trabaja con aniones y cationes con la misma valencia y que el potencial eléctrico en la superficie mineral es pequeño, se puede obtener la ecuación diferencial para la doble capa difusa, conocida como ecuación de Poisson Boltzmann:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x^2} = \frac{2c_0 z^2 F^2}{\epsilon_0 k' RT} V_x \quad (2.3)$$

Esta ecuación diferencial se resuelve considerando las siguientes condiciones de borde: potencial nulo a distancia infinita y potencial fijo  $V_0$  en la superficie de la partícula. Finalmente, la solución de la ecuación diferencial resulta:

$$V_x = V_0 e^{-x/g} \quad (2.4)$$

A partir de la ecuación (2.4) se evidencia que el potencial eléctrico decae en forma exponencial a medida que aumenta la distancia a la superficie cargada. Se denomina longitud de Debye Hückel a la distancia para la cuál el decaimiento del potencial es  $1/e$ , y ésta es representativa del espesor de la doble capa difusa. La ecuación (2.5) permite calcular el espesor de la doble capa difusa alrededor de partículas planas.

$$g = \sqrt{\frac{\epsilon_0 R k' T}{2 F^2 c_0 z^2}} \quad (2.5)$$

La ecuación (2.5) es sólo válida para especies iónicas con valencia unitaria tanto del anión como del catión, a este tipo de sales se las denomina 1:1 (ejemplo NaCl).

En cuanto a la concentración iónica, afecta el espesor de la doble capa difusa en forma inversa a su raíz cuadrada, lo que implica que un cambio de 100 veces en la concentración sólo se refleja en una magnitud de 10 en el cambio de espesor. En cuanto a los tamaños de los iones, a mayor radio de ión hidratado, mayor será el espesor de doble capa difusa.

La doble capa difusa varía en forma proporcional a la raíz cuadrada de la constante dieléctrica del fluido, con lo que el cambio de un fluido por otro con menor constante dieléctrica implica una disminución de espesor. Respecto a la temperatura, si bien, de acuerdo a la ecuación (2.5), el espesor varía en forma proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura, el cambio en la temperatura implica también cambio en el valor de la constante dieléctrica, por lo tanto, se debe considerar el cambio en el producto de estas dos variables [23].

En la Figura 2.10a se muestra la variación de la concentración de aniones y cationes en las proximidades de la partícula, mientras que en la Figura 2.10b se muestra la variación del potencial eléctrico con la distancia a la partícula, la posición de la capa de Stern y el espesor de la doble capa difusa.

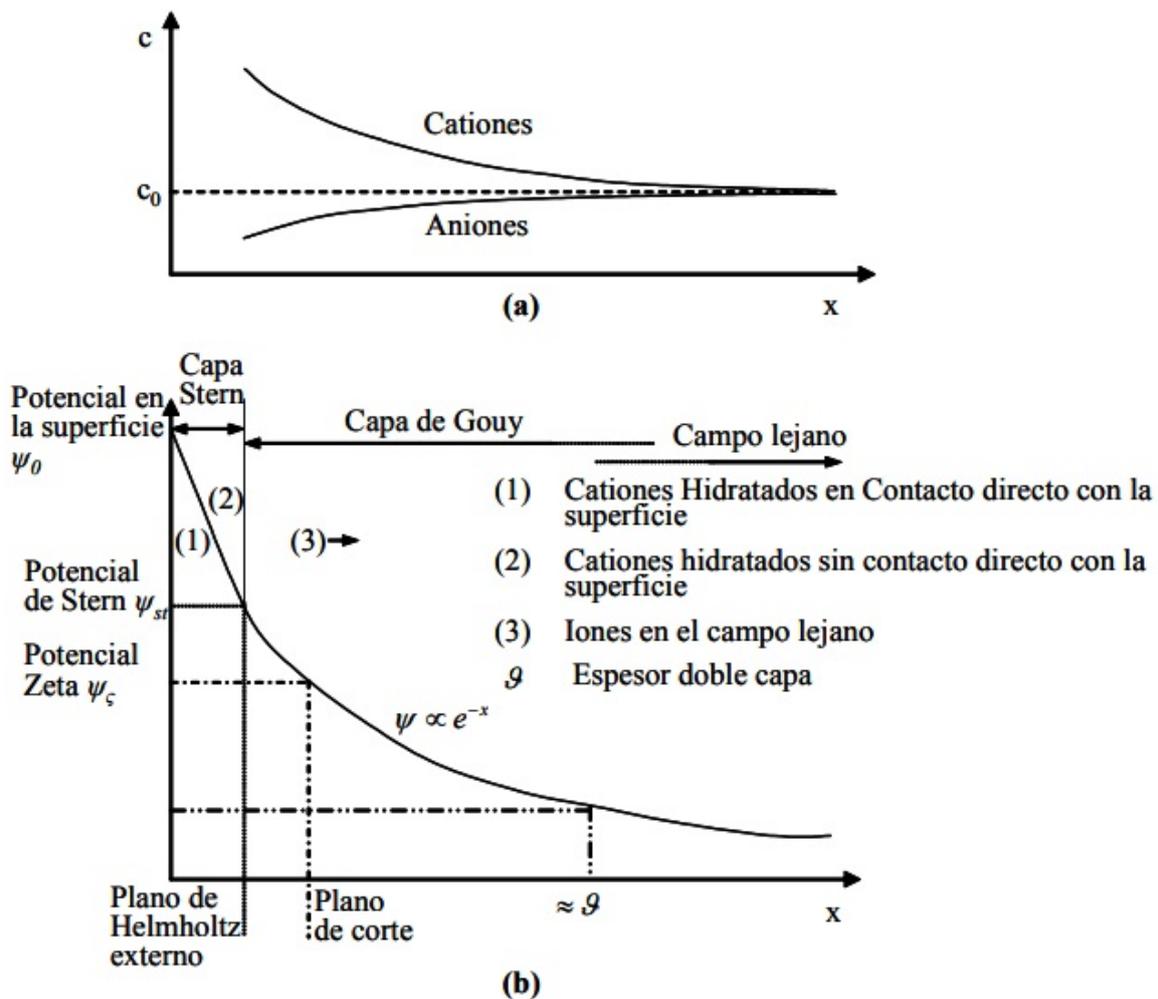


Fig. 2.10: Doble capa difusa. a) Variación del Potencial. b) Variación de las concentraciones (Modificado de Santamarina 2001).

## 2.3. Suelo-polímero

Los polímeros interactúan con el suelo durante el proceso de hidratación modificando sus propiedades, sean mecánicas (mejorando su resistencia o rigidez), físicas (modificando características como los límites de Atterberg), químicas (participando en reacciones químicas con el suelo) o alterando su granulometría mediante la agregación de partículas artificiales. En la figura 2.11 se esquematiza el proceso de hidratación o humectación de una mezcla de suelo-polímero.

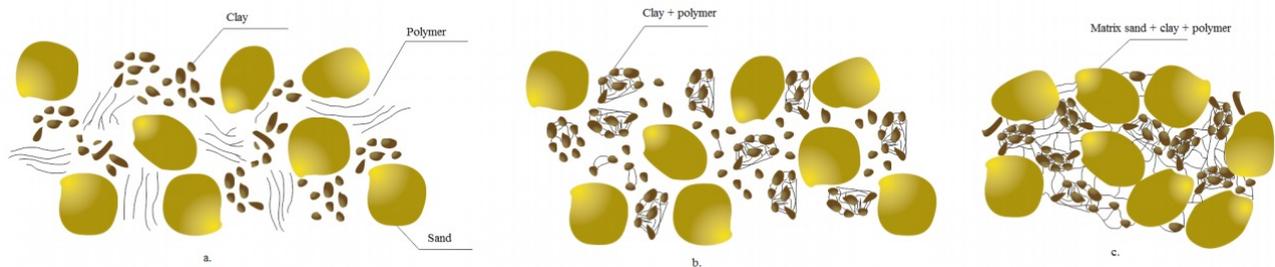


Fig. 2.11: Esquema del proceso de humectación de una mezcla de suelo-polímero.

Numerosos autores han estudiado el uso de aditivos para el tratamiento de suelos naturales para cambiar sus propiedades [35][36][37]. Los polímeros se han aplicado de varias maneras: inyección, pulverización in situ, entre otras. Su eficacia se ve condicionada por la compatibilidad entre el suelo y el compuesto del aditivo.

Las primeras experiencias de empleo de polímeros en el ámbito de la ingeniería geotécnica comienza a partir de la década del 90, siendo utilizados para mejorar el desempeño de barreras hidráulicas, estabilización de perforaciones y control de erosión y sedimentación [38][39][40][41][42][43].

Distintos investigadores han utilizado diferentes polímeros para controlar la variación volumétrica en suelos obteniendo reducciones de hinchamiento de hasta un 67% [44]. Otros investigan la utilización de polímeros que producen un aumento de la resistencia a la compresión no confinada que producen además un cambio en los límites de Atterberg [45].

### 2.3.1. Aplicaciones en lodos de perforación

La bentonita o más específicamente bentonita de sodio es una arcilla que se clasifica como una smectita con alto contenido de montmorillonita, lo que le da la capacidad de poder absorber varias veces su peso en agua. Se utiliza para la construcción de pilotes. Se inyecta una solución de bentonita en la excavación, lo que asegura la estabilidad de las paredes hasta el vertido del hormigón, que hará subir la bentonita a la superficie por diferencia de densidades. Esta metodología es conocida como método Tremie. Bachy and Soletanche [46] desarrollaron un polímero que se usa en lugar de la bentonita en estas aplicaciones. En la figura 2.12 se muestra una experiencia de uso de polímeros en excavaciones.

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 convencional que no es estable en agua salada.



Fig. 2.12: Aplicación de polímeros en excavaciones de pilotes.

### 2.3.2. Aplicaciones en sistemas de riego

Aparte del uso constructivo, la interacción química entre polímeros y suelos tiene aplicaciones en el campo de la agricultura para mejorar el rendimiento de cultivos [47]. Los polímeros utilizados son tripolifosfato de sodio o acetato vinílico con concentraciones bajas que al secarse, la solución forma una costra microporosa y resistente a la lluvia que impide la erosión del suelo, permitiendo también conservar el agua más tiempo en el suelo.

Otros trataron de mejorar la retención de agua adentro del suelo para disminuir las pérdidas de agua de riego por evapotranspiración o infiltración [48]. El polímero utilizado es capaz de absorber grandes cantidades de agua. Demostraron que la presencia de gel polimérico 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 empieza por la evaporación 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.

### 2.3.3. Estabilización de suelos

El USACE (Cuerpo de ingenieros del ejército de EE.UU) [49] mezcló una arena con varios polímeros (co-polímero de acrílico, co-polímero de acrílico vinil acetato). Demostraron que los suelos modificados con polímeros presentan aumentos en la resistencia, con valores mayores a una mezcla de suelo-cemento y presentan propiedades similares a las de mezclas suelo-cemento pero con cantidades de polímero menores que cemento, lo que podría constituir un ahorro importante de material utilizado.

También existen procesos de inyección de resinas en los suelos para permitir su consolidación en profundidad cuando ocurre un asentamiento peligroso para una estructura construida en el

sitio. La empresa Canakci [50] puso en práctica un método de inyección de resina expansiva que expande el suelo in situ y provoca un desplazamiento de la estructura en peligro.

Otro método consiste en inyectar un conjunto de arcilla expandida y resina expansiva en un suelo cuyo índice de vacíos es alto, eso permite llenar los vacíos del material con el material polimérico para conformar uno más cohesivo. La inyección de resina adentro de una arcilla permite disminuir su permeabilidad.

También se utilizan polímeros en la estabilización de suelos para uso en carreteras, John Derec [51] tuvo como objetivo utilizar aditivos poliméricos que modifiquen las propiedades de suelos tales como su capacidad portante y reducir su susceptibilidad al agua en la base y subbase de una carretera. La adición de polímero permitió que las reacciones de estabilización se produzcan en horas/días, y no en meses, por lo que se redujo notablemente el tiempo de curado. En las figuras 2.13 y 2.14 se muestran ejemplos de usos de polímeros en carreteras y control de erosión de taludes respectivamente.



Fig. 2.13: Aplicación de polímero en seco.



Fig. 2.14: Aplicación de polímero por rocío de hidrogel.

Uretek [52] utilizó 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 2.15 se observa la modificación de la arcilla mediante el proceso de intercambio iónico.

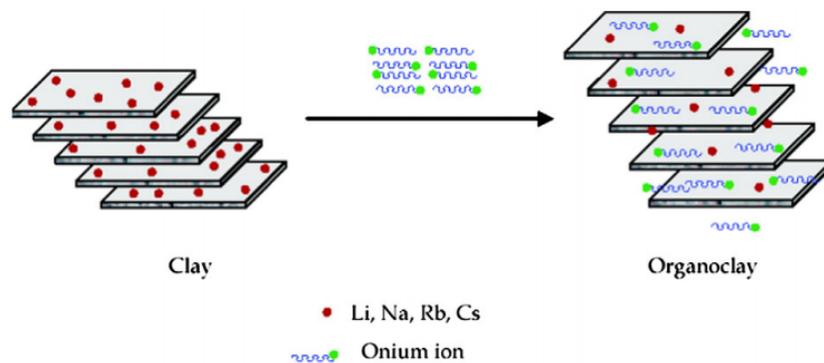


Fig. 2.15: Esquema de modificación del material arcilloso (Azzam, 2014).

### 2.3.4. Aplicaciones ecológicas

El almacenaje de residuos debe cumplir condiciones de impermeabilidad, es decir, los desechos deben estar bien confinados para evitar la fuga de lixiviados al medio exterior. 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 Concetta y col [53] analizaron el agregado de polímero al conjunto contaminado, y observaron 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, y no absorbe los nutrientes y la microflora del suelo, o sea que no empobrece el suelo. No obstante, las perlas del polímero permiten sacar un tipo preciso de contaminante

Por otro lado los procesos de desinfección convencionales del agua se basan en reacciones químicas por acción de varios componentes (cloro, ozono entre otros) que permiten reducir los patógenos presentes pero forman bioproductos de desinfección tales como trihalometanos, ácidos halocéticos y nitrosamina que representan un riesgo para la salud humana y animal. Por este motivo, se implementa un procedimiento para la eliminación de micro-organismos en aguas por filtración mediante el contacto de la solución acuosa con un material complejo compuesto por un polímero catiónico adsorbido sobre láminas de minerales de arcilla. La composición del complejo se basa en las propiedades antimicrobianas ejercidas por ciertos polímeros catiónicos que se ven incrementadas cuando están adsorbidos sobre el mineral de la arcilla. Este método tiene grandes ventajas frente a métodos convencionales como carbón activo granulado (GAC) que posee un bajo rendimiento, además los filtros pueden regenerarse mediante tratamientos con ácido clorhídrico [54].

### 2.3.5. Poliacrilamida aniónica (APAM)

En este estudio se utiliza un polímero súper absorbente denominado poliacrilamida (PAM) que tiene una elevada capacidad de retención de agua y forma un gel en contacto con la misma [55]. En la figura 2.16 se muestra el APAM seco como un material granular. El material es comercializado como Paipefloc F-AN por química Paipe S.R.L.



Fig. 2.16: APAM seco.

La poliacrilamida tiene una gran capacidad para absorber agua generando un hidrogel, reteniendo el agua. Esta característica de los hidrogeles ha favorecido su aplicación en horticultura y crianza de plantas, ya que constituye una reserva de agua.

Numerosas investigaciones han corroborado que la adición de PAM en suelos modifica sus propiedades físicas, hidráulicas o mecánicas [56][57][58][59]. El buen conocimiento de la interacción a nivel microscópico es fundamental para definir la cantidad y tipo de polímero a emplear para modificar un suelo así como su efectividad. En la figura 2.17 se esquematiza la polimerización del APAM y su monomero.

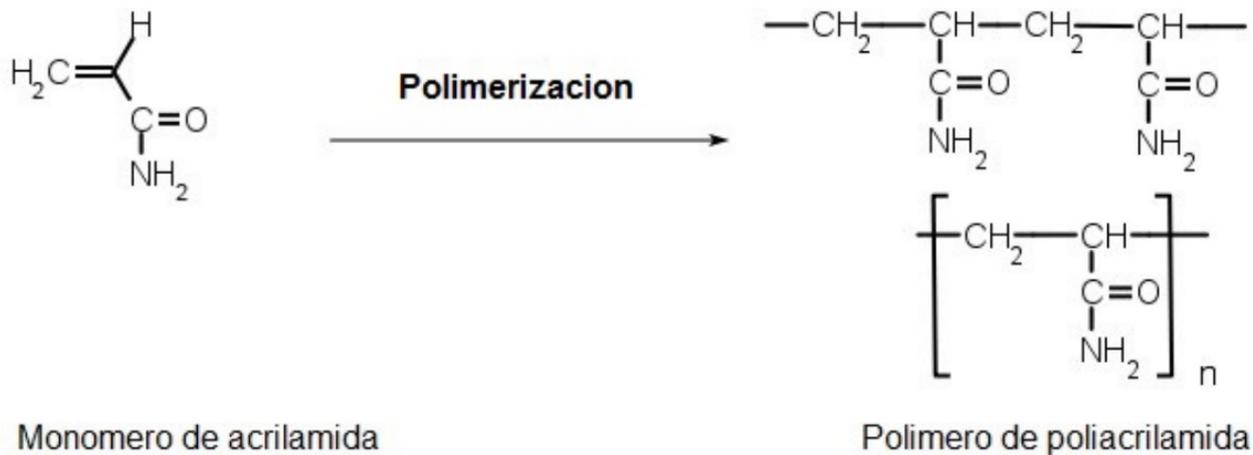


Fig. 2.17: Estructura química de la poliacrilamida.

La APAM (forma aniónica) se usa para controlar la erosión de suelos y mejorar la calidad de agua de un cauce natural, por ejemplo, V. K. y col [60], establecen que una de las mayores aplicaciones de la poliacrilamida aniónica es la floculación de sólidos en suspensión dentro de un líquido, proceso muy utilizado en la potabilización de aguas fluviales. En la figura 2.18 se muestra la estructura química de los monomeros del CPAM (poliacrilamida catiónica) y del APAM (poliacrilamida aniónica).



Fig. 2.18: Estructura química de la poliacrilamida en sus versiones aniónica y catiónica.

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. La formación de hidrogel permite también atraer todos los polvos en suspensión en el agua, y así disminuir su turbidez, reduciendo al mismo tiempo la cantidad de algunos nutrientes como fósforo, nitrato o por fin la demanda biológica en oxígeno (DBO) llegando a un agua más sana [61].

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. En las figuras 2.19 y 2.20 se muestra la interacción entre el PAM en sus dos variantes y la partícula de arcilla. En el caso del CPAM el polímero es adsorbido por la partícula de arcilla mientras que en el APAM el polímero es rechazado de la partícula de arcilla.

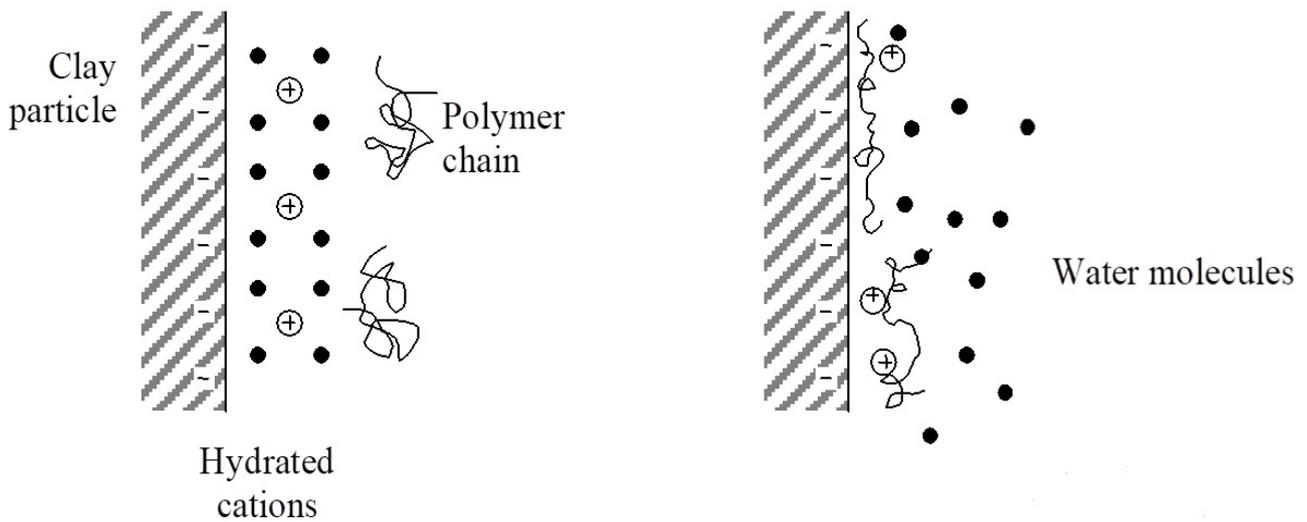


Fig. 2.19: Interacción fluido-partícula de la PAM en versión catiónica con el agua y la partícula de arcilla (Theng, 1979).

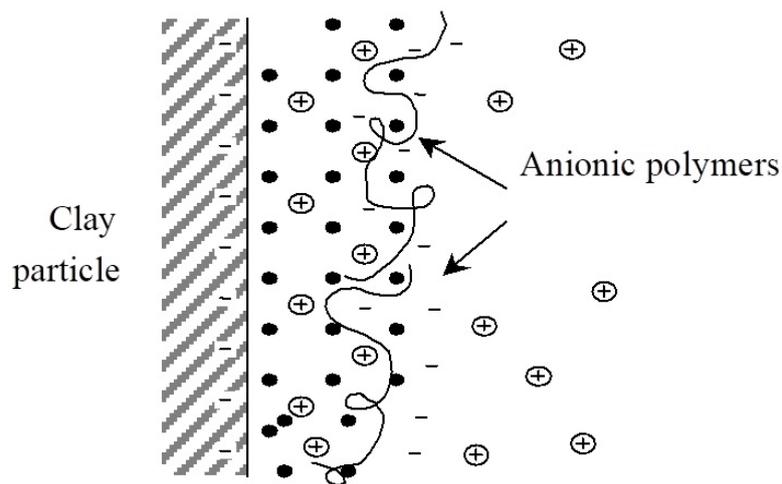


Fig. 2.20: Interacción fluido-partícula de la PAM en versión aniónica con el agua y la partícula de arcilla (Theng, 1979).

Lentz y Sojka, (1994) estudiaron el uso de PAM para disminuir la dispersión de suelo arcilloso mostró la eficiencia de tal proceso con una concentración optima de 10 mg/L (el suelo seco se colocó en una solución acuosa de 10mg de PAM por litro de solución, y se midió la velocidad de sedimentación) [62]. Otra conclusión de ese proyecto fue que la reducción de la dispersión aumentó con el uso respectivamente, de poliacrilamida aniónica/no iónica/catiónica.

Un estudio realizado por el INTA (Instituto nacional de tecnología agraria) Irurtia, Mon y Holzman [63] concluyeron que la PAM produce cambios importantes en las propiedades hidrofísicas del suelo arenoso, estudiando la PAM en estado sólido y líquido. La PAM sólida aumenta notablemente la capacidad de retención del agua y disminuye su conductividad hidráulica, por otra parte su capacidad de hinchamiento tiende a descompactar el suelo cuando está húmedo. La PAM líquida genera efectos similares pero de mayor magnitud en cuanto a la permeabilidad y a la retención, en cambio no mostró capacidad de hinchamiento. Estos efectos en suelos

arenosos de alta tasa de infiltración y baja retención de agua pueden mejorar la eficiencia del uso del agua de riego.

La poliacrilamida, a través de los estudios mencionados, tiene consecuencias en la afinidad del suelo con la cual se la mezcla. Por otra parte, su facilidad de utilización permite desarrollar su uso a gran escala y tener aplicaciones en varios campos y por ser un producto sin riesgo para la salud o el medio ambiente, la APAM puede constituir una solución a la escasa capacidad de retención de agua de un suelo. Los resultados obtenidos tras los ensayos ya realizados llevan a pensar que las formas iónicas de la poliacrilamida pueden modificar las propiedades hidráulicas de un suelo. Esas conclusiones son una herramienta importante que nos inclinó a elegir como material polimérico la poliacrilamida.

Se puede citar un trabajo que consistió en estudiar una mezcla arena-bentonita-polímero conocido como el producto Trisoplast que se utiliza como barrera mineral contra la contaminación [64]. Se usa para confinamiento de desechos, y 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.

Otros estudios, tal como el sobre mezclas entre bentonita y polímeros electrolitos [65] mostraron una disminución de la conductividad hidráulica comparando el suelo no modificado y el suelo con agregado de polímero.

Marti. L, (2015) estudió una mezcla de APAM y arcilla con el objetivo de estudiar su posible uso como alternativa de barrera hidráulica. En la figura 2.21 se muestra un ejemplo de la aplicación de APAM en arcilla.



Fig. 2.21: Mezcla de arcilla-APAM. (Marti. L, 2015).

El trabajo de Marti buscó caracterizar mezclas de arcilla-APAM con concentraciones del 1.5% en seco y posteriormente una alternativa de arena-(arcilla-1.5%APAM). Para ello se buscó una optima mezcla de arena-arcilla con el objetivo de maximizar la densidad  $\gamma_d$ . En la figura 2.22 se muestran los ensayos realizados en los que se determinó la optima combinación de arena-(arcilla-1.5%APAM).

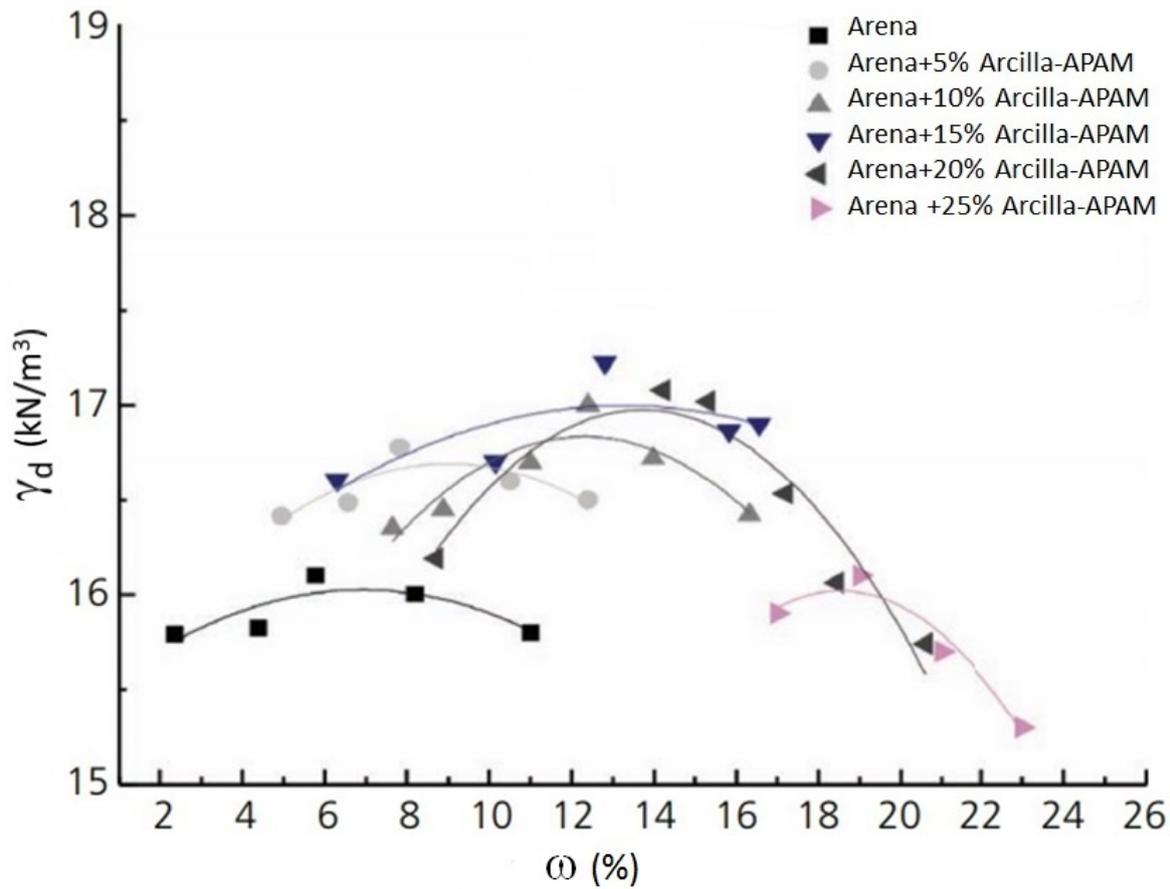


Fig. 2.22: Curvas de compactación para distintas relaciones de arena-arcilla. (Luz Marti, 2015).

Bajo el criterio ya mencionado (maximizar  $\gamma_d$ ) se adoptó como relación de arena-arcilla óptima en 85%arena-15%arcilla para el desarrollo de este trabajo.

### 3. Programa experimental

El programa experimental propuesto consiste en el estudio de un grupo de mezclas arena-arcilla-APAM con el objeto de estudiar sus características físicas, mecánicas e hidráulicas para su uso como barrera hidráulica de rellenos sanitarios. Para profundizar el efecto del fluido en la barrera hidráulica se ha estudiado el comportamiento hidráulico antes diferentes tipos de fluidos.

#### 3.1. Materiales

Los materiales constituyentes de este estudio son tres: un material granular, un suelo fino con alto contenido de minerales arcillosos, y un polímero. Esta mezclas fueron analizadas con tres fluidos: Agua destilada, Salmuera y Kerosene. En los apartados siguientes se describen los materiales y los ensayos básicos de identificación que se realizaron en este trabajo. En la tabla 3.1 y 3.2 se resumen los resultados.

USCS	#200 (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	SL (%)	Clay (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ ( $kN/m^3$ )	$\omega_{\acute{o}pt}$ (%)	$S_s$ ( $m^2/gr$ )
MH	94	63	42	21	17.5	25	13	31	214

Tabla 3.1: Propiedades físicas de la arcilla en estudio.

USCS	#200 (%)	$C_u$ (-)	$C_c$ (-)	$D_{50}$ (mm)	$G_s$ (-)	$\phi_c$ ( $^{\circ}$ )
SP	3	2.5	1.3	0.38	2.65	30.5

Tabla 3.2: Propiedades físicas de la arena en estudio.

El polímero usado es poliacrilamida aniónica (APAM) comercializado como Paipafloc F-AN por Química PAIPE S.R.L, Argentina (ver sección 2.3.5).

##### 3.1.1. Arena

La arena seleccionada es una arena comercial de río Paraná, para utilizarla como agregado grueso, ya que es un material cuyo costo es bajo, abundante en gran parte del territorio nacional y de fácil obtención. La arena utilizada, es de granulometría muy uniforme, mal graduada, de alta permeabilidad y estabilidad volumétrica. Fue provista por el Laboratorio de materiales y estructuras de la Facultad de Ingeniería (UBA).

Granulometría:

La granulometría del material es una medida de la distribución del tamaño de las partículas constitutivas del mismo, para la realización de este ensayo se siguieron los lineamientos de la norma ASTM D422-63R02 [66]. En la figura 3.23 se muestran los resultados obtenidos experimentalmente.

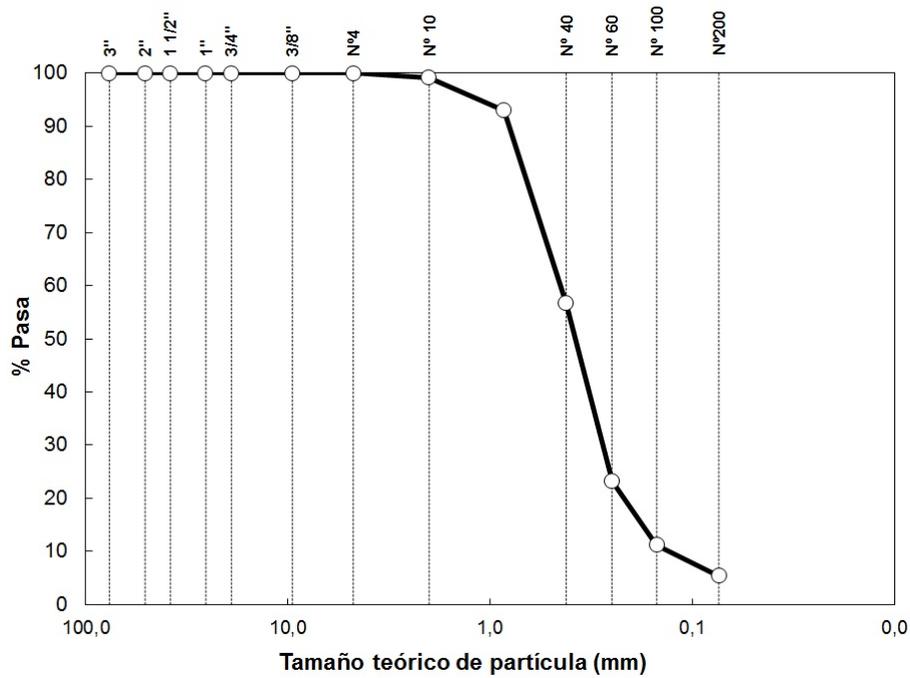


Fig. 3.23: Granulometría de la arena comercial utilizada.

A partir de la curva granulométrica se determinan los parámetros  $D_{60} = 0,45$ ,  $D_{30} = 0,32$ ,  $D_{10} = 0,18$ ,  $Cu = 2,5$  y  $Cc = 1,3$  y una clasificación como SP, una arena mal graduada.

### 3.1.2. Arcilla

Para la realización de este trabajo se utilizó una arcilla proveniente de Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina la cual es muy abundante en la zona. En la figura 3.24 se muestra la arcilla en estado natural y una vez tamizada.



Fig. 3.24: Arcilla en su estado natural en campo y luego de su molienda y tamizado.

Este material es un suelo fino de alta plasticidad, con alto contenido de mineral de 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 de este tipo de suelos, los mismos 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.

#### Hidrometría:

Este ensayo tiene por objetivo la determinación de la curva granulométrica para suelos finos, siendo un tamizado impracticable se usa la ley de Stokes la cual relaciona la velocidad de sedimentación de una partícula en suspensión con el diámetro teórico de dicha partícula.

Para medir la suspensión de una partícula se aplica la ley de Arquímedes con un hidrómetro calibrado, el cual mide indirectamente la cantidad de masa en suspensión a través de la densidad del fluido en donde se sumerge, en este caso, agua con suelo en suspensión.

Este ensayo se realizó bajo las directrices recomendadas en la norma ASTM D422-63 R02.

En la figura 3.25 se presentan los resultados obtenidos y de los cuales se obtiene que el porcentaje de partícula con un diámetro teórico menor a 2  $\mu\text{m}$  es del 25 %.

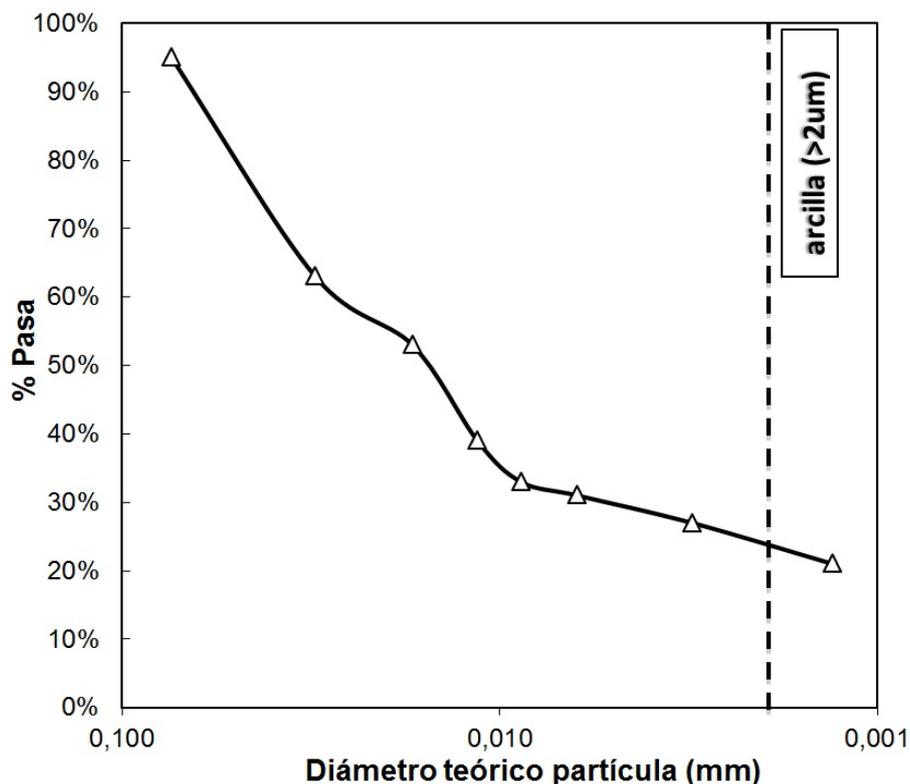


Fig. 3.25: Curva granulométrica del suelo fino (fracción menor a tamiz #200).

Pasante tamiz 200.

Una vez terminado el ensayo de hidrometría se procedió a tamizar todo el suelo dentro de la probeta para determinar el porcentaje de suelos finos ensayado en la hidrometría y conocer la cantidad de suelos finos dentro del total, el cual resultado ser el 94 %.

Superficie específica:

Este ensayo busca determinar la superficie específica de las partículas sólidas de los suelos finos que determina el balance entre las fuerzas capilares, eléctricas y gravimétrica actuantes en la superficie de dichas partículas y se define como la relación entre la superficie y su masa. Ante la inexistencia de una norma ASTM se utilizó como referencia al documento de Santamarina [67]. El ensayo se basa en la absorción de cationes de Azul de Metileno que son atraídos por las cargas negativas presentes en la superficie de los suelos.

Se preparo una solución de 30gr de agua desmineralizada con 10gr de suelo, mezclado y homogeneizada durante 24, a continuación se agrego la solución de Azul de Metileno a medida que se mezcla y homogeneizan ambas soluciones durante al menos 5min, a continuación se deposita una gota de la mezcla en un papel filtro calibrado en el cual por capilaridad se expandirá dicha gota, se debe repetir el ensayo agregando cada vez más mezcla de Azul de Metileno hasta que el mismo deje de ser atraído por la superficie de la arcilla y se exprese esto como una aureola celeste rodeando la la gota creada en el papel filtro. En la figura 3.26 se muestran distintas gotas de azul de metileno en el papel filtro.

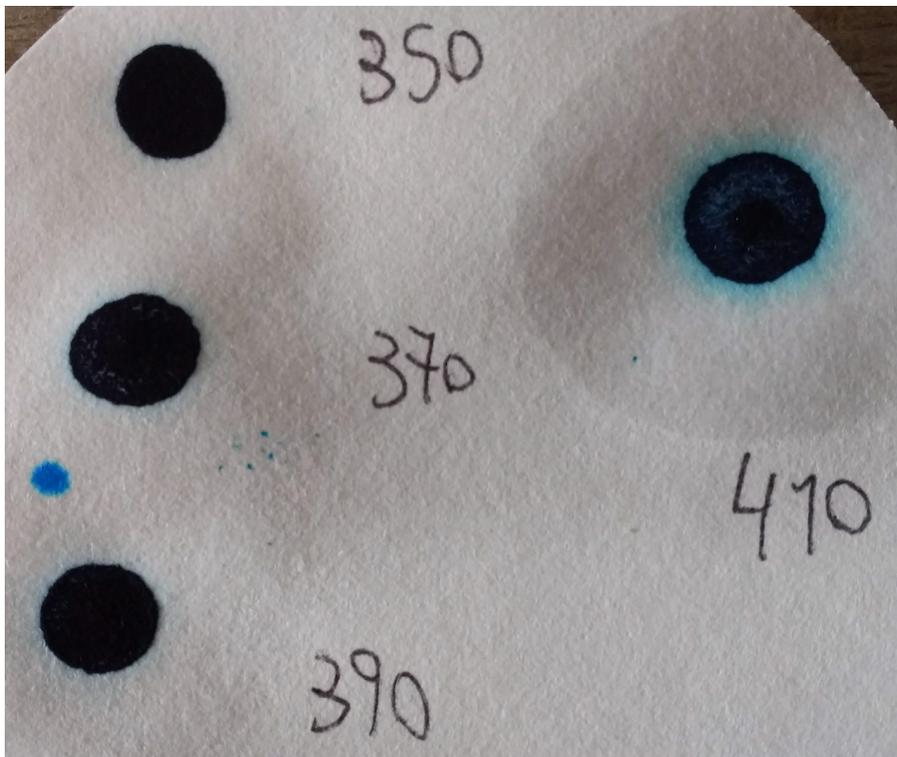


Fig. 3.26: Ensayo de superficie específica.

Con un N igual a 350 se determino una superficie específica de la siguiente forma.

$$S_e = (1gr/319,87gr/mol).(1/200ml).(N,0,5ml).N_{AV}.A_{AM}.(1/10gr) \quad (3.6)$$

Donde:

- $N_{AV}$  es el numero de Avogadro.
- $A_{AM}$  es el área del catión de azul de metileno.

Se obtuvo así una superficie específica igual a  $214m^2/gr$ .

### 3.1.3. Fluidos

Los fluidos en estudio serán de distinta naturaleza e interés para la comprensión de la interacción fluido-partícula a la cual la barrera puede verse sometida durante su vida útil.

Los mismos son:

- Agua doblemente desmineralizada comúnmente utilizado como un fluido estándar por las normas ASTM y la practica habitual. Es un fluido de carácter polar, que forma enlaces de puente de hidrógeno entre si y que presenta un contenido de iones casi nulo.

- Salmuera, es una solución de agua doblemente desmineralizada con cloruro de sodio en estado sólido (comúnmente conocido como sal de mesa) a una concentración de 2 molar, es decir, 2 moles de cloruro de sodio por litro de agua desmineralizada. Este fluido presenta las mismas características que el agua desmineralizada pero posee gran cantidad de iones en solución que potencialmente alteren el comportamiento del material.

- Kerosene o Queroseno. Es un hidrocarburo derivado de la destilación del petróleo, levemente más liviano que el agua, combustible y de carácter no-polar.

### 3.2. Métodos experimentales

La metodología seguida en este trabajo consistió en desarrollar un estudio de mezclas arcilla-polímero y arena-arcilla-polímero sobre muestras compactadas con la energía definido en el ensayo Proctor Standard para evaluar la influencia del contenido de APAM sobre las mezclas antes diferentes tipos de ensayos: Consistencia, compactibilidad, conductividad hidráulica, capacidad de retención de agua, resistencia a la compresión no confinada. Para el estudio se analizaron las mezclas descritas en la tabla 3.3.

Mezcla	Arena (%)	Arcilla (%)	APAM (%)
C I	-	100	0.0
C II	-	98.5	1.5
C III	-	97.5	2.5
C IV	-	96.5	3.5
I	85	15.00	0.00
II	85	14.77	0.25
III	85	14.62	0.375
IV	85	14.47	0.525

Tabla 3.3: Composición de las mezclas estudiadas.

Es de importancia aclarar que el objeto principal en estudio son las mezclas de arena-arcilla-APAM (mezclas I, II, III y IV) pero para completar el análisis de resultados se estudiaron complementariamente las mezclas sin ningún contenido de arena (mezclas C).

Las relación de arena-arcilla estudiada (85-15)(%) fue elegida con el objetivo de maximizar la densidad seca máxima obtenida en el ensayo Proctor estándar [1].

Durante todo el desarrollo de este trabajo los materiales constitutivos fueron tamizados por el tamiz ASTM #10, secados al horno, mezclados en seco y posteriormente humectado para ser dejado durante 24 horas en condiciones de humedad y temperatura controladas antes de la compactación. En la figura 3.27 se muestran mezclas de arena-arcilla-APAM (mezclas I a IV) previo al mezclado en seco y posterior al mezclado e hidratación.



Fig. 3.27: Mezcla de arena-arcilla-APAM previo al mezclado en seco y posterior al mezclado y humedecimiento.

Posteriormente a la humectación el material es compactado de forma estática hasta lograr la densidad seca  $Y_d$  objetivo. En la figura 3.28 se muestra una mezcla de arena-arcilla-APAM compactada de forma estática.



Fig. 3.28: Mezcla de arena-arcilla-APAM compactada.



Fig. 3.29: Mezcla de arena-arcilla-APAM donde se puede apreciar el hidrogel de APAM.

En la figura 3.29 se muestra una mezcla de arena-arcilla-APAM fisurada mecánicamente donde se aprecia macroscopicamente el hidrogel de APAM.

### 3.3. Ensayos realizados

Los ensayos realizados en este trabajo buscaron estudiar la aptitud de las mezclas para su uso como barrera. Para ello se evaluaron los requerimientos mecánicos necesarios mediante los ensayos de hinchamiento libre-consolidación y compresión simple. Los requerimientos hidráulicos se evaluaron mediante ensayos de succión y conductividad hidráulica. El efecto de los fluidos permeantes o de mezclado se evaluó mediante la repetición de ensayos con distintos fluidos.

#### 3.3.1. Límites de Atterberg

Para el estudio de la interacción fluido-partícula y la influencia que el APAM tenga en ellos se realizaron los ensayos para los fluidos permeantes ya definidos.

Los suelos finos pueden caracterizarse de forma experimental en base a su comportamiento frente al agua y la interacción con el mismo, se define así a la plasticidad como la capacidad de un material a deformarse sin cambios de volumen, fisuras o recuperaciones elásticas.

Según el contenido de humedad un suelo puede tener comportamientos asociados a distintos estados de plasticidad.

- Estado líquido: el suelo se encuentra en suspensión dentro de la masa del agua.
- Estado semilíquido: el suelo se comporta como un fluido viscoso.
- Estado plástico: en donde se aprecia la mayor plasticidad del suelo.
- Estado semisólido: en donde subjetivamente es sólido pero aun altera su volumen con la pérdida de humedad.
- Estado sólido: en el cual el volumen no se altera con la pérdida de humedad.

A la frontera entre los estados plástico y semisólido se lo define como límite plástico LP mientras que a la frontera entre los estados semilíquido y plástico se lo define como límite líquido LL.

Ambos límites se determinaron mediante el ensayo de fall cone que permite determinar la curva de plasticidad y determinar así ambos límites mediante una penetración estándar del cono. En la figura 3.31 y 3.31 se muestra el funcionamiento del equipo.

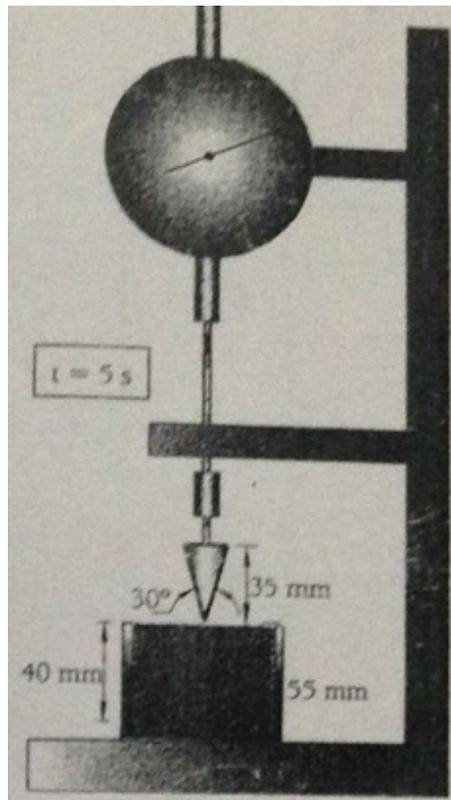


Fig. 3.30: Esquema de funcionamiento del equipo (Koumoto, T. & Houlsby, G.T.(2001)).

La preparación de las muestras consiste en trabajar con el material fino pasante por tamiz #40 e hidratarlo a diferentes humedades objetivo para luego ensayarlos al día siguiente.



Fig. 3.31: Funcionamiento del equipo.

### 3.3.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El proceso de preparación de las muestras requiere generar la estructura porosa a analizar, es decir, deben ser muestras de suelo compactadas. Esto puede generar que el barrido de electrones provoque perturbaciones en la muestra debido al paso de electrones a través del agua libre existente en los poros. Esta problemática se resolvió eliminando el agua libre existente en los poros, pero para ello no se puede recurrir a prácticas convencionales de secado de suelos, ya que los mismos producen grandes cambios en la microestructura del suelo. Por ello la solución utilizada fue la iofilización de las muestras.

La iofilización de la muestra es un proceso que busca eliminar el agua libre presente en los poros pero sin alterar significativamente su estructura interna. El proceso comienza con el congelamiento abrupto del agua libre. Para ello se inunda el suelo durante varios segundos con nitrógeno líquido. Este proceso garantiza que el agua no se expanda al momento del cambio de fase ya que dicha expansión se genera solamente si la estructura generada es cristalina y de forma lenta, al hacerlo de forma abrupta el agua se solidifica formando una estructura amorfa sin expandirse. En la figura 3.32 se muestra el proceso de congelación del agua presente en los poros del suelo mediante la inundación con nitrógeno líquido.



Fig. 3.32: Muestra de suelo durante y posterior a la inundación con nitrógeno líquido.

A continuación se procede a eliminar el agua sólida mediante un proceso de sublimación de la misma. Para ello se debe someter a las muestras a un rango de combinaciones de presión y temperatura de forma tal de que el agua sólida sublime. En la figura 3.33 se muestra el proceso de sublimación del agua de las mezclas.



Fig. 3.33: Proceso de sublimación del agua congelada en los poros de las muestras.

Posteriormente a la sublimación del agua se observan las muestras bajo un microscopio electrónico de barrido. En la sección 4.1.3 y el anexo 7.1 se presentan imágenes de resultados.

### 3.3.3. Ensayos de hinchamiento libre

Este ensayo permite determinar el índice de expansión o hinchamiento del suelo. Para ello se siguieron los lineamientos sugeridos por la norma ASTM D4829-3.

Se debe saturar el material con el fluido analizado para dejar se deja hinchar la muestra de suelo de manera libre, con una precarga de 10kPa. Tras la lectura de un flexímetro se calcula para cada medición el porcentaje de hinchamiento.

La primer parte del ensayo, hasta los 1000 segundos, corresponde al tiempo de ingreso del agua al 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 alejando estas capas. En la figura 3.34 se muestra una muestra previo al ensayo y posterior al mismo.



Fig. 3.34: Material previo al hinchamiento y posterior al mismo.

La deformación final permite calcular el EI según la ecuación:

$$EI(\%) = (h_i - h_f)/h_i \quad (3.7)$$

### 3.3.4. Ensayos de consolidación

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 la realización de este ensayo se siguieron los lineamientos recomendados por la Norma ASTM D4546-03.

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. 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:

$$\Delta\eta = \Delta H/H \quad (3.8)$$

$\Delta H$ : 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  $C_s$ .

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.

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:  $w > w_{opt}$

Luego del proceso de hinchamiento libre se comienza con la etapa de carga.

### 3.3.5. Ensayos de compresión simple

El ensayo de compresión simple, uniaxial o no confinada se realizó para evaluar la resistencia de las mezclas en estudio. Esta resistencia, estará siempre del lado conservador, ya que no contempla el confinamiento lateral otorgado por la masa de suelo, lo que normalmente se conoce como presión de confinamiento. Para la realización de este ensayo se siguieron los lineamientos de la Norma ASTM D-2166.

Este ensayo se realiza con el fin de determinar la resistencia o esfuerzo último ( $q_u$ ), también conocida como tensión desviado. Mediante la aplicación de una carga axial a deformación controlada y utilizando una muestra moldeada en forma de cilindro con un 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 tensión longitudinal. Con el esfuerzo último se puede obtener la resistencia al corte del suelo de la siguiente manera:

$$S_u = q_u/2$$

La velocidad de deformación específica recomendada por la norma y la utilizada fue de 2%/min. En la figura 3.35 se muestran probetas de las mezclas I a IV previo a la aplicación de la deformación.



Fig. 3.35: Armado de muestras.

En la figura 3.36 se muestran muestras posterior al ensayo de compresión simple.



Fig. 3.36: Muestras posterior a la falla del material.

Para un mejor entendimiento se ensayaron las mezclas analizando las 3 principales variables en juego. La humedad de ensayo, el contenido de APAM y el fluido de mezclado.

- Humedad: se ensayaron muestras a 3 humedades distintas, rama seca (RS), humedad optima (RO) y rama húmeda (RH) en relación a la curva de compactación Proctor.
- Contenido de APAM: Mezclas I, II, III y IV a igualdad de las demás variables.
- Fluido de mezclado: se ensayaron muestras humectadas con los tres distintos fluidos estudiados.

### 3.3.6. Ensayos de succión

Las propiedades hidráulicas de un material nos ayudan a predecir el comportamiento e interacción del mismo frente a cambios de humedad, contacto con agua o ante gradientes hidráulicos.

En suelo cuyos vacíos no están completamente llenos de agua, que es análogo a decir que el suelo no esta saturado, coexisten dentro del material 3 fases perfectamente definidas.

- La fase solida, integrada por las partículas de suelo interconectadas entre si.
- La fase gaseosa, integrada por el aire existente entre la fase solida.
- La fase liquida, integrada por el agua libre existente entre la fase solida y la fase gaseosa.

Por ultimo existe una cuarta fase aun no definida que se trata de la interfaz existente entre la fase liquida y gaseosa, la misma existe y se genera por el efecto de capilaridad y tiene la particularidad de poseer, por interacciones físico-químicas del fluido, un gradiente de tensiones que genera una tensión de tracción en dicha interfaz que se equilibra con una tensión de compresión en la interfaz solida. Ya que el gradiente de tensiones sobre la cuarta fase depende de la interacción y relación entre la fase liquida y gaseosa se puede pensar a dicho fenómeno como un equilibrio en ambas fases que no involucra a la fase solida pero que la misma se ve afectada por equilibrio de las otras dos, dicha tensión de tracción en las partículas solidas sera una diferencia de presiones entre la fase gaseosa  $u_a$  y la fase liquida  $u_w$ . Definiéndose así a la succión mátrica como  $(u_a - u_w)$ .

Los ensayos de succión permiten determinar la relación que existe entre el grado de saturación del suelo, relacionado directamente con el equilibrio entre las fases gaseosas y líquidas del suelo con la succión mátrica del mismo. En la figura 3.37 se muestra una curva de retención y esquemas de los estados del suelo en distintas zonas de la curva y en la figura 3.38 se muestran curvas de retenciones típicas para distintos tipos de suelos.

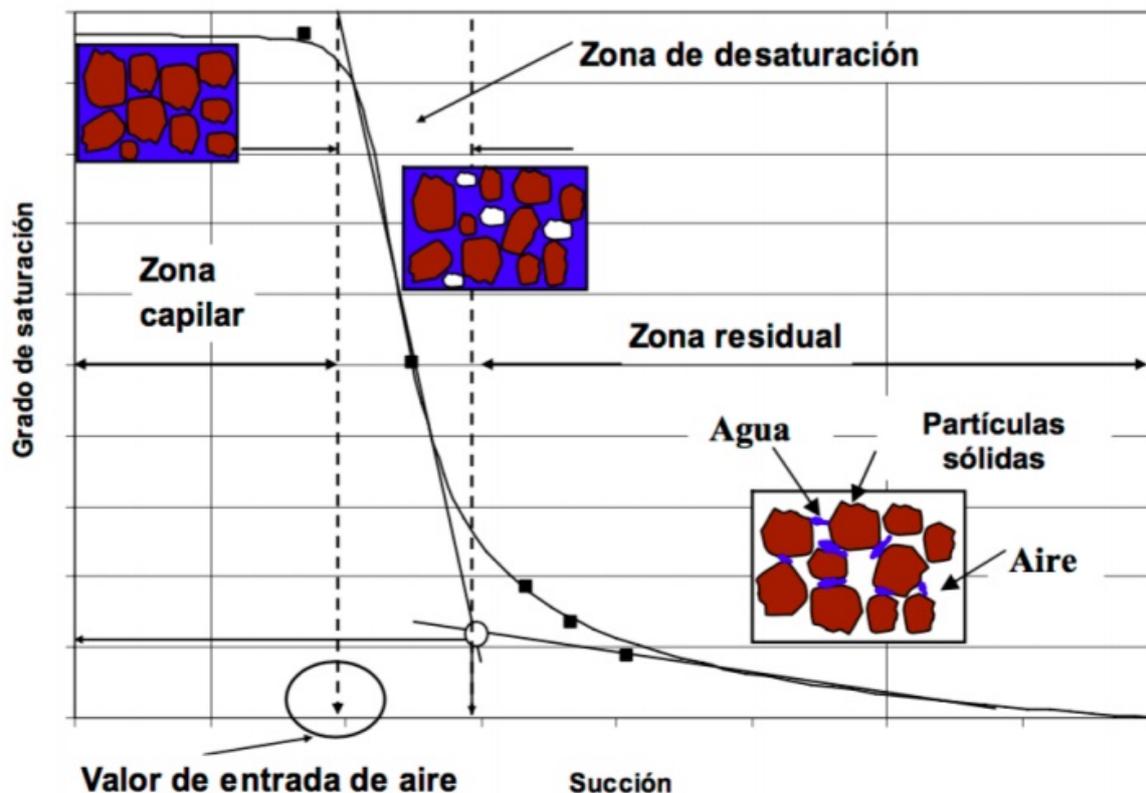


Fig. 3.37: Estados del suelo en distintas zonas de la curva de retención (Vanapalli & Fredlund, 2000).

La curva de retención de agua está compuesta por 3 zonas: zona capilar, zona de desaturación y zona residual.

- **Zona capilar:** En esta zona el suelo continúa en una situación saturada. Finaliza cuando el suelo llega a la presión de entrada de aire. La presión de entrada de aire ( $S_{ae}$ ) representa el valor que debe exceder la succión mátrica antes que el aire comience a ingresar en los macroporos del suelo.

- **Zona de desaturación:** El agua es desplazada por el aire generando que la fuerza de adhesión entre el agua y el suelo aumente. Al finalizar esta etapa, el agua dentro del suelo se encuentra dispersa generando una reducción importante en la permeabilidad del suelo.

- **Zona residual:** En esta zona grandes aumentos en la succión mátrica no generan modificaciones importantes en el grado de saturación del suelo. Al ser poca la cantidad de agua en el medio, ésta ya no fluye a través de los poros. Para generar una completa remoción del agua debe utilizarse un proceso de evaporación. En esta zona las succiones son muy altas y el agua se encuentra adsorbida a la partícula de suelo, y puede definirse el grado de saturación residual del suelo  $S_{res}$ . Es el grado de saturación correspondiente al agua adsorbida a las partículas de suelo.

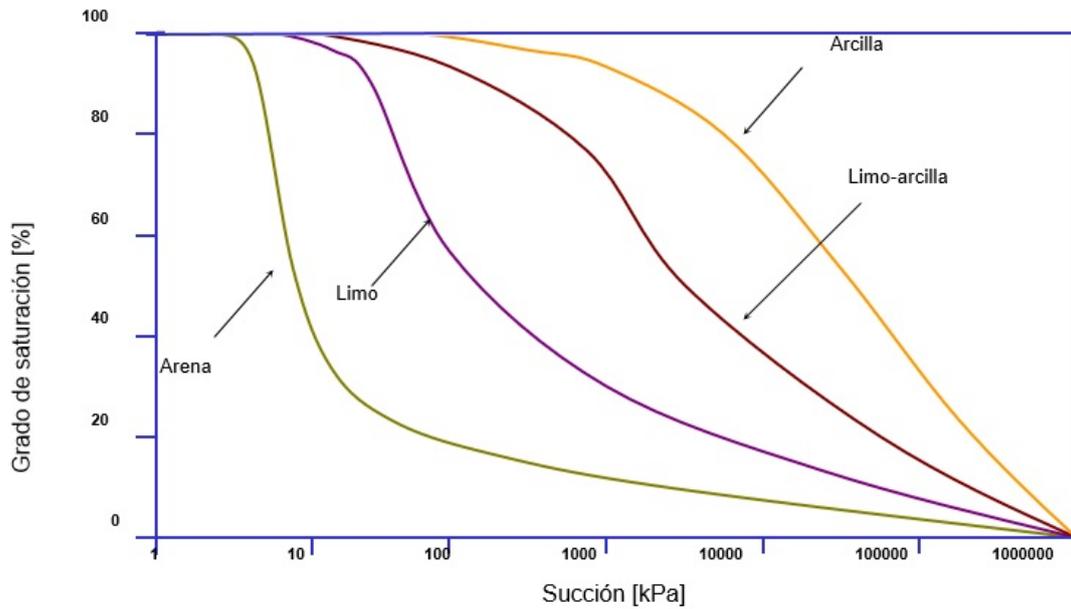


Fig. 3.38: Curvas de retención típicas según distintos suelos.

Procedimiento:

Se realizaron 8 ensayos de succión por cada mezcla en estudio siguiendo los lineamientos propuestos por la norma ASTM 5298-03.

Se preparó suelo con distintas humedades gravimétrica buscando abarcar todo el rango de humedades hasta la saturación.

Se dejó homogeneizar cada muestra durante 24 horas en condiciones de humedad y temperatura controladas.

A continuación se compactó. Se colocaron los papeles filtro y se hermetizó para evitar cambios de humedad de la muestra con el aire circundante con el exterior.

Una vez armado el ensayo se lo dejó durante 7 días a 18°C para lograr el equilibrio higrotérmico de cada muestra aislada. En la figura 3.39 se muestra el armado de un ensayo de succión.



Fig. 3.39: Armado del ensayo de succión.

Una vez desarmada la muestra se procede a medir las humedades de todos los papeles para la determinación de la succión mátrica, la succión total y las humedades gravimétrica nuevamente para usar como valores finales, conociéndose puntualmente una relación entre la succión mátrica y la humedad.

### 3.3.7. Ensayos de conductividad hidráulica saturada

En suelos totalmente saturados se define a la conductividad hidráulica ( $k$ ) según la ley de Darcy (1856).

$$V = k \cdot i = \frac{k * \rho}{u} \cdot i \quad (3.9)$$

Donde:

- $i$  es definido como el gradiente hidráulico al que esta sometido el suelo definido como  $(\Delta H)/(\Delta L)$ .

- $V$  velocidad adentro del medio poroso para dicho gradiente  $i$  (m/seg).
- $\mu$  es la viscosidad del fluido (Pa.seg).
- $K$  es la permeabilidad (m<sup>2</sup>).
- $k$  es la conductividad hidráulica  $k = K * \rho/u$  (m/seg).

Puede pensarse a la conductividad hidráulica como la facilidad de un fluido para atravesar el material.

Para la determinación de la conductividad hidráulica se realizaron ensayos de permeabilidad de carga variable siguiendo los lineamientos recomendados por la norma ASTM D5084-00.

Se prepararon muestras de las mezclas I y II con una humedad optima y compactadas con agua desmineralizada. Posteriormente la saturación y el gradiente hidráulico se realizaron con fluidos permeantes de distinta naturaleza.

Las muestras fueron saturadas aplicándoles un gradiente hidráulico descendente y continuo durante varios días hasta notar la salida de agua por debajo de las muestras.

Una vez saturadas las muestras se procedió a medir la conductividad de la siguiente forma:

$$k = \frac{a.L}{A.(t_2 - t_1)} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (3.10)$$

Donde:

- $a$  es el área de la bureta.
- $L$  es la longitud de la muestra de suelo.
- $h_1$  es la diferencia de energías piezométricas ( $\Delta H$ ) al que esta sometida la muestra a un cierto tiempo  $t_1$ .
- $h_2$  es la diferencia de energías piezométricas ( $\Delta H$ ) al que esta sometida la muestra a un cierto tiempo  $t_2$  mayor a  $t_1$ .
- $A$  es el área de la muestra de suelo ensayada.

Esto debe realizarse repetidamente hasta asegurarse un valor constante ya que así se comprueba la total saturación de la muestra.

### 3.3.8. Ensayos de conductividad hidráulica no-saturada

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 [68].

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:

$$q_a = -\frac{k \cdot k_{ra}}{u_a} \cdot (\Delta P_a - \rho_a \cdot g) \quad (3.11)$$

Donde:

- $k$  es la permeabilidad intrínseca en condiciones de saturación total.
- $k_{ra}$  es la permeabilidad relativa.
- $P_a$  es la presión del fluido.
- $\rho_a$  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.

Primero debe definirse el gradiente hidráulico de la ley de Darcy como:

$$i_\omega = \frac{dh_\omega}{dx} \quad (3.12)$$

Donde:

- $i_\omega$  es el gradiente hidráulico.
- $\frac{dh_\omega}{dx}$  es la derivada de la altura piezométrica del fluido en función de la longitud del perfil de suelo.

La altura piezométrica del fluido puede calcularse como:

$$h_\omega = h_m + \frac{\mu_a - \mu_\omega}{\rho_\omega \cdot g} \quad (3.13)$$

Donde:

- $\mu_a - \mu_\omega$  es la succión mátrica.
- $\rho_\omega$  es la densidad del fluido.
- $g$  es la aceleración de la gravedad.

Ambas ecuaciones permiten 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 [69]:

- 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 a medida que un flujo descendente recorre la misma.

El volumen total de agua en el suelo parcialmente saturado entre una posición  $j$  y  $m$  puede calcularse como

$$V_{\omega} = \int_j^m \theta(x) \cdot A \cdot dx \quad (3.14)$$

Donde:

- $A$  es el área transversal al camino trazado desde la posición  $j$  y  $m$ .
- $V_{\omega}$  es el volumen de agua en el suelo entre las posiciones  $j$  y  $m$ .
- $\theta$  es el contenido volumétrico de humedad en el suelo en función del recorrido  $dx$  entre la posición  $j$  y  $m$ .

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

$$\theta = \frac{V_{\omega}}{V_T} \quad (3.15)$$

Donde  $V_{\omega}$  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:

$$\theta = \omega \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma_{\omega}} \quad (3.16)$$

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

Luego se puede calcular una velocidad como:

$$v_{\omega} = \frac{dV_{\omega}}{A \cdot dt} \quad (3.17)$$

Donde:

- $v_{\omega}$  es la velocidad del flujo.
- $dt$  es el tiempo transcurrido.
- $dV_{\omega}$  es el agua infiltrada en la muestra de suelo en el tiempo  $dt$ .

Una vez calculada la velocidad se debe usar la ecuación de Darcy para calcular la conductividad hidráulica  $k_{\omega}$  no saturada como:

$$k_{\omega} = \frac{v_{\omega}}{i_{\omega}} \quad (3.18)$$

El permeámetro utilizado en el ensayo fue diseñado y construido en el laboratorio, en la figura 3.40 se esquematiza su funcionamiento.

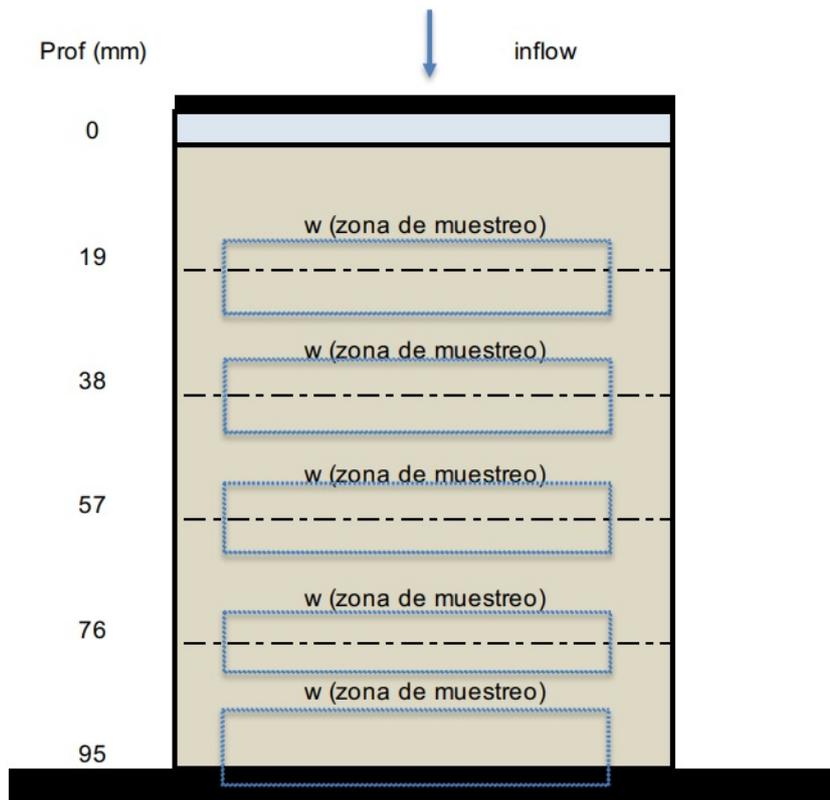


Fig. 3.40: Esquema de columna y muestreo.

Una vez armada la columna la misma es sometida a un gradiente hidráulico durante varios días (entre 1 y 5) para luego ser desarmada. En la figura 3.41 se muestran columnas antes de someterse al gradiente hidráulica, durante el sometimiento y posterior al mismo.



Fig. 3.41: Columnas previo, durante y posterior a la realización del ensayo.

Una vez medido los valores de humedad y succión se calcula la conductividad hidráulica de la columna para distintos niveles de altura-saturación.

### 3.4. Resultados del programa experimental

Los resultados del programa experimental se analizaran en función de los requerimientos buscados en una barrera hidráulica. Se evaluó la interacción fluido partícula y la influencia del APAM en la plasticidad mediante los límites de Atterberg. Se estudió la compactación optima mediante el ensayo Proctor estándar de las mezclas de arena-arcilla-APAM y se estableció la densidad objetivo en base a ello. La estabilidad volumétrica de las mezclas se analizó mediante los ensayos de hinchamiento libre y consolidación con un especial énfasis en las mezclas de arcilla-APAM (mezclas C). El comportamiento no saturado de las mezclas se estudió mediante la curva de retención y ensayos de succión. Los requerimientos de resistencia al corte se evaluó mediante ensayos de compresión no confinada a deformación controlada y a diferentes humedades. Las conductividades hidráulicas saturadas se evaluaron mediante ensayos de permeabilidad de carga variable y las conductividades hidráulicas no saturadas se evaluaron mediante columnas de infiltración con el objetivo de recrear las condiciones de una barrera hidráulica. Los ensayos sobre las mezclas de arena-arcilla-APAM (Mezclas I a IV) y arcilla-APAM (Mezclas C) se realizaron con los tres fluidos en estudio recreando las condiciones de exposición a los mismos.

#### 3.4.1. Límites de Atterberg: efecto del tipo de fluido

Los resultados obtenidos de límites líquidos, límites plásticos e índices de plasticidad para las fracciones finas de las mezclas analizadas mezcladas con los tres fluidos en análisis se presentan en la tabla 3.4.

Mezcla	Fluido	LL (%)	LP (%)	IP (%)
	Agua desmineralizada	63	42	21
C I	Salmuera	52	35	17
	Kerosene	47	34	13
	Agua desmineralizada	85	43	42
C II	Salmuera	64	43	21
	Kerosene	47	32	15
	Agua desmineralizada	85	43	42
C III	Salmuera	68	55	13
	Kerosene	65	31	34
C IV	Agua desmineralizada	90	73	17
	Salmuera	93	71	22

Tabla 3.4: Límites de Atterberg para distintas concentraciones de APAM y fluidos de distinta naturaleza.

### 3.4.2. Proctor estándar

Este ensayo permite evaluar la efectividad de la compactación dinámica de los suelos en función de la humedad de los mismos, buscando un óptimo de humedad para lograr una densidad máxima mediante la reducción de los vacíos en el suelo y asociado esto a la resistencia, permeabilidad, y reducción de la deformabilidad. Para un primer análisis se considera que una mayor densidad se corresponderá con una mayor resistencia.

Este trabajo usa como base el trabajo realizado por Luz Marti el cual determino ya cual era la mezcla de arena-arcilla que para la misma energía de compactación lograba la mayor densidad, siendo como resultado una mezcla de 85-15 respectivamente. En este trabajo se buscó estudiar la incidencia del polímero dentro de la mezcla ya preestablecida de arena-arcilla con lo que se busca estudiar si la energía de compactación necesaria o la humedad óptima cambian en función de la cantidad de polímero.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 3.42.

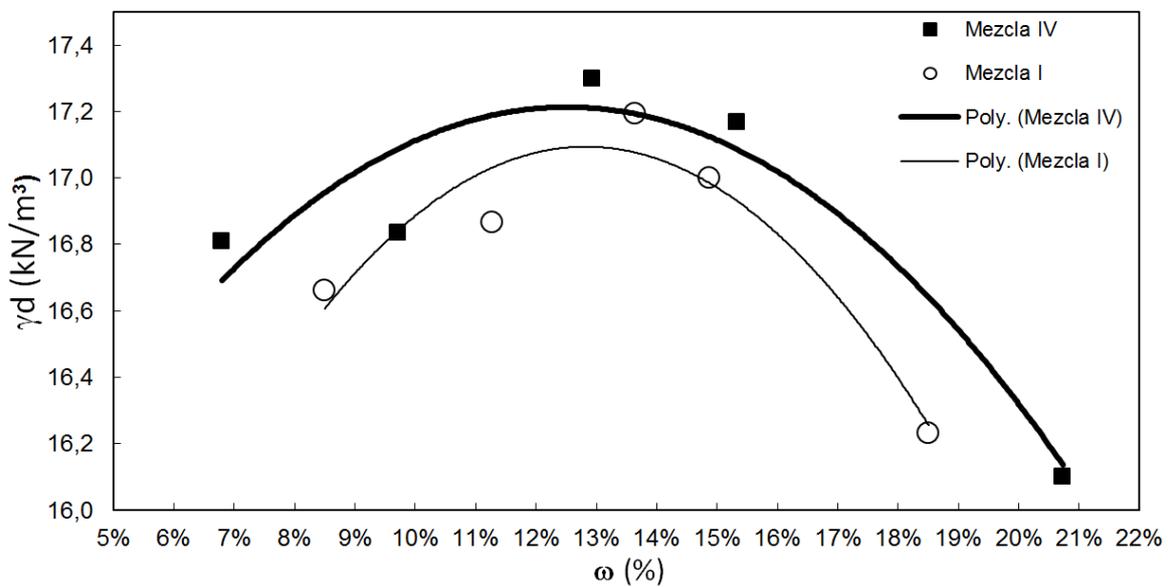


Fig. 3.42: Curvas de compactación de las mezclas I y IV.

Obteniéndose valores de  $\omega_{\text{óptimo}} = 13,13\%$  y  $\gamma_d = 17,13 \text{KN/m}^3$  para la mezcla I, corroborándose con el trabajo realizado por Luz Marti. A su vez se comprobó una nula influencia del polímero en el fenómeno de compactación para las mezclas estudiadas.

Se trabajo a partir de estos resultados con una densidad de  $\gamma_{d_{\text{objetivo}}} = 0,95 * \gamma_{d_{\text{máx}}}$  y  $\omega_{\text{óptimo}} = 13,13$  para todas las mezclas.

### 3.4.3. Hinchamiento libre y consolidación

Los resultados obtenidos para las mezclas de arena-arcilla-APAM (mezclas I a IV) se muestran en la figura 3.43 y se resumen en la tabla 3.5.

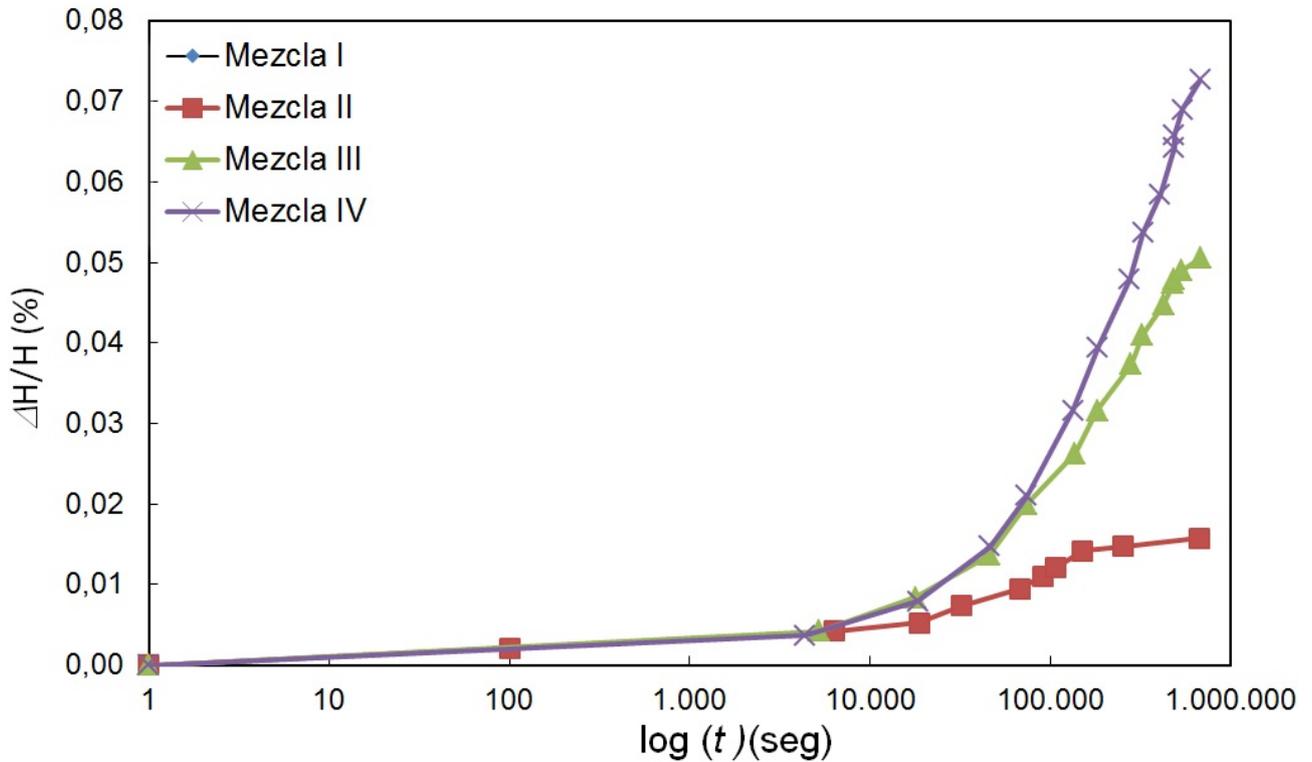


Fig. 3.43: Curvas de hinchamiento para las mezclas I, II, III y IV ante la saturación con agua desmineralizada.

No se apreció un hinchamiento de la mezcla I (mezcla de 85 %arena-15 %arcilla).

Mezcla	Tiempo de hinchamiento (Hrs)	EI (hinchamiento)
I	0	-
II	186.7	1.58 %
III	188.3	5.05 %
IV	187.2	7.26 %

Tabla 3.5: Hinchamientos libres de las mezclas arena-arcilla-APAM.

Complementariamente a los ensayos ya presentados se realizaron ensayos de hinchamiento libre para las mezclas sin contenido de arena (mezclas C) y para distintos fluidos permeantes. Sus resultados se muestran en la figura 3.44, 3.45 y se resumen en la tabla 3.6.

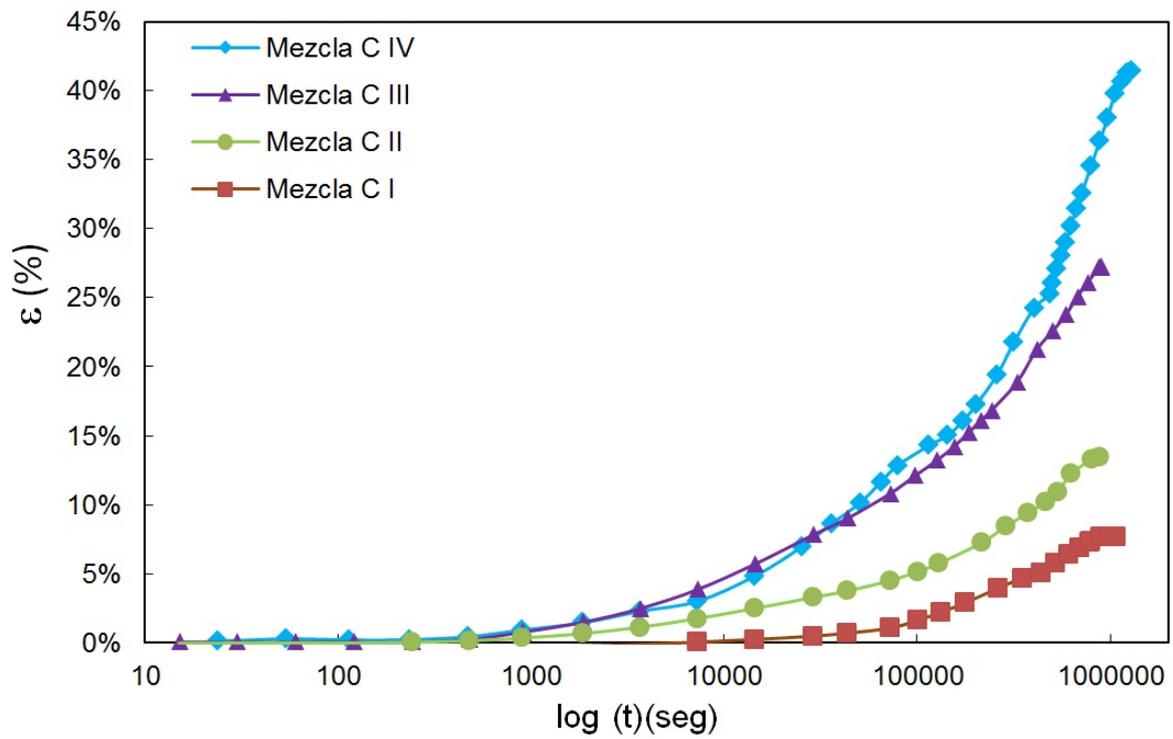


Fig. 3.44: Curvas de hinchamiento de las mezclas C con agua desmineralizada.

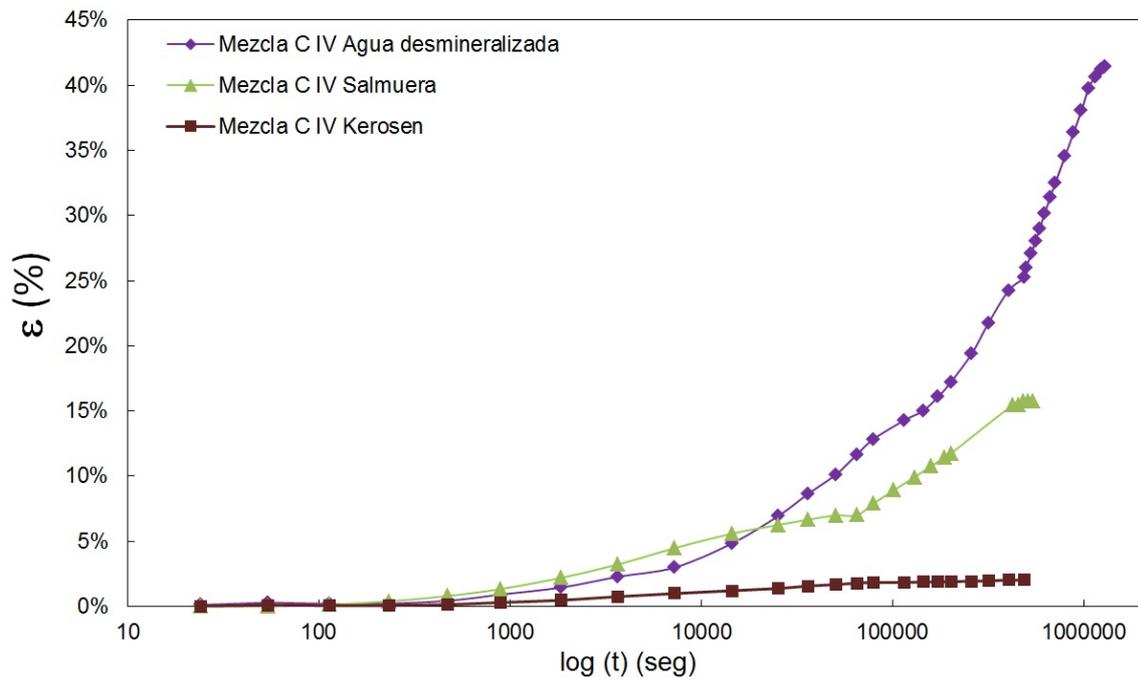


Fig. 3.45: Curvas de hinchamiento de la mezclas C 3.5 con distintos fluidos permeantes.

Mezcla	Fluido	$\omega_i$	$\Delta H/H$ (%)	Tiempo (días)
	Agua destilada	31.3	7.70	12.3
C 0.0	Salmuera	31.2	2.43	6.5
	Kerosene	-	0	-
	Agua destilada	33.8	13.48	10.7
C 1.5	Salmuera	33.9	5.22	5.7
	Kerosene	-	0	-
	Agua destilada	31.6	27.24	10.3
C 2.5	Salmuera	30.6	9.37	4.4
	Kerosene	-	0	-
	Agua destilada	31.5	41.48	14.8
C 3.5	Salmuera	30.7	15.74	5.2
	Kerosene	30.5	2.02	23.6

Tabla 3.6: Hinchamientos libres de las mezclas de arcilla-APAM estudiadas.

En la figura 3.46 se muestran la diferencia visual de mezclas de arcilla-APAM luego del hinchamiento con diferentes fluidos. Se aprecia una fisuración mucho mayor en las mezclas de arcilla-APAM con agua desmineralizada en comparación con salmuera o kerosene.



Fig. 3.46: Mezcla C 1.5 posterior al hinchamiento con distintos fluidos.

En el Anexo 7.3 se muestran cada uno de los resultados experimentales y en la tabla 3.7 se resumen los resultados obtenidos en los ensayos de consolidación.

Mezcla	Yd (KN/m <sup>3</sup> )	Sro (%)	$\Delta H/H$ (%)	Cc	Cr
C 0.0	12.99	62.1	7.7	0.33	0.08
C 1.5	13.05	76.1	13.48	0.40	0.07
I	16.97	56.7	0	0.27	0.09
II	16.04	55.3	1.58	0.33	0.10
III	16.98	56.5	5.79	0.40	0.09
IV	16.95	57.3	7.26	0.39	0.07

Tabla 3.7: Resultados de ensayos de consolidación.

### 3.4.4. Compresión no confinada

En las figuras 3.47, 3.48 y 3.49 se presentan las curvas de tensión-deformación de obtenidos para las mezclas I a IV. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 3.8.

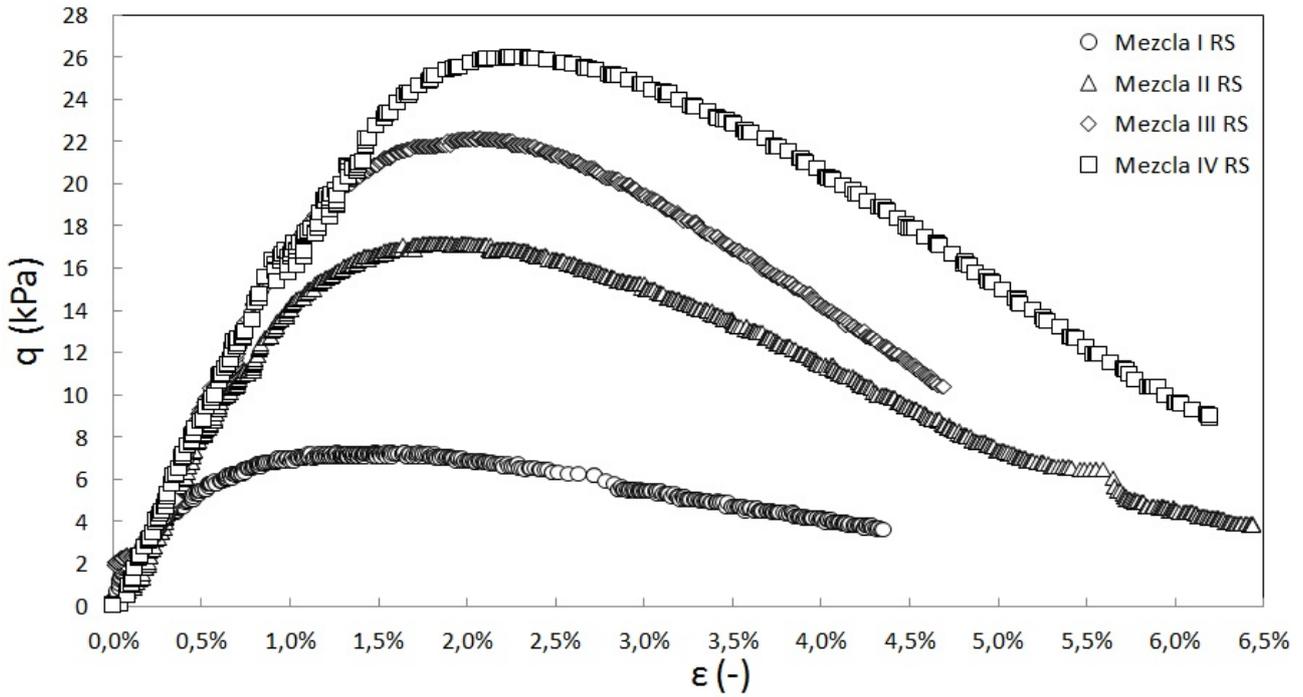


Fig. 3.47: Curvas tensión-deformación para la Rama Seca (RS) de las mezclas I, II, III y IV.

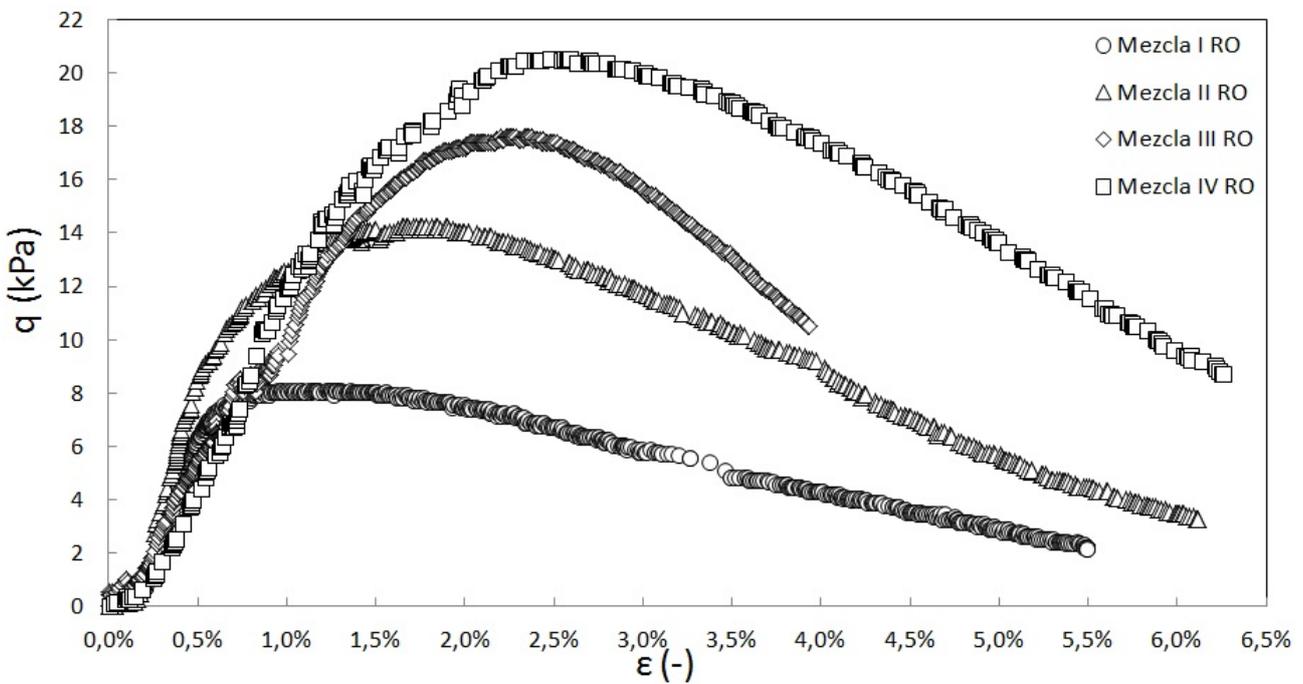


Fig. 3.48: Curvas tensión-deformación para la humedad óptima (RO) de las mezclas I, II, III y IV.

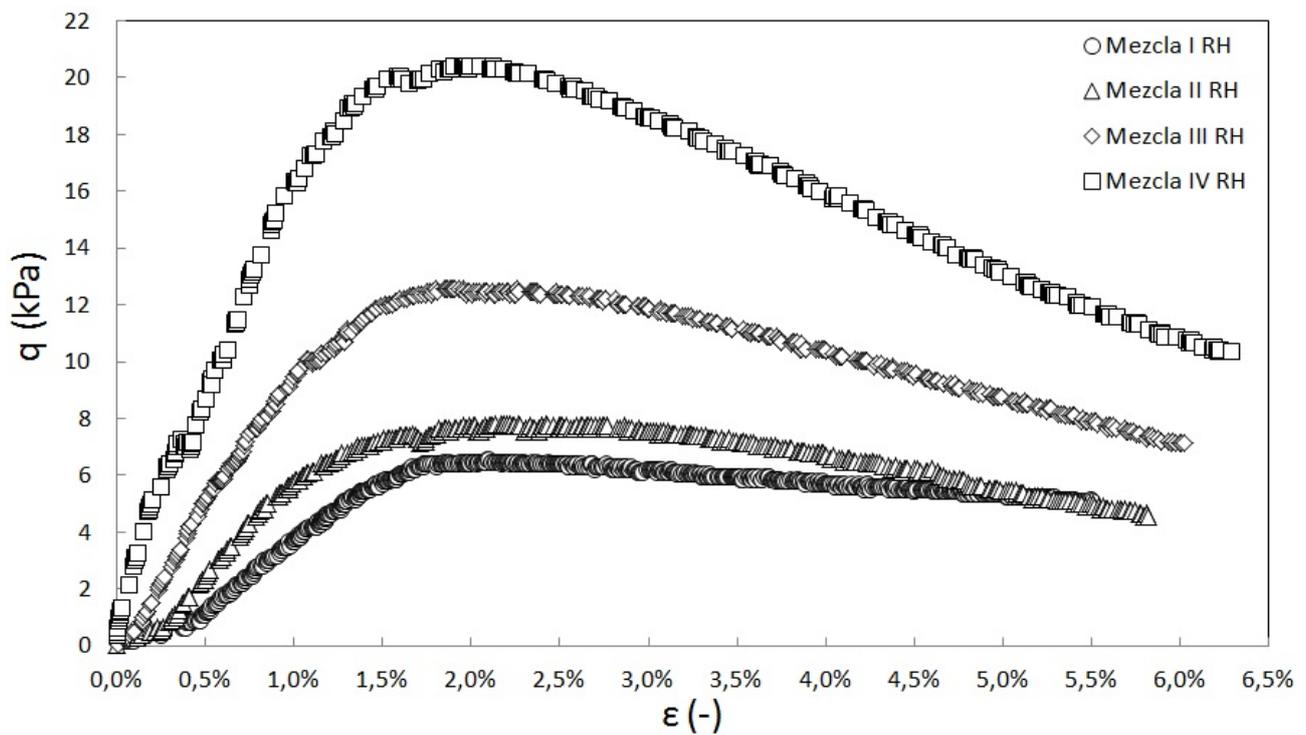


Fig. 3.49: Curvas tensión-deformación para la Rama Húmeda (RH) de las mezclas I, II, III y IV.

Mezcla	Rama	$\omega$ (%)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)	$q_{m\acute{a}x}$ (kPa)
	Seca (RS)	9.28	2.14	1959	9.1
I	Optima (RO)	13.11	0.86	1097	8.1
	Húmeda (RH)	16.96	2.59	1129	6.5
	Seca (RS)	9.13	1.54	2037	16.9
II	Optima (RO)	12.90	1.89	1091	14.0
	Húmeda (RH)	16.15	2.33	1313	7.7
	Seca (RS)	8.86	1.94	2578	21.9
III	Optima (RO)	13.28	2.47	2653	17.4
	Húmeda (RH)	16.68	1.89	2547	12.5
	Seca (RS)	9.57	2.23	2691	26.0
IV	Optima (RO)	13.23	2.48	1910	20.5
	Húmeda (RH)	17.52	1.89	3150	20.4

Tabla 3.8: Resumen de resultados UCS para distintas mezclas y humedades.

Donde:

- $E_{50}$  es el modulo de elasticidad tangente a una tensión del 50% de la tensión máxima medida.
- $\omega$  es la humedad de la muestra al finalizar el ensayo.
- $\epsilon$  es la deformación correspondiente a la máxima tensión.

En la figura 3.53 y tabla 3.9 se presentan los resultados obtenidos para las mezclas con distintos fluidos de mezclado.

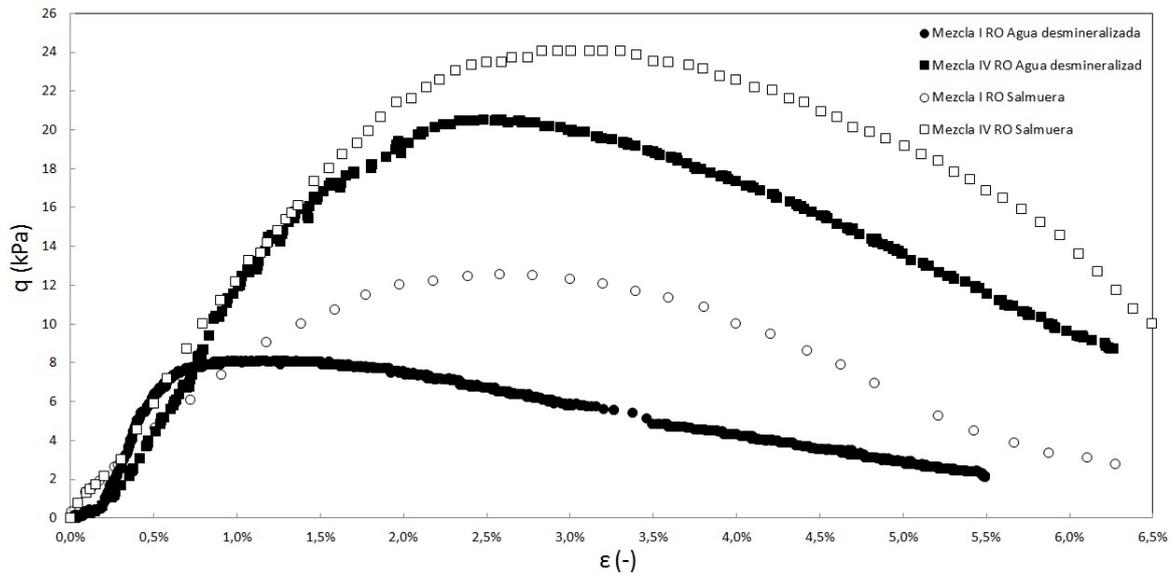


Fig. 3.50: Curvas tensión-deformación para las mezclas I y IV con agua desmineralizada y salmuera.

Mezcla	Rama	$\omega$ (%)	$q_{m\acute{a}x}$ (kPa)
I	Optima	13.11	8.1
I	Optima	13.23	12.5
IV	Optima	13.23	20.5
IV	Optima	12.94	24.1

Tabla 3.9: Resultados experimentales de resistencia a la compresión simple para las mezclas I y IV para diferentes fluidos.

La muestras mezcladas con kerosene no mantienen la consistencia debido a que es un fluido no polar.

### 3.4.5. Curva de retención

El estudio de la relación del grado de saturación y la succión de las mezclas compactadas se realizó por el método de papel de filtro como se explico anteriormente. Los resultados de las distintas mezclas se pueden observar en las tabla 3.10 y 3.11. En la Figura 3.51 se observan los resultados de todas las muestras analizada junto a la calibración del modelo de curvas de retención de van Genutchen. Este modelo consiste en las siguientes ecuaciones:

$$S_e = \frac{S_r - S_{res}}{1 - S_{res}} = \left(1 + \left(\frac{\mu_a - \mu_\omega}{S_{ae}}\right) \frac{1}{1 - \lambda}\right)^\lambda \quad (3.19)$$

$$S_r = S_e \cdot (1 - S_{res}) + S_{res} \quad (3.20)$$

Donde:

- $S_r$  es el grado de saturación de la muestra.
- $S_{res}$  es el grado de saturación residual del material.
- $S_e$  es el grado de saturación efectiva.
- $S_{ae}$  es el grado de saturación de entrada de aire.
- $\lambda$  es el indice de distribución de poros.
- $\mu_a - \mu_\omega$  es la succión mátrica.

Mezcla I		Mezcla II		Mezcla III		Mezcla IV	
Sr (-)	$\mu_a - \mu_\omega$	Sr (-)	$\mu_a - \mu_\omega$	Sr (-)	$\mu_a - \mu_\omega$	Sr (-)	$\mu_a - \mu_\omega$
0.28	6.41	0.33	31.04	0.29	69.78	0.84	4.28
0.38	7.31	0.41	14.50	0.38	47.47	0.75	6.67
0.46	5.48	0.48	11.09	0.47	17.05	0.65	8.43
0.51	3.44	0.52	10.24	0.53	14.76	0.57	13.65
0.59	4.14	0.56	6.64	0.57	13.01	0.38	18.15
0.62	4.63	0.62	5.77	0.67	7.09	0.33	166.75
0.72	2.05	0.72	6.38	0.80	5.65	0.27	306.56
0.93	1.53	0.95	2.79	0.87	3.92	0.31	34.11

Tabla 3.10: Resultados experimentales de los ensayos de succión.

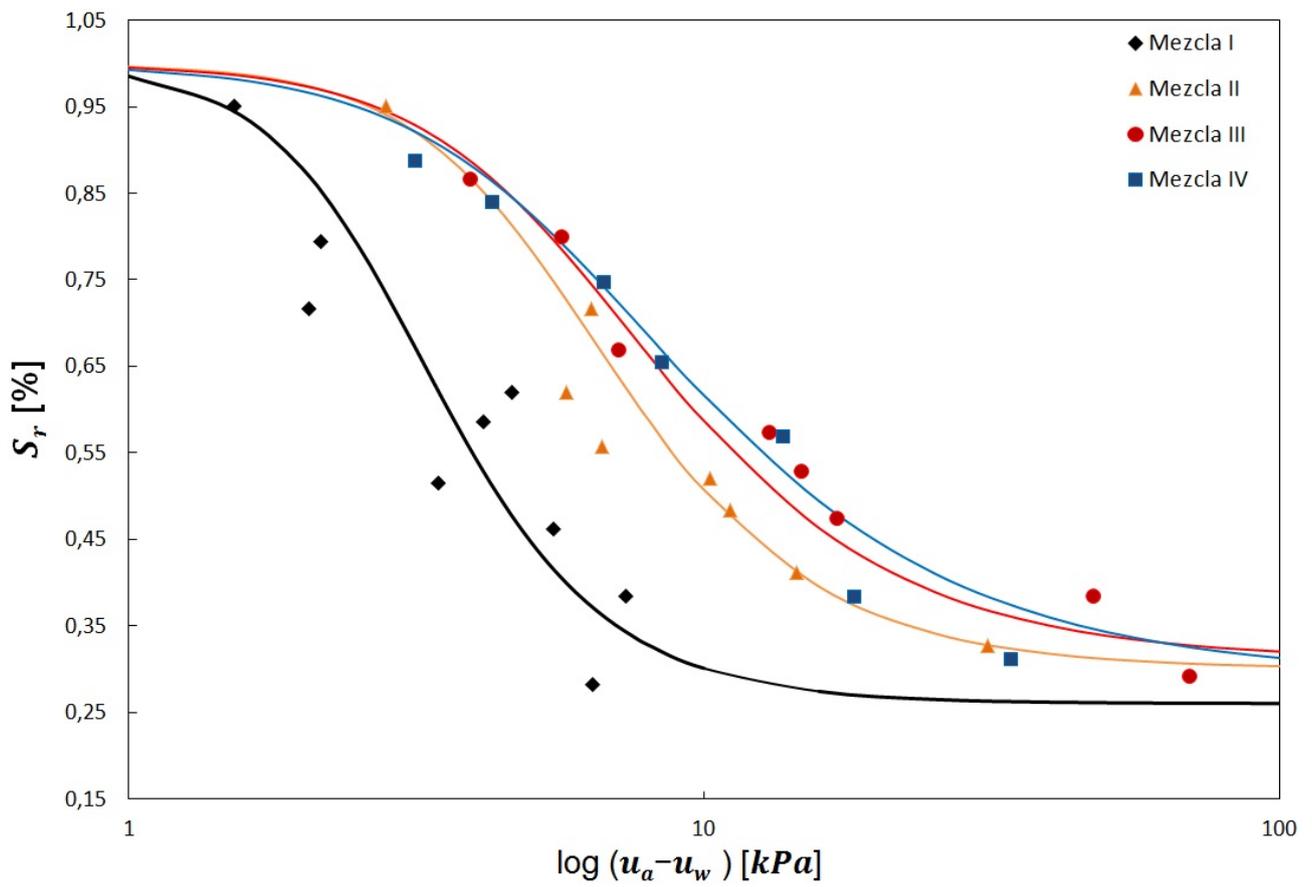


Fig. 3.51: Curvas de retención para las mezclas I, II, III y IV.

Mezcla	$\lambda$ (-)	$S_{ae}$ (kPa)	$S_{res}$ (%)
I	0.70	3.5	23
II	0.65	5.5	25
III	0.60	6.0	31
IV	0.55	6.0	29

Tabla 3.11: Cambios en los parámetros del ajuste de Van Genutchen con el aumento de la concentración de APAM.

### 3.4.6. Conductividad hidráulica saturada

El estudio de la conductividad hidráulica de las mezclas para uso en barreras hidráulicas es primordial. Se realizaron ensayos de conductividad hidráulica sobre las mezclas I y II. Las condiciones iniciales de los ensayos y los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3.12. En la figura 3.52 muestra la variación del nivel piezométrico en función del tiempo para mezclas con distintos fluidos.

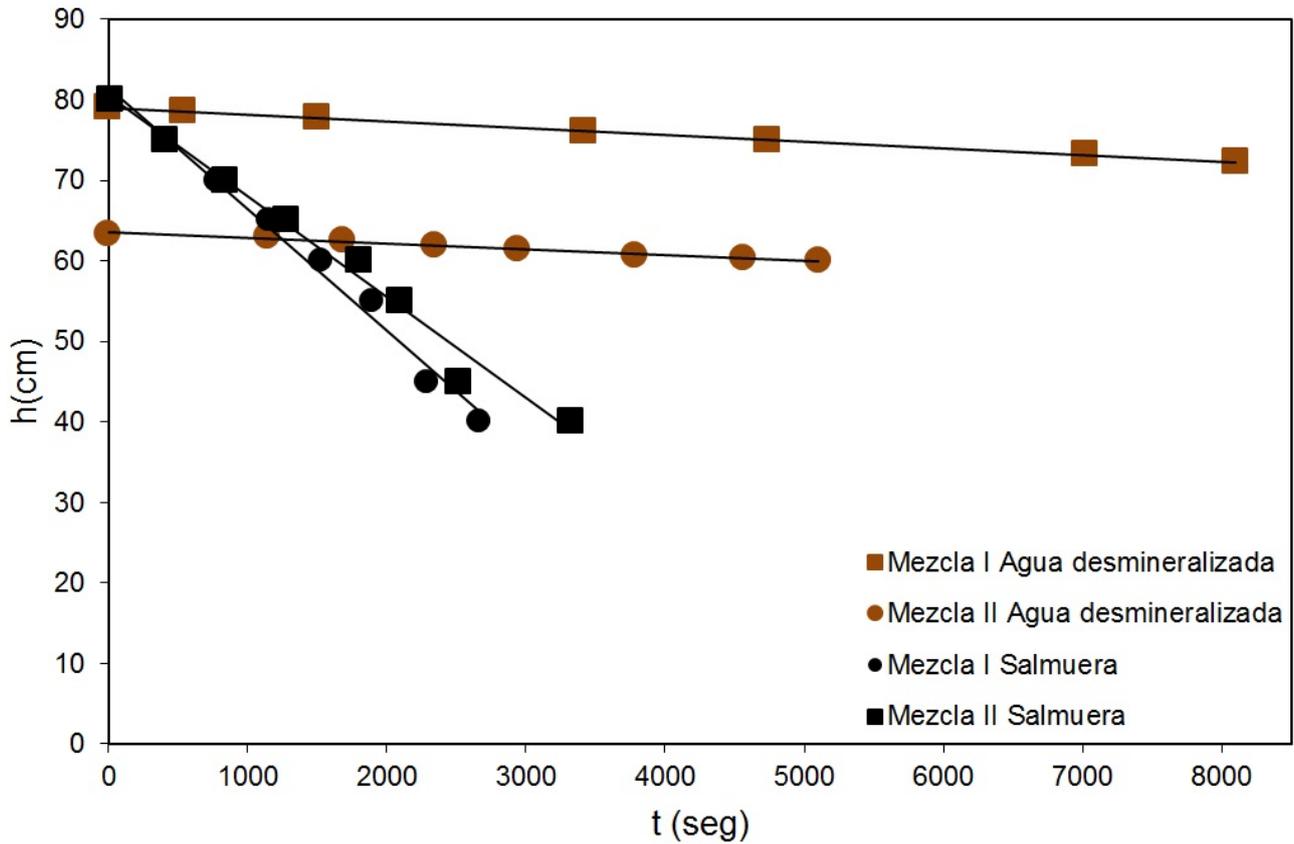


Fig. 3.52: Dispersión experimental durante los ensayos de conductividad hidráulica.

Fluido	Mezcla	$\omega_i$ (%)	$\omega_f$ (%)	i (-)	k (m/seg)
Agua Desmineralizada	I	12.75	23.11	15.2	$7.9 \cdot 10^{-8}$
	II	13.28	23.37	12.3	$7.3 \cdot 10^{-8}$
Salmuera	I	12.64	22.49	12.1	$2.1 \cdot 10^{-6}$
	II	12.81	23.23	11.8	$1.4 \cdot 10^{-6}$

Tabla 3.12: Resultados experimentales de conductividad hidráulica.

### 3.4.7. Conductividad hidráulica no saturada

La evaluación de la permeabilidad no saturada se realizó sobre todas las mezclas analizadas con diferentes tipos de fluidos. Las condiciones iniciales de las muestras analizadas y los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3.13 y en el anexo 7.3.

En la figura 3.53 se muestra una planilla de calculo y en las figuras 3.54, 3.55, 3.56, 3.57 se presentan los resultados obtenidos para distintas mezclas y fluidos.

TIEMPO (hr)	POSICIÓN j	mm	$Sr_0$ (%)	$Sr_F$ (%)	$\theta_0$ -	$\theta_F$ -	$\Delta V_{\omega j,t}$ (cm3)	$h_{w,t}$ (cm)	$i_{j,t}$ -	$v_{\omega j,t}$ (cm/seg)	$k_w$ (m/seg)
48	1	19	57,8%	91,3%	0,218	0,345	20,4	-10,2			
	2	38	57,8%	88,2%	0,218	0,333	18,5	-14,2	2,10	1,26E-06	6,01E-09
	3	57	57,8%	86,0%	0,218	0,324	17,2	-17,4	1,68	1,17E-06	6,97E-09
	4	76	57,8%	84,8%	0,218	0,320	16,5	-20,0	1,36	1,12E-06	8,24E-09
	final	95	57,8%	78,8%	0,218	0,297	12,8	-25,2			

Fig. 3.53: Planilla de calculo. Mezcla I con agua desmineralizada.

Donde:

- $Sr_0$  es el grado de saturación inicial del ensayo.
- $Sr_f$  es el grado de saturación final del ensayo.
- $\theta_0$  es la humedad volumétrica inicial.
- $\theta_f$  es la humedad volumétrica final.
- $\delta V_{\omega j,t}$  es el volumen de agua que entro a la muestra en la posición j entre el tiempo inicial y final.
- $h_{w,t}$  es la energía piezometrica en la posición j y tiempo final.
- $i_{j,t}$  es el gradiente hidráulico actuante entre las posiciones j y j-1.
- $v_{\omega j,t}$  es la velocidad de filtración del fluido.
- $k_w$  es la conductividad hidráulica no saturada.

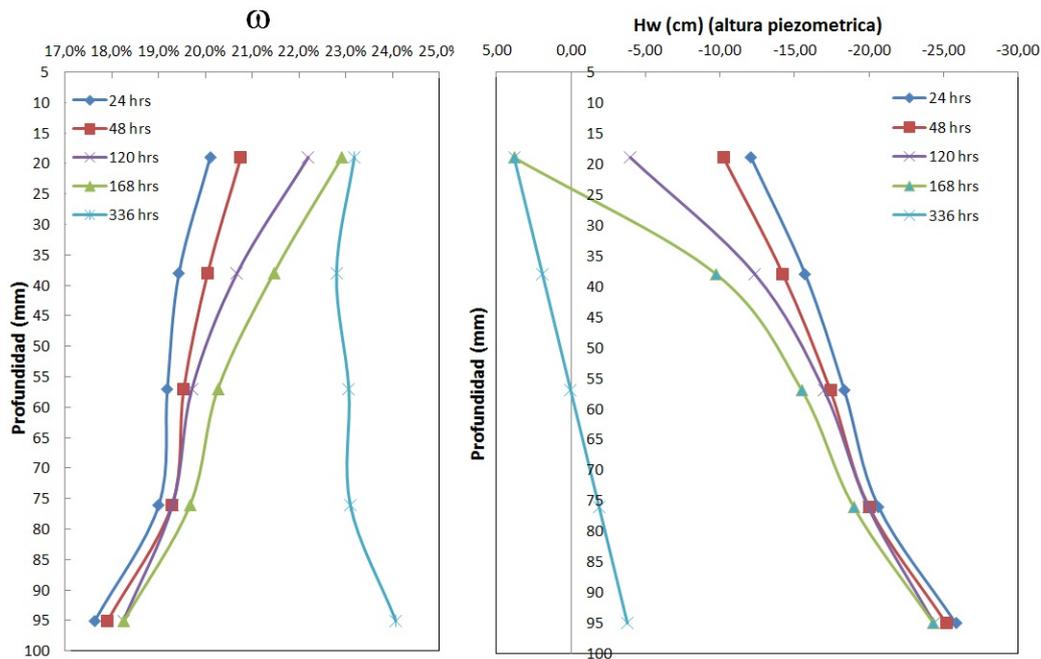


Fig. 3.54: Resultados experimentales para la mezcla I con agua desmineralizada.

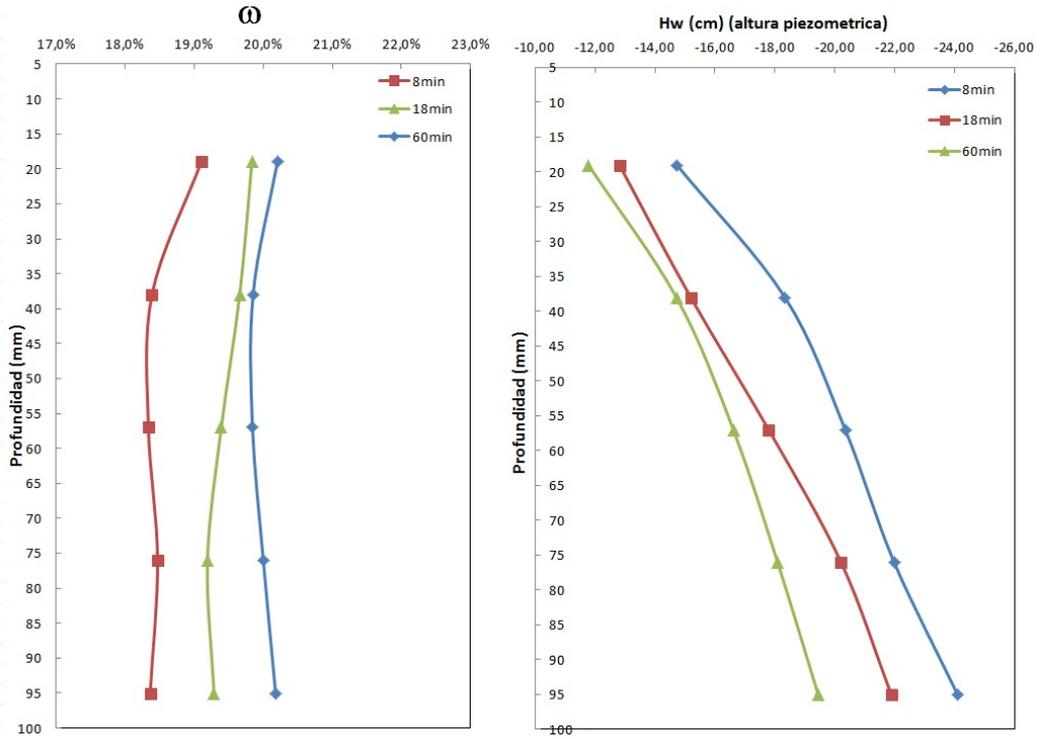


Fig. 3.55: Resultados experimentales para la mezcla I con salmuera.

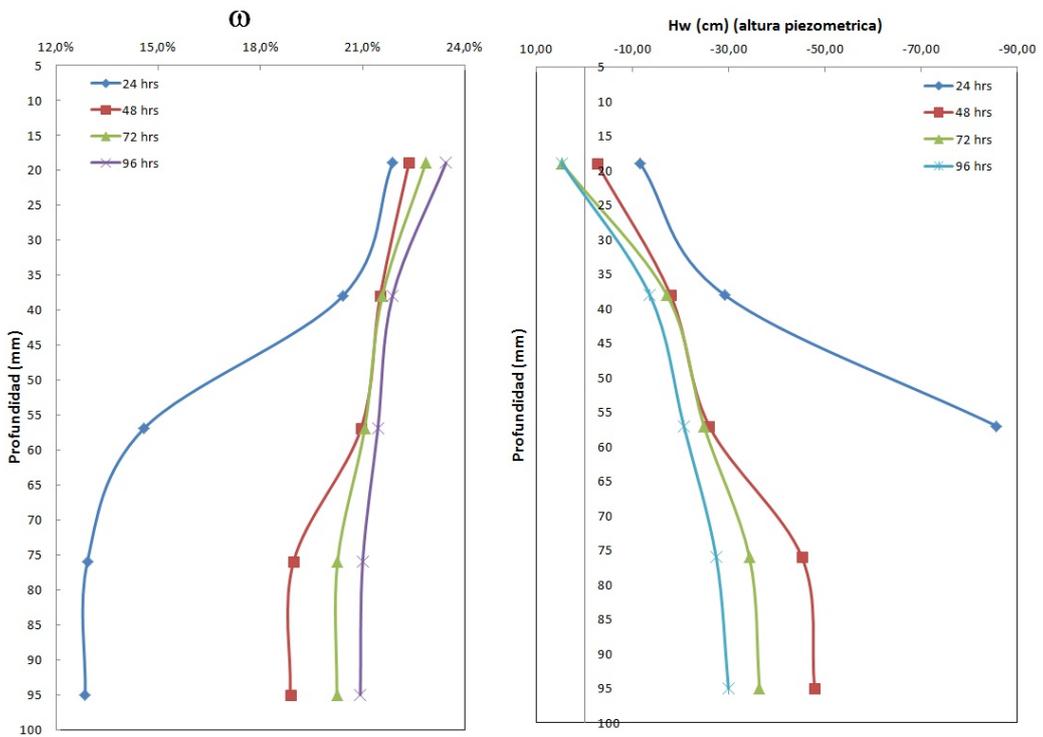


Fig. 3.56: Resultados experimentales para la mezcla IV con agua desmineralizada.

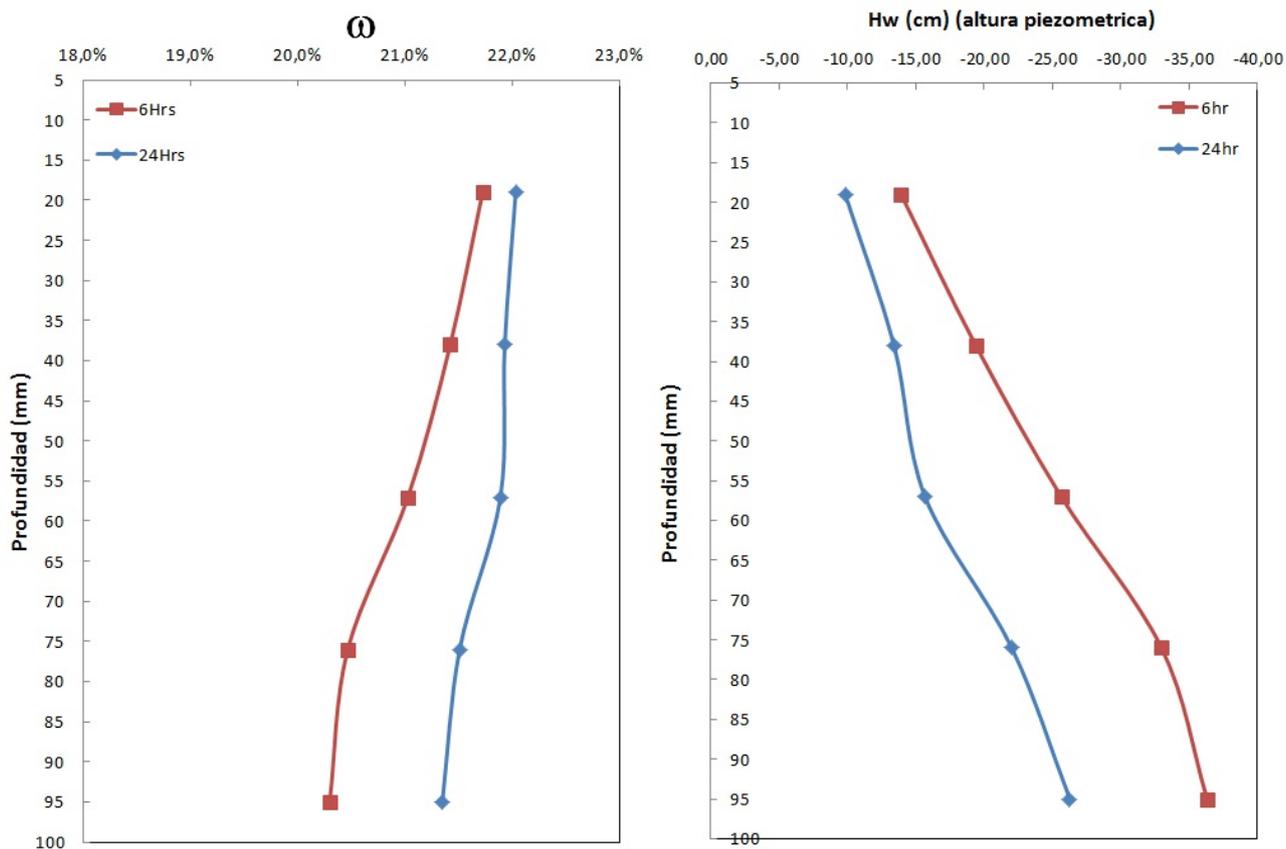


Fig. 3.57: Resultados experimentales para la mezcla IV con salmuera.

Mezcla	Fluido	$\gamma_{d0}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega_0$ (%)	$\mu_a - \mu_w$ (kPa)	$k_w$ (m/seg)
I	Agua Desmineralizada	16.28	12.4-13.6	1.5-2.2	$6.1 \cdot 10^{-10}$ - $1.2 \cdot 10^{-8}$
I	Salmuera	16.28	13.0-13.3	2.0-2.4	$3.9 \cdot 10^{-7}$ - $4.0 \cdot 10^{-6}$
IV	Agua Desmineralizada	16.28	12.8-13.4	1.9-8.8	$1.4 \cdot 10^{-10}$ - $3.4 \cdot 10^{-9}$
IV	Salmuera	16.28	13.2-13.3	1.9-3.4	$8.9 \cdot 10^{-9}$ - $4.1 \cdot 10^{-8}$

Tabla 3.13: Resultados experimentales de conductividades hidráulicas no saturadas.

## 4. Análisis y discusión de resultados

Los resultados del programa experimental se analizaron en esta sección dividiéndolos en dos partes: el efecto de la incorporación de APAM a las mezclas de arena-arcilla y el efecto del tipo de fluido y su interacción con las mezclas propuestas.

### 4.1. Incorporación de APAM en mezclas de arena-arcilla

#### 4.1.1. Cambios en la curva de retención

En la figura 4.58 se puede apreciar el cambio en la curva de retención con el aumento de la concentración de APAM y en la tabla 4.14 se resumen los parámetros del ajuste de Van Genuchten.

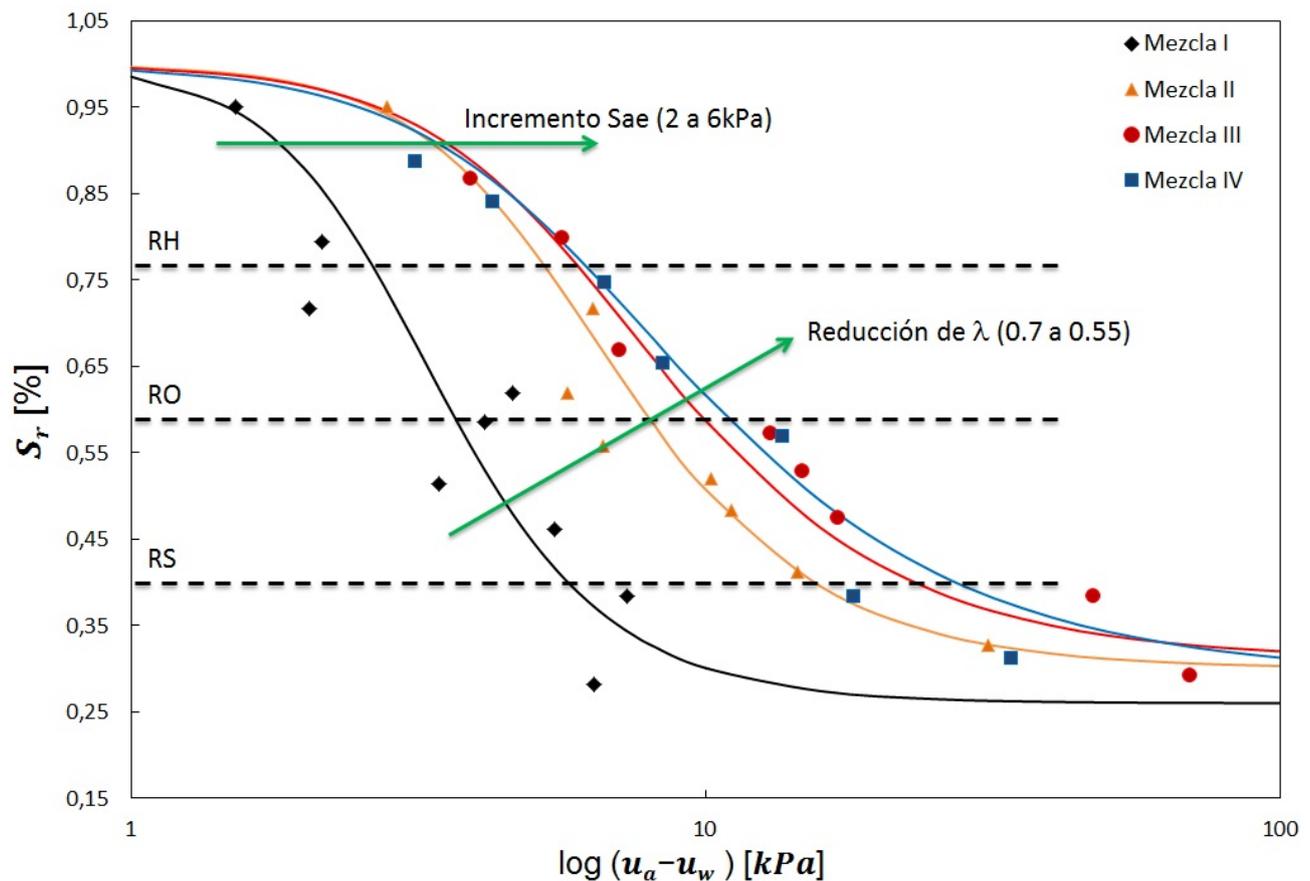


Fig. 4.58: Cambios en la curva de retención en función de la concentración de APAM.

Mezcla	$\lambda$ (-)	$S_{ae}$ (kPa)	$S_{res}$ (%)
I	0.70	3.5	23
II	0.65	5.5	25
III	0.60	6.0	31
IV	0.55	6.0	29

Tabla 4.14: Cambios en los parámetros del ajuste de Van Genuchten con el aumento de la concentración de APAM.

La succión de entrada de aire  $S_{ae}$  expresa la tensión que debe superarse para que el aire entre a los poros del suelo y el mismo comience el proceso de desaturación. Este fenómeno se ve incrementado con el aumento de la concentración de APAM y significa que la desaturación del suelo será mas lenta a su vez también implica que una vez que el agua entra a los poros será mas difícil eliminarla. Esto puede explicarse debido a que el agua presente en los poros una vez que entra en contacto con el APAM pasa a formar parte del hidrogel de APAM alterando sus propiedades. El hidrogel se vuelve cada vez más concentrado a medida que aumenta la concentración de APAM.

El parámetro  $\lambda$  del ajuste de Van Genuchten esta asociado a la porosidad del suelo y a la distribución de los poros en el volumen de la muestra. Un  $\lambda$  alto esta asociado a una distribución de poros mal graduada, es decir una gran cantidad de poros de un único tamaño. Mientras que una disminución del parámetro  $\lambda$  esta asociado a una distribución de poros bien graduada, es decir la no existencia de un tamaño de poro predominante.

Es importante destacar que todas las muestras fueron armadas con el mismo valor de porosidad por lo tanto  $\lambda$  solo podría estar asociado a un cambio en la distribución de dicha porosidad [70].

La disminución del parámetro  $\lambda$  se puede interpretar pensando que la compactación de muestras con mayor contenido de APAM generan una estructura de poros mas uniforme. Es decir que el hidrogel de APAM podría estar disminuyendo el tamaño o la cantidad de floculos característicos de suelos compactados con bajas humedades [71].

No se apreció un cambio significativo en el parámetro  $S_{res}$ . Esto puede explicarse debido a la disminución del efecto del APAM para humedades relativamente. El APAM actúa sobre el agua mediante un fenómeno de adsorción formando el hidrogel de APAM. Si existe menos cantidad de agua en el suelo el APAM formara menos cantidad de hidrogel. Un aspecto a tener en cuenta es que la metodología utilizada para determinar la succión para valores grandes de succión es imprecisa. A esto se suma que el contenido de agua para succiones elevadas es muy bajo y por lo tanto la activación del APAM es muy baja.

#### 4.1.2. Conductividad hidráulica

La microestructura de los suelos puede ser definida como el ordenamiento de las partículas a nivel microscópico o la distribución de los poros en el volumen de vacíos del suelo. Cuando se establece un  $\gamma_{objetivo}$  queda definida una relación de vacíos inicial ( $e_0$ ), que está definida como el cociente entre el volumen de vacíos del suelo y el volumen de sólidos del suelo. Sin embargo dicho valor de relación de vacíos dice muy poco acerca de como se distribuye dicho volumen de vacíos, si es en muchos poros muy pequeños, pocos poros muy grandes, si existe un tamaño de poro predominante sobre el resto o si mas bien es una distribución de poros bien graduada.

La microestructura del suelo comienza a ser determinante cuando el contenido de finos es importante, ya que dependiendo de la humedad presente al momento de armar la muestra, la forma y energía de compactación pueden determinar microestructuras diferentes con iguales densidades y relaciones de vacíos, pero con comportamientos muy diferentes [24][31].

En la tabla 4.15 se resumen los resultados obtenidos mediante los ensayos de permeabilidad de carga variable para la conductividad hidráulica saturada y los ensayos de columna de infiltración para la conductividad hidráulica no-saturada.

Mezcla	I	II	IV
$k_{sat}$ (m/seg)	$7.9 \cdot 10^{-8}$	$7.3 \cdot 10^{-8}$	-
$k_{no-sat}$ (m/seg)	$6.1 \cdot 10^{-10} - 1.2 \cdot 10^{-8}$	-	$1.4 \cdot 10^{-10} - 3.4 \cdot 10^{-9}$

Tabla 4.15: Resultados experimentales de conductividades hidráulicas saturadas y no saturadas para distintas concentraciones de APAM.

Es importante destacar que dichos ensayos poseen una dispersión experimental elevada y por lo que determinan ordenes de magnitud. Se aprecia que los valores de conductividad hidráulica, tanto saturada como no-saturada no presentan cambios apreciables bajo los métodos utilizados. Eso significa que la APAM en los porcentajes estudiados no influye significativamente sobre la conductividad hidráulica del material.

Esto podría deberse a la presunta dilución de la APAM ante una sobresaturación o flujo de agua. Para entender este efecto se puede pensar que el polímero se diluyen en el fluido y no alteran las características del mismo de una forma relevante para ser medida.

En la figura 4.59 se muestran los resultados de ensayos de porosimetría realizados sobre mezclas de arena-arcilla (Mezcla I) y mezclas de arena-arcilla-APAM (Mezcla II) realizados por Luz Marti como parte de su tesis grado.

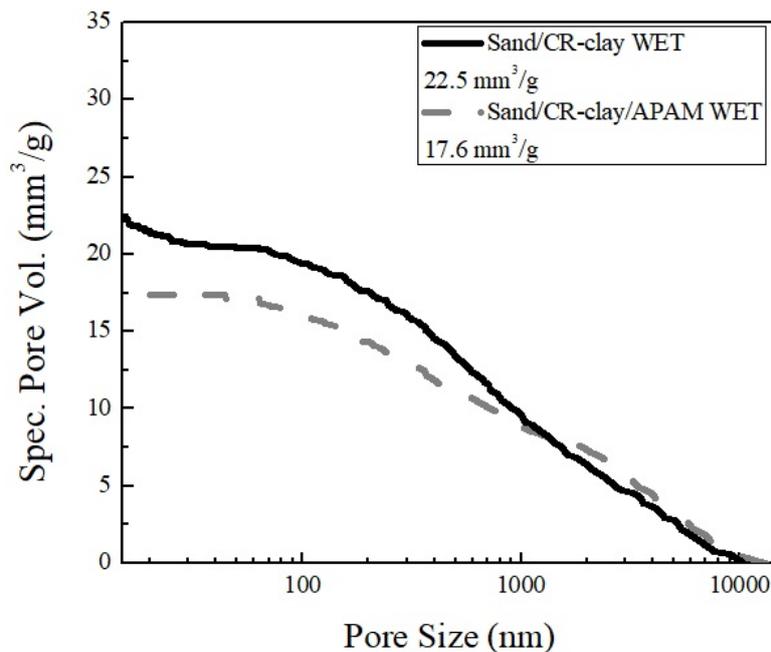


Fig. 4.59: Ensayo de porosimetría por instrucción de mercurio de las mezclas I y II. (Luz Marti, 2015).

Del anterior resultado se desprende que la microestructura del suelo depende de la concentración de APAM, es decir que el hidrogel de APAM altera levemente la distribución de poros en el suelo pero que dicha alteración o cambio no logra alterar la conductividad hidráulica de forma significativa como para poder ser medida con métodos convencionales.

En la sección 4.1.1 se buscó una explicación para los cambios en la curva de retención. Se menciona que la diferencia en el parámetro  $\lambda$  representa un cambio en la microestructura del suelo, esto es evidenciado en la figura 4.61. Con estos resultados se puede concluir que para las concentraciones de APAM estudiadas generan un cambio en la microestructura del suelo lo suficientemente relevante para ser observado en un ensayo de succión pero no lo suficientemente grande para ser medido en los ensayos de conductividad hidráulica.

### 4.1.3. Rigidez y resistencia

En las figuras 3.47, 3.48 y 3.49 se puede apreciar un considerable aumento de la rigidez para las mezclas con APAM hidratadas en la rama humedad mientras no se aprecian cambios significativos a simple vista en la rama seca.

En la tabla 4.16 se muestra el cambio en la rigidez medido a través del modulo de elasticidad  $E_{50}$  de las mezclas I a IV para las rama seca y rama húmeda.

Humedad	Mezcla I	Mezcla II	Mezcla III	Mezcla IV
RS	0 %	4 %	31 %	38 %
RH	0 %	16 %	125 %	179 %

Tabla 4.16: Cambios en el modulo de elasticidad  $E_{50}$  en función del contenido de APAM para la rama seca (RS) y rama húmeda (RH).

De estos resultados se puede concluir que el APAM aumenta la rigidez de las mezclas de arena-arcilla-APAM en humedades altas. Es interesante notar que la rigidez de la mezcla IV en la rama húmeda (RH) es similar a la rigidez de la mezcla I en la rama seca (RS). Esto puede explicarse debido a la hipótesis comentada anteriormente en la que se presume que un mayor contenido de humedad induce a una mayor activación del APAM en forma de hidrogel que se encuentra en la matriz porosa del material. Esto se aprecia en el leve incremento de rigidez que el APAM provoca sobre las muestras hidratadas en la rama seca (RS) (apenas un 15 %) pero en el importante aumento que provoca en las muestras hidratadas en la rama húmeda (RH) (casi un 200 %).

Resistencia:

Los ensayos de compresión no confinada (UCS) demostraron un aumento considerable de la resistencia en función de la concentración de APAM. En la tabla 4.17 se muestra el incremento en relación a cada humedad ensayada (RS), (RO) y (RH).

Humedad	Mezcla I	Mezcla II	Mezcla III	Mezcla IV
RS	0 %	85 %	113 %	166 %
RO	0 %	73 %	115 %	153 %
RH	0 %	18 %	92 %	213 %

Tabla 4.17: Incremento porcentual de UCS en función del contenido de APAM.

El considerable aumento de la resistencia al corte del material puede explicarse debido al aumento de la succión del material con la concentración de APAM ya mencionadas en la sección anterior.

Para un mejor análisis es importante recordar que en suelos no saturados la teoría de falla de Mohr-Cloulomb sigue siendo valida pero debe expresarse de la siguiente manera:

$$\tau = c + \sigma' . tg(\phi) + (\mu_a - \mu_w) . tg(\phi_b) \quad (4.21)$$

Donde:

- $\tau$  es la tensión tangencial en el plano de falla en el momento de la falla del material.
- $c$  es la cohesión efectiva del material.
- $\phi$  es el ángulo de fricción interna del material.

- $\phi_b$  es el ángulo de fricción interna del material relativo a la succión mátrica.
- $\sigma'$  es la tensión efectiva normal al plano de falla en el momento de la falla del material.
- $(\mu_a - \mu_w)$  es la succión mátrica medida a partir de la curva de retención (ver sección 3.5.1).

En la figura 4.60 se muestra la superficie descrita en la ecuación 4.21 de la teoría de falla de Mohr-Coulomb para suelos no saturados. En la misma se puede apreciar que en el plano de succión mátrica  $(\mu_a - \mu_w) = 0$  la superficie se convierte en la recta de falla de la teoría convencional de Mohr-Coulomb para suelos totalmente saturados.

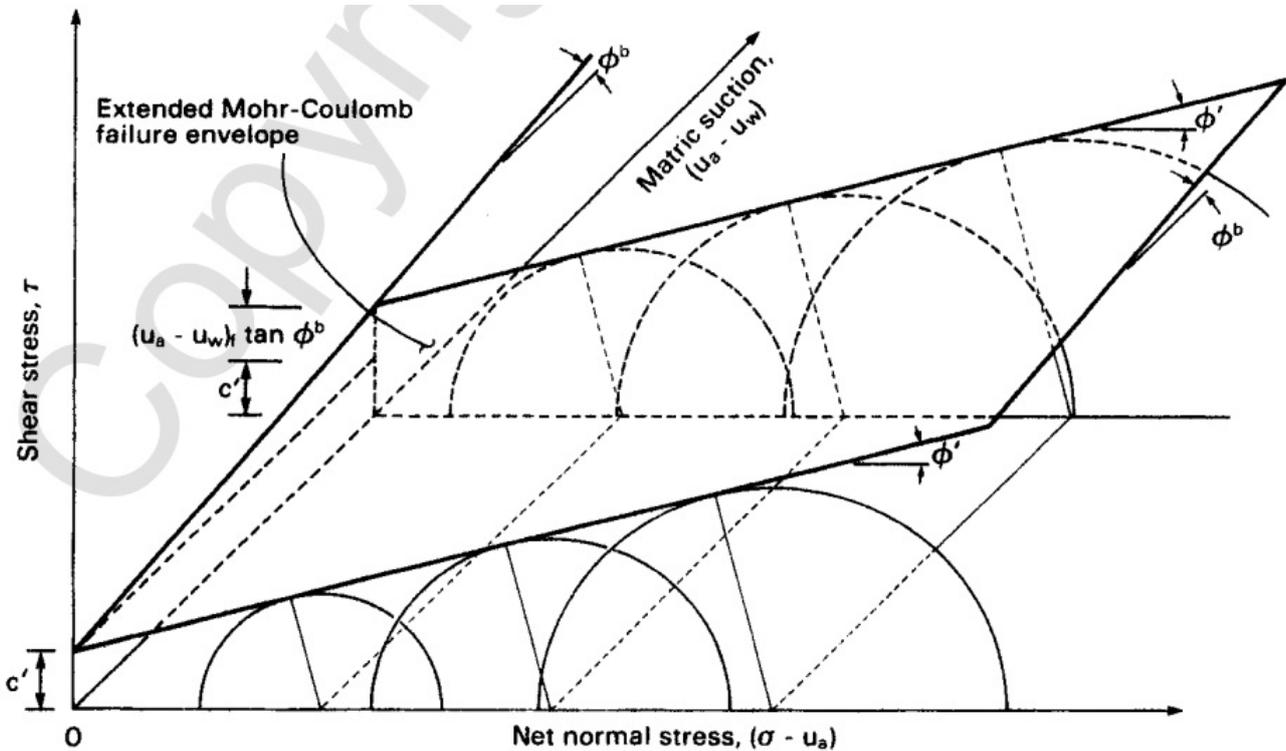


Fig. 4.60: Superficie de falla extendida de la teoría de Mohr-Coulomb para suelos no saturados (Fredlund, 1993).

En el caso particular de muestras premoldeadas como las analizadas en este trabajo se puede asumir que  $c=0$  y al ser analizadas mediante ensayos de compresión simple la tensión normal efectiva  $\sigma'_3$  también es nula.

Según Fredlund [69] el parámetro  $\phi_b$  a diferencia de  $\phi$  ha demostrado una variación muy leve entre suelos de distinta naturaleza por lo que es de esperar que el APAM no cambie sensiblemente dicho parámetro. Por otra parte se asume que  $\phi_b = \text{cte}$  es una simplificación válida para un rango bajo de succiones para suelos granulares. Esto deja de ser válido para succiones elevadas propias de suelos finos [72].

En la figura 4.61 se muestra un esquema de las condiciones de tensiones durante las diferentes etapas de la realización del ensayo de compresión simple (UCS). La etapa inicial describe las condiciones del suelo previo a la aplicación de la deformación axial. La etapa de compresión axial describe las condiciones durante la deformación del suelo previo a la falla del material. El estado de falla describe las condiciones del suelo durante la falla del material en donde se aplica la teoría de Mohr-Coulomb descrita anteriormente.

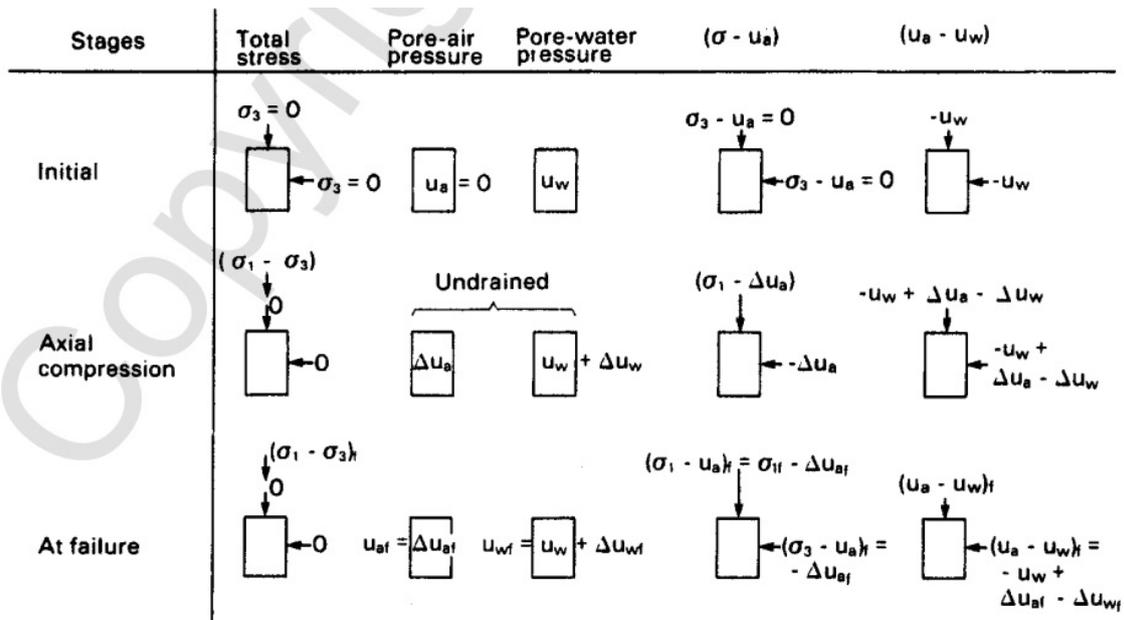


Fig. 4.61: Condiciones de tensiones durante las distintas etapas del ensayo de compresión simple (Fredlund, 1993).

En las figuras 3.49, 3.50 y 3.51 se puede observar que para las 3 humedades analizadas la mezcla I presenta un comportamiento de pico muy reducido en comparación con las demás mezclas mientras que las mezclas II, III y IV presentan un importante comportamiento de pico. El comportamiento de pico se expresa en una relevante diferencia entre las tensiones máximas resistidas por la muestra y la tensión residual luego de mucha deformación.

El comportamiento de pico se suele asociar a cambios volumétricos de las muestras. Un mayor comportamiento de pico se suele asociar a un comportamiento dilatante del material en el momento de la falla mientras que la ausencia del comportamiento de pico se suele asociar a un comportamiento contractivo del material al momento de la falla.

A falta de un relevante comportamiento de pico en la mezcla I se puede asumir que la misma posee un comportamiento contractivo al momento de la falla. Las mezclas II, III y IV poseen un fuerte comportamiento de pico que lleva a pensar que las mismas poseen un comportamiento dilatante al momento de la falla. En la figura 4.62 se muestra una posible trayectoria de tensiones durante la aplicación de la deformación axial.

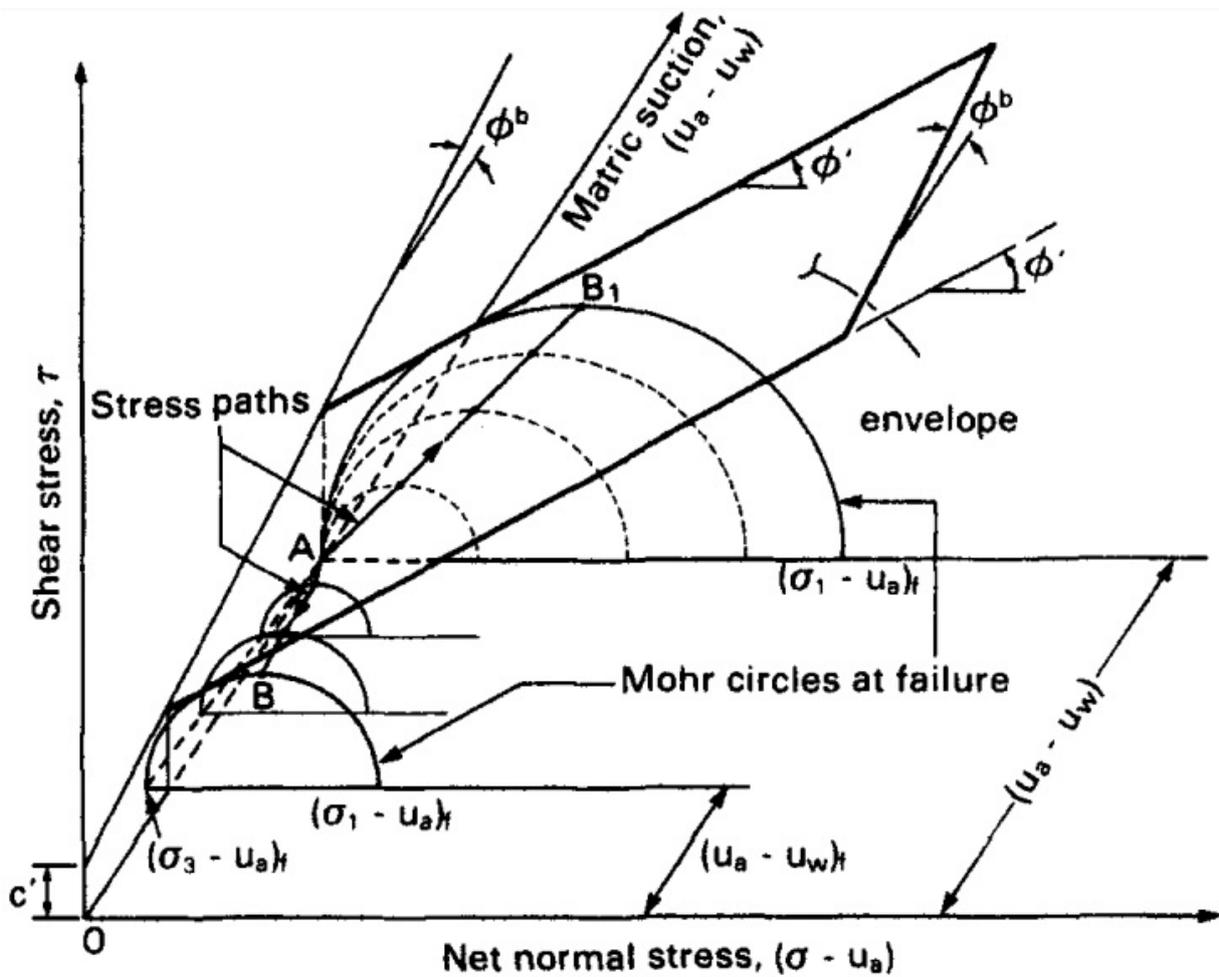


Fig. 4.62: Posibles trayectorias de tensiones durante la ejecución del ensayo de compresión simple (Fredlund, 1993).

En la posición A se muestra el círculo de Mohr correspondiente al estado tensional de una muestra a baja deformación donde mantiene una succión igual a la inicial, en la posición B1 se muestra el círculo de Mohr correspondiente a la falla del material asumiendo una succión constante durante la deformación y en la posición B se muestra el círculo de Mohr correspondiente a la falla del material cuando se asume que la succión disminuye por efecto contractiva de la muestra al momento de la falla. Para el caso de las muestras dilatante la posición final al momento de la falla correspondería a un círculo de Mohr con una mayor succión.

La hipótesis contractiva de la mezcla I se sustenta en el hecho de que las muestras son premoledadas y normalmente consolidadas, esto se comprueba experimentalmente mediante las curvas tensión-deformación en la figura 3.49. El efecto de la contracción volumétrica de la muestra genera una disminución de la succión y por consiguiente una disminución de la resistencia [69]. La hipótesis dilatante de las mezclas II, III, IV solo pueden estar relacionadas al efecto del APAM en dichas mezclas.

En la figura 4.58 las curvas de retención se puede apreciar que las ramas mas secas (RS) tienen un incremento menor de la succión en función de la concentración de APAM en comparación con las mezclas mas húmedas (RH). Es interesante resaltar que el valor de succión de entrada de aire  $S_{ae}$  es un valor de succión mátrica  $(\mu_a - \mu_w)$  con una humedad cercana a la rama seca (RS) analizada. Esto es coincidente con el incremento de la resistencia observada en los UCS expresada en la tabla 4.17 donde el incremento de la resistencia en función de la concentración de APAM se evidencia con mayor fuerza en la rama húmeda (RH) que en la rama (RS).

Esto podría pensarse al igual que en la sección anterior que contenidos altos de humedad inducen a una mayor activación del APAM en forma de hidrogel que se encuentra en la matriz porosa del material. Puede pensarse que el hidrogel promueve la formación de puentes entre las partículas de arena y arcilla [38]. Este puente puede apreciarse macro y microscópicamente en la figura 4.63.

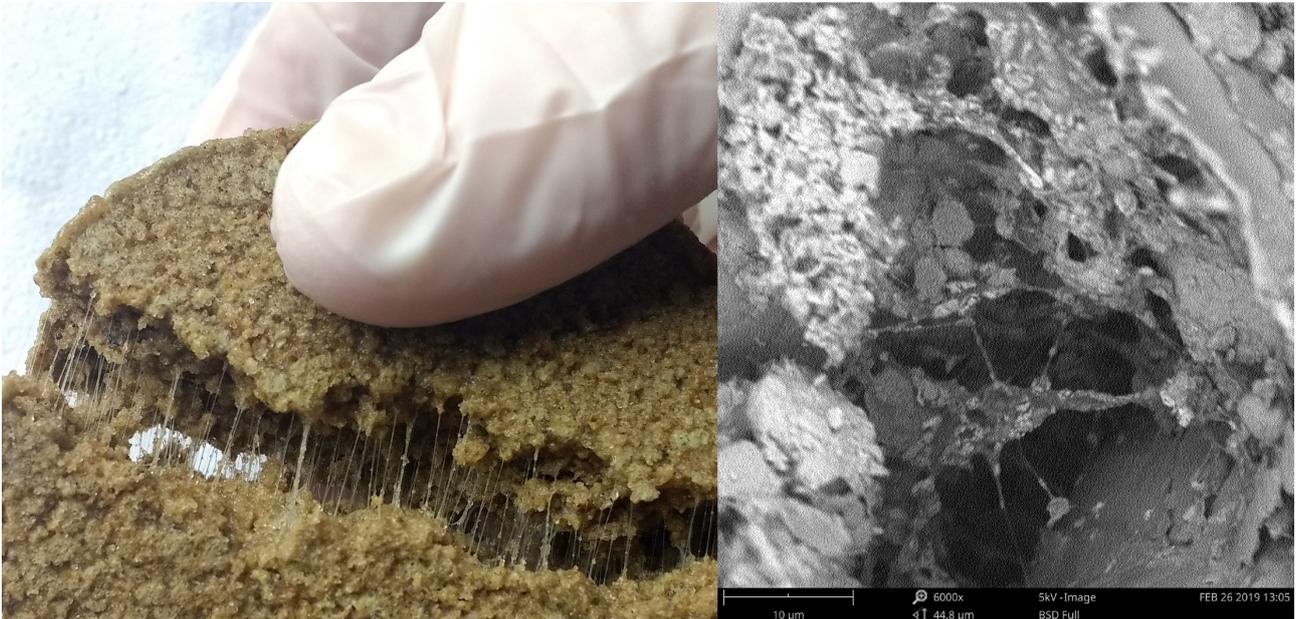


Fig. 4.63: Evidencias macro y microscópicas de puentes entre partículas formados por hidrogel de APAM.

## 4.2. Efectos del fluido permeante

El fluido permeante puede afectar al flujo en los medios porosos desde dos puntos de vistas: por un lado, por cambios en las propiedades físicas que afectan el flujo (por ejemplo, viscosidad y densidad) y por otro, debido al efecto de la interacción fluido-partícula ocasionado por las propiedades químicas del líquido.

Los mecanismos de interacción fluido-partícula están controlados principalmente por la formación de la doble capa difusa en torno a partículas de suelos finos. Este fenómeno está gobernado por la carga eléctrica neta de las partículas y la presencia de fluidos formados por moléculas polares.

El espesor de la doble capa difusa controla la magnitud de las fuerzas de repulsión entre partículas que es uno de los factores que determina la microestructura del suelo fino. La estructura resultante tiene amplia influencia en el valor de conductividad hidráulica de estos medios [69].

Los resultados experimentales presentados en la literatura muestran la variación de la conductividad hidráulica de los suelos ensayados al cambiar diferentes características de los fluidos, entre ellas, el pH, la concentración de sales, la valencia de los iones presentes, etc. En general, todos los autores atribuyen los cambios en el comportamiento del suelo a la modificación de los espesores de la doble capa difusa [31][73].

### 4.2.1. Límites de Atterberg

En la figura 4.64 se muestra como se ordenan los pares de valores LL-IP obtenidos para cada mezcla y para diferentes fluidos en la carta de plasticidad. En trazo azul se muestra una trayectoria tentativa del corrimiento que experimenta la mezcla de arcilla con agua destilada por la incorporación de APAM. En trazo verde se muestra una trayectoria tentativa del corrimiento que experimenta la mezcla por cambio en su fluido hidratante.

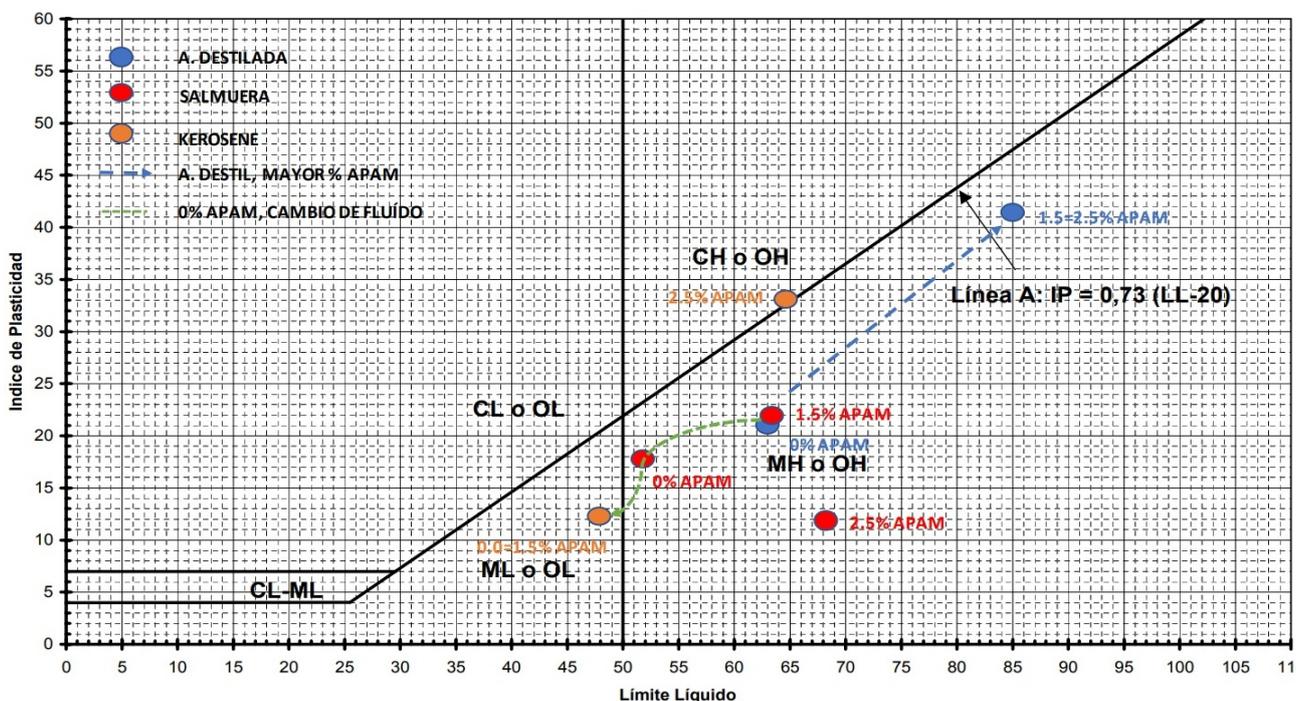


Fig. 4.64: Presentación de resultados de límites Atterberg con diferentes fluidos hidratantes.

En la figura 4.64 se puede apreciar una fuerte reducción de la interacción fluido-partícula con el cambio del fluido de agua desmineralizada a salmuera.

Este fenómeno puede explicarse debido al cambio en el espesor de la doble capa difusa que es un indicador de la interacción fluido-partícula que se reduce producto del intercambio iónico entre la partícula de arcilla y los iones  $Na^{+1}$ . Para demostrar la reducción de la capa difusa hace falta recordar la ecuación 4.22.

$$\varrho = \sqrt{\frac{\epsilon_0 R k' T}{2 F^2 c_0 Z^2}} \quad (4.22)$$

Donde:

- $\varrho$  es el espesor de la doble capa difusa
- $\epsilon_0$  es la permitividad del vacío 8.85
- $k'$  es la permitividad real relativa del fluido
- $R$  es la constante universal de los gases
- $T$  es la temperatura absoluta en grados Kelvin
- $c_0$  es la concentración de la solución en el campo lejano (sin el efecto de la presencia del campo eléctrico debido a las cargas de las partículas)

Es importante destacar que la ecuación 4.22 es sólo válida para especies iónicas con valencia unitaria tanto del anión como del catión, a este tipo de sales se las denomina 1:1 (e.g.  $Na^{+1}Cl^{-1}$ ). Observe que el espesor de la doble capa difusa varía en forma inversamente proporcional a la valencia del catión. Por lo tanto, manteniendo constante las demás variables, el espesor de la doble capa difusa disminuye con el aumento de la concentración de cationes  $Na^{+1}$  presentes en la salmuera.

Este fenómeno se puede explicar a través de la termodinámica química con el objeto de determinar el sentido de la reacción de intercambio utilizando el cambio en la energía libre de Gibbs  $\Delta G$ , el cuál se define de la siguiente forma [26].

$$\Delta G = \Delta h - T.\Delta S \quad (4.23)$$

En donde  $\Delta h$  es el cambio en la entalpía de la reacción y  $\Delta S$  es el cambio en la entropía del sistema. Por definición, un cambio total negativo en la energía libre implica que la reacción es espontánea, un cambio nulo indica que el sistema se encuentra en equilibrio y si el cambio resulta positivo, la reacción no será espontánea. Se debe notar que un cambio en la temperatura puede afectar la espontaneidad con que se produce la reacción. Para una reacción el cambio en la energía libre se puede calcular como.

$$\Delta G^0 = \Sigma G_{Productos}^0 - \Sigma G_{Reactivos}^0 \quad (4.24)$$

Donde  $G_0$  es la energía libre de Gibbs en condiciones normales (298 K y 101.3 kPa). De acuerdo a Faure [74] las energías libres estándares de los elementos intervinientes son:

- $G^0(Na_{Adsorbido}^{+1}) = -15958.5$  KJ/mol
- $G^0(Na_{Acuoso}^{+1}) = -261.9$  KJ/mol
- $G^0(\text{Partícula de arcilla}) = -1164.2$  KJ/mol

Por lo tanto  $\Delta G^0 = -14532,4$  KJ/mol. Esto implica que la reacción del intercambio iónico es espontanea cuando la superficie de arcilla entra en contacto con el ion  $Na^{+1}$  presente en la salmuera reduciendo la interacción fluido-partícula entre la salmuera y el mineral de arcilla.

En el caso del kerosene, al ser este un fluido no polar y no poseer ningún tipo de carga iónica se puede pensar que la interacción fluido-partícula es nula y que el kerosene actúa como un fluido inerte ante la superficie de arcilla. Incluso se considera que no se forma la doble capa difusa en este caso por ser un fluido orgánico no polar [73].

El cambio del valor del límite líquido determinado con cualquiera de los fluidos empleados respecto del valor con agua destilada se atribuye a la modificación de la doble capa difusa por cambio en la química del fluido. Sin embargo, no se pueden explicar con este efecto los diferentes

valores de límites líquidos obtenidos con las distintas concentraciones de APAM, ya que todos estos poseen una composición química similar.

#### 4.2.2. Resistencia

Los cambios en el comportamiento mecánico de las mezclas estudiadas con distintos fluidos de mezclado mostraron una gran importancia de la interacción fluido-partícula para las mezclas analizadas.

Se aprecia un aumento de la resistencia al corte cuando el fluido hidratante es salmuera y un abrupto decaimiento cuando el fluido es kerosene.

Los cambios en la resistencia al corte de las mezclas hidratadas con fluidos de distinta naturaleza se presentan en la tabla 4.18 y figura 4.65.

Mezcla	Fluido	Rama	$\omega_0$ (%)	$q_{m\acute{a}x}$ (kPa)
I	Agua Desmineralizada	Optima	13.11	8.1
I	Salmuera	Optima	13.23	12.5
I	Kerosene	-	-	0.00
IV	Agua Desmineralizada	Optima	13.23	20.5
IV	Salmuera	Optima	12.94	24.1
IV	Kerosene	-	-	0.00

Tabla 4.18: Resultados experimentales de resistencia a la compresión simple para las mezclas I y IV para diferentes fluidos.

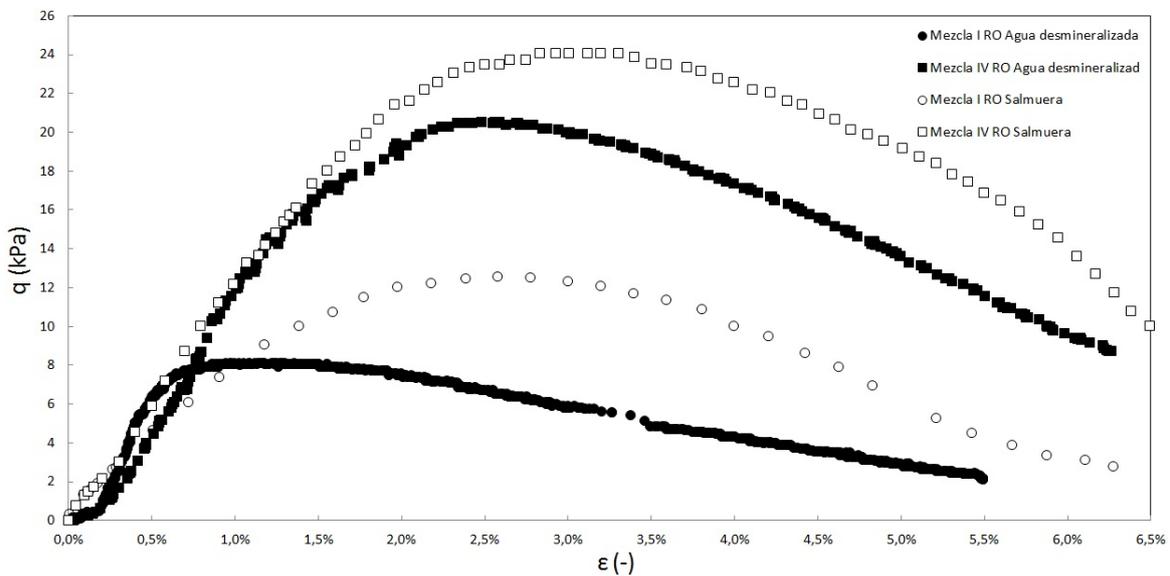


Fig. 4.65: Curvas tensión-deformación para las mezclas I y IV con agua desmineralizada y salmuera.

Los cambios evidenciados experimentalmente pueden ser explicados mediante dos fenómenos diferentes.

Primero la tendencia a la floculación de la estructura y la disminución del límite líquido con el cambio de los fluidos es consistente con la tendencia al aumento de la resistencia al corte no drenada de los suelos, ya que estructuras más floculadas presentan en general mayor resistencia al corte no drenada [75]. Esta explicación tiene sus limitaciones y contradicciones ya que en la sección 4.2.1 se evidencio un aumento del LL a la par de un aumento de la resistencia al corte

cuando se aumenta la concentración de APAM. Este efecto puede deberse a una interacción química o física.

Por otro lado se puede pensar que el aumento en la concentraciones de sales de NaCl presentes en la salmuera genera un importante aumento de la succión osmótica de las muestras [69] y por consiguiente un aumento de la resistencia al corte (sección 4.1.2). La succión osmótica  $\pi$  representa la parte de la succión dependiente de la concentración de sales presentes en el fluido.

$$\Psi = (\mu_a - \mu_w) + \pi \quad (4.25)$$

Donde:

- $\Psi$  es la succión total de la muestra.
- $\mu_a - \mu_w$  es la succión mátrica de la muestra. La succión mátrica es la parte de la succión medida con la curva de retención.
- $\pi$  es la succión osmótica de la muestra. La succión osmótica es la succión del suelo producida por el efecto de ósmosis en el fluido, el mismo según la bibliografía varía relativamente poco en función de la humedad del suelo [69].

#### 4.2.3. Conductividad hidráulica

Las conductividades hidráulicas, tanto saturadas como no saturadas de los suelos se ven fuertemente afectadas por el tipo y naturaleza de los fluidos que atraviesan su estructura poral así como la interacción que pueda llegar a existir entre las partículas de suelo y el fluido [73].

Mezcla	Fluido	k (m/seg)
I	Agua Desmineralizada	$7.9 \cdot 10^{-8}$
II	Agua Desmineralizada	$7.3 \cdot 10^{-8}$
I	Salmuera	$2.1 \cdot 10^{-6}$
II	Salmuera	$1.4 \cdot 10^{-6}$

Tabla 4.19: Resultados experimentales de conductividades hidráulicas saturadas para distintas concentraciones de APAM y fluidos permeantes.

Mezcla	Fluido	$k_w$ (m/seg)
I	Agua Desmineralizada	$6.1 \cdot 10^{-10}$ - $1.2 \cdot 10^{-8}$
I	Salmuera	$3.9 \cdot 10^{-7}$ - $4.0 \cdot 10^{-6}$
IV	Agua Desmineralizada	$1.4 \cdot 10^{-10}$ - $3.4 \cdot 10^{-9}$
IV	Salmuera	$8.9 \cdot 10^{-9}$ - $4.1 \cdot 10^{-8}$

Tabla 4.20: Resultados experimentales de conductividades hidráulicas no saturadas para distintas concentraciones de APAM y fluidos permeantes.

En las tablas 4.19 y 4.20 se puede apreciar un importante aumento (entre 2 y 3 ordenes de magnitud) de la conductividad hidráulica saturada y no saturada de las mezclas cuando el fluido permeante es salmuera en relación al valor medido con agua desmineralizada.

La explicación de este fenómeno es que se puede adjudicar la mayor conductividad hidráulica al cambio de estructura debido a la disminución del espesor de las dobles capas difusas con el aumento de la concentración iónica (sección 4.2.1), lo que genera mayor espacio poral disponible para el flujo.

Gleason [76], Petrov y Rowe [77], Stern y Shackelford [78], Jo [79], Lee y Shackelford [80] reportan aumentos entre 2 y 5 órdenes de magnitud en la permeabilidad de muestras de bentonitas sódicas y arenas mezcladas con diferentes porcentajes de bentonita, cuando se cambia el fluido permeante por soluciones monoiónicas con concentraciones entre 0.25M y 1M. Sin embargo, los cambios en la permeabilidad son menos drásticos cuando las bentonitas contienen menos porcentaje de montmorillonita sódica [80].

Otro fenómeno al que se puede atribuir el aumento de conductividad hidráulica es a la posibilidad de que la muestra de suelo se contraiga al disminuir el espesor de las dobles capas y aumentar las fuerzas de atracción entre partículas, generando cambios volumétricos que al estar la muestra en un permeámetro de pared rígida permite la aparición de fisuras que no se cierran cuando se reemplaza la solución iónica por agua destilada. Estas fisuras pueden ser pequeñas e incluso no detectables a simple vista, pero alcanzan a modificar el valor de conductividad hidráulica.

Por la definición de la conductividad hidráulica de los medios porosos y de la viscosidad relativa de los fluidos, el uso conjunto de estos dos conceptos resulta atractivo, ya que suponiendo que la permeabilidad intrínseca del medio poroso es una propiedad que caracteriza al mismo, se podría determinar la conductividad hidráulica de un suelo con cualquier fluido a partir de la conductividad hidráulica determinada con otro. Esto permitiría, por ejemplo, reducir los tiempos y cantidad de ensayos, ya que sólo bastaría hacer un solo ensayo de conductividad hidráulica para conocer la conductividad con otros fluidos, incluso podría elegir cuál es el fluido más conveniente para realizar el ensayo.

$$\frac{k_i * \mu_i}{\rho_i} = \frac{k_j * \mu_j}{\rho_j} \quad (4.26)$$

Donde:

- $k_i$  es la conductividad hidráulica saturada del suelo sometido a con gradiente hidráulico con un fluido i.

- $\mu_i$  es la viscosidad dinámica del fluido i.

- $\rho_i$  es la densidad del fluido i.

El problema de usar la ecuación anterior es que se debe garantizar que la permeabilidad intrínseca permanezca constante o lo que es lo mismo que el efecto de interacción fluido-partícula en la microestructura del suelo sea despreciable.

Por su parte Gleason [76], Schenning [81] y Muhammad [82] encontraron entre 1 y 4 órdenes de magnitud de diferencia entre los valores finales de permeabilidad de muestras prehidratadas con agua respecto de las prehidratadas con una solución polielectrolítica. Este aumento de permeabilidad se puede atribuir a la formación de una estructura más floculada cuando la muestra es prehidratada en presencia de abundantes iones, debido a los menores espesores de doble capa difusa.

Ante esto es importante recordar que en este trabajo las muestras de conductividad hidráulica saturada y no-saturada fueron prehidratadas y compactadas con agua desmineralizada previo a la aplicación de gradientes hidráulicos con fluidos de distinta naturaleza por lo que dicho fenómeno se considera despreciable en estos resultados.

Por cuestiones de seguridad e higiene no se lograron realizar de forma satisfactoria ensayos de conductividad hidráulica en muestras cuyo fluido permeante fuese el kerosene. Pero si se noto cualitativamente una permeabilidad considerablemente mayor que con el resto de los fluidos.

## 5. Aplicación tecnológica

La aplicación tecnológica del presente trabajo consiste en la evaluación del desempeño de la barrera hidráulica propuesta con las mezclas frente a la acción de una lluvia de diseño para el área de la ciudad de Buenos Aires.

Con el objeto de analizar el efecto de la distintas mezclas estudiadas experimentalmente en una capa de cobertura de un relleno sanitario diseñado bajo la normativas vigentes, se realizó una modelación numérica para evaluar la tasa de infiltración y la estabilidad mecánica. Para ellos se analizó la hidrogeología de la ciudad de BsAs y se determinó una lluvia de diseño. Luego con el programa Hydrus 1D se analizó la infiltración para las mezclas I a IV y para evaluar la estabilidad se analizó el factor de seguridad al deslizamiento.

En la figura 5.66 se muestra una cobertura superior de un relleno sanitario convencional (ver sección 2.1).

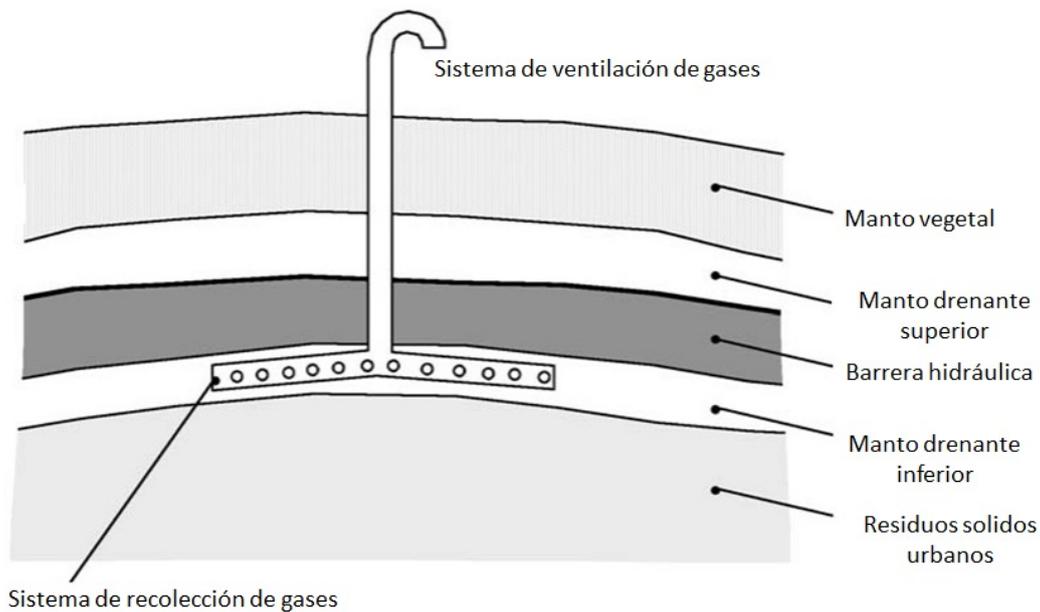


Fig. 5.66: Cobertura superior convencional de rellenos sanitarios de RSU (EPA, 2000).

Los rellenos sanitarios son depósitos expuestos a la intemperie y condiciones climatológicas. Humedad relativa, velocidades del viento, radiación solar o lluvias son algunas de las variables más importantes que generan cambios en la humedad del suelo. Las lluvias son el fenómeno más relevante para el estudio. Ante precipitaciones prolongadas en el tiempo la cobertura superior del relleno puede llegar a saturarse y comenzar a infiltrar el agua de lluvia hacia el interior del relleno sanitario, efecto perjudicial para el correcto funcionamiento del mismo.

## 5.1. Capas drenantes

Las capas drenantes se dividen en 2.

- Capa drenante superior: es una capa de suelo colocada por encima de la barrera hidráulica que posee como objetivo permitir la fácil escorrentía de agua de lluvia hacia los drenes laterales y evitar la aplicación de importantes gradientes hidráulicos sobre la barrera. Suelen estar compuestas por arenas limpias (con contenidos de finos menos al 5 %) y un espesor no menor de 30cm según la literatura [21][83]. La arena utilizada en este trabajo satisface los requerimientos de la capa drenante.

- Capa drenante inferior: es una capa de suelo colocada por debajo de la barrera hidráulica que posee como objetivo permitir la fácil evacuación de los gases producidos por la degradación dentro de los rellenos hacia colectores que los extraen de forma segura. Suelen estar compuestos de arenas limpias (con contenidos de finos menos al 5 %) y con un espesor no menor de 15cm [83]. La arena utilizada en este trabajo satisface los requerimientos de la capa drenante.

## 5.2. Manto vegetal

Una capa de suelo vegetal se usa para permitir el crecimiento de vegetación, favoreciendo la evapotranspiración y evitando la erosión. Esta capa generalmente está integrada a un proyecto más general para la naturalización del terreno y su rehabilitación junto con los terrenos aledaños existentes. Dependiendo del uso final de los rellenos durante su vida útil su espesor puede variar entre 15cm y 50cm [21][83].

## 5.3. Barrera hidráulica superior

La barrera hidráulica es el manto de la cobertura superior del relleno que busca evitar la infiltración de fluidos exteriores hacia el interior del relleno. La misma debe garantizar bajos valores de infiltración de agua de lluvia desde la superficie así como el escape de gases producidos en el mismo relleno.

Actualmente no existen metodologías de diseño para las barreras hidráulicas. En cambio existen recomendaciones de espesores mínimos del manto y valores de conductividad hidráulica máximas del material que compone dicho manto. Los espesores mínimos recomendados están relacionados a desviaciones de construcción y asentamientos mientras que la conductividad hidráulica busca una transmisibilidad mínima [21][83].

$$T = \frac{t}{k_w} \quad (5.27)$$

Donde:

- T es la transmisibilidad de la barrera (1/seg).
- t es el espesor de la barrera (m).
- $k_w$  es la conductividad hidráulica de la barrera.

Sin embargo esto busca ser una recomendación empírica que evita un análisis mas complejo de las situaciones a las que puede estar sometido el relleno en su vida útil. Sería incorrecto pensar que un relleno sanitario ubicado en una zona de intensas lluvias deba tener las mismas características que un relleno sanitario ubicado en una zona árida.

### 5.3.1. Análisis hidrológico

Para el estudio de las condiciones meteorológicas a las cuales se vera sometido el relleno sanitario se considero una zona preferencial de la república Argentina. El AMBA ó área metropolitana de Buenos Aires abarca al 40 % de la población de la república y posee uno de los servicios de deposición de los RSU más desarrollados y grande del país.

El estudio hidrológico busca determinar una duración de una lluvia de diseño a la cual estará sometido el relleno durante su vida útil.

La lluvia de diseño es una lluvia teórica cuyo período de ocurrencia es la vida útil del relleno, la vida útil convencional de los rellenos sanitarios es de 40 años. Para ello se recurrió a las series históricas del servicio meteorológico nacional (SMN) medidos en el AMBA entre los años 1961 y 2013.

En base a las series históricas de precipitaciones de calculan las curvas IDF, curvas que relacionan la Intensidad de una lluvia, la Duración asociada a una lluvia y la Frecuencia de ocurrencia de una lluvia. En la figura 5.67 se muestran los datos obtenidos del SMN argentino.

	10 min	15 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	90 min	120 min	180 min	240 min	360 min	720 min	1440 min
2 años	96,58	79,66	70,39	54,54	48,99	42,75	37,40	27,55	21,90	17,61	14,25	10,01	5,48	3,28
5 años	128,30	106,40	94,78	74,62	66,32	57,90	51,31	39,24	31,32	24,83	19,89	13,57	7,79	4,40
10 años	149,31	124,11	110,92	87,92	77,79	67,92	60,52	46,98	37,55	29,61	23,61	15,92	9,33	5,15
20 años	169,45	141,09	126,41	100,67	88,80	77,54	69,36	54,41	43,54	34,20	27,19	18,18	10,79	5,87
50 años	195,53	163,08	146,46	117,18	103,04	89,99	80,79	64,02	51,28	40,14	31,82	21,10	12,70	6,79
100 años	215,07	179,55	161,49	129,55	113,71	99,32	89,37	71,22	57,08	44,58	35,29	23,29	14,12	7,49

Fig. 5.67: Datos obtenidos del SMN.

A partir de las series históricas se ajusta la curva teórica de una curva IDF para un período de ocurrencia de 50 años según la ecuación 5.28.

$$I = \frac{c}{t_d^e + f} \quad (5.28)$$

Donde:

- $t_d$  es el tiempo de duración de la lluvia de diseño medida en minutos.
- $I$  es la intensidad de la lluvia medida en mm/h.
- $e$ ,  $c$  y  $f$  son los parámetros del ajuste numérico.

Para realizar el ajuste se tomaron los valores de intensidades y duraciones asociados a un período de ocurrencia de 50 años y se ajusto la curva teórica a dichos valores. En la figura 5.69 se muestran los resultados obtenidos.

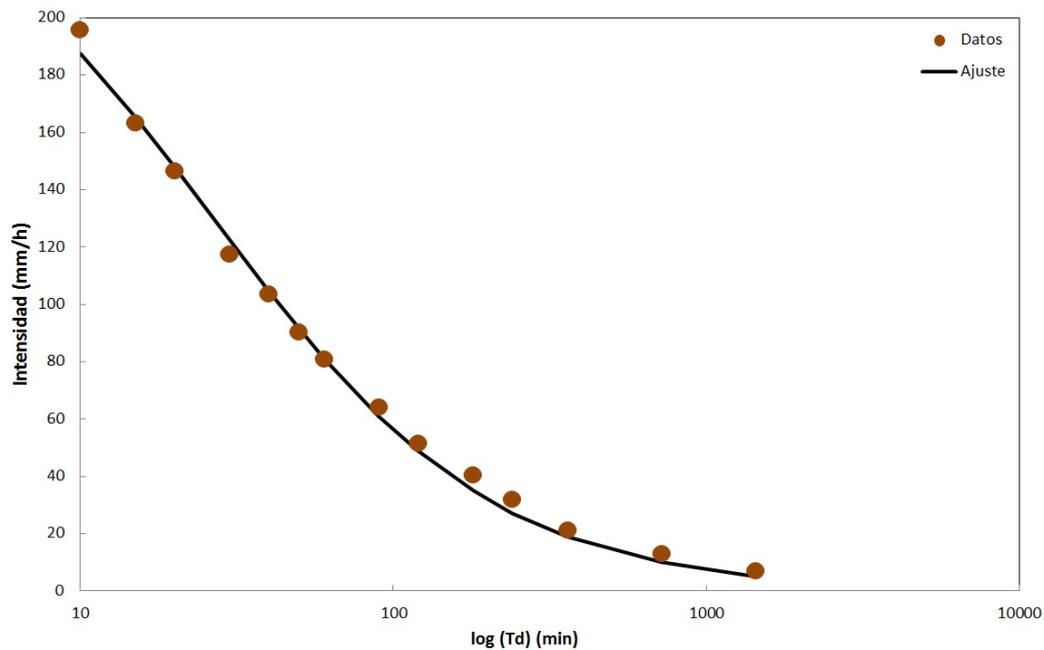


Fig. 5.68: Ajuste de la curva IDF para el período de ocurrencia de 50 años.

Los parámetros característicos del ajuste de la curva IDF fueron  $c=6558$ ,  $e=0.98$ ,  $f=25.44$ .

A partir de la función IDF se obtuvo una duración para la lluvia de diseño igual a 120 horas o 5 días. La intensidad considerada para el análisis fue de 1mm/hrs ya que intensidades menores son consideradas lloviznas de poco interés.

La duración de la lluvia de 120hrs será la condición dimensionante para el análisis la barrera hidráulica.

### 5.3.2. Análisis de infiltración

Mediante el análisis de infiltración se busca estudiar el proceso de saturación del suelo. Gracias a la pendiente de la cobertura del relleno y a la capa drenante el agua de lluvia natural escurre a gravedad hacia drenes cuyo objetivo es la recolección de dicha agua, aun así la barrera hidráulica se ve sometida a un gradiente hidráulico relativamente pequeño pero constante durante toda la lluvia.

Las recomendaciones estipulan valores de espesores de la barrera hidráulica no menores de 50cm por seguridad, dispersiones constructivas y asentamientos diferenciales [21][83].

Complementariamente en este análisis se comprobó que el grado de saturación del suelo en la parte inferior de la barrera nunca llegue a un nivel de saturación superior al de la rama húmeda (RH)  $S_{rRH} = 76\%$  analizada en el trabajo experimental ya que no se poseen datos de su comportamiento por fuera de esta. Estar cercano a la saturación implica estar cercano al comienzo de la percolación de agua de lluvia hacia el interior del relleno.

### 5.3.3. Hydrus 1D

Para la modelación de la infiltración se utilizó un programa libre llamado Hydrus 1D desarrollado por la agencia de protección medioambiental (EPA). Dicho programa utiliza distintos modelos de la curva de retención para modelar la saturación de los suelos bajo distintas condiciones. En este trabajo se utilizó el modelo constitutivo de Van Genuchten-Mualem para el ajuste con los parámetros determinados a partir de los datos experimentales de este trabajo.

Los parámetros de entrada del modelo son:

- $K_s = k_w$  conductividad hidráulica saturada.
- $n$  y  $\alpha$  parámetros del ajuste de la curva de retención de Van Genuchten-Mualem.
- $\theta_r = 0.0885\%$  es la humedad volumétrica residual.
- $\theta_s = 39.28\%$  es la humedad volumétrica de saturación.

Las condiciones de borde del problema se establecieron en un drenaje libre por la cara inferior de la barrera hidráulica en simulación del dren inferior de la barrera y en una humedad superior igual a la saturación en simulación de la escorrentía superficial. La humedad inicial del modelo se estableció en la humedad óptima de compactación.

En la figura 5.70 se muestran los resultados del análisis del programa. Se muestran curvas para distintos tiempos donde se gráfica la humedad volumétrica (Theta) del suelo en función de la profundidad de la barrera (Depth). Los tiempos analizados son: 1, 6, 12, 18, 24, 36, 48, 72, 96, 120hrs.

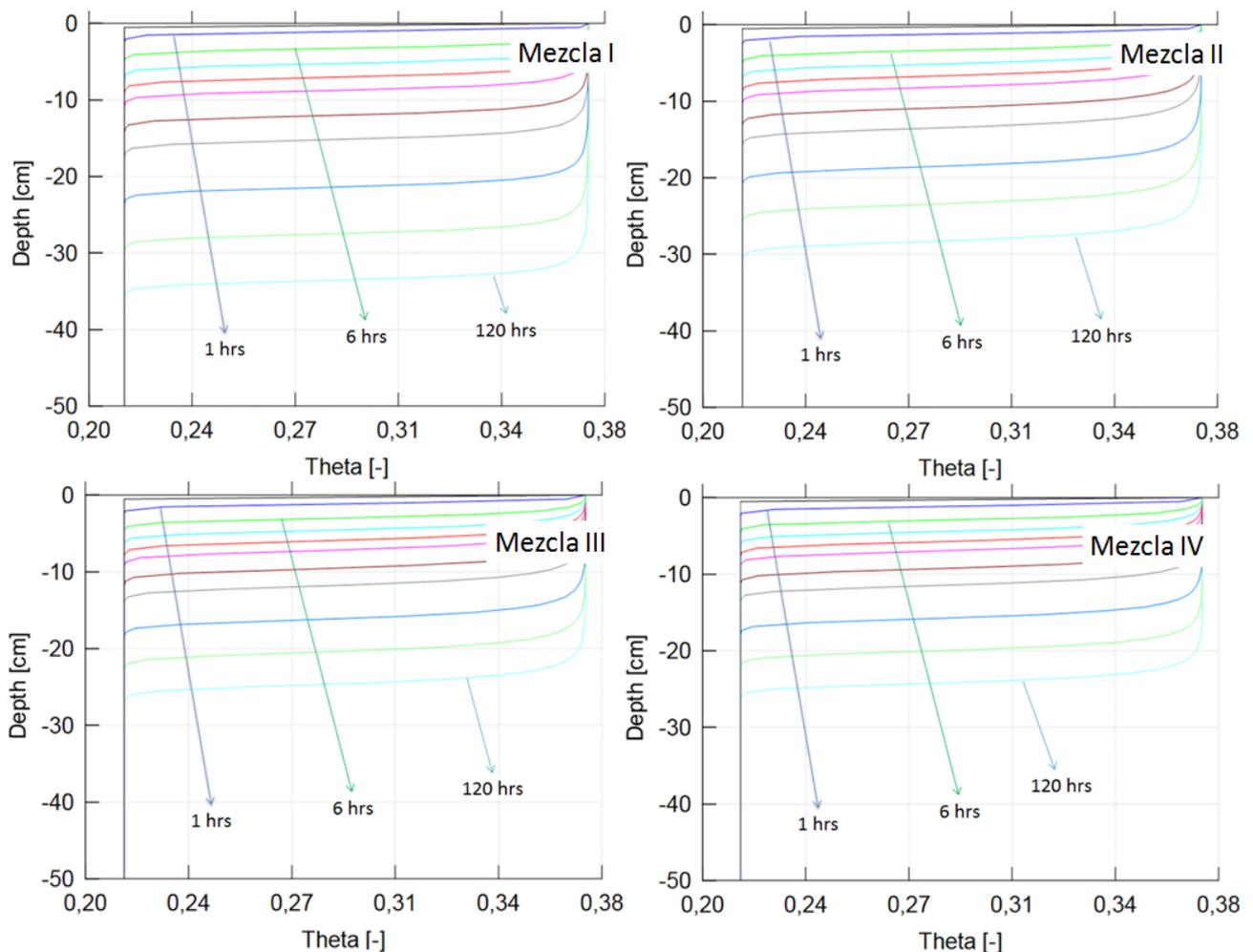


Fig. 5.69: Resultados del análisis para las mezcla I a IV. En abscisas se aprecia la profundidad de la barrera y en coordenadas se aprecia la humedad volumétrica para distintos tiempos de análisis.

Estos resultados demuestran que para las condiciones establecidas de humedad inicial, escorrentía superficial superior y drenaje libre inferior las barreras no llegan a superar la humedad de la rama húmeda (RH).

Las infiltraciones calculadas con los modelos del Hydrus 1D se muestran en la figura 5.70 y se resumen en la tabla 5.21.

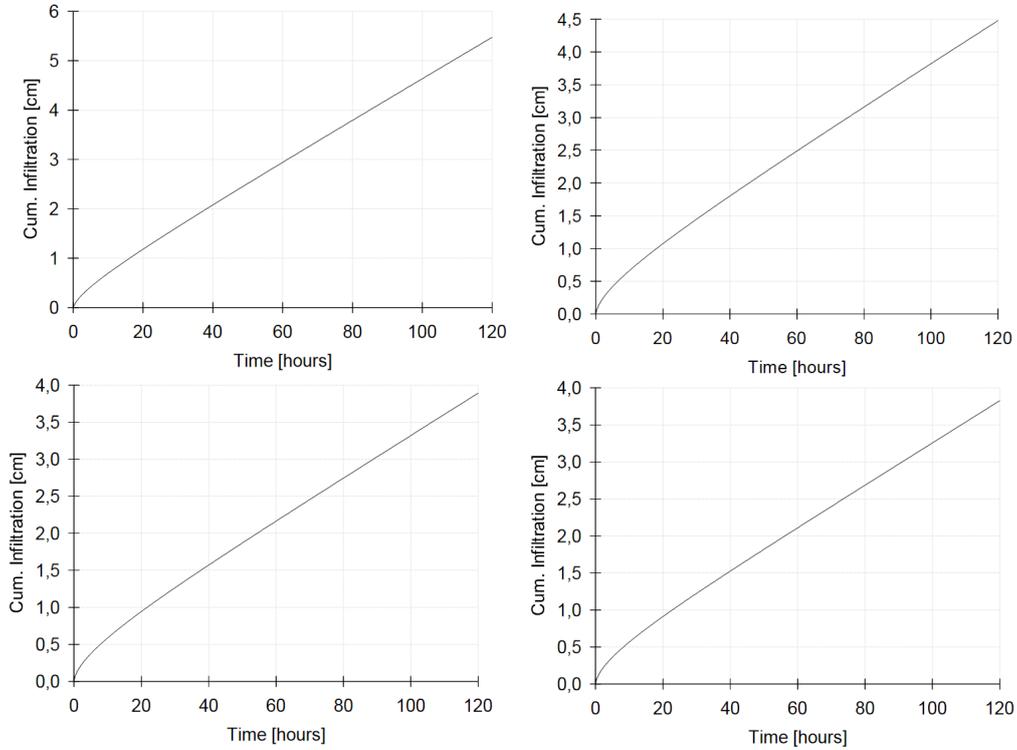


Fig. 5.70: Resultados de infiltración para las distintas mezclas. En abscisas se aprecia la profundidad de la barrera y en coordenadas se aprecia la humedad volumétrica para distintos tiempos de análisis.

Mezcla / tiempo (hrs)	1	6	12	24	48	72	120
I	0.07	0.50	0.57	1.39	2.42	3.38	5.41
II	0.07	0.49	0.55	1.21	2.02	2.86	4.49
III	0.07	0.47	0.54	1.08	1.67	2.53	3.93
IV	0.07	0.47	0.53	1.05	1.44	2.48	3.74

Tabla 5.21: Resultados de infiltración ( $cm^3/cm^2$ ) para distintos tiempos de duración de lluvia.

El modelo de Hydrus 1D permite obtener el resultado de conductividades hidráulicas no saturadas en base a las curvas de retención de cada mezcla estudiada. Estos resultados ayudan a entender el proceso de saturación del suelo. En la figura 5.71 se muestran las conductividades hidráulicas K de las mezclas I y IV en función de la humedad volumétrica Theta.

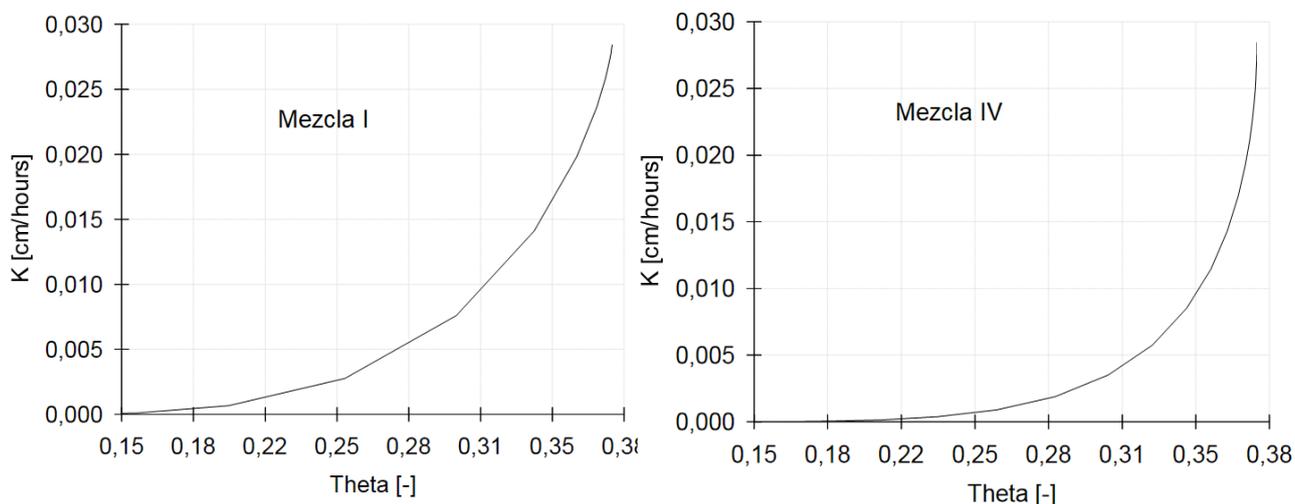


Fig. 5.71: Conductividades hidráulicas K en función de la humedad volumétrica para las mezcla I y IV.

En la figura 5.71 se aprecia un leve cambio en la relación k-Theta de la mezcla IV en comparación con la mezcla I, esto refleja los cambios medidos en la curva de retención. En la figura 5.74 se aprecia un leve cambio en la conductividad hidráulica no saturada de la mezcla I en comparación con la mezcla IV. Este cambio no pudo ser apreciado experimentalmente debido a la dispersión de los ensayos.

#### 5.3.4. Estabilidad de taludes

Los taludes de los rellenos generan pendientes adecuadas para minimizar la infiltración y dirigir la escorrentía superficial hacia colectores perimetrales del relleno.

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 5.72.

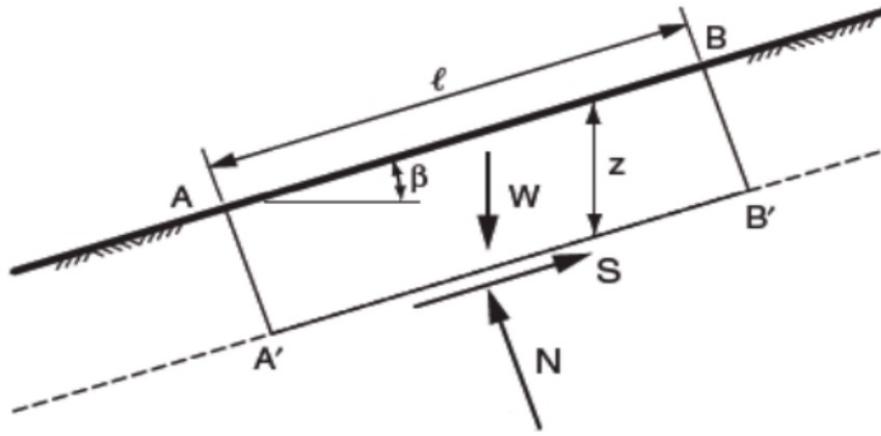


Fig. 5.72: Análisis de un Talud infinito.

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

$$FS = \frac{c + (\gamma \cdot Z \cdot \cos^2(\beta) - \tan(\phi)) \cdot \tan(\beta)}{\gamma \cdot Z \cdot \cos(\beta) \sin(\beta)} \quad (5.29)$$

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:

$$FS = \frac{Su}{\gamma \cdot Z \cdot \cos(\beta) \sin(\beta)} \quad (5.30)$$

Donde  $Su$  es la resistencia al corte no drenada del suelo calculada como:

$$Su = \frac{q_u}{2} \quad (5.31)$$

A continuación se calcula el coeficientes de seguridad frente al deslizamiento para cada mezcla y espesor adoptado en la sección anterior. En la tabla 5.22 se resumen los resultados obtenidos del coeficientes 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  $FS_{\text{mín}}=1.50$ .

Mezcla	Su (kPa)	espesor t (cm)	FS al deslizamiento (-)	$\beta$
I	3.3	50	1.5	$7^\circ$
II	3.9	50	1.5	$17^\circ$
III	6.3	50	1.5	$30^\circ$
IV	10.2	50	2.2	$30^\circ$

Tabla 5.22: Espesores, factores de seguridad y ángulo de inclinación de las barreras hidráulicas propuestas según cada mezcla analizada.

Se considero que la condición no drenada del material será el mas desfavorable y se realizo el calculo con la humedad correspondiente a la rama húmeda (RH).

Se obtuvieron a partir del desarrollo de todo el trabajo un paquete estructural de la cobertura superior de un relleno sanitario detallados en la tabla 5.23 y esquematizadas en la figura 5.73.

Mezcla	I	II	III	IV
Manto vegetal (cm)	20	20	20	20
Capa drenante superior (cm)	30	30	30	30
Barrera hidráulica necesaria (cm)	35.6	30.3	28.1	25.8
Barrera hidráulica recomendada (cm)	50	50	50	50
Infiltración ( $cm^3/cm^2$ )	5.41	4.49	3.93	3.74
Capa drenante inferior (cm)	15	15	15	15
Ángulo de inclinación $\beta$	19°	25°	30°	30°

Tabla 5.23: Detalle de coberturas superiores de rellenos sanitarios dimensionados con las distintas mezclas estudiadas.

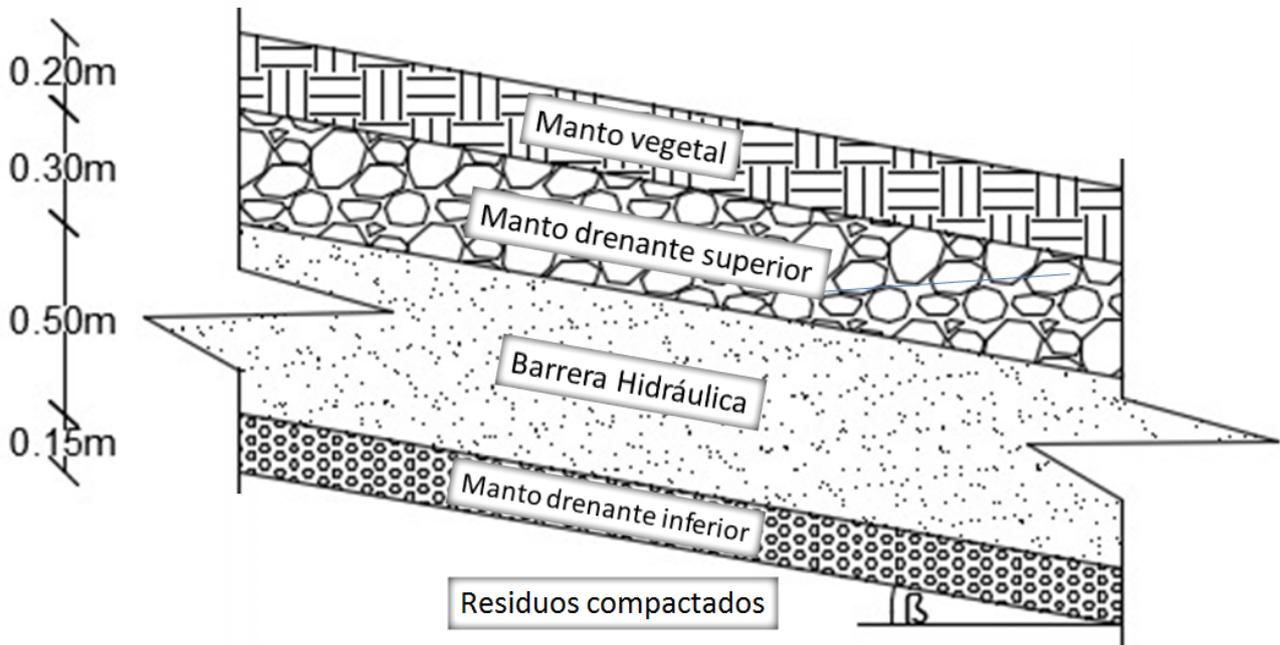


Fig. 5.73: Detalle de coberturas superiores de rellenos sanitarios dimensionados con las distintas mezclas estudiadas.

## 6. Conclusiones

El presente trabajo que buscó el estudio de una alternativa para barreras hidráulicas de coberturas de rellenos sanitarios se dividió en dos partes. La primera parte consistió en una batería de ensayos y análisis experimentales que buscó estudiar la aptitud de los materiales. La segunda parte buscó el uso de los resultados del programa experimental para una modelación numérica que se utilizó para el cálculo de infiltraciones mediante un programa de uso libre llamado Hydrus 1D. Se observó una interesante aptitud de las mezclas de arena-arcilla-APAM para su uso en barreras hidráulicas. La interacción fluido-partícula estudiadas a través de los distintos fluidos demostró una gran relevancia en el comportamiento de las mezclas estudiadas.

Se observa que a partir del diseño de las barreras hidráulicas con las distintas mezclas analizadas estas se presentan como una alternativa confiable para su uso.

- Se observa que las barreras hidráulicas diseñadas según la literatura de 50cm [21][83] resulta ser conservadora desde el punto de vista técnico. Las mezclas arena-arcilla-APAM muestran una necesidad de espesores considerablemente menores.

- Se destaca una reducción en los valores de infiltración para mezclas con mayor contenido de APAM, destacándose por sobre el resto el cambio entre las mezclas I y II.

- El análisis de la estabilidad de los taludes de la cobertura refleja un importante ahorro de dinero en las pendientes de los rellenos gracias al incremento de la resistencia a la compresión simple, destacándose por sobre el resto el cambio en la mezcla III. La mezcla IV presenta una mejora de la resistencia al corte pero su talud se ve limitado por métodos constructivos y de uso por lo que su mejora no resulta de utilidad práctica.

- Los valores de hinchamientos obtenidos para las mezclas de arena-arcilla-APAM resultan ser relativamente bajos para su uso y no representan una dificultad para el uso en barreras hidráulicas de rellenos sanitarios.

- La modelación del material en una condición no saturada demostró tener una aplicación práctica a largo plazo. El estudio hidrológico y en análisis de infiltraciones mostraron que incluso para una lluvia de diseño conservadora la barrera hidráulica de la cobertura superior no llega a la saturación en agua.

- Los ensayos realizados con salmuera mostraron una importante mejora en el comportamiento mecánico de las mezclas y una reducción de su aptitud hidráulica. Los ensayos realizados con kerosene mostraron un comportamiento drásticamente distinto en comparación con agua desmineralizada. Se concluye que el estudio de los fluidos con los cuales esta en contacto el suelo tiene una relevancia considerable y debe ser analizado correctamente.

## 6.1. Trabajos futuros

- Este trabajo tuvo por objetivo el estudio de la incorporación de APAM a una mezcla previamente definida de arena-arcilla bajo el criterio de la maximización de la densidad, sin embargo mezclas de diferentes relaciones de arena-arcilla podrían tener mejores propiedades hidromecánicas aun a costa de una peor compactación.

- Un estudio del lavado del APAM ante la saturación o el flujo de fluidos puede ser determinante para las características de las mezclas a largo plazo. En este trabajo no se estudiaron efectos del APAM a largo plazo. Este fenómeno puede llegar a ser estudiado mediante ensayos cíclicos de humedecimiento y secado.

- Un estudio detallado del efecto de saturación de la cobertura superior debido a flujos y presiones de gases producidos en el relleno sanitario.

- La caracterización mecánica de las mezclas en este trabajo fue puramente no-saturada y en condición no-confinada. Un estudio del comportamiento mecánico en condición de saturación ayudaría a una mejor comprensión de la influencia del APAM a las mezclas de arena-arcilla y daría aplicaciones extras a la expuesta en este trabajo.

- El estudio de la interacción entre el APAM y ciertos productos de los rellenos sanitarios puede ser determinante para su uso. Productos de la degradación dentro del relleno, como el butano o el propano gaseoso o incluso vapores ácidos pueden llegar a generar efectos imprevistos sobre la barrera hidráulica.

- Para una mejor confiabilidad se debería recurrir a un análisis continuo del análisis hidrológico de forma tal de poder garantizar de una forma mas confiable los valores de infiltración a lo largo de la vida útil del relleno sanitario.

- El desarrollo de este trabajo tuvo por objetivo el estudio de la microestructura del suelo en función de la cantidad de APAM, no tuvo por objetivo el estudio de de la microestructura de las mezclas en función de la forma o energía de compactación, la humedad o la densidad inicial. Para esto se ensayaron mezclas bajo las mismas condiciones iniciales ( $\gamma_d, \omega_{inicial}$ ). Una posible alternativa al presente trabajo seria el estudio del comportamientos hidromecánicos de las mezclas estudiadas frente a diferentes compactaciones.

## 7. Anexos

### 7.1. Publicaciones en congresos nacionales e internacionales



#### *Caracterización física y mecánica de mezclas de arena-arcilla modificadas con poliacrilamida aniónica (APAM)*

Casagrande C. y Codevilla M.

*ccasagrande@fi.uba.ar; mcodevilla@fi.uba.ar*  
Universidad de Buenos Aires – Facultad de Ingeniería

Manzanal D.

*diego.manzanal@gmail.com*  
Universidad de Buenos Aires – Facultad de Ingeniería  
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia (UNPSJB), Argentina.  
Instituto de Tecnología y Ciencias de la Ingeniería INTECIN-UBA-CONICET

**RESUMEN:** La adición de polímeros en suelos naturales con propósitos geotécnico-ambientales se presenta en la actualidad como un campo de acción en pleno desarrollo. En este trabajo, se investiga la incidencia de diferentes cantidades de poliacrilamida aniónica (APAM) incorporadas sobre una mezcla natural de materiales finos y gruesos previamente establecida. Sobre una mezcla óptima de arena-arcilla se realiza diferentes adiciones de APAM para evaluar las propiedades de retención de agua a través de la técnica de papel de filtro. Se analizó la estabilidad volumétrica de las muestras en edómetro a través de ensayos de expansión libre y compresibilidad. La resistencia mecánica de las muestras se analizó con probetas de compresión simple. Se efectúa una comparativa de resultados con el objeto de seleccionar una cantidad óptima de polímero incorporado para uso de las mezclas como barrera natural de cobertura de vertederos.

**Palabras clave:** POLIACRILAMIDA ANIÓNICA – CURVA DE RETENCIÓN – EXPANSIÓN LIBRE

**ABSTRACT:** Polymer addition on natural soils is presented as full development technique on geoenvironmental field. The purpose of this study is to examine the addition of an anionic polyacrilamide polymer (APAM) on sand-clay mixtures previously established. Different APAM amounts were added to sand-clay mixtures to evaluate changes on the behavior on soil-water-retention curve, free swelling and unconfined compression test. All results were compared in order to select an optimal APAM addition to apply on hydraulic barriers.

**Key words:** POLYACRILAMIDE – WATER RETENTION CURVE – FREE SWELLING

Fig. 7.74: Publicación en el XXIV congreso argentino de mecánica de suelos. Salta, Argentina. Octubre 2018.



# Polymer enhanced clay-sand mixture

Mauro CODEVILLA<sup>1,a,d</sup>, Camilo CASAGRANDE<sup>a</sup>, Gastón FERNÁNDEZ<sup>a</sup>, Teresa M. PIQUÉ<sup>a,b</sup>, Diego MANZANAL<sup>a,c,d</sup>

<sup>a</sup> *Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires (UBA), Argentina.*

<sup>b</sup> *Inst. de Tecnología en Polímeros y Nanotecnología ITPN -UBA-CONICET, Arg.*

<sup>c</sup> *ETSCCyP, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), España.*

<sup>d</sup> *Inst. de Tecnología y Ciencias de la Ingeniería INTECIN-UBA-CONICET, Argentina.*

**Abstract.** Using polymers to modify the properties of soils is an area of interest for designing landfills. Landfill closures requires conditions of long-term mechanical and hydraulic stability. This work studies the micro and macroscopic interaction of a fine soil (CRclay), a uniform sand (Sand) and an anionic polyacrylamide (APAM). APAM is a superabsorbent polymer that swells by two orders of magnitude when immersed in water. This paper emphasizes on understanding the interaction between different mixtures of APAM, Clay and Sand analyzing the physical properties, soil-water retention, microstructure by means of Mercury Intrusion Porosimetry (MIP), and volumetric and mechanical behaviour. Results shows an increase on swelling potential and swelling pressure for different Sand-CRclay-APAM mixtures. APAM reduce the microporosity and increase the water retention capacity of the mixtures. For the mechanical behavior, mixtures with APAM present higher unconfined compressive strength and more ductile behavior than mixtures without it (Sand-CRclay). The low hydraulic conductivity of the mixtures with APAM make it viable for its use as part of landfill cover installations.

**Keywords.** Landfill cover, polyacrylamide, sand-clay mixtures, microstructure, mechanical behavior, hydraulic conductivity.

Fig. 7.76: Publicación en el XVI congreso Panamericano de mecánica de suelos. Cancún, México. Noviembre 2019.

## 7.2. Imágenes



Fig. 7.77: Lugar de extracción de la arcilla. Ciudad de Comodoro Rivadavia, Argentina.



Fig. 7.78: Mezcla de arcilla-APAM luego del hinchamiento libre.



Fig. 7.79: Fallido intento de ensayo de conductividad hidráulica con kerosene.



Fig. 7.80: Fallido intento de ensayo de conductividad hidráulica con kerosene.

### 7.3. Resultados

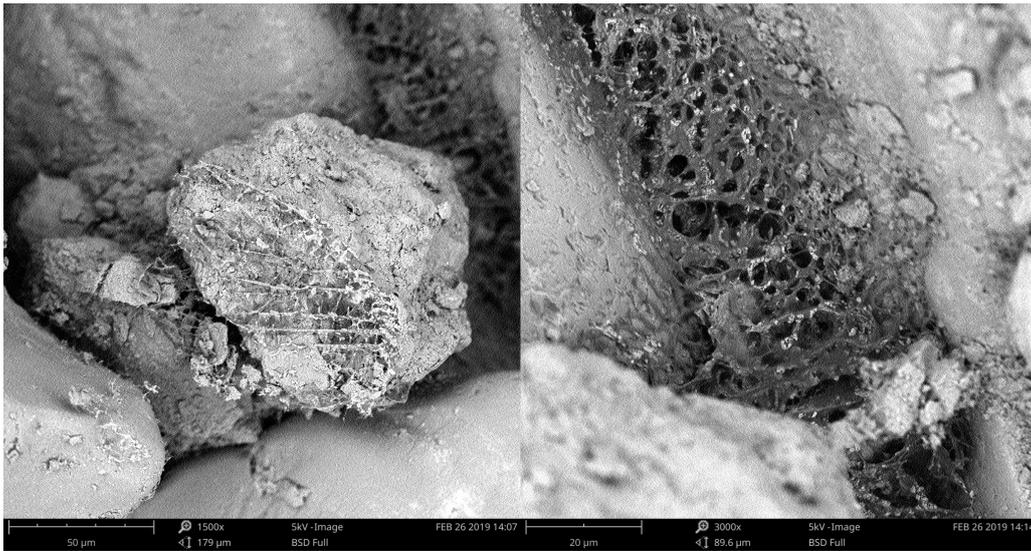


Fig. 7.81: Imágenes extraídas del microscopio electrónico de barrido (SEM).

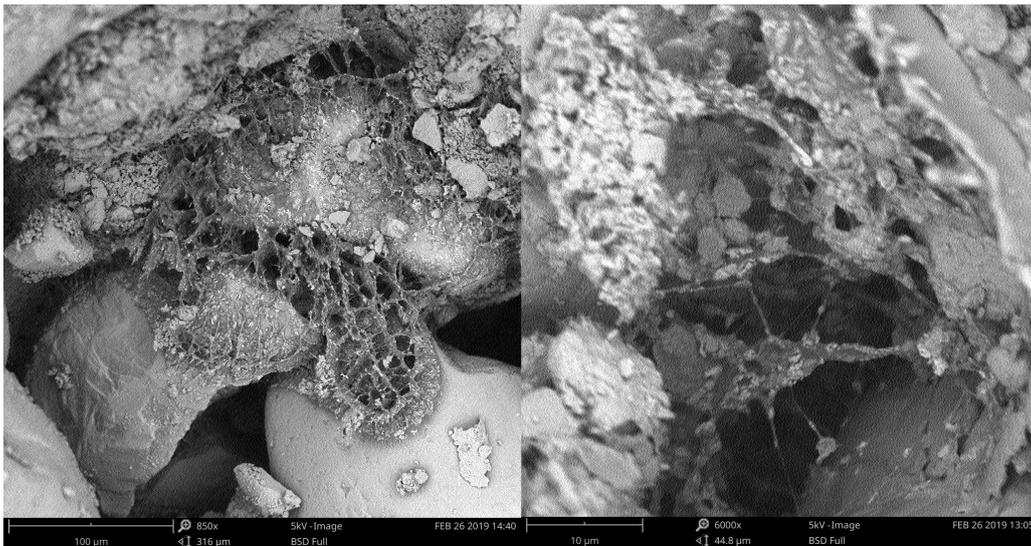


Fig. 7.82: Muestras donde se aprecia la estructura porosa propia de los suelos.

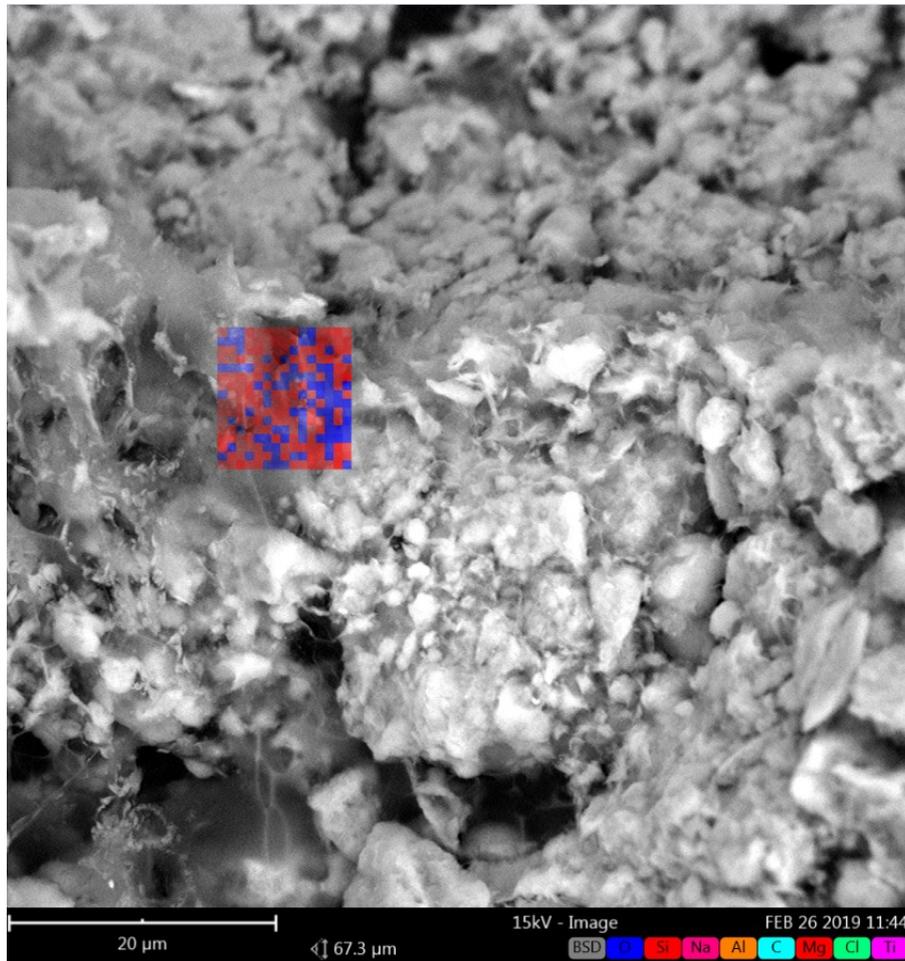


Fig. 7.83: Composición química de una muestra. Destacan los átomos de O, Si y Al asociados a las moléculas de Oxido de sílice de la arena y Silicoaluminato de la arcilla [30].

TIEMPO (hr)	POSICIÓN		$\omega_t$	$Sr_0$	$Sr_t$	$\theta_0$	$\theta_t$	$\Delta V \omega_{j,t}$	$h_{w,t}$	$i_{j,t}$	$v \omega_{j,t}$	$k_w$
	j	mm	-	(%)	(%)	-	-	(cm3)	(cm)	-	(cm/seg)	(m/seg)
0,13	1	19	19,1%	58,4%	84,0%	0,220	0,317	15,6	-14,7			
	2	38	18,4%	58,4%	80,9%	0,220	0,305	13,7	-18,3	1,90	3,36E-04	1,77E-06
	3	57	18,3%	58,4%	80,7%	0,220	0,304	13,6	-20,3	1,06	3,33E-04	3,15E-06
	4	76	18,5%	58,4%	81,2%	0,220	0,307	13,9	-22,0	0,86	3,42E-04	3,99E-06
	final	95	18,4%	58,4%	80,8%	0,220	0,305	13,6	-24,1			
0,3	1	19	19,8%	58,2%	87,3%	0,220	0,329	17,7	-12,8			
	2	38	19,7%	58,2%	86,5%	0,220	0,326	17,2	-15,2	1,25	1,88E-04	1,50E-06
	3	57	19,4%	58,2%	85,3%	0,220	0,322	16,5	-17,8	1,37	1,80E-04	1,31E-06
	4	76	19,2%	58,2%	84,4%	0,220	0,319	16,0	-20,2	1,27	1,74E-04	1,37E-06
	final	95	19,3%	58,2%	84,8%	0,220	0,320	16,2	-21,9			
1	1	19	20,2%	57,3%	88,9%	0,216	0,335	19,2	-11,8			
	2	38	19,9%	57,3%	87,3%	0,216	0,330	18,3	-14,7	1,54	5,97E-05	3,87E-07
	3	57	19,8%	57,3%	87,3%	0,216	0,329	18,2	-16,6	1,00	5,97E-05	5,97E-07
	4	76	20,0%	57,3%	88,0%	0,216	0,332	18,7	-18,1	0,77	6,10E-05	7,88E-07
	final	95	20,2%	57,3%	88,8%	0,216	0,335	19,1	-19,4			

Fig. 7.84: Resultados de conductividad hidráulica no saturada de la mezcla I con salmuera.

TIEMPO (hr)	POSICIÓN		$\omega$	$Sr_0$	$Sr$	$\theta_0$	$\theta_t$	$\Delta V \omega_{j,t}$	$h_{w,t}$	$v \omega_{j,t}$	$k_w$
	j	mm	—	(%)	(%)	—	—	(cm3)	(cm)	(cm/seg)	(m/seg)
24	1	19	20,5%	57,7%	90,3%	0,217	0,340	19,8	-0,148	2,70E-06	2,72E-07
	2	38	20,0%	57,7%	88,3%	0,217	0,332	18,5	-0,177	2,52E-06	2,55E-07
	3	57	18,8%	57,7%	82,8%	0,217	0,311	15,2	-0,202	2,07E-06	2,09E-07
	4	76	17,9%	57,7%	79,0%	0,217	0,297	12,9	-0,226	1,76E-06	1,78E-07
	final	95	13,2%	57,7%	58,2%	0,217	0,219	0,3			
								66,8	0,188	0,099	
								vol total	hw ave	i ave	

TIEMPO (hr)	POSICIÓN		$\omega$	$Sr_0$	$Sr$	$\theta_0$	$\theta_t$	$\Delta V \omega_{j,t}$	$h_{w,t}$	$v \omega_{j,t}$	$k_w$
	j	mm	—	(%)	(%)	—	—	(cm3)	(cm)	(cm/seg)	(m/seg)
48	1	19	21,3%	57,8%	94,7%	0,216	0,354	22,3	-0,107	1,52E-06	1,73E-07
	2	38	20,8%	57,8%	92,3%	0,216	0,345	20,8	-0,157	1,42E-06	1,62E-07
	3	57	20,1%	57,8%	89,1%	0,216	0,333	18,9	-0,186	1,28E-06	1,47E-07
	4	76	19,7%	57,8%	87,5%	0,216	0,327	17,9	-0,215	1,22E-06	1,39E-07
	final	95	19,5%	57,8%	86,7%	0,216	0,324	17,4			

Fig. 7.85: Resultados de conductividad hidráulica no saturada de la mezcla II con agua desmineralizada.

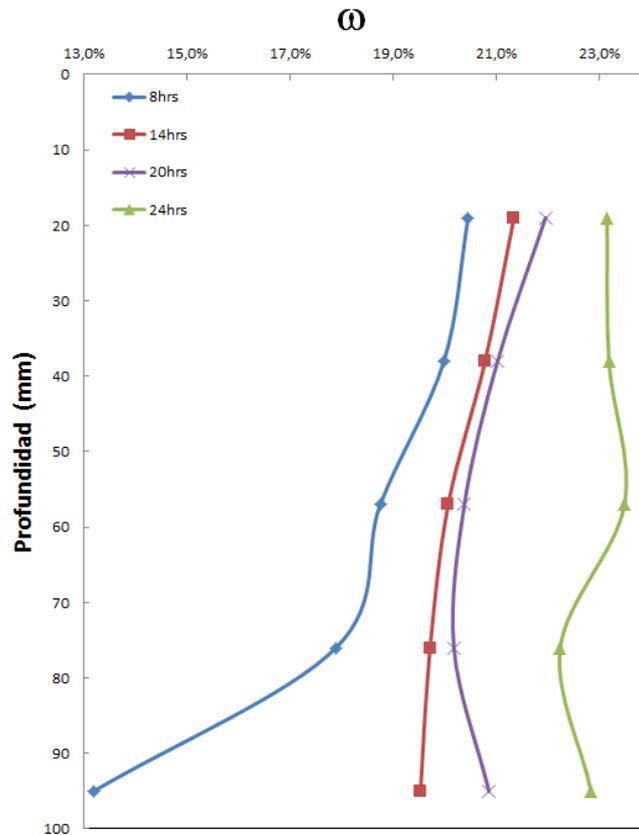


Fig. 7.86: Resultados de conductividad hidráulica no saturada de la mezcla II con agua desmineralizada.

TIEMPO (hr)	POSICIÓN		$\omega_t$	$Sr_0$	$Sr_t$	$\theta_0$	$\theta_t$	$\Delta V\omega_{j,t}$	$h_{w,t}$	$i_{j,t}$	$v\omega_{j,t}$	$k_w$
	j	mm										
24	1	19	21,9%	59,6%	97,1%	0,223	0,363	22,6	-11,6	-	-	-
	2	38	20,4%	59,6%	90,6%	0,223	0,339	18,7	-29,1	9,18	2,55E-06	2,78E-09
	3	57	14,6%	59,6%	64,7%	0,223	0,242	3,1	-85,6	29,76	4,20E-07	1,41E-10
	4	76	12,9%	59,6%	57,4%	0,223	0,215	-1,3	-98,5	6,79	-1,83E-07	-2,70E-10
	final	95	12,9%	59,6%	57,1%	0,223	0,213	-1,5	-10,2	-	-	-
48	1	19	22,4%	57,9%	99,2%	0,217	0,371	24,9	-2,6	-	-	-
	2	38	21,5%	57,9%	95,5%	0,217	0,357	22,7	-17,9	8,03	1,54E-06	1,92E-09
	3	57	20,9%	57,9%	93,0%	0,217	0,348	21,2	-25,9	4,22	1,44E-06	3,41E-09
	4	76	19,0%	57,9%	84,2%	0,217	0,315	15,9	-45,1	10,14	1,08E-06	1,07E-09
	final	95	18,9%	57,9%	83,8%	0,217	0,313	15,6	-47,8	-	-	-
72	1	19	22,9%	59,7%	101,4%	0,223	0,379	25,2	4,7	-	-	-
	2	38	21,6%	59,7%	95,8%	0,223	0,358	21,8	-17,1	11,45	9,89E-07	8,64E-10
	3	57	21,1%	59,7%	93,5%	0,223	0,350	20,4	-24,8	4,05	9,26E-07	2,29E-09
	4	76	20,3%	59,7%	89,9%	0,223	0,336	18,3	-34,3	4,98	8,29E-07	1,66E-09
	final	95	20,2%	59,7%	89,8%	0,223	0,336	18,2	-36,4	-	-	-
96	1	19	23,4%	56,7%	104,0%	0,212	0,389	28,6	4,6	-	-	-
	2	38	21,9%	56,7%	97,1%	0,212	0,363	24,4	-13,5	9,56	8,31E-07	8,69E-10
	3	57	21,4%	56,7%	95,2%	0,212	0,356	23,2	-20,6	3,73	7,91E-07	2,12E-09
	4	76	21,0%	56,7%	93,2%	0,212	0,349	22,0	-27,3	3,54	7,51E-07	2,12E-09
	final	95	20,9%	56,7%	92,9%	0,212	0,347	21,9	-29,9	-	-	-

Fig. 7.87: Resultados de conductividad hidráulica no saturada de la mezcla IV con agua des-mineralizada.

TIEMPO (hr)	POSICIÓN		$\omega_t$	$Sr_0$	$Sr_t$	$\theta_0$	$\theta_t$	$\Delta V\omega_{j,t}$	$h_{w,t}$	$i_{j,t}$	$v\omega_{j,t}$	$k_w$
	j	mm										
6	1	19	21,7%	59,2%	96,4%	0,221	0,361	22,5	-13,9	-	-	-
	2	38	21,4%	59,2%	95,1%	0,221	0,356	21,7	-19,4	2,88	1,18E-05	4,10E-08
	3	57	21,0%	59,2%	93,3%	0,221	0,349	20,6	-25,6	3,29	1,12E-05	3,42E-08
	4	76	20,5%	59,2%	90,8%	0,221	0,340	19,1	-33,0	3,86	1,04E-05	2,69E-08
	final	95	20,3%	59,2%	90,1%	0,221	0,337	18,6	-36,3	-	-	-
24	1	19	22,0%	59,2%	97,8%	0,221	0,366	23,3	-9,8	-	-	-
	2	38	21,9%	59,2%	97,3%	0,221	0,364	23,0	-13,4	1,88	3,14E-06	1,67E-08
	3	57	21,9%	59,2%	97,1%	0,221	0,363	22,9	-15,7	1,19	3,12E-06	2,62E-08
	4	76	21,5%	59,2%	95,5%	0,221	0,357	21,9	-22,0	3,34	2,98E-06	8,93E-09
	final	95	21,3%	59,2%	94,7%	0,221	0,354	21,5	-26,3	-	-	-

Fig. 7.88: Resultados de conductividad hidráulica no saturada de la mezcla IV con salmuera.

MUESTRA	MUESTRAS ENSAYADAS					Succión total [kPa]		Matrix [kPa]
	$\omega$	$\gamma_d$	e	Sr	Se	Arriba	Abajo	(ua-uw)
1	23,6%	1,21	1,20	0,53	-0,18	18148	14989	10196
2	36,6%	1,24	1,16	0,84	0,61	7057	7949	388,2
3	29,2%	1,25	1,14	0,69	0,22	6682	6850	4358
4	45,0%	1,21	1,20	1,00	1,00	2692	2896	242
5	47,7%	1,16	1,30	0,98	0,96	2423	13502	15
6	44%	1,18	1,26	0,93	0,83	2972	2847	236
7	31%	1,29	1,08	0,78	0,44	6305	3944	257
8	25%	1,27	1,10	0,61	0,03	6513	4947	999
9	#DIV/0!	1,27	19,62	#DIV/0!	#DIV/0!	0	0	#DIV/0!

Fig. 7.89: Resultados de curva de retención de la mezcla C III.

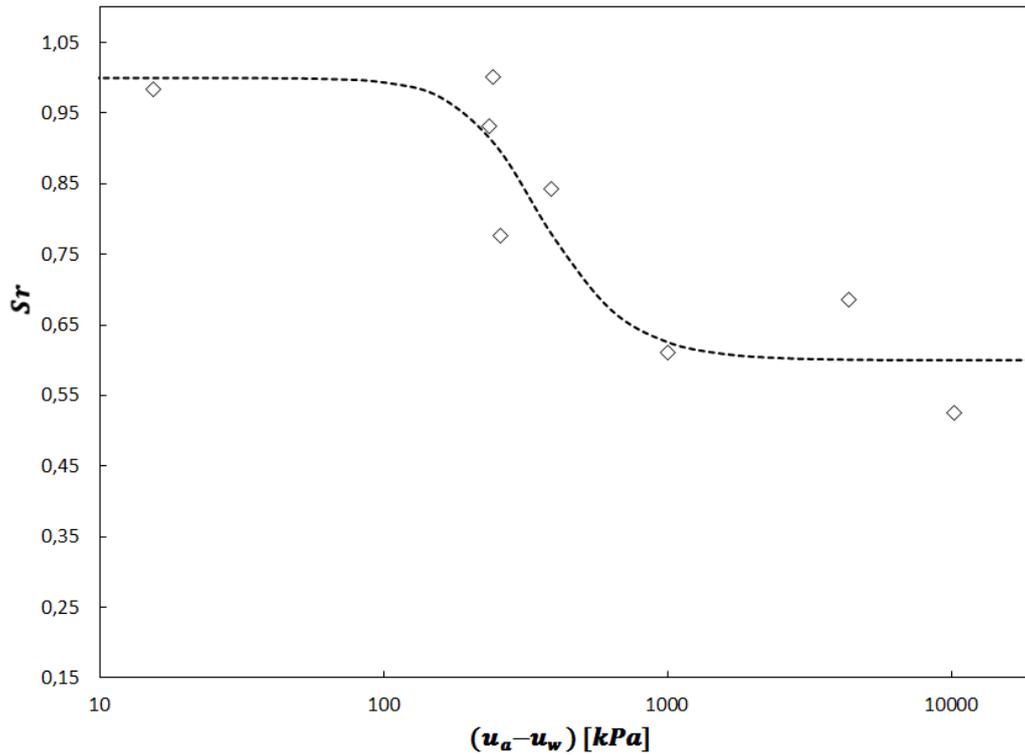


Fig. 7.90: Resultados de curva de retención de la mezcla C III.

$\sigma'$ (kPa)	$\Delta H$ (mm)	$\Delta H_{\alpha}$ (mm)	$H$ ( $H_o - \Delta H_{\alpha}$ )	$\Delta e$ ( $\Delta H_{\alpha}/H_s$ )	$e$ ( $e_o - \Delta e$ )	PARÁMETROS		
10	inundación muestra				0,544			
10	0,00	0,00	19,00	0,00	0,544	$\Delta H/H_o$	0,00%	Hinchariento libre bajo precarga inicial.
22	-0,57	-0,57	18,43	-0,05	0,498			
45	-0,68	-1,25	17,75	-0,05	0,444	$\sigma_{sp}$		Presión de hinchariento sin corregir (kPa).
102	-0,67	-1,92	17,08	-0,05	0,390			
215	-0,45	-2,37	16,63	-0,04	0,355	$\sigma'_{sp}$		Presión de hinchariento corregida (kPa).
441	-0,86	-3,23	15,77	-0,07	0,286			
892	-1,29	-4,52	14,48	-0,10	0,183	$C_c$	0,28	Índice de compresión.
441	0,20	-4,32	14,68	0,02	0,199			
215	0,40	-3,92	15,08	0,03	0,231			
102	0,36	-3,56	15,44	0,03	0,260	$C_s$	0,10	Índice de hinchariento.

Fig. 7.91: Resultados de ensayos de consolidación para la mezcla I con agua desmineralizada.

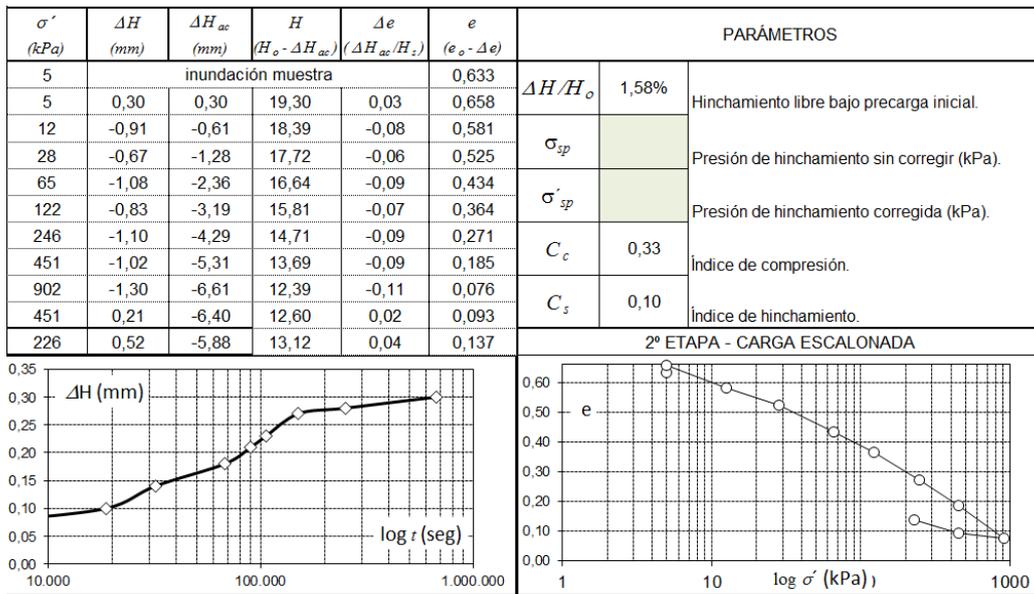


Fig. 7.92: Resultados de ensayos de consolidación para la mezcla II con agua desmineralizada.

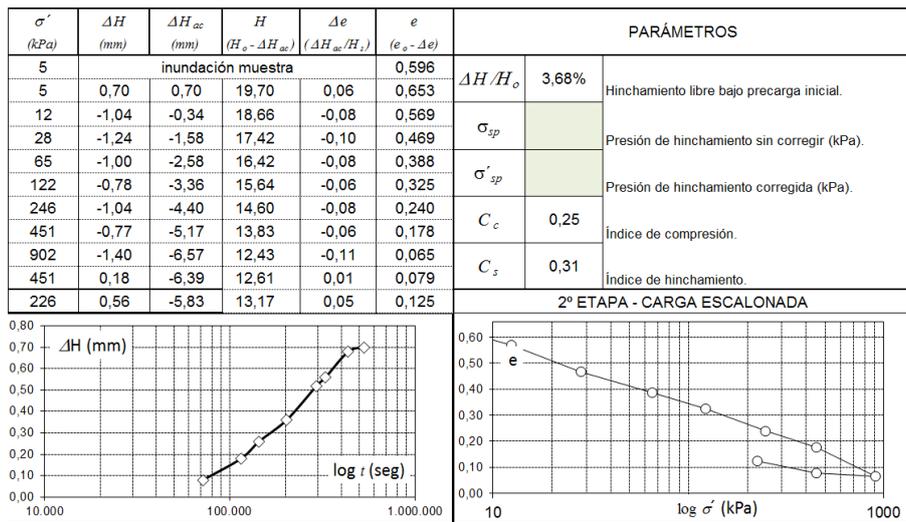


Fig. 7.93: Resultados de ensayos de consolidación para la mezcla III con agua desmineralizada y rama húmeda.

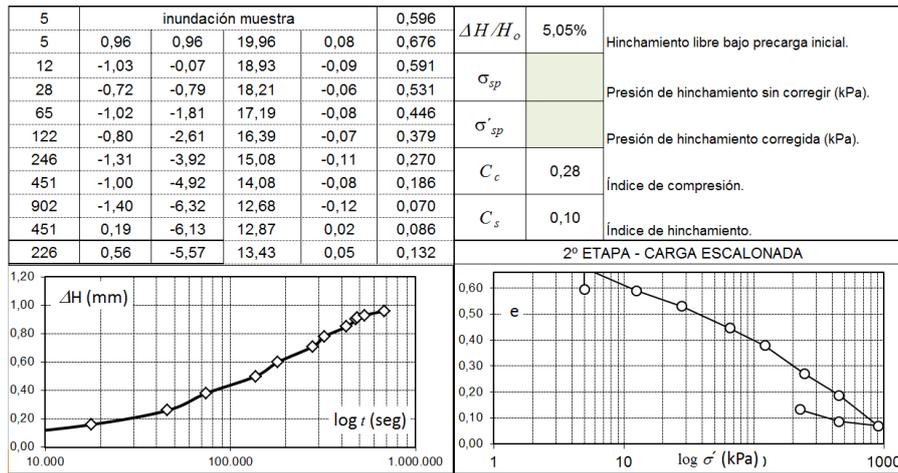


Fig. 7.94: Resultados de ensayos de consolidación para la mezcla III con agua desmineralizada y rama óptima.

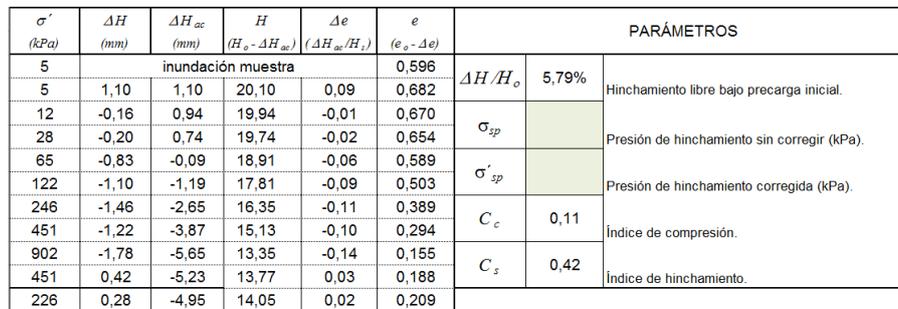


Fig. 7.95: Resultados de ensayos de consolidación para la mezcla III con agua desmineralizada y rama seca.

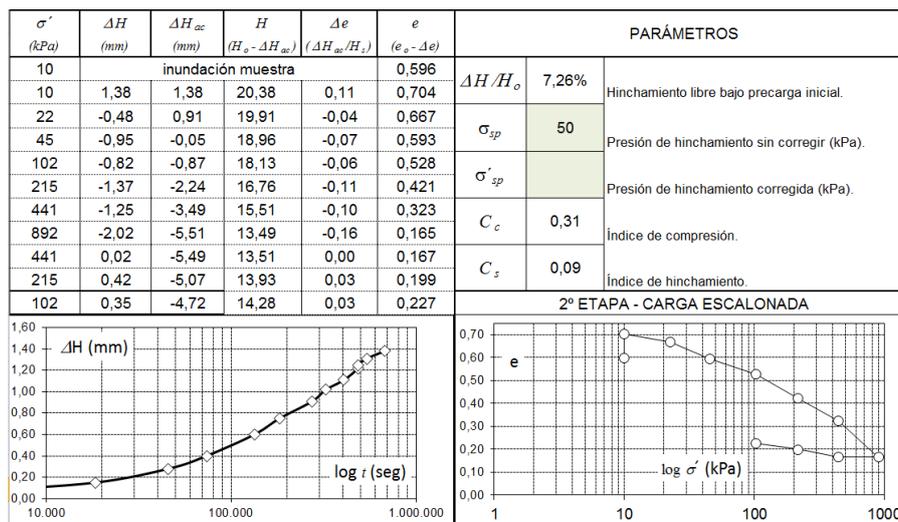


Fig. 7.96: Resultados de ensayos de consolidación para la mezcla IV con agua desmineralizada y rama óptima.

## 7.4. Miscelaneos

  		
<b>HOJA TÉCNICA</b>		
Producto: FAISAN AP-1011		
Parámetro		
Materia Activa (%)	>99	
Densidad de Carga Aniónica	Alta	
Peso Molecular	Muy Alto	
Granulometría	% > 10 mesh	Máx. 2
	% < 100 mesh	Máx. 10
Densidad Aparente Aproximada (gr/ml)	0.8	
Viscosidad aproximada Brookfield (cps)	5,0 gr/lit	1740
	2,5 gr/lit	700
	1,0 gr/lit	200
Concentración de Operación recomendada (gr/lit)	1	
Concentración Máxima de Operación (gr/lit)	5	
Tiempo de disolución para una concentración de 1 gr/lit (min)	90	
Estabilidad de la solución 1 gr/lit en agua destilada en recipiente cerrado (días)	5	
Temperatura de Almacenaje (°C)	0 a 35	
Estabilidad (meses)	24	

Fig. 7.97: Hoja técnica poliacrilamida aniónica (APAM) (FAISAN AP 1011).

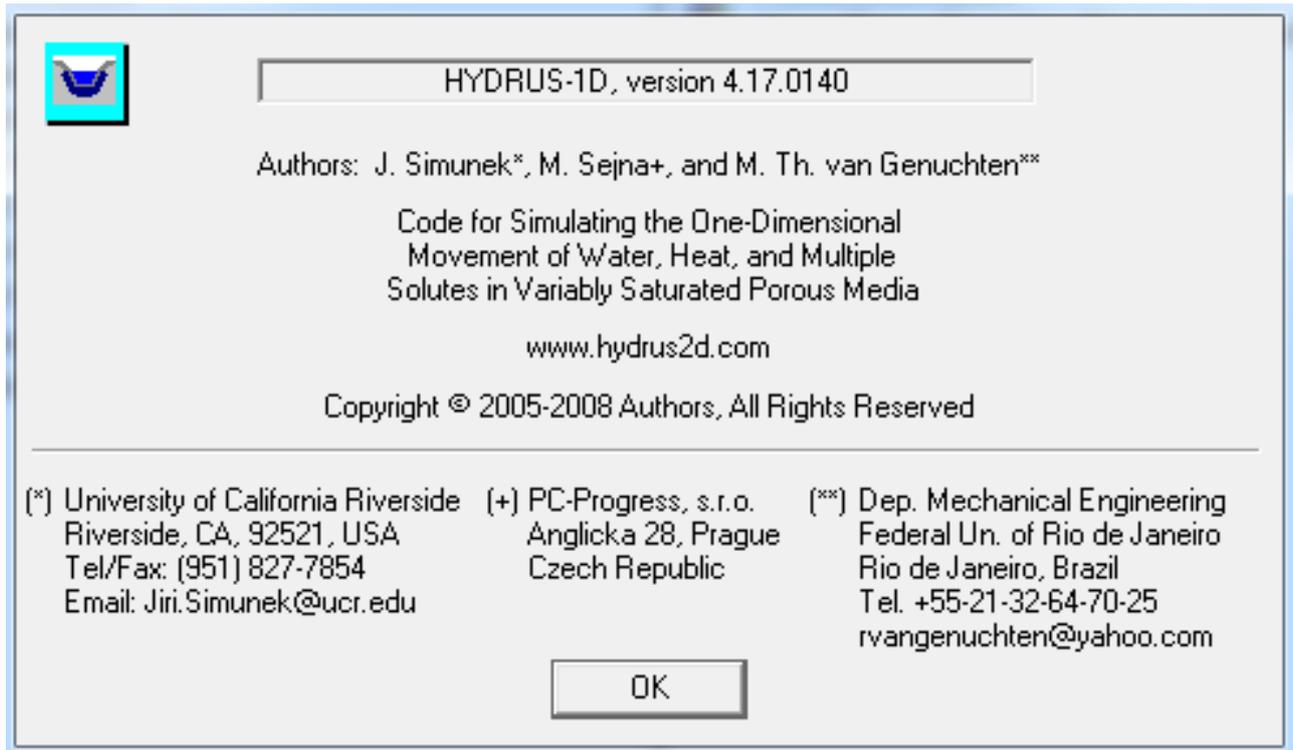


Fig. 7.98: Derechos de autor: Hydrus 1D.

## Referencias

- [1] F. M. (2014), "Study of expansive soil and polymer interactions. 2nd symposium on coupled phenomena in environmental geotechnics (cpeg2). leeds, uk.,"
- [2] M. L. (2015), "Natural soil modified with polymer for use in landfill systems. advances in soil mechanics and geotechnical engineering: Proceedings of the 15th pccmge. 15 17 november, buenos aires, argentina. ed. ios press. pages 2228 2235. doi: 10.3233/97816149960332228.,"
- [3] G. L. G. (2010), "Residuos solidos urbanos argentina, comarco.,"
- [4] Chamberlain and G. (1979), "Effect of freezing and thawing on the conductivity and structure of soils. eng. geol. 13, 72, 92.,"
- [5] J. Kleppe and R. . Olson, "Desiccation cracking of soil barriers, hydraulic barriers in soil and rock, stp 874, astm, philadelphia, 263 275.,"
- [6] K. L. (1989), "Numerical accuracy of the regular coulomb function.,"
- [7] Othman and B. (1992), "Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil.,"
- [8] P. H. . Morris, "Compressibility and permeability correlations for fine grained dredged materials. journal of waterway, port, coastal and ocean engineering. vol. 129.,"
- [9] D. E. Daniel and Y. K. . Wu, "Compacted clay liners and covers for arid sites. j. geotech. enrg, asce, 119(2), 223, 237.,"
- [10] S. et al. (1993), "Effect of cement type on behavior of cemented calcareous soil.,"
- [11] M. Young and Z. (1993), "Construction of the corinth landfill cover.,"
- [12] Bowders and M. (1994), "The effects of thaw cycles on the permeability of three compacted soils.,"
- [13] I. M. A. (2005), "Polyacrylamide sorption opportunity on interlayer and external pore surfaces of contaminant barrier clays. chemosphere, vol. 58, p. 19 31, 2005.,"
- [14] H. . Kaya, A. y Fang, "Experimental evidence of reduction in attractive and repulsive forces between clay particles permeated with organic liquids. canadian geotechnical journal. vol. 42.,"
- [15] Fleming and I. (1995), "Contaminant barrier material textural response o interaction with aqueous polymers.,"
- [16] D. E. . Ruhl, J. L. y Daniel, "Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates. journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. vol. 123.,"
- [17] D. D. E. Benson, C. H. and G. P. . Boutwell, "Field performance of compacted clay liners. j. geotech. and geoenvir. enrg. asce, 125(5), 390, 403.,"
- [18] B. A. Albrecht and C. H. B. (2001), "Efect of desiccation on compacted natural clays.,"
- [19] u. d. A. . J. Jamarillo
- [20] M. de salud de Costa Rica. (1997), "Gobierno nacional de costa rica.,"

- [21] S. H. (2004), "Geoenvironmental engineering.,"
- [22] C. W. . Fetter, "Contaminant hydrogeology. 2nd ed. prentice hall, upper saddle river.,"
- [23] J. K. . Mitchell, "Fundamentals of soil behaviour. 2nd ed. john wiley and sons, new york.,"
- [24] K. K. y. F. M. A. . Santamarina, J. C., "Soils and waves. john wiley y sons, england.,"
- [25] J. A. . Freeze, R. A. y Cherry, "Groundwater. prentice hall, new jersey.,"
- [26] C. E. . Mortimer, "Quimica. grupo editorial iberoamerica, mexico.,"
- [27] R. M. . Mercer, J. W. y Cohen, "A review of immiscible fluids in the subsurface. properties, models, characterization and remediation. journal of contaminant hydrology, n 29, pp. 319 346.,"
- [28] S. R. R. R. y. H. S. G. . Newell, C. J. Acree, "Light nonaqueous phase liquids. epa groundwater issue. epa, 540, s 95/500.,"
- [29] S. S. . Suthersan, "Remediation engineering, design concepts. crc. press. boca raton, florida.,"
- [30] H. y Kovacs. (1981), "An introduction to geotechnical engineering. prentice hall, new jersey.,"
- [31] J. K. . Mitchell, "Fundamentals of soil behaviour. 2.,"
- [32] C. E. . Marshall, "The physical chemistry and mineralogy of soils. vol. 1 soil materials. wiley. new york.,"
- [33] R. V. . Lambe, T. W. y Whitman, "Mecanica de suelos. limusa wiley, mexico.,"
- [34] A. P. . Adamson, A. W. y Gast, "Physical chemistry of surfaces. 6to ed. wiley interscience.,"
- [35] F. H. . Chen, "Foundations on expansive soils. elsevier.,"
- [36] M. A. . Khemissa, M, "Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay. applied clay science , 95, 104, 110.,"
- [37] G. A. . Pal, S. K, "Volume change behavior of fly ash montmorillonite clay mixtures. international journal of geomechanics , 14 (1), 59, 68.,"
- [38] L. S. S. H. Y. F. L. W. . L. S. . Yang, L., "Polyacrylamide molecular formulation effects on erosion control of disturbed soil on steep rocky slopes. canadian journal of soil science , 91, 917, 924.,"
- [39] Z. Zhou and D. G. (1993), "Polymer modified clay as impermeable barriers for acid mining tailings.,"
- [40] B. y col. (2001), "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.,"
- [41] A. H. A. Maghchiche and B. I. (2010), "Use of polymers and biopolymers for water retaining and soil stabilization in arid and semiarid regions.,"
- [42] Y. A. S. Agus and T. S. (2005), "Hydro mechanical characteristics of a polymer enhanced bentonite sand mixture for landfill applications.,"

- [43] T. P. M. Fernandez, M. Codevilla and D. M. (2017), "Study of expansive soil and polymer interactions.,"
- [44] A. R. (2009), "Effect of polymers on swelling potential of expansive soils. proceedings of the ice.,"
- [45] A. A. . Canakci, H, "Soil stabilization of clay with lignin, rice husk powder and ash. geomechanics and engineering.,"
- [46] Examples and B. S. benefits of using polymer support fluids as an alternative to bentonite, Hoja tecnica
- [47] A. M. H. y J. Letey, "Polymer type and water quality effects on soil dispersion.,"
- [48] J. o. A. P. . M. Bakass y col, "Absorption and desorption of liquid water by a super-absorbent polymer, effect of polymer in the drying of the soil and the quality of certain plants.,"
- [49] K. N. y J.S Tingle. (2004), "Emulsion polymers for soil stabilization.,"
- [50] U. (2007), "Leader francais de l injection de resine expansive, procedes et references.,"
- [51] J. D. (2007), "Uso de polimeros en la estabilizacion de suelos para su uso en carreteras y ejecucion de un tramo experimental.,"
- [52] W. R. A. (2014), "Utilization of polymer stabilization for improvement of clay microstructures.,"
- [53] C. T. y col. (2013), "Ex situ remediation of polluted soils by absorptive polymers, and a comparison of slurry and two phase partitioning bioreactors for ultimate contaminant degradation.,"
- [54] D. S. . Consejo superior de investigaciones cientificas (CSIC)
- [55] S. E. S. C. . Mechtcherine, V, "Effect of superabsorbent polymers (saps) on rheological properties of fresh cement based mortars development of yield stress and plastic viscosity over time. cement and concrete research , 67, 52.,"
- [56] S. (1892), "Botanische zeitung. leipzig. germany.,"
- [57] J. (1963), "Compacted fill. aurora. usa.,"
- [58] M. M. M. (1970), "Clay organic complexes and interactions.,"
- [59] B. K. G. . Theng, "Formation and properties of clay polymer complexes. elsevier, amsterdam, 362 pp.,"
- [60] V. K. y col. (2002), "Application of polyacrylamide flocculants for water treatment.,"
- [61] R. S. . R.D Lentz, "Field results using polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration.,"
- [62] A. M. H. y J. Letey. (), "Polymer type and water quality effects on soil dispersion.,"
- [63] H. . Iruiria, Mon, "Xix congreso latinoamericano del suelo. efecto de la poliacrilamida en las propiedades físicas de un suelo arenoso.,"

- [64] S. A. y col. (2005), "Hydromechanical characteristics of a polymer enhanced bentonite sand mixture for landfill applications.,"
- [65] A. R. (2009), "Etudes du comportement hydromecanique, chimique et de la durabilite des geomateriaux detancheite renforces par ajout de polymeres.,"
- [66] "Normas consultadas. american society of testing materials. d2166-00. d2216-98. d 2435-03. d5856-95 r02. d4972-01. d5298-03. d1140-00. d4318-00.,"
- [67] S. J. C. (2001), "Specific surface, determination and relevance.,"
- [68] R. H. W. B. Yang H and L. E. (2004), "A soil column apparatus for laboratory infiltration study, geotechnical testing journal vol 27.,"
- [69] F. D. G. (1993), "Soil mechanics for unsaturated soils.,"
- [70] S. K and P. A. (2009), "Polyacrylamide treated kaolin a fabric study. applied clay science 45(4), 270 279.,"
- [71] Inyang and B. (2005), "Polyacrylamide sorption opportunity on interlayer and external pore surfaces of contaminant barrier clays. chemosphere 58(1) 19 31.,"
- [72] Saez and E. (1986)., "Geotechnique. the shear strength of partly saturated soils.,"
- [73] M. M. (2008), "Interaccion fluido particula en la permeabilidad de suelos.,"
- [74] F. G. (1998), "Principles and aplicaciones of geochemistry. new jeysey.,"
- [75] J. K. y C. C. K. . Seed, H. B. Mitchell, "The strength of compacted cohesive soils. conference on shear strength of cohesive soils. asce.,"
- [76] D. E. y E. G. R. . Gleason, M. H. Daniel, "Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications. journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. vol. 123, n 5. pp. 438 445.,"
- [77] R. . Petrov, R. y Rowe, "Geosynthetic clay liner (gcl) chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance. canadian geotechnical journal. vol. 34. pp. 863 885.,"
- [78] C. D. . Stern, R. T. y Shackelford, "Permeation of sand processed clay mixtures with calcium chloride solutions. journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. vol. 124, n 3. pp. 231 241.,"
- [79] T. B. C. H. y E. T. B. . Jo, H. Y. Katsumi, "Hydraulic conductivity and swelling of nonprehydrated gcls permeated with single species salt solutions. journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. vol. 127, n 7. pp. 557 567.,"
- [80] S. L. (1995), "Soil liners and covers for landfills. lectures notes for caterpillar hemispheric series of short courses. universidad de puerto rico.,"
- [81] S. S. (2004), "Hydraulic performance of polymer modified bentonite. master thesis. university of south florida.,"
- [82] M. H. (2004), "Hydraulic difusion and retention of inorganic chemicals in bentonite phd thesis.,"
- [83] E. P. A. (2000)., "Landfill manuals landfill site design.,"