



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y GEOLOGÍA

TESIS DE GRADO EN INGENIERÍA CIVIL (84.00)  
TRABAJO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL (84.99)

---

**REDOSIFICACIÓN DE MEZCLAS  
ARENA-ARCILLA-POLÍMERO PARA USO EN  
BARRERAS HIDRÁULICAS DE RELLENOS  
SANITARIOS**

---

Autor:

Agustín Gabriel PILEGGI

Director:

Ing. Mauro CODEVILLA

8 de febrero, 2021

# Agradecimientos

Quiero agradecerles personalmente:

- Al ingeniero Camilo Casagrande, tesista y compañero del LMS: mil gracias por ayudarme a empezar en el laboratorio y acompañarme a lo largo de todo el trabajo con tus sugerencias e ideas.
- A mi director el ingeniero Mauro Codevilla: gracias por guiarme durante la realización de este trabajo con el enorme compromiso y dedicación que pusiste buscando siempre la forma de avanzar aún cuando la emergencia sanitaria que atravesamos nos lo dificultó.
- Al futuro ingeniero Nicolás Tasso: gracias por compartir conmigo todo lo que sabés con tanto entusiasmo. La tesis quedó "mas linda".
- A la ingeniera Andreína Brugaletta: gracias por tu colaboración "estratégica" desde el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- A mis amigos y amigas de la facultad y en algunos casos también "colegas tesistas": el apoyo y acompañamiento de ustedes hizo que disfrute aún mas de desarrollar esta tesis.
- A la ingeniera Sandra Orlandi y colaboradores de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco: el compromiso de ustedes para proveernos de suelo de Comodoro fue fundamental.
- Al licenciado Roberto Goldschmidt de Química Paípe: gracias por el aporte de las muestras de APAM sin las cuales este trabajo no se podría haber realizado.

## Resumen

El propósito de la investigación es encontrar una dosificación óptima de arena-arcilla y poliacrilamida aniónica (APAM) para evaluar su aptitud como barreras hidráulicas de rellenos sanitarios (RS). Considerando la información preexistente se ensayaron y analizaron nuevas distintas dosificaciones con el objeto de generar una carta que identifique la zona óptima de mezclas que cumpla simultáneamente los criterios de impermeabilidad, resistencia y expansión exigidos en barreras hidráulicas. La etapa experimental comprendió el estudio físico e hidromecánico de las nuevas mezclas mediante la ejecución de ensayos de compresión simple, hinchamiento libre, conductividad hidráulica saturada y curvas de retención características (SWCC). El contenido de APAM utilizado en todas las mezclas fue 0, 1.5, 2.5 y 3.5 % en peso y las mezclas arena-arcilla se dosificaron en proporciones 80-20 y 70-30. La resistencia se incrementó con el aumento de finos y de APAM, presentando mayor ductilidad en rotura frente a la incorporación del polímero. La succión de entrada de aire se incrementó con el aumento de finos y de APAM y las SWCC obtenidas mostraron un comportamiento bimodal. El hinchamiento libre se incrementó con el aumento de finos y de APAM, registrando valores por encima del 10 % para algunas mezclas. La conductividad hidráulica saturada disminuyó hasta un orden de magnitud con el aumento de finos y de APAM, resultando más eficiente la adición de APAM. Se verificó en todas las mezclas el valor límite fijado por normas para barreras hidráulicas inferiores de RS ( $k \sim 10^{-9}$  m/s). Se efectuó un análisis de infiltración y de transporte de contaminante con el propósito de evaluar el desempeño de las mezclas como parte de una barrera hidráulica inferior de RS de 60cm de espesor y sometida a una carga hidráulica de 30cm de lixiviado. Se obtuvieron tiempos de saturación de barrera entre 1.8 y 110 años y tiempos de paso de contaminante por fuera del RS entre 1.4 y 21 años.

## Abstract

The aim of this project is to find an optimum dosification of a mixture of natural fine sand, clayey soil, and anionic polyacrylamide (APAM) to enhance its use as a hydraulic barrier in a landfill system. In addition to the existing information, several dosifications were tested and analyzed to obtain a chart that identifies the one that simultaneously meets the impermeability, resistance, and expansion capacity required for a hydraulic barrier. To complete the chart, for every new dosification, a physical and hydromechanical study was completed, including measurements of the uniaxial compressive strength (UCS), the free swelling capacity, the saturated hydraulic conductivity, and the soil water retention curves (SWCC). APAM was used at 1.5, 2.5 y 3.5 wt. % and sand-clay mixtures were mixed in proportions 80-20 and 70-30. It was demonstrated that the UCS and ductility increases with increasing APAM and clay content. Additionally, the air entry value increases with clayey soil and APAM content with a bimodal behavior observed in soil water retention curves. The free swelling also increased with the clayey soil and APAM content, presenting results over 10 %, and the hydraulic conductivity decreased up to an order of magnitude with the increase of clayey soil and APAM, making the addition of APAM more efficient. The limit value set by standards for lower hydraulic barriers in landfill systems was verified in all mixtures. Finally, an infiltration and contaminant transport analysis was done to evaluate the performance of a 60 cm thick lower hydraulic barrier of landfill systems exposed to a hydraulic head of 30 cm of leachate. Barrier saturation times were reached between 1.8 and 110 years and pollutant passage times between 1.4 and 21 years.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>6</b>
1.1. Motivación . . . . .	6
1.2. Objetivos . . . . .	6
1.3. Contenido . . . . .	6
<b>2. Estado del arte</b>	<b>8</b>
2.1. Introducción . . . . .	8
2.2. Rellenos sanitarios . . . . .	8
2.2.1. Necesidad de los Rellenos sanitarios . . . . .	8
2.2.2. Componentes de un Relleno sanitario . . . . .	9
2.2.3. Generación y circulación de lixiviados . . . . .	12
2.2.4. Impermeabilización superior . . . . .	13
2.2.5. Impermeabilización inferior . . . . .	13
2.2.6. Aspectos de diseño de la barreras impermeables superior e inferior . . . . .	14
2.2.7. Marco y requerimientos normativos para la confección de RS . . . . .	17
2.3. Interacción fluido-partícula . . . . .	18
2.4. Succión en suelos no saturados . . . . .	24
2.4.1. Curva de retención característica . . . . .	26
2.4.2. Resistencia al corte . . . . .	29
2.5. Poliacrilamida . . . . .	30
2.6. Mezclas suelo-APAM . . . . .	32
2.7. Mezclas Arena-Arcilla . . . . .	35
<b>3. Programa experimental</b>	<b>41</b>
3.1. Introducción . . . . .	41
3.2. Materiales . . . . .	41
3.2.1. Arena . . . . .	41
3.2.2. Arcilla . . . . .	42
3.2.3. Poliacrilamida . . . . .	47
3.3. Métodos y ensayos realizados . . . . .	47
3.3.1. Preparación de mezclas . . . . .	47
3.3.2. Proctor estándar . . . . .	48
3.3.3. Curvas de retención . . . . .	49
3.3.4. Conductividad hidráulica saturada . . . . .	50
3.3.5. Resistencia a compresión simple . . . . .	52
3.3.6. Hinchamiento libre . . . . .	53
<b>4. Resultados obtenidos</b>	<b>54</b>
4.1. Introducción . . . . .	54
4.2. Proctor estándar . . . . .	54
4.3. Curvas de retención . . . . .	55
4.4. Conductividad hidráulica saturada . . . . .	56
4.5. Resistencia a compresión simple . . . . .	57
4.6. Hinchamiento libre . . . . .	59

<b>5. Análisis y discusión de resultados</b>	<b>61</b>
5.1. Introducción . . . . .	61
5.2. Curvas de compactación . . . . .	61
5.3. Curvas de retención . . . . .	61
5.3.1. Efecto del aumento del porcentaje de finos . . . . .	61
5.3.2. Efecto de la incorporación de APAM . . . . .	63
5.4. Conductividad hidráulica . . . . .	65
5.4.1. Efecto del aumento del porcentaje de finos . . . . .	65
5.4.2. Efecto de la incorporación de APAM . . . . .	66
5.5. Resistencia y rigidez . . . . .	67
5.5.1. Efectos del aumento del porcentaje de finos . . . . .	67
5.5.2. Efectos de la incorporación de APAM . . . . .	69
5.5.3. Efecto del paso del tiempo . . . . .	71
5.6. Hinchamiento . . . . .	72
5.6.1. Efecto del aumento del porcentaje de finos . . . . .	72
5.6.2. Efecto del contenido de APAM . . . . .	73
<b>6. Aplicación tecnológica: desempeño de mezclas arena-arcilla-APAM como barrera hidráulica frente al avance de lixiviados y transporte de contaminantes</b>	<b>75</b>
6.1. Introducción . . . . .	75
6.2. Análisis de infiltración . . . . .	76
6.2.1. Geometría y propiedades de los casos analizados . . . . .	76
6.2.2. Condiciones de borde . . . . .	77
6.2.3. Criterio de análisis . . . . .	77
6.2.4. Resultados . . . . .	78
6.3. Análisis de transporte de contaminantes . . . . .	79
6.3.1. Mecanismos de advección, difusión y dispersión . . . . .	79
6.3.2. Ecuación general de transporte . . . . .	80
6.3.3. Determinación de coeficientes para las distintas mezclas . . . . .	81
6.3.4. Selección del contaminante . . . . .	81
6.3.5. Geometría y propiedades de los casos analizados . . . . .	82
6.3.6. Condiciones de borde . . . . .	82
6.3.7. Criterio de análisis . . . . .	82
6.3.8. Resultados . . . . .	82
<b>7. Conclusiones</b>	<b>86</b>
7.1. Aspectos relevantes hallados . . . . .	86
7.2. Próximos trabajos . . . . .	88
7.3. Divulgación académica . . . . .	89
<b>Anexos</b>	<b>90</b>
<b>A. Informes de avance</b>	<b>90</b>
A.1. Informe de avance N°1 - Caracterización materiales . . . . .	90
A.2. Informe de avance N°2 - Ensayos Proctor . . . . .	94
A.3. Informe de avance N°3 - Ensayos UCS . . . . .	95
<b>B. Hoja técnica APAM</b>	<b>99</b>

<b>C. Software utilizados</b>	<b>100</b>
C.1. RETC . . . . .	100
C.2. Hydrus-1D . . . . .	100
<b>D. Composición química de lixiviados</b>	<b>101</b>

# 1. Introducción

## 1.1. Motivación

El uso de polímeros se encuentra cada vez más difundido en diferentes ramas de la industria. Desde mediados del siglo XX se vienen realizando numerosas investigaciones a nivel académico sobre la interacción arcilla-polímero-fluido. Dentro del ámbito de la ingeniería civil, los polímeros ya forman parte del diseño de hormigones o de procesos de mejora de suelos o fluidos de perforación, entre otras aplicaciones. En línea con esta tendencia, el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Geología (LMS) se propuso investigar el comportamiento de mezclas arena-arcilla modificadas con poliacrilamida aniónica (APAM) analizando su aptitud para barreras hidráulicas de un relleno sanitario (RS). En el año 2015 la ing. Luz Martí presentó su trabajo de Tesis de grado sobre la caracterización hidromecánica de mezclas arcilla-1.5 % APAM y mezclas arena-arcilla-APAM en proporción 85-15-1.5 con el propósito de obtener por primera vez en el Laboratorio resultados experimentales de la interacción del APAM con distintos materiales. Siguiendo la misma línea de investigación, en el año 2019 el ing. Camilo Casagrande presentó su trabajo de Tesis de grado sobre el estudio de mezclas arena-arcilla en proporción 85-15 pero con adición de APAM al 1.5, 2.5 y 3.5 %, evaluando el comportamiento de las mezclas con fluidos de diferente naturaleza electroquímica como la salmuera y kerosene que simulan distintas características físico-químicas del lixiviado de un RS. En virtud de los trabajos anteriormente descritos y teniendo en cuenta la obtención de resultados alentadores para su uso como barrera hidráulica, el trabajo desarrollado en esta Tesis tuvo por objetivo modificar la mezcla original 85-15 arena-arcilla aumentando el contenido de finos, pero manteniendo las dosificaciones de APAM efectuadas en el trabajo de Casagrande.

Cabe preguntarse por qué se presenta un tercer trabajo de características similares a los anteriores y más aún, se prevé que comience en el LMS un cuarto trabajo sobre la misma temática en este año 2021. Simplemente porque la acumulación de numerosos resultados experimentales permite posicionar al LMS en la comunidad académica mediante la publicación de artículos científicos en revistas de prestigio internacional. Esto último ya es un hecho concreto desde el año 2019.

## 1.2. Objetivos

El trabajo de Tesis tiene como objetivo evaluar la aptitud de nuevas mezclas arena-arcilla-APAM para su uso como barrera hidráulica de un relleno sanitario. En particular se busca:

- Proponer nuevas mezclas arena-arcilla en proporciones 80-20 y 70-30 en peso manteniendo la misma adición de APAM que los anteriores trabajos (0, 1.5 y 3.5 %) y verificar que cumplan los requisitos mínimos exigidos por normas.
- Cuantificar y comprender los cambios en el comportamiento hidromecánico de las nuevas mezclas en base a los conceptos básicos de interacción fluido-partícula.
- Proponer un gráfico de combinación de mezclas arena-arcilla-APAM que permita identificar una zona óptima que verifique simultáneamente los criterios de impermeabilidad, resistencia y expansión exigidos por normas.

## 1.3. Contenido

El documento se compone de 7 capítulos. En el capítulo 2 se realiza una introducción a la composición y estructura de los rellenos sanitarios. Se hace especial foco en el funcionamiento de las

barreras hidráulicas que lo componen y se resumen aspectos normativos para su diseño. Se repasan los conceptos de interacción fluido-partícula y succión en suelos no saturados que son útiles a éste trabajo. También se presentan antecedentes sobre estudios similares. En el capítulo 3 se caracterizan los materiales utilizados y se describen los métodos experimentales. En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos. En el capítulo 5 se realiza el análisis y discusión de los resultados obtenidos. En el capítulo 6 se aplica un modelo computacional para evaluar el desempeño de las distintas barreras propuestas. En el capítulo 7 se presentan las conclusiones obtenidas de este trabajo de tesis.



## 2. Estado del arte

### 2.1. Introducción

En esta sección se expone la necesidad actual de contar con rellenos sanitarios para la disposición de residuos. Se presentan los componentes esenciales de un relleno sanitario y se resumen los principales problemas y aspectos de diseño de las barreras hidráulicas que lo componen desde el punto de vista geotécnico. Luego, se realiza un resumen de aspectos teóricos y resultados de trabajos realizados por otros autores que guardan estrecha relación con la motivación de este trabajo, el programa de ensayos y los materiales utilizados.

### 2.2. Rellenos sanitarios

#### 2.2.1. Necesidad de los Rellenos sanitarios

Los rellenos sanitarios (RS) son sitios destinados a la disposición final de residuos generados por el ser humano. Constituyen una solución integral de ingeniería a los problemas ocasionados por los basurales a cielo abierto (BCA) y por el vertido de basura sin control en zonas aledañas a las ciudades o fábricas. Los BCA son el modo de disposición de basura más utilizado en los municipios de Argentina [1] ya que resulta el método más económico a corto plazo para disponer los residuos. Sin embargo, los BCA generan problemas complejos a lo largo del tiempo. Al estar desarrollados a cielo abierto son constantemente invadidos por animales e insectos que proliferan sin control y se convierten luego en vectores de enfermedades peligrosas para el ser humano y otros seres vivos. La generación de gases y la acumulación de materia inflamable los vuelven propensos a incendios que generan humos y gases tóxicos que contaminan el medio ambiente. En algunos casos la basura es incinerada intencionalmente como método de "estabilización" de residuos ya que los BCA no permiten una descomposición controlada. La exposición al viento transporta basura, olores y gases tóxicos por vía aérea que llegan a las ciudades ya que es común que se ubiquen próximos a los centros urbanos. Los BCA no tienen tratamiento de suelos y tampoco poseen sistemas de clasificación de la basura. No existe control del tipo de residuos volcados allí. Los lixiviados que producen se infiltran hacia las capas inferiores contaminando las napas de agua y escurren superficialmente contaminando arroyos y lagunas. La proximidad con los centros urbanos atrae a personas que merodean la zona sin protección sanitaria buscando restos con algún valor económico (ver Figura 2.1). En casos más extremos se generan asentamientos precarios permanentes.

Los RS surgieron en los países desarrollados para dar solución a todas estas problemáticas de manera integral. Para ello se realiza un diseño que abarca distintas ramas de la ingeniería.

En la actualidad se distinguen tres tipos de RS según los tipos de residuos que almacenan y que determinan su diseño.

- Relleno sanitario para residuos sólidos urbanos: diseñados para recibir los desechos domiciliarios y comerciales no peligrosos de las zonas urbanas.
- Relleno sanitario industrial: diseñado para recibir los restos de obras en construcción o demolición, restos de la industria del carbón u otras industrias que generen residuos no peligrosos.
- Relleno sanitario para residuos peligrosos: diseñados para contener residuos de la industria que sean corrosivos o dañen la salud y el ambiente de forma irreparable como solventes, pesticidas, baterías, residuos de industria petrolera o química, etc.

En la Tabla 2.1 se resume el origen de los desechos que constituyen los RSU.



Fig. 2.1: Basural a cielo abierto en la provincia de Buenos Aires.

### 2.2.2. Componentes de un Relleno sanitario

Existen RS con distintos niveles de tecnología pero de manera general todos los RS posee una serie de elementos básicos. La basura se dispone en uno o mas módulos centrales con dimensiones definidas e impermeables donde es compactada a una densidad controlada y predeterminada en distintas celdas. Cada celda es diseñada para alcanzar una determinada altura y es cubierta por suelo cada cierto período de tiempo para evitar que lo residuos estén en contacto con el ambiente por lapsos muy prolongados (ver Figuras 2.3 y 2.4). De cada módulo se colectan los líquidos lixiviados para su posterior tratamiento en una planta diseñada para tal fin. El objetivo es que los lixiviados no migren a las napas de agua. Además, en algunos diseños el líquido lixiviado es tratado y re-inyectado a los módulos para acelerar la estabilización de la basura. Las unidades pueden tener sistemas de captación del metano generado por los residuos (ver Figura 2.5). En algunos casos el gas es utilizado para generar energía eléctrica. En los proyectos modernos, los RS poseen plantas de separación de residuos que dan trabajo a cooperativas que buscan dar valor al trabajo de quienes colectan restos en la basura para su venta. El RS comprende la materialización de un cierre al completarse el volumen del módulo. En la Figura 2.2 se presenta un esquema conceptual de un RS para la disposición de residuos sólidos urbanos (RSU).

Tabla 2.1: Origen de los residuos sólidos urbanos (Sharma, 2004)

Origen	Instalaciones, actividades o lugares donde se genera la basura	Tipo de basura
Residencial	Viviendas familiares y edificios de departamentos	Restos de alimentos, papel, cartón, plástico, telas, cueros, restos de jardinería, madera, vidrio, aluminio, latas, otros metales, cenizas, basuras especiales (incluye electrónica, baterías, aceites y caucho de cubiertas), etc.
Comercial	Comercios, restaurantes, mercados, oficinas, hoteles, estaciones de servicio, talleres, librerías, etc.	Papel, cartón, plástico, madera, restos de alimentos, vidrio, metal, basuras especiales (incluye electrónica, baterías, aceites y caucho de cubiertas).
Institucional	Colegios, hospitales, cárceles, oficinas gubernamentales	Igual que comercial
Construcción y demolición	Obras nuevas, remodelaciones, reparación de carreteras, etc.	Madera, acero, hormigón, etc.
Servicios municipales	Barrido de calles y veredas, limpieza y mantenimiento de parques, playas, etc.	Desechos de parques, playas, plazas, como hojas y ramas.
Plantas de tratamiento, incineradores municipales	Aguas residuales (domiciliarias e industriales), residuos industriales.	Desechos compuestos principalmente por barros.

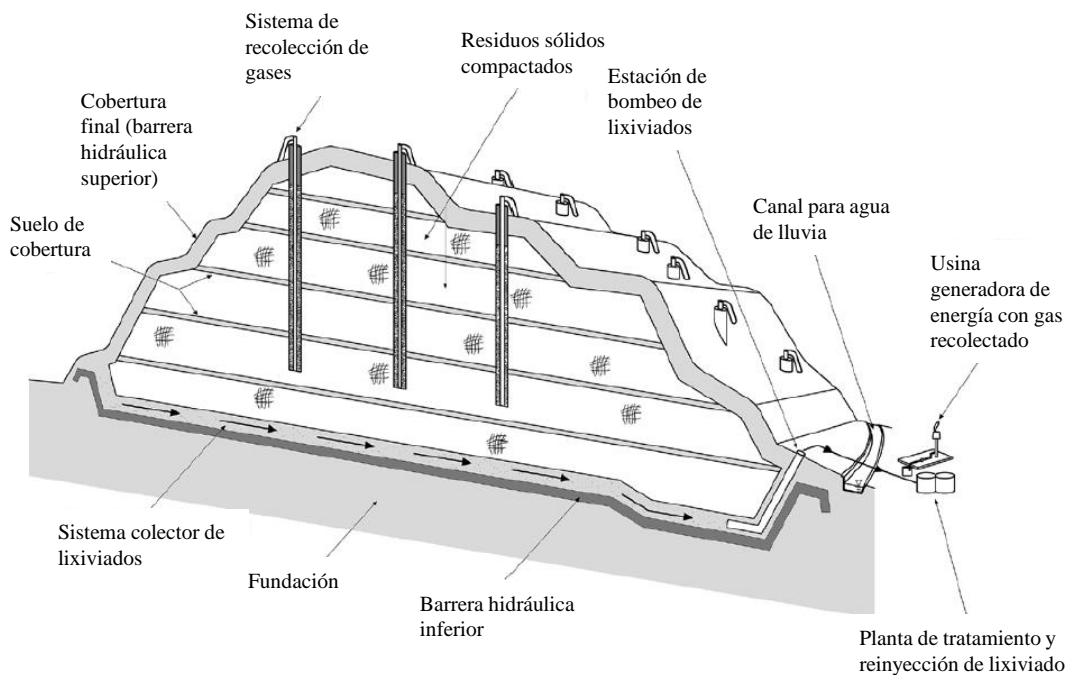


Fig. 2.2: Elementos básicos de un relleno sanitario moderno (Adaptado de Townsed, 2015)

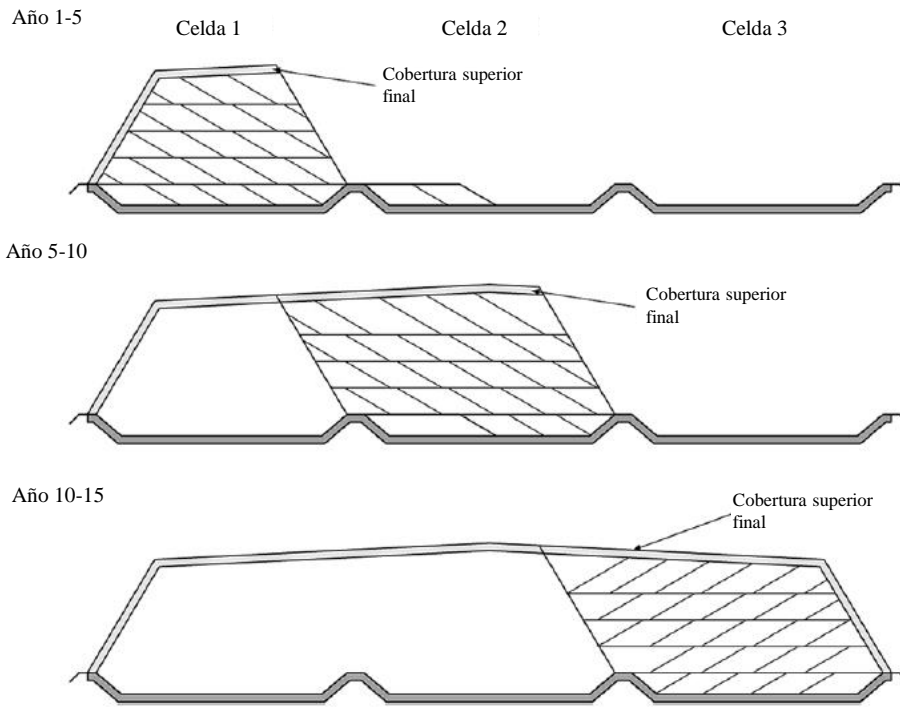


Fig. 2.3: Proceso de confección de celdas de un módulo a lo largo del tiempo (Adaptado de Townsed, 2015)



Fig. 2.4: Disposición de suelo de cobertura sobre residuos (Townsed, 2015)



Fig. 2.5: Extremo superior del sistema de captación de gas (Townsed, 2015)

### 2.2.3. Generación y circulación de lixiviados

Los lixiviados se generan de la humedad propia de la basura y cuando el agua de lluvia o de recirculación ingresa dentro del relleno y toma contacto con los residuos. Por gravedad, migran hacia el fondo del relleno donde son detenidos por las capas de la barrera hidráulica inferior. La barrera es confeccionada con cierta pendiente para facilitar el drenaje de los líquidos hacia tubos de recolección que los conducen a la planta de tratamiento. La acumulación de lixiviados genera una carga hidráulica sobre la barrera (ver Figura 2.6). Algunas normas internacionales limitan la carga hidráulica máxima a 30 cm para evitar filtraciones importantes hacia las napas [2].

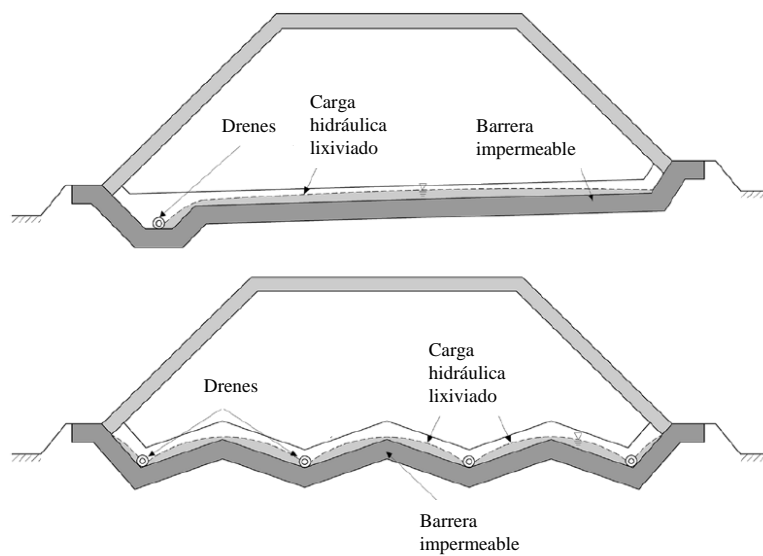


Fig. 2.6: Carga hidráulica sobre barrera impermeable inferior para distintas configuraciones (Adaptado de Townsed, 2015).

#### 2.2.4. Impermeabilización superior

El éxito del RS depende en gran parte de la correcta impermeabilización del módulo para evitar escape de gases y lixiviados. Dicha aislación se compone de una barrera hidráulica superior y una barrera hidráulica inferior.

La barrera hidráulica superior se ubica entre los residuos compactados y la atmósfera exterior. Sus funciones principales son aislar la basura del exterior, permitir la migración de gases para su extracción, y drenar el agua de lluvia para impedir que ingrese al módulo. De esta forma se limita la formación de lixiviado. De manera general se conforma con las siguientes capas:

- Capa resistente a la erosión: es el límite con el exterior. Suele ser cubierta con vegetación aunque en zonas áridas se colocan productos resistentes a la erosión.
- Capa drenante: estrato semipermeable que permite infiltrar y escurrir el agua de lluvia.
- Capa impermeable: compuesta por una geomembrana y suelo de baja conductividad hidráulica.
- Capa drenante: para recolectar el metano generado.
- Capa de emparejamiento: estrato de suelo compactado para emparejar la superficie en contacto con los residuos

En la Figura 2.7 se presenta un corte típico y esquema de funcionamiento de la barrera hidráulica superior. Las flechas indican la dirección de movimiento de los fluidos.

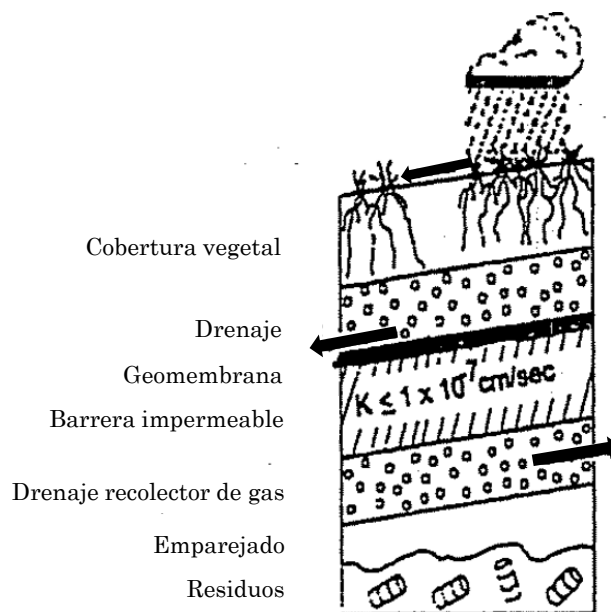


Fig. 2.7: Estructura de una cobertura superior típica de rellenos sanitarios (Adaptado de Sharma, H. 2004).

#### 2.2.5. Impermeabilización inferior

La barrera hidráulica inferior se ubica entre el suelo de fundación y los residuos compactados. Su función es retener los lixiviados de la basura para poder captarlos y así impedir su migración a las capas inferiores de suelo y/o napas de agua. Se componen típicamente de:

- Capa drenante de suelo seleccionado que permite el drenaje de lixiviados hacia los tubos recolectores y protege a la geomembrana.
- Geomembrana constituida con polietileno de alta densidad, soldada y anclada.

- Suelo compactado con alto contenido de arcilla de muy baja conductividad hidráulica.

En la Figura 2.8 se presenta un corte típico de una barrera hidráulica para un RS de residuos domiciliarios.

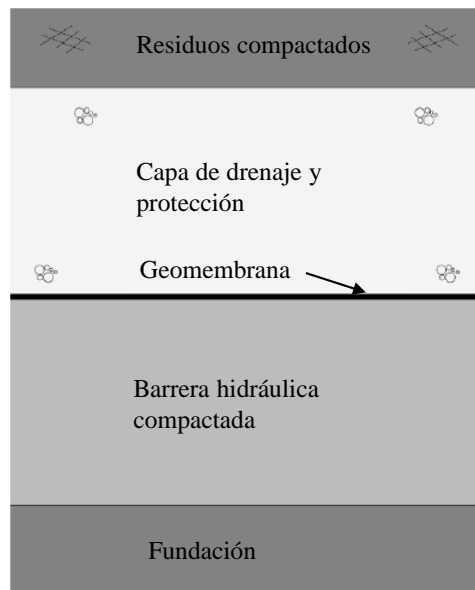


Fig. 2.8: Estructura de una barrera hidráulica típica de rellenos sanitarios (Adaptado de Townsend, 2015).

## 2.2.6. Aspectos de diseño de la barreras impermeables superior e inferior

### Barrera hidráulica inferior

Una barrera inferior eficiente debe tener una baja conductividad hidráulica que minimice la migración de lixiviados a napas de agua, una resistencia al corte suficiente para su estabilidad, y un potencial de hinchamiento aceptable para evitar fisuras por desecación que pueden generar un aumento de la conductividad hidráulica ( $k$ ). El proceso de diseño de la barrera impermeable se basa en encontrar un rango de humedad y peso unitario seco tal que el suelo compactado cumpla de manera simultánea con todos los requerimientos [3]. Algunos métodos de diseño buscan el equilibrio de dichas variables en función de la humedad de compactación. Los minerales de arcilla compactados en la rama seca adquieren una estructura floculada mientras que los compactados en la rama húmeda adquieren una estructura dispersa [4]. Las estructuras floculadas resultan en una red porosa conectada relativamente grande con lo cual poseen un valor de  $k$  mayor que las de estructura dispersa. Es decir que los suelos compactados en la rama húmeda tienen una menor  $k$  que los compactados en la rama seca. Por otra parte, los suelos compactados en la rama seca poseen mayor resistencia al corte que los compactados en rama húmeda.

Se desarrolló el método tradicional que implica conocer la conductividad hidráulica en función de la humedad para una cierta energía de compactación (ver Figura 2.9). De allí se establece el rango de humedad aceptable que permite alcanzar un valor mínimo de  $k$  (típicamente  $k_{max} = 10^{-9} m/s$  en barrera hidráulica inferior). Este proceso se extiende a otros requerimientos como la resistencia al corte y el potencial de hinchamiento. En la Figura 2.10 se muestra cualitativamente las zonas aceptables según cada requerimiento y la zona que cumple con todos los requerimientos de manera simultánea. Adicionalmente, se debe asegurar la estabilidad de taludes en los elementos de la barrera que posean inclinación necesaria para permitir el drenaje y recolección de lixiviados. Se recomiendan valores mínimos entre 1 y 3 %.

En las Figuras 2.11a y 2.11b se muestran la compactación de una barrera hidráulica inferior y la colocación de una geomembrana por encima de la arcilla compactada. En la Figura 2.12 se observa

una barrera hidráulica inferior simple (sin geomembrana) finalizada junto con el sistema de drenes de lixiviado.

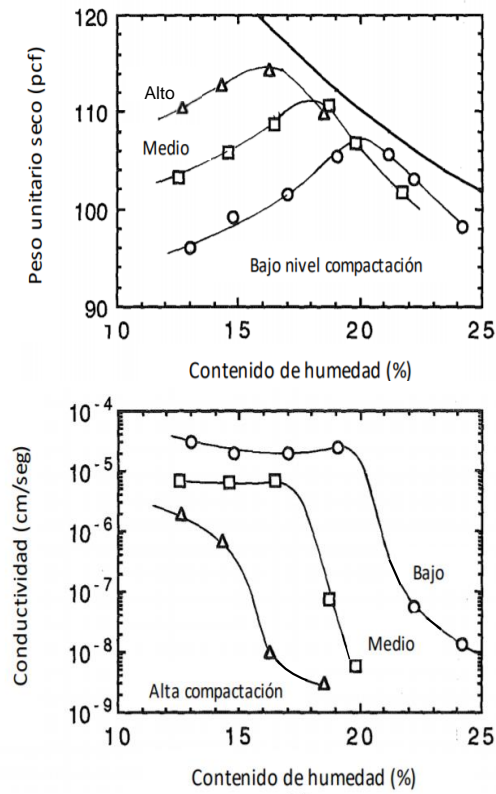


Fig. 2.9: Efecto de la energía de compactación y la humedad en la conductividad hidráulica (Adaptado de Mitchell et al., 1965).

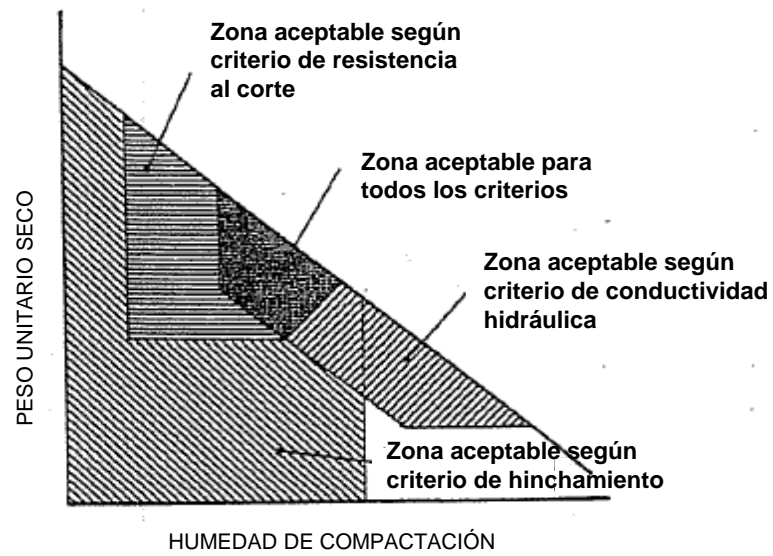


Fig. 2.10: Zona aceptable en función de los objetivos de diseño (Sharma et al., 2004).





(a)



(b)

Fig. 2.11: (a) Compactación de barrera inferior y (b) colocación de geomembrana (Townsed, 2015).



Fig. 2.12: Barrera inferior finalizada con sistema de drenes (Townsed, 2015).

### Barrera superior

La barrera hidráulica superior debe ser resistente a las variaciones diarias y mensuales de la temperatura, poseer una baja conductividad hidráulica (típicamente  $k_{max} = 10^{-7} m/s$  en barrera hidráulica superior), tolerar la circulación de vehículos, y ser estable a la falla de taludes. En general, el talud mínimo recomendado es 1 en 30 para evitar acumulación de agua. El talud máximo depende de la resistencia del material, su uso futuro y la altura máxima entre otros aspectos pero se recomienda no exceder una inclinación de 1 en 3. Se recomienda un espesor mínimo de 60 cm y en su diseño aplican los mismos criterios mencionados para la capa compactada impermeable de las barreras inferiores.

En la Figura 2.13b se observa un RS cerrado con cobertura vegetal y sistema de recolección de gases.



Fig. 2.13: (a) Barrera hidráulica superior en construcción y (b) cierre finalizado con cobertura vegetal y sistema recolector de gases.

### 2.2.7. Marco y requerimientos normativos para la confección de RS

La ley nacional de RSU (25.916) establece que son los municipios los encargados de gestionar la disposición de residuos generados en sus jurisdicciones. Sin embargo los municipios tienen serias dificultades para gestionar los RSU de manera ambiental y socialmente adecuada. Una razón es que los municipios poseen agudos problemas presupuestarios y de recaudación. Otro inconveniente es que la mayoría no posee normativa adecuada para regular la actividad. Por ello, la gran mayoría de los municipios del país poseen BCA como sistema de disposición final. En cuanto a construcción y operación de RS, no hay una normativa nacional que iguale a todas las provincias[5]. En la práctica suele utilizarse como referencia la Resolución 1143/02, de la Provincia de Buenos Aires. En este contexto la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (SAyDS) implementó en el año 2005 la Estrategia Nacional para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos (ENGIRSU). Este plan busca valorizar y gestionar de manera sustentable cada etapa del tratamiento de los RSU desde la recolección hasta la disposición final. Entre los diversos objetivos se pretende eliminar los BCA y reemplazarlos por RS. En el marco de la ENGIRSU, la SAyDS ejecuta el subprograma Plan de Gestión Integral de los RSU (PGIRSU) para ejecutar los objetivos propuestos en la ENGIRSU. El PGIRSU es financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) mediante el préstamo BID 3249/ OC-AR. En junio de 2020 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible aprobó el reglamento operativo correspondiente al PGIRSU de dicho préstamo. Este reglamento establece criterios mínimos para el diseño, construcción, operación y cierre de RS y tiene aplicación prioritaria respecto de las normas locales que se contrapongan a sus disposiciones [5].

En el ámbito internacional sirven de referencia las normas elaboradas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), la Agencia de Protección Ambiental de Australia, la Agencia de Protección Ambiental de Irlanda, y las directivas del Consejo de la Unión Europea (CEE). En la Tabla 2.2 se resume para cada normas las especificaciones exigidas para cobertura inferior y superior.

Tabla 2.2: Especificaciones de diseño para barreras impermeables de rellenos sanitarios de RSU según distintas normas.

Norma/Res.	Barrera Inferior		Barrera Superior		Requiere Geomembrana
	Kadm	Espesor	Kadm	Espesor	
	[m/s]	[cm]	[m/s]	[cm]	
CEE	10 <sup>-9</sup>	100	-	-	No indica
USEPA	10 <sup>-9</sup>	60	10 <sup>-7</sup>	60	Si
EPA Australia	10 <sup>-9</sup>	100	10 <sup>-9</sup>	60	Si (>20.000 ton/año)
EPA Irlanda	10 <sup>-9</sup>	100	10 <sup>-9</sup>	60	Si
R1134/20 Buenos Aires	10 <sup>-9</sup>	60/100	10 <sup>-9</sup>	40	Si (en barrera inferior de 60)
R128/04 Santa Fe	10 <sup>-9</sup>	60	10 <sup>-9</sup>	60	No indica
Reglamento PGIRSU - Anexo IV	10 <sup>-9</sup>	60	10 <sup>-9</sup>	40	Si (sobre barrera inferior).

### 2.3. Interacción fluido-partícula

Las barreras impermeables de material compactado se componen generalmente de una mezcla de materiales previamente evaluada. Uno de los principales requisitos es cumplir con una baja conductividad hidráulica. Por ello, el empleo de arcillas compactadas de alta plasticidad ha sido por muchos años el tipo de barrera estándar más utilizado. Las partículas de suelo tamaño arcilla interactúan con los fluidos permeantes de distinta naturaleza química (agua de lluvia, lixiviados compuestos orgánicos, etc) modificando la conductividad hidráulica, la estabilidad volumétrica y la resistencia al corte de la barrera. Estas interacciones se vuelven significativas cuando el contenido de finos aumenta.

La fase sólida del suelo contiene distintas proporciones de minerales cristalinos arcillosos y no arcillosos, arcilla no cristalina, materia orgánica y sales precipitadas. Todos ellos interactúan con el agua presente en el suelo. Sin embargo la interacción del agua con las partículas de arcilla es la más significativa y la que más influye en la estabilidad volumétrica, el comportamiento a compresión, y la conductividad hidráulica del suelo. Una pequeña proporción de arcilla incide en las propiedades del suelo en una magnitud mayor a su porcentaje [4]. El término arcilla puede resultar ambiguo ya que refiere tanto al tamaño de las partículas como al mineral. En cuanto al tamaño se denomina arcilla a las partículas de diámetro teórico menor a  $2\mu m$ . Como mineral refiere a las partículas que se distinguen por tener un tamaño pequeño, carga eléctrica neta negativa, presentar plasticidad cuando se le adiciona agua, y poseer gran superficie específica. De aquí en adelante el término arcilla hace referencia a la segunda definición. Los minerales de arcilla son aluminosilicatos cuya estructura cristalina es combinación de dos unidades simples: el tetraedro de silicio más oxígeno y el octaedro de aluminio más hidroxilo (Fig.2.14).

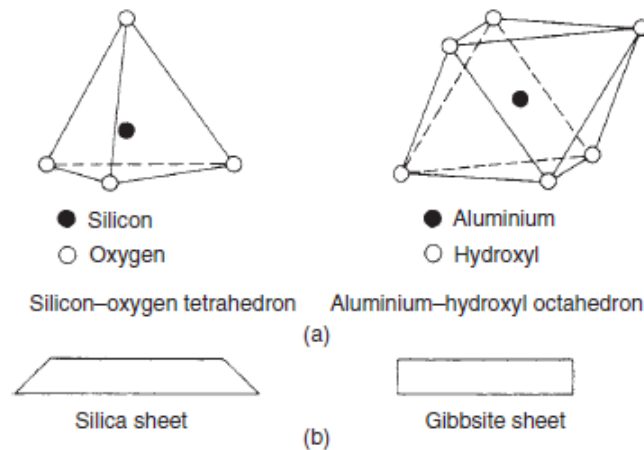


Fig. 2.14: Estructuras básicas de los minerales de arcilla.

Estas unidades no existen individualmente si no que se combinan para formar estructuras de tipo hoja. Los tetraedros se unen compartiendo oxígenos para formar hojas de sílice y los octaedros se unen compartiendo hidroxilos para formar hojas de gibsita. La combinación de hojas de sílice y gibsita forma capas y la unión de estas capas conforma los distintos minerales de arcilla.

La hoja de gibsita es eléctricamente neutra pero la hoja de sílice posee carga neta negativa. Este déficit de carga positiva se debe en gran parte a que el  $\text{Si}^{4+}$  y el  $\text{Al}^{3+}$  son sustituidos por cationes de menor valencia generando así una carga neta negativa. Este proceso se denomina sustitución isomórfica [6]. El enlace entre las distintas hojas que forman una capa es muy fuerte. Sin embargo, los enlaces que mantienen unidas a las distintas capas entre sí son variados, y pueden ser lo suficientemente débiles para que el comportamiento químico y físico de la arcilla se vea influenciado por los cambios en las condiciones ambientales (contenido de humedad, propiedades químicas del fluido con el que interactúa, etc). Existen cinco tipos posibles de enlaces entre capas [4]:

- Las capas eléctricamente neutras se unen entre sí por fuerzas de Van der Waals.
- En minerales como la caolinita se desarrollan enlaces tipo puente de hidrógeno en la superposición de planos de oxígenos y hidroxilos de las sucesivas capas.
- Al enfrentarse dos capas de silicatos electricamente neutras se mantienen separadas por moléculas de agua de gran momento dipolar que a su vez se unen por puentes de hidrógeno.
- Para preservar la neutralidad eléctrica dada por la sustitución isomórfica, distintos cationes ingresan y quedan retenidos entre capas en las superficies y bordes de las partículas. Estos cationes pueden ser o no intercambiables. Los cationes intercambiables no están fijos y la cantidad de ellos define la capacidad de intercambio catiónico del mineral (CIC). En las illitas, cationes  $\text{K}^+$  están fijos y se ubican entre capas formando una estructura fuerte que no se separa con la presencia de agua u otros líquidos polares.
- Cuando la densidad de carga superficial es moderada como en la montmorilonita, las capas adsorben moléculas de agua y cationes hidratados lo que deriva en separación y expansión de las capas ya que el enlace es débil.

En la Fig. 2.15 se presentan los modelos de los principales minerales de arcilla.

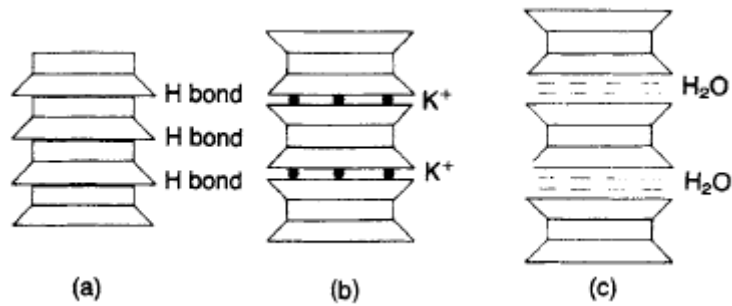


Fig. 2.15: Minerales de arcilla: a) Caolinita b) Illita c) Montmorilonita.

El agua es fuertemente atraída por los minerales de arcilla. Los minerales cuyas uniones entre capas tienen característica débil aumentan su volumen al interactuar con el agua y los iones disueltos que contenga. Los posibles mecanismos de interacción fluido-partícula que se conocen en la literatura [4] se describen a continuación y se presentan en la Figura 2.16 en forma esquemática.

- Puente de hidrógeno: generado por la atracción de los átomos de oxígeno  $O^{2-}$  presentes en la arcilla y los átomos de hidrógeno  $H^+$  de la molécula de agua ( $H_2O$ ) o atracción de los átomos de hidrógeno de grupos oxidrilos ( $OH^-$ ) presentes en la arcilla y los átomos de oxígeno de la molécula de agua.
- Hidratación de los cationes de intercambio: los cationes hidratados son atraídos por las superficies negativas de la arcilla.
- Atracción por ósmosis: la concentración de cationes aumenta con la proximidad a la superficie de arcilla. Debido a ello, las moléculas de agua tienden a difundirse hacia las caras de arcilla para igualar la concentración de la solución.
- Atracción entre dipolos y superficies con carga eléctrica: generado por la re-orientación de la molécula de agua de carácter dipolar presente en el campo eléctrico generado por las caras de la superficie de las partículas de arcilla, cuya acción disminuye a mayor distancia de la arcilla.
- Atracción por fuerzas de London: la fluctuación en la nube de electrones de la molécula de agua induce a la formación de un dipolo transitorio que es atraído a la superficie de la arcilla.

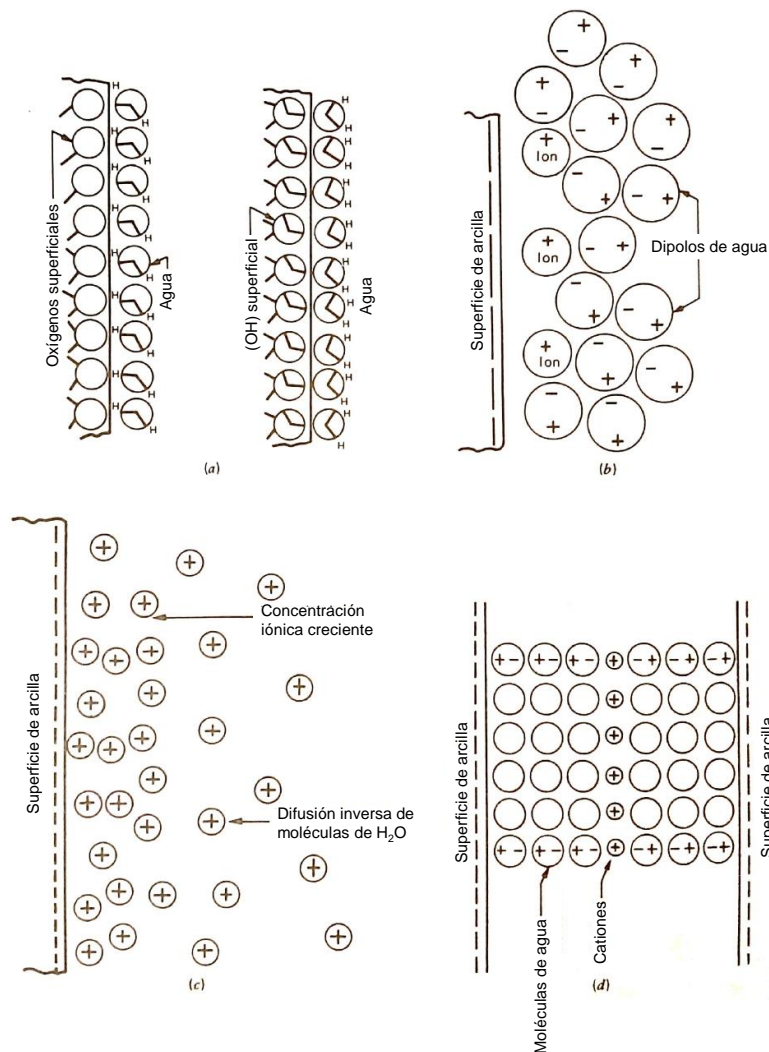


Fig. 2.16: Mecanismos posibles de la adsorción de agua en arcillas. a) Puente de hidrógeno b) Hidratación de iones c) Atracción por ósmosis d) Atracción de dipolos. (Adaptado de Mitchell, 1993)

Las moléculas de agua que se encuentran íntimamente ligadas a las partículas sólidas por fuerzas electroquímicas constituyen lo que se denomina agua adsorbida. La interacción del fluido con la superficie de arcilla según los mecanismos mencionados modifica la estructura del agua adsorbida ya que existe un orden molecular mayor al del agua líquida aunque menor al del agua en estado sólido. Esto implica que algunas propiedades como el punto de fusión y la densidad en función de la temperatura se vean modificadas. Sin embargo diversos estudios comprobaron que la viscosidad del agua adsorbida es la misma que la del agua libre. De esta manera, la ley de Darcy es válida en arcillas saturadas de alta plasticidad [7][8].

### Doble capa difusa

La superficie con carga eléctrica negativa de las arcillas y el conjunto de cationes hidratados atraídos a dicha superficie conforman lo que se denomina *doble capa difusa*. Los cationes adsorbidos por la superficie de arcilla presentan una concentración elevada que disminuye considerablemente a mayor distancia y alcanza la electroneutralidad en el campo lejano, tal como se indica en la Figura 2.17.

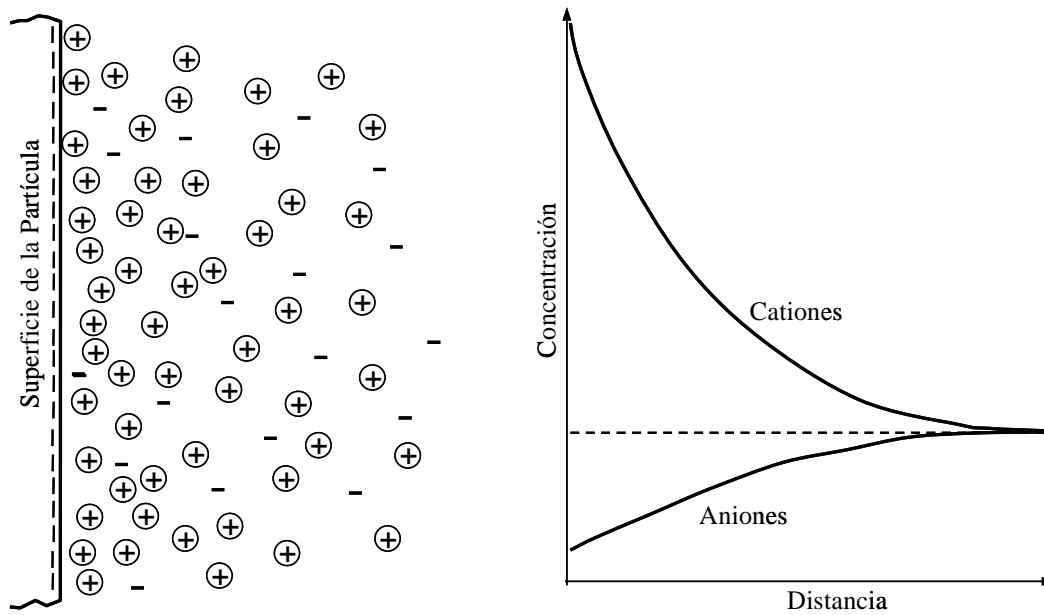


Fig. 2.17: Distribución de iones adjacentes a la superficie de arcilla según el concepto de doble capa difusa (Adaptado de Mitchell, 1993).

Se propusieron distintos modelos para describirla matemáticamente. El más aceptado es el modelo de Gouy-Chapman (Gouy, 1910; Chapman, 1913). A continuación se presentan algunos detalles del modelo que son útiles en este trabajo. El modelo desarrollado para partículas planas asume las siguientes hipótesis: a) Los iones son puntos de carga y no interactúan entre ellos. b) La carga en las partículas está uniformemente distribuida. c) La superficie de la partícula es plana y su dimensión predomina por sobre el espesor. d) La permitividad del medio es independiente de la posición.

La ecuación de Poisson relaciona el potencial  $\Psi$ , la densidad de carga  $\rho$ , y la distancia  $x$  para el caso unidimensional según la siguiente ecuación:

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.1)$$

siendo  $\epsilon$  la permitividad estática del medio. A su vez, la densidad de carga se puede calcular a partir de la valencia iónica y la concentración de manera tal que:

$$\rho = \epsilon \sum v_i n_i \quad (2.2)$$

siendo  $v$  la valencia iónica y  $n$  la concentración iónica. La concentración de iones (iones/m<sup>3</sup>) del tipo  $i$ ,  $n_i$  en un campo de fuerzas en equilibrio se describe con la ecuación de Boltzmann:

$$n_i = n_{i0} e^{\frac{E_{i0} - E_i}{kT}} \quad (2.3)$$

siendo  $E$  el potencial eléctrico de los iones inmersos en el campo eléctrico generado por la superficie negativa.

Combinando (2.3) con (2.2) y reemplazando en (2.1) y asumiendo un potencial eléctrico  $<25\text{mV}$  y cationes y aniones de la misma valencia se obtiene la ecuación diferencial de Poisson-Boltzmann en su forma simplificada:

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} = K^2\Psi \quad (2.4)$$

donde:

$$K^2 = \frac{2n_0e^2v^2}{\epsilon kT} \quad (2.5)$$

Esta ecuación diferencial se resuelve considerando las siguientes condiciones de borde: potencial nulo a distancia infinita y potencial fijo  $\Psi_0$  en la superficie de la partícula. Finalmente, la solución de la ecuación diferencial resulta:

$$\Psi = \Psi_0 e^{-Kx} \quad (2.6)$$

Según (2.6) el potencial decae exponencialmente con la distancia a la superficie de arcilla. El centro de gravedad de la carga difusa se encuentra a una distancia  $x = 1/K$  de la superficie por lo que la expresión queda:

$$\frac{1}{K} = \sqrt{\frac{\epsilon kT}{2n_0e^2v^2}} \quad (2.7)$$

Esta distancia es una medida del espesor de la doble capa difusa. Analizando (2.7) se ve que el espesor de la doble capa es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la concentración de iones e inversamente proporcional a la valencia. Un cambio de 100 veces en la concentración disminuye 10 veces el espesor de la doble capa. Por otra parte, el espesor de la doble capa difusa varía en forma proporcional a la raíz cuadrada de la constante dieléctrica y la temperatura del fluido [4].

El modelo de Gouy-Chapman fue complementado con la teoría de Stern (1924) que tuvo en cuenta el tamaño finito de los cationes. La teoría de Stern indica que inicialmente el potencial decae linealmente de  $\Psi_0$  a  $\Psi_\delta$  y luego decae según lo desarrollado por la teoría de Gouy-Chapman como se ve en la Figura 2.18.

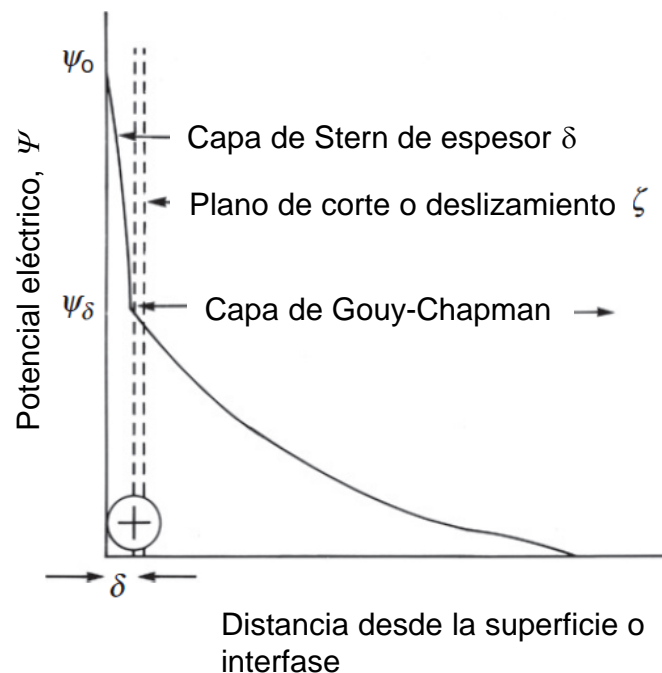


Fig. 2.18: Variación del potencial eléctrico en función de la distancia según Stern (1924). (Adaptado de Theng, 2012).

La capa difusa de las partículas se solapan entre si e interactúan eléctricamente generando fuerzas de repulsión electrostática. A mayor espesor de la doble capa difusa se desarrollan fuerzas repulsivas mas intensas y por consiguiente, a nivel macroscópico se registran mayores presiones de hinchamiento.[4].



## 2.4. Succión en suelos no saturados

En ciertas ocasiones, las barreras hidráulicas no se encuentran saturadas por lo que resulta necesario evaluar su desempeño en condición de saturación parcial. La termodinámica define a la succión como el estado de energía libre que posee el agua contenida en un suelo. También es interpretada como la energía requerida para remover una molécula de agua de la matriz de suelo por medio de la evaporación. La succión del suelo se denomina succión total y posee dos componentes que son la succión mátrica y la succión osmótica (ver Ecuación 2.8). La succión mátrica está asociada a fenómenos de capilaridad y la succión osmótica está asociada a las sales disueltas en el agua.

$$\Psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (2.8)$$

donde:

- $\Psi$  : succión total
- $(u_a - u_w)$  : succión mátrica
- $u_a$  : presión del aire intersticial
- $u_w$  : presión del agua intersticial
- $\pi$  : succión osmótica

### Succión mátrica

La succión mátrica está asociada al fenómeno de capilaridad en la interfase aire-agua y se indica en la Figura 2.20.

El ascenso de agua capilar se debe a la tensión superficial del agua generada por el desbalance de fuerzas moleculares en la interfase aire-agua. La ecuación de Young-Laplace (2.9) representa la relación entre la diferencia de presión  $(u_a - u_w)$  o succión mátrica en la interfase aire-agua y la tensión superficial  $T_s$  de una superficie curva con radios principales  $R_1$  y  $R_2$  (ver Fig. 2.19).

$$(u_a - u_w) = T_s \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.9)$$

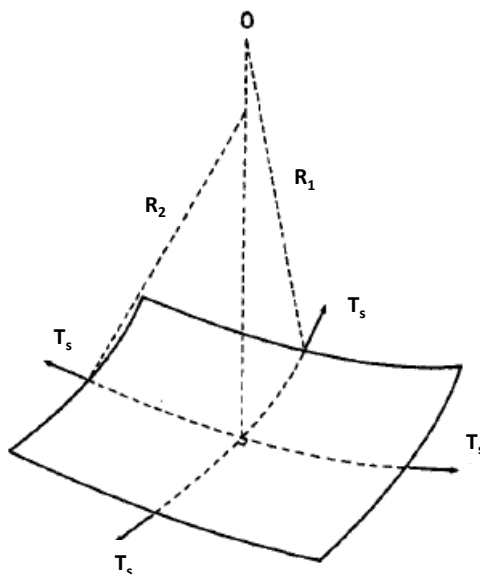


Fig. 2.19: Superficie de la interfase aire-agua curvada por la tensión superficial con sus dos radios principales (Adaptado de Fredlund, 1993).

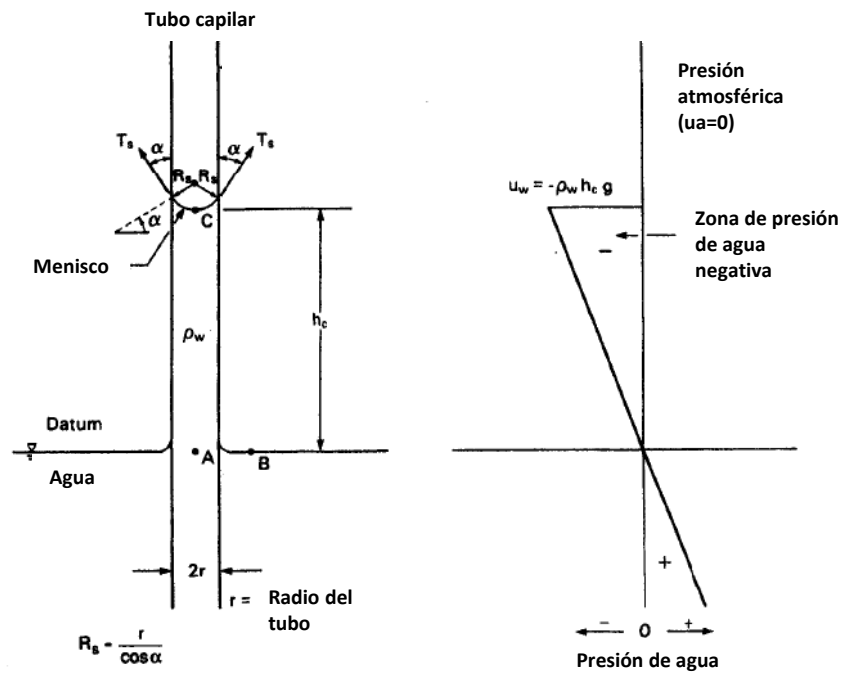


Fig. 2.20: Modelo físico del fenómeno de capilaridad (Adaptado de Fredlund, 1993).

Si el radio de curvatura es el mismo en todas direcciones entonces entonces  $R_1 = R_2 = R$  y la Ecuación 2.9 se convierte en 2.10.

$$(u_a - u_w) = 2 \frac{T_s}{R} \quad (2.10)$$

La Ecuación 2.10 se denomina Modelo de capilaridad de Kelvin. En un modelo simplificado, se puede considerar a los poros del suelo como vacíos esféricos de radio  $R$ . De esa manera, la ecuación muestra que a menor radio de poros del suelo, mayor será la succión mátrica. La succión generada por la tensión superficial es equilibrada por la adhesión de las moléculas de agua al suelo que a su vez reacciona con fuerzas de compresión. Como resultado, a menor radio de poros mayores serán las fuerzas de compresión en el suelo.

La Figura 2.21 representa geometrías simplificadas de la interfase aire-agua que puede formarse en la matriz de un suelo no saturado.

### Succión osmótica

En la mayoría de los casos el agua intersticial contiene sales disueltas. La tendencia de la solución a equilibrar la concentración de sales con respecto al agua atmosférica libre de sales genera una disminución de la presión de vapor en la interfase aire-agua. La diferencia entre dicha presión y la presión de vapor de agua que existe sobre una superficie de agua destilada en equilibrio higrótérmico se denomina succión osmótica.

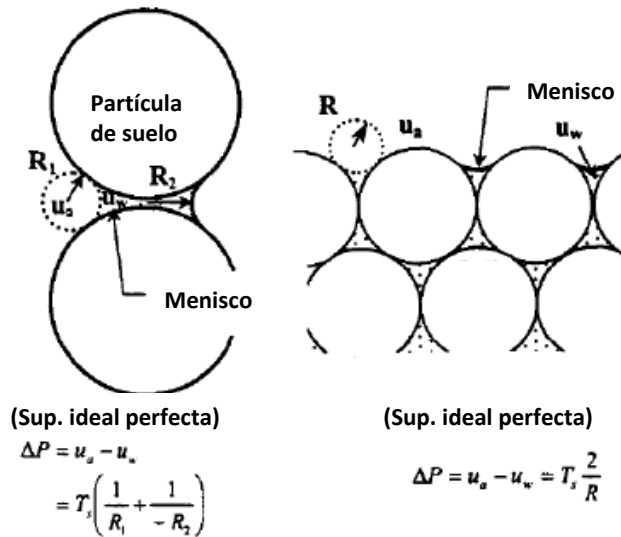


Fig. 2.21: Diferencia de presión según la ecuación de Young-Laplace para modelos simplificados de suelos (Adaptado de Fredlund 2003).

### 2.4.1. Curva de retención característica

La curva de retención de agua del suelo (SWCC) relaciona en forma biunívoca el grado de saturación y la succión mátrica de un suelo. Su conocimiento es determinante al momento de efectuar simulaciones numéricas de flujo en condición de saturación parcial. En la Figura 2.22 se presentan los elementos típicos de una curva de retención y los estados del suelo en cada zona de la curva.

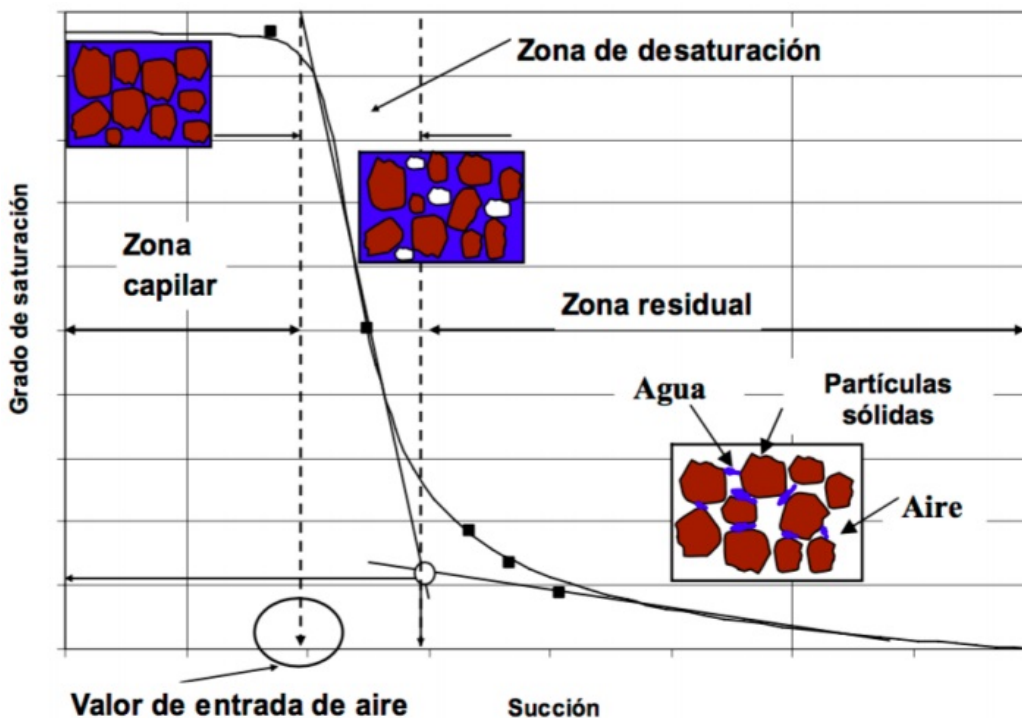


Fig. 2.22: Estados del suelo en distintas zonas de la curva (adaptado de Vanapalli y Fredlund 2000).

La SWCC está compuesta por tres zonas: zona capilar, zona de desaturación y zona residual.

- Zona capilar: En esta zona el suelo se encuentra saturado. Finaliza cuando el suelo llega a la presión de entrada de aire.
- 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 conductividad hidráulica 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.

Los parámetros que describen a la curva de retención son:

- Presión de entrada de aire ( $S_{ae}$ ): es la succión mátrica a la que el aire comienza a ingresar a los macroporos del suelo.
- Saturación residual ( $S_{res}$ ): contenido de agua que requiere valores de succión mátrica extremadamente altos para que sea extraída. Es el grado de saturación correspondiente al agua adsorbida a las partículas de suelo.
- Distribución de tamaño de poros ( $\lambda$ ): se define como la pendiente negativa del grado de saturación en función de la succión mátrica.

### Curvas unimodales y bimodales

Las curvas de retención se clasifican según la forma que adoptan. Cuando el suelo posee un único nivel o diámetro de poros entorno a un mismo orden de magnitud se generan curvas del tipo unimodal como la observada en la Figura 2.22. Cuando el suelo posee dos o más densidades de tamaño de poros de varios órdenes de magnitud distintos, las curvas pueden ser bimodales o multimodales [9]. Ejemplos de éstas últimas pueden ser suelos limosos o arcillosos fisurados o mezclas de arena y materiales arcillosos.

La forma de la curva de retención está directamente relacionada con la distribución del tamaño de poros y con la curva granulométrica. La Figura 2.23a), muestra la posible estructura de un suelo con distribución granulométrica bien graduada, su distribución de tamaño de poros acumulada y densidad de tamaño de poros. La curva de distribución de tamaño de poros es unimodal y por lo tanto la curva de retención será unimodal ya que hay un único sistema de poros. La Figura 2.23b) muestra la posible estructura de un suelo con distribución granulométrica con “saltos”, su distribución de tamaño de poros acumulada y densidad de tamaño de poros. En este caso, la curva de distribución de tamaño de poros es bimodal y por lo tanto la curva de retención será bimodal ya que hay dos sistemas de poros gobernados por la fracción gruesa (poros intergranulares) y la fracción fina (poros intragranulares) [9].

En mezclas arena-arcilla pueden presentarse curvas bimodales ya que son suelos que poseen simultáneamente sistemas de poros denominados intergranulares e intragranulares. Los poros intergranulares son aquellos espacios que forman las partículas de arena y arcilla entre sí. Los poros intragranulares son aquellos espacios que existen entre las láminas de arcilla. Estos últimos poseen un tamaño de varios ordenes de magnitud menor que los primeros por lo que requieren de la aplicación de elevados valores de succión para poder extraer el agua que almacenan[10].

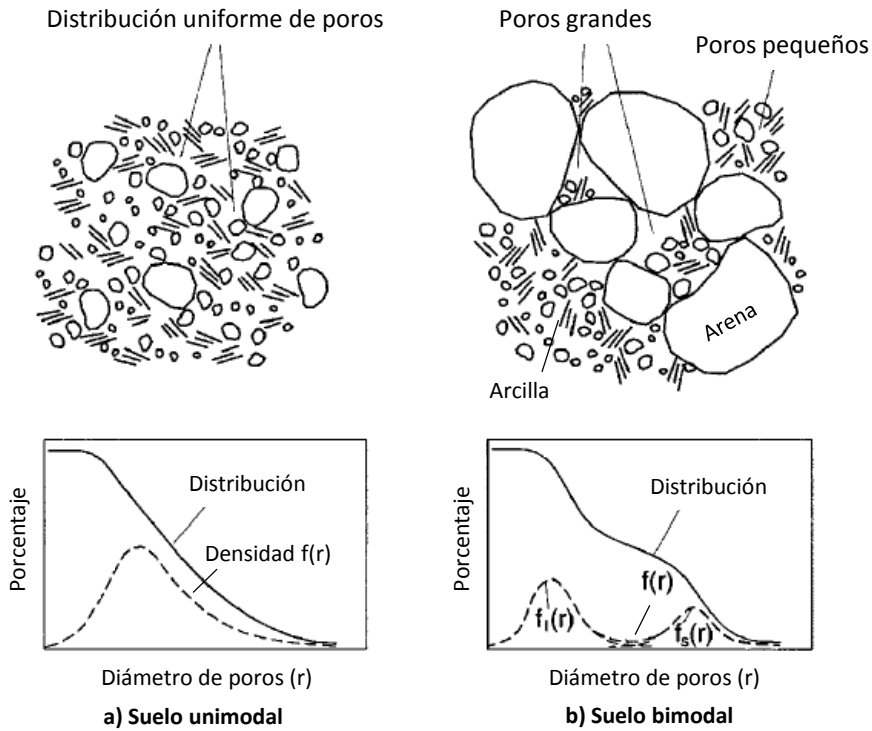


Fig. 2.23: Estructuras, curvas de distribución de poros y densidad de poros para suelos unimodales y bimodales (Adaptado de Zhang et al., 2005).

En la Figura 2.24 se muestra una curva bimodal típica con sus elementos. Se compone de dos valores de entrada de aire  $Sae_1$  y  $Sae_2$  y dos valores de humedad residual  $Sres_1$  y  $Sres_2$  correspondientes a cada estructura de poros presente en el suelo. La primera humedad residual representa tanto la humedad residual de sistema de macro poros como el máximo contenido de humedad del sistema de micro poros. A su vez, la curva presenta una primera caída con pendiente  $\lambda_1$  correspondiente a la extracción de agua de los poros intergranulares y una segunda caída con pendiente  $\lambda_2$  correspondiente a la extracción de agua de los poros intragranulares[11].

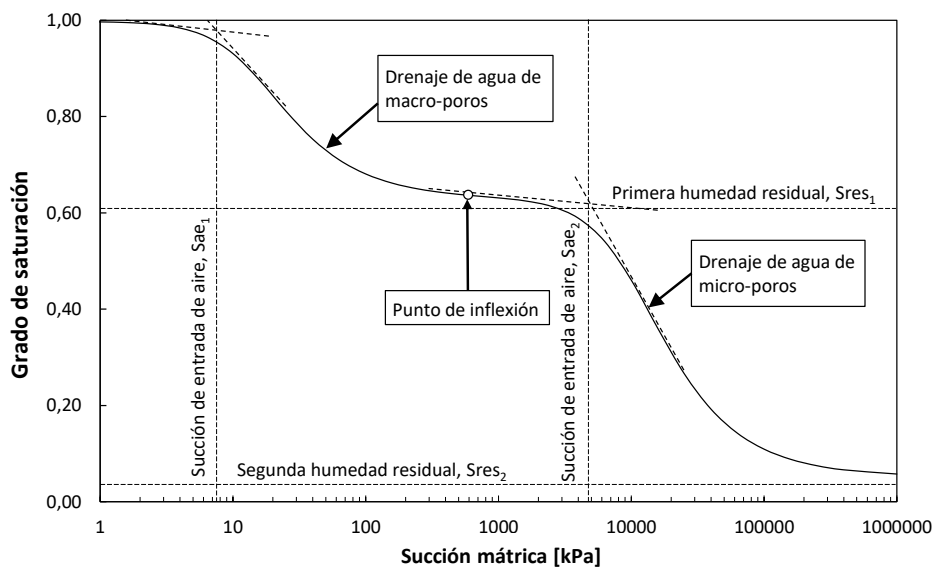


Fig. 2.24: Elementos típicos de una curva de retención característica bimodal.

## 2.4.2. Resistencia al corte

Los suelos no saturados poseen una resistencia al corte adicional a la que tienen cuando se encuentran saturados debido a la existencia de succión. Esto se expresa matemáticamente en la ecuación de falla de Mohr Coulomb extendida para suelos no saturados en la que se considera el aporte de la succión mátrica a la resistencia al corte (ver Ecuación 2.11)

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (2.11)$$

donde:

- $c'$  : cohesión efectiva del material con succión mátrica nula.
- $\tau$  : esfuerzo de corte en el plano de falla.
- $\sigma$  : esfuerzo normal en el plano de falla.
- $\phi'$  : ángulo de fricción interna efectivo del material relacionado con el esfuerzo normal neto.
- $\phi^b$  : ángulo que indica la tasa de incremento de la resistencia al corte relativo a la succión mátrica.
- $(u_a - u_w)$  : succión mátrica.

En la Figura 2.25 se muestra la superficie de falla que genera la Ecuación 2.11. Cuando la succión mátrica es nula ( $u_a - u_w = 0$ ) se obtiene la recta de falla de la teoría de Mohr-Coulomb para suelos saturados. Cuando la succión mátrica aumenta en valor absoluto, también lo hace la resistencia según el ángulo  $\phi^b$ .

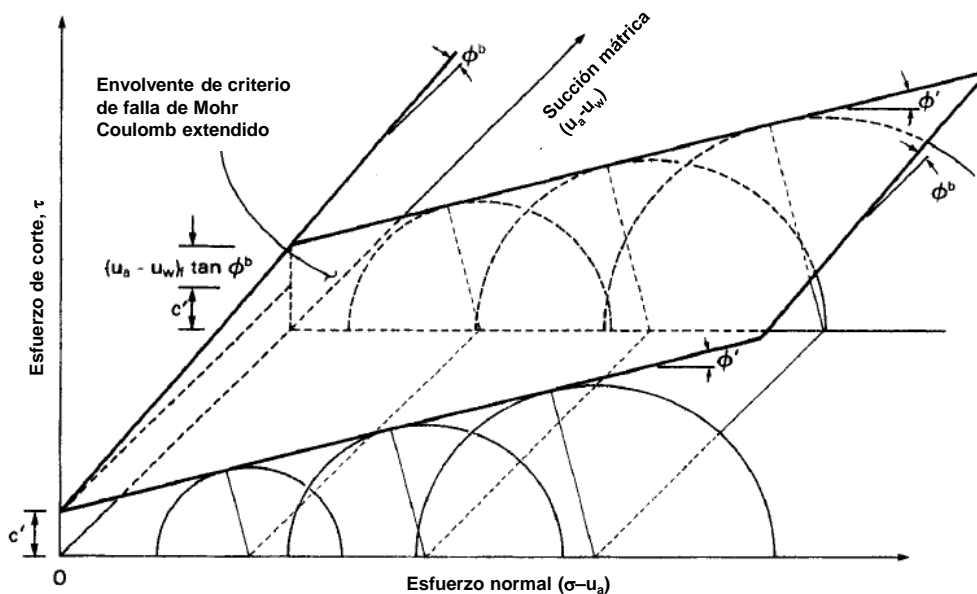


Fig. 2.25: Superficie de falla extendida de la teoría de Mohr-Coulomb para suelos no saturados (adaptado de Fredlund, 1993).

## 2.5. Poliacrilamida

La poliacrilamida pura (PAM) es un homopolímero no iónico de elevado peso molecular sintetizado a partir de monómeros de acrilamida (AMD). En combinación con otros comonómeros produce la poliacrilamida catiónica (CPAM) y la poliacrilamida aniónica (APAM) que son las variantes iónicas del mismo elemento. En las Figuras 2.26 y 2.27 se presentan las estructuras moleculares de cada uno de los elementos mencionados.

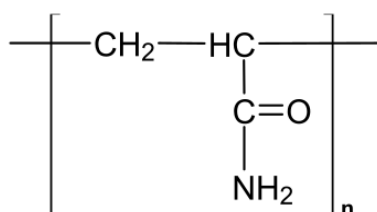


Fig. 2.26: Estructura molecular de la poliacrilamida no iónica.

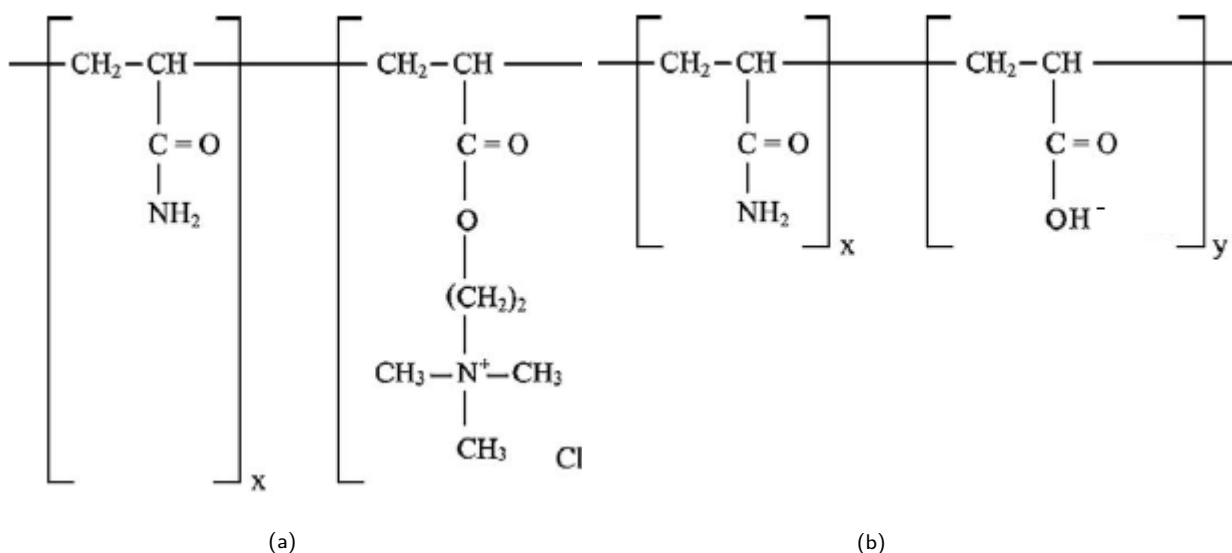


Fig. 2.27: Estructura molecular de la poliacrilamida catiónica (a) y la poliacrilamida aniónica (b).

Los parámetros más importantes de la PAM y que definen su interacción con el medio en el que se halle inmerso son la carga, la densidad de carga y el peso molecular. La carga está dada por el tipo de grupo funcional del comonómero y puede ser positiva o negativa. La densidad de carga se define como el porcentaje de monómeros que contienen el grupo funcional cargado en relación al total de monómeros de la molécula. El peso molecular refiere al largo de la cadena molecular. A mayor peso molecular se tienen cadenas más largas. La acrilamida posee una reactividad química tal que permite generar polímeros en un rango amplio de dichos parámetros. La PAM en estado sólido se presenta como un polvo de partículas frágiles y alargadas de color blanco. Es altamente higroscópica y al absorber agua forma un hidrogel. En general se vuelve cada vez más higroscópica a medida que el carácter iónico del polímero aumenta. En la Tabla 2.3 se presentan algunas propiedades físicas de la PAM sólida no iónica. Al disolverse en agua, la PAM forma moléculas de cadenas lineales. La extensión de la cadena depende principalmente del pH y de la concentración de sales de la solución. Cuando estos valores son altos, las cadenas abandonan su forma extendida y se enrollan o curvan ocupando mayor volumen aparente.

La PAM puede sufrir degradación bajo el efecto de rayos UV o esfuerzos mecánicos excesivos. La degradación de la PAM implica una reducción del peso molecular por corte de las cadenas

Tabla 2.3: Propiedades físicas de la poliacrilamida sólida.

Propiedades de la Poliacrilamida Sólida	
Densidad	1.302 g/cm <sup>3</sup> (23°C)
Punto de fusión	195°C
Cristalinidad	Amorfo (Alto peso molecular)
Solventes	Agua-Etilenglicol-Formamida - otros fluidos polares
No Solventes	Hidrocarburos-Alcoholes

moleculares. Esto disminuye la capacidad de la PAM para mantener unidas y aglomeradas a las partículas con las que interactúa.

La poliacrilamida en cualquiera de sus variantes posee niveles muy bajos de toxicidad siendo la APAM la de menor nivel de las tres. Por el contrario, la AMD residual presente por una polimerización incompleta en la síntesis de PAM constituye una neurotoxina peligrosa con potencial carcinógeno. Normas y/o requerimientos en Estados Unidos y Europa limitan el contenido de AMD en un 0.1 % (*w/w*) para que el uso de la PAM sea seguro. Si bien todas las PAMs poseen cierto porcentaje de AMD la mayoría de las PAMs comerciales cumplen con este límite. [12][13][14].

### Aplicaciones de la Poliacrilamida

La poliacrilamida en sus variantes catiónica, aniónica y no iónica es utilizada en diversas ramas de la industria desde hace aproximadamente setenta años. Desde la introducción de la poliacrilamida aniónica con el producto "Krilium" de Monsanto en 1950 como acondicionador de suelo se diversificó en distintas aplicaciones[15][16][17][18][19]. Entre las principales se cuenta su uso como aditivo de riego en agricultura, tratamiento de aguas residuales, explotación de pozos de petróleo, estabilización de lodos de perforación y estabilización de suelos. En la Tabla 2.4 se resumen las principales aplicaciones. En la Figura 2.28 se observan ejemplos de la aplicación de poliacrilamida en solución.

Tabla 2.4: Aplicaciones industriales de la poliacrilamida. (Adaptado de Bavernik, 1994)

Industria	Aplicación
Producción de petróleo	Recuperación terciaria Cementación de pozos Lodos de perforación
Tratamiento de aguas	Coagulación y floculación Potabilización Remoción de metales pesados Desalinización
Agricultura	Incremento de capacidad de campo en suelos arenosos Disminución de erosión superficial Protección de canales
Construcción	Lodos de perforación Estabilización superficial
Fabricación de papel	Dispersante Agente de retención Deshidratación
Minería y producción de carbón	Deshidratación Procesos de clarificación Purificación de minerales





(a)



(b)

Fig. 2.28: (a) Aplicación de polímero previo a la compactación de suelos (b) Aplicación superficial en estabilización de taludes.

## 2.6. Mezclas suelo-APAM

La utilización de polímeros como adición para el tratamiento de suelos naturales fue estudiado por varios autores en pos de mejorar las propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas para distintas aplicaciones. A continuación se sintetizan las principales características y resultados obtenidos de distintas investigaciones [6][14][15][16][17][18][20][21][22][23][24][25][26][27][28].

### *Mecanismos de adsorción*

La interacción electrostática influye directamente en la adsorción del polímero a la arcilla. La capacidad de adsorción en minerales de montmorillonita e illita se da en el orden de polímeros catiónicos > no iónicos > aniónicos. La CPAM es fuertemente atraída por la carga negativa de la superficie de arcilla y conforma parte de la doble capa difusa. Los polímeros como la APAM son rechazados por la superficie de la arcilla ya que esta última posee carga neta negativa. Sin embargo investigaciones de los últimos treinta años muestran que aunque las cadenas de APAM no puedan aproximarse a dicha superficie, éstas se adsorben igualmente a las partículas de arcilla principalmente por alguno de los cinco mecanismos que se describen a continuación:

1. En condiciones de pH bajo, y/o concentraciones de electrolitos lo suficientemente altas el polímero se adsorbe por la presencia de cationes que actúan de puente entre el grupo electronegativo del polímero y la superficie negativa de la arcilla [20]. Esto se ilustra en la Figura 2.29.
2. En condiciones de pH ácido los bordes del cristal de arcilla adquieren carga neta positiva y los polianiones se adsorben a dichos bordes [27].
3. Otra unión posible consiste en la formación de un complejo entre el grupo electronegativo del polímero y el catión  $Al^{3+}$  interior [29][20].
4. Todos los polímeros sean iónicos o no, interactúan con los cationes presentes en las superficies de arcilla por fuerzas ion-dipolo que desarrollan los segmentos no cargados del polímero. Esto es posible ya que el grupo amida ( $CONH_2$ ) es dipolar [30].
5. El grupo amida de la poliacrilamida se protona y adquiere carga positiva con lo que interactúa con las superficies negativas de la arcilla [30][22].

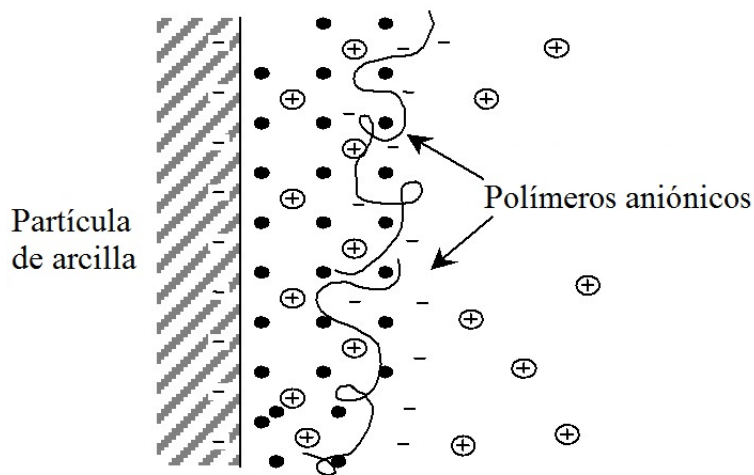


Fig. 2.29: Interacción APAM - arcilla (Adaptado de Theng, 1979).

Una vez que la PAM queda adsorbida a los minerales de arcilla es prácticamente imposible de remover [24]. Esto es importante ya que implica que las modificaciones obtenidas con la adición de polímero al suelo pueden perdurar en el tiempo. Los polianiones poseen una geometría alargada y abierta. Esto se debe a la repulsión electrostática entre los propios segmentos aniónicos del polímero. Esto le confiere al APAM la capacidad de enlazar partículas de diversos tamaños y formas. A mayor peso molecular, las cadenas del polímero adquieren mayor longitud aumentando así la unión entre agregados [23]. De estudios de adsorción se encontró que el polímero forma una red de cadenas poliméricas que rodea a los agregados [24]. En la Figura 2.30 se esquematiza el proceso de unión de agregados finos y gruesos.

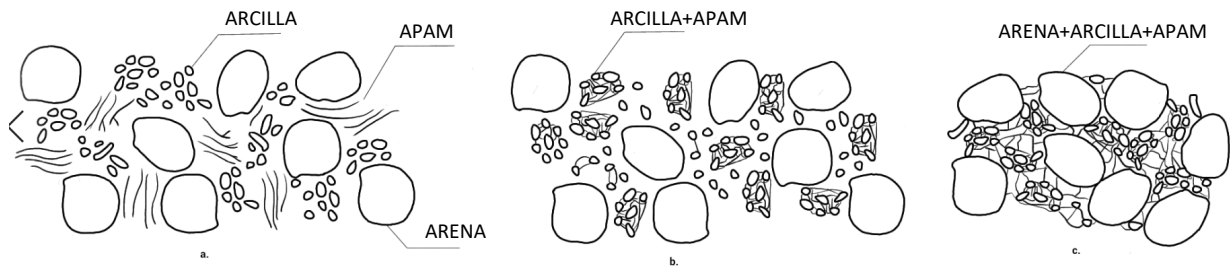


Fig. 2.30: Esquema ilustrativo de la interacción suelo-polímero.

En la Figura 2.31 se presenta un claro ejemplo de la interacción arcilla-APAM a nivel microscópico [26] en donde se observa la formación de “nudos” y una “red de APAM” que conecta a los agregados entre sí.

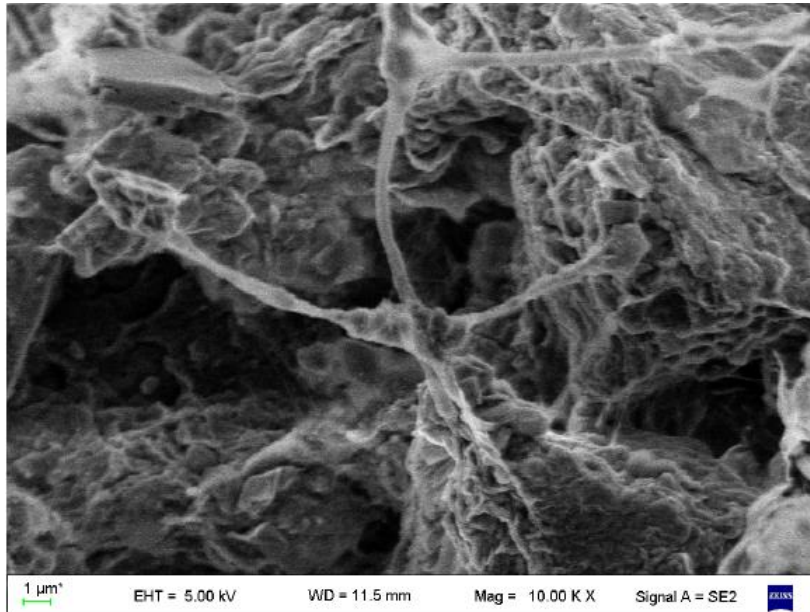


Fig. 2.31: APAM formando un nudo (Marti, 2015).

### *Resistencia a la compresión simple*

El uso de PAM como adición parece mejorar la resistencia y ductilidad de los suelos. Georgees[31] estudió mezclas grava-arena-arcilla con APAM al 0.002 % en peso de suelo para su uso como subbase en carreteras. Obtuvo mejoras entre 85 % y 94.3 % en valores UCS para tres mezclas con contenido variable de los tres elementos. Casagrande[25] obtuvo aumentos en la resistencia a compresión simple entre un 75 % y 162 % para mezclas 85 %arena+15 %arcilla con adición de APAM al 1.5 %, 2.5 % y 3.5 % de la fracción fina.

### *Conductividad hidráulica saturada*

La conductividad hidráulica saturada de arcillas guarda estrecha relación con la mineralogía del material, la densidad de carga superficial expuesta al fluido presente en los poros y la estructuración inicial de las partículas. Haase[29] realizó ensayos de conductividad hidráulica saturada en muestras de bentonita y caolinita con  $2 \text{ mgg}^{-1}$  de APAM para distintas relaciones de vacíos  $e$ . En la Figura 2.32 se reproducen los resultados de ambos ensayos. Se aprecia que la conductividad hidráulica es directamente proporcional a la relación de vacíos y que en ambos casos la incorporación de APAM no la modifica. La adición de CPAM aumentó los valores de conductividad hidráulica de la bentonita para todas las relaciones de vacíos pero no lo hizo en en la caolinita.

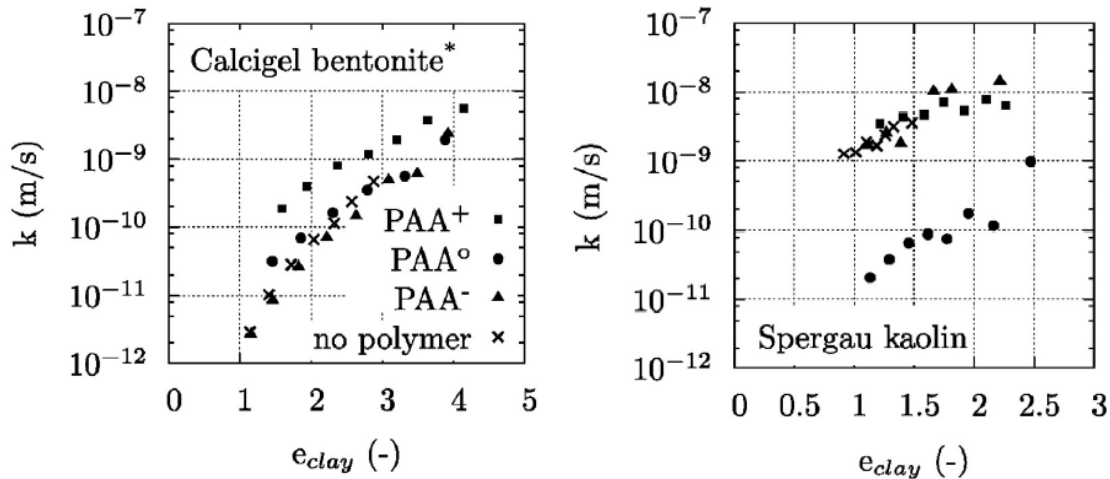


Fig. 2.32: Conductividad hidráulica saturada sin y con APAM. PAA<sup>-</sup> simboliza a la APAM y PAA<sup>+</sup> simboliza a la CPAM (Haase, 2015).

Casagrande[25] obtuvo resultados similares. Realizó ensayos de conductividad hidráulica saturada para la mezcla arena-arcilla sin APAM y con 1.5 %APAM en proporción de la fracción fina. Ambas muestras fueron compactadas con la misma relación de vacíos. Obtuvo un valor de conductividad hidráulica  $k=7.9 \cdot 10^{-10} \text{ms}^{-1}$  sin APAM y  $k=7.3 \cdot 10^{-10} \text{ms}^{-1}$  con APAM.

## 2.7. Mezclas Arena-Arcilla

El uso de mezclas compactadas de arena y arcilla es una práctica corriente en la confección de barreras hidráulicas de rellenos sanitarios. En estas mezclas, la fracción gruesa controla la resistencia al corte mientras que la conductividad hidráulica está controlada por las características físico-químicas de la fracción fina [32]. En el caso de arcillas potencialmente expansivas, la incorporación de arena también permite controlar la fisuración por desecación [33]. De esta manera, la combinación óptima para el diseño de una mezcla de fracción gruesa y fina deberá garantizar que los valores de conductividad hidráulica, resistencia, deformabilidad y otros aspectos sean aceptados por las normas de referencia. En primera instancia, la ejecución de ensayos Proctor para distintas proporciones arena-arcilla resulta un buen estimador inicial ya que la combinación óptima se halla próxima a maximizar el peso unitario seco máximo de las distintas proporciones.

La distribución de poros existente juega un rol fundamental en la elección de la mezcla óptima de gruesos-finos. Con un contenido de finos por debajo del óptimo, la arcilla expande pero no logra ocupar los vacíos propios de la matriz de arena por lo que la conductividad hidráulica y la densidad seca resultan similares a los de una arena. Con un mayor contenido de arcilla pero por debajo del óptimo los finos cubren a los granos de arena y bloquean los poros mas pequeños. La conductividad hidráulica disminuye drásticamente al aumentar el contenido de arcilla. En el porcentaje óptimo el contenido de arcilla es tal que al hinchar ocupa casi todos los poros interconectados. La conductividad hidráulica resulta muy similar a la de la arcilla sola y los granos de arena aún están en contacto entre sí por lo que pueden proporcionar resistencia al corte. El espacio intergranular de la fracción gruesa resulta muy similar al de una arena sola por lo que con la arcilla ocupando esos vacíos, se maximiza el peso unitario seco. Con un contenido de finos mayor al óptimo, la conductividad hidráulica es controlada por la arcilla alcanzando una asíntota. Los granos de arena quedan dispersos en la matriz de arcilla por lo que ya no pueden proporcionar resistencia al corte. La expansividad resulta la misma

que la de la arcilla sola y el peso unitario seco máximo desciende acercándose a la de la arcilla sola. En la Figura 2.33 se presentan diferentes fábricas de mezclas grueso-fino que guardan relación con lo expresado anteriormente.

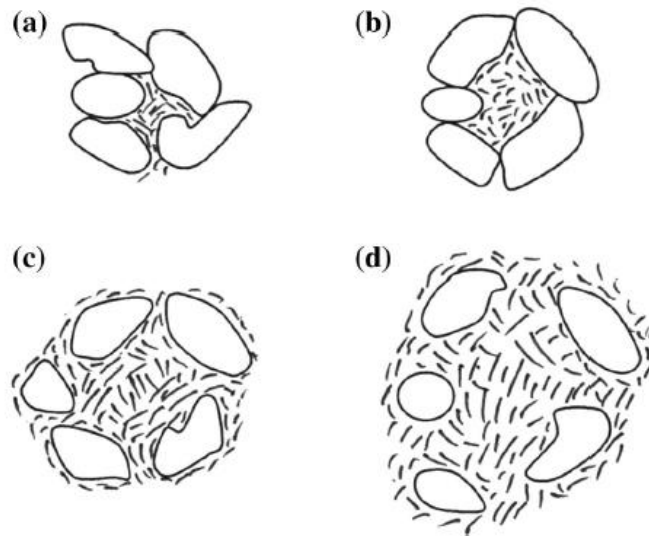


Fig. 2.33: Modelo de distintas disposiciones en la estructura de la mezcla. a) y b) Comportamiento dominado de la fracción gruesa. c) Combinación óptima. Los finos ocupan el espacio intergranular. d) Comportamiento dominado por la fracción fina (Adaptado de Elkady, 2006).

En la Figura 2.34 se presentan imágenes del proceso de hinchamiento de una mezcla de arena y bentonita. Inicialmente, las partículas de bentonita se encuentran fijadas a los granos de arena confeccionando una estructura con macroporos. Al agregar agua a la mezcla, la bentonita comienza a expandir ocupando completamente los macroporos.

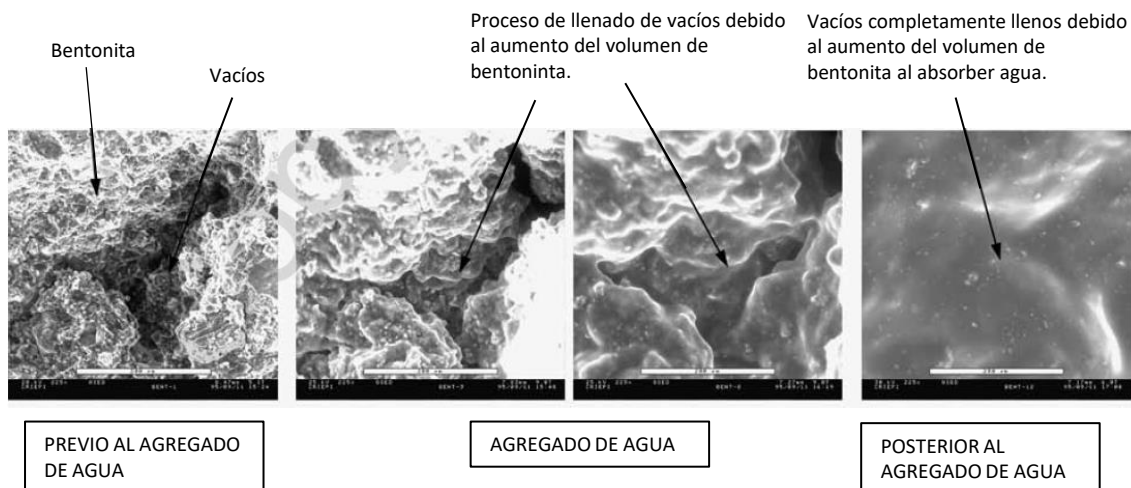


Fig. 2.34: Proceso de hinchamiento de bentonita en una mezcla de arena-bentonita (Adaptado de Mitchell, 1996).

Elkady et al.[32] realizaron ensayos proctor en mezclas arena-atapulguita con porcentajes de

finos variando de 0 % a 60 %. Obtuvo la máxima densidad seca con las mezclas 80-20 y 70-30 (ver Figura 2.35).

En forma complementaria, se realizaron ensayos de corte directo a distintos niveles de confinamiento encontrando un máximo de resistencia para un contenido de atapulguita de 30 %. En base a los resultados obtenidos el estudio determinó una mezcla óptima grueso-fino de 70-30.

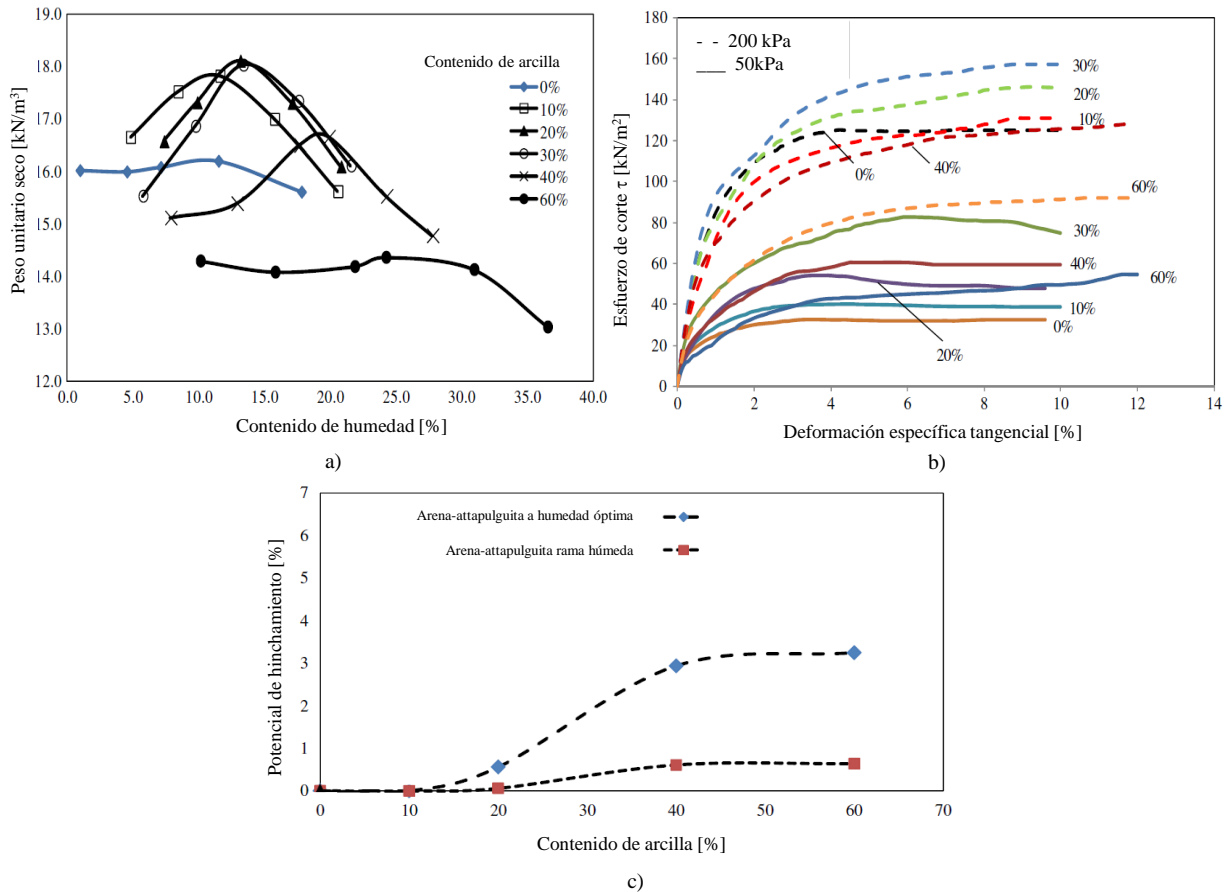


Fig. 2.35: a) Curvas de compactación para distintas proporciones de arena-atapulguita b) Efecto del contenido de arcilla en ensayos de corte directo c) Variación del potencial expansivo con el contenido de arcilla (Adaptado de Elkady et al., 2006).

Abichou et al.[34] estudiaron mezclas de arena-bentonita y llegaron a conclusiones similares. Un aporte interesante es que discriminaron el comportamiento de la conductividad hidráulica de mezclas arena-arcilla en tres regiones denominadas A, B y C. En la región A la conductividad hidráulica es controlada por la matriz granular de la arena. En la región B la conductividad hidráulica cae drásticamente a medida que aumenta el contenido de finos. En la región C la conductividad hidráulica alcanza una asíntota correspondiente a la de la arcilla sola. La mezcla óptima se ubicaría al comienzo de la región C (ver Figura 2.36).

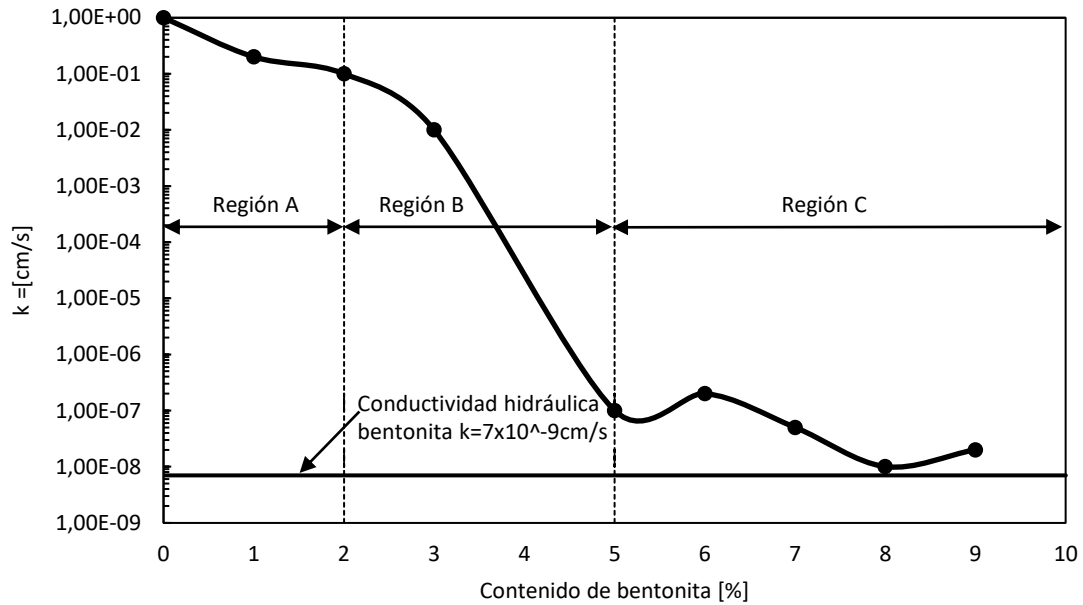


Fig. 2.36: Conductividad hidráulica en función del contenido de bentonita (Adaptado de Abichou et al., 2002).

Akgün et al.[35] realizaron ensayos de conductividad hidráulica y resistencia a compresión no confinada (UCS) en mezclas arena-bentonita para su uso en barreras hidráulicas de desechos nucleares con porcentaje de bentonita variable entre 5% y 40%. Para porcentaje entre 5% y 10% la conductividad hidráulica resultó similar a la de la arena sola. Al aumentar el contenido de bentonita la conductividad hidráulica disminuyó de manera drástica hasta formar una asintota para porcentajes mayores al 30%. Para contenidos de bentonita de 32% en adelante la conductividad alcanzó el valor correspondiente al de la bentonita sola, tal como describió Abichou [34]. La resistencia UCS se incrementó de manera uniforme con la adición de finos hasta un 30%. El módulo de elasticidad aumentó a la vez que el porcentaje de bentonita era mayor. Su tasa de incremento alcanzó un máximo para una variación de bentonita entre el 20% y el 30%. En base a los resultados obtenidos el estudio determinó una mezcla óptima grueso-fino de 70-30 (ver Figura 2.37).

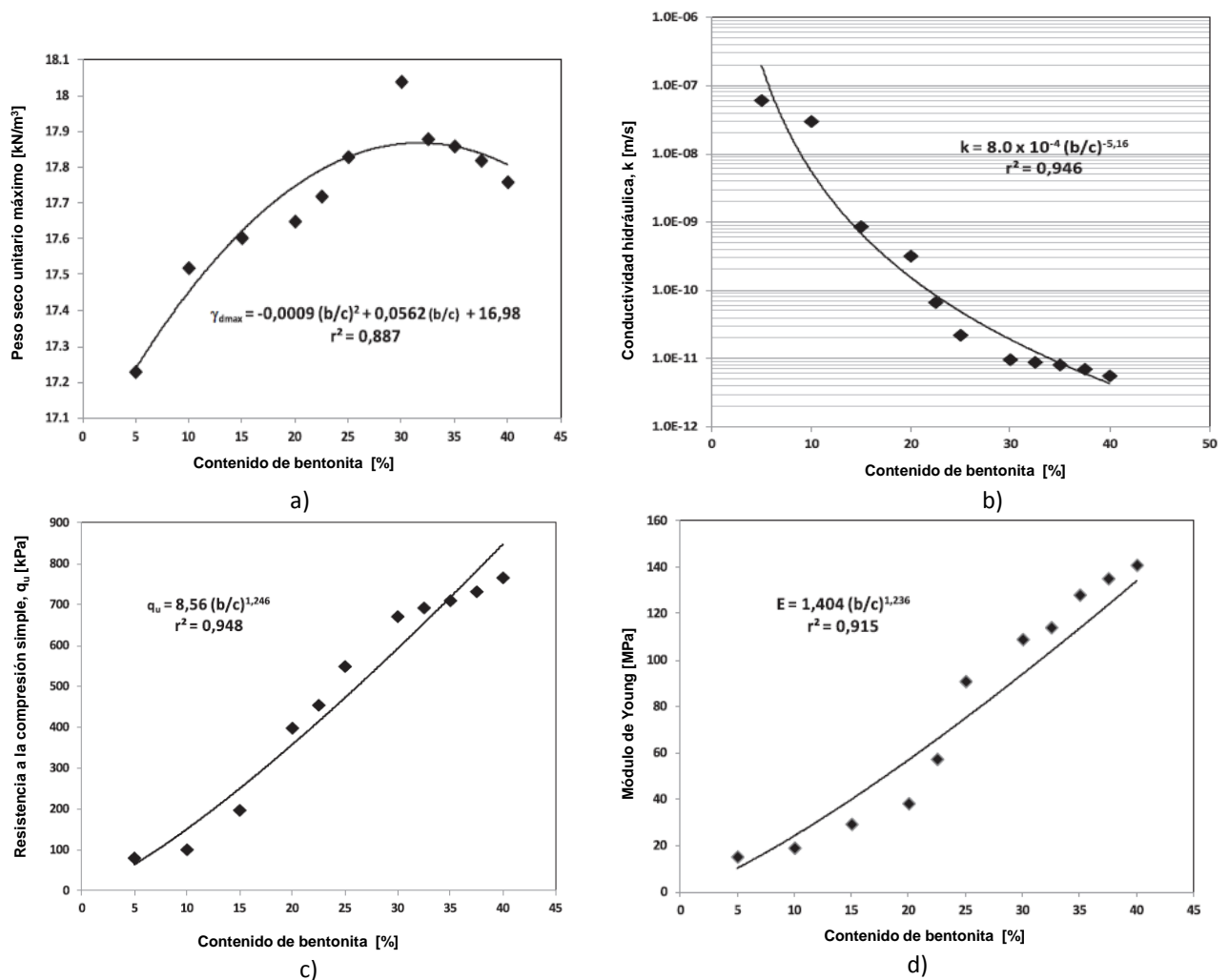


Fig. 2.37: a) Máxima densidad seca con un 30 % de bentonita b) Conductividad hidráulica  $k$  en función del contenido de finos. c) UCS en función del contenido de finos. Se aprecia el incremento de resistencia para un contenido de bentonita entre el 15 % y 30 %. d) Módulo de Young en función del contenido de bentonita. (Adaptado de Akgün et al. 2017).

La humedad de compactación incide en el valor de conductividad hidráulica del material en estudio. Cuando se compacta con contenidos de humedad mayores a la óptima (rama húmeda) se obtienen valores de conductividad hidráulica considerablemente mas bajos ya que la matriz de arcilla se conforma de manera dispersa. La compactación con humedades menores a la óptima (rama seca) resulta en una conductividad hidráulica sustancialmente mayor debido a la agregación de la matriz de arcilla y la formación de una estructura floculenta [4][36].

Al-Rawas et al.[37] ensayaron mezclas de arena-atapulguita para su uso como barrera hidráulica. Se determinó que la proporción grueso-fino de 70-30 compactada un 2 % por encima de la humedad óptima proporcionó una conductividad hidráulica  $k \approx 10^{-9} m/s$ , no mostró hinchamiento y maximizó la resistencia en ensayos de corte directo.

La granulometría de la fracción gruesa también influye en los porcentajes de la combinación óptima. Una mezcla con arena bien graduada presentará menor conductividad hidráulica que una mezcla con arena mal graduada [36].

El porcentaje óptimo de arcilla puede variar en un amplio rango de 3 % a 40 % según su mineralogía predominante. Arcillas con gran capacidad de hinchamiento como las bentonitas expanden mucho y ocupan todo el espacio intergranular por lo que su porcentaje óptimo suele ser bajo. Por el



contrario, arcillas con baja capacidad de hinchamiento como las caolinitas requieren mas porcentaje para optimizar la mezcla.

Varios investigadores [10][38][39][40] estudiaron las características de la SWCC en mezclas arena-arcilla para su uso en barreras hidráulicas. Jeong et al.[38] y Elkady et al.[32] estudiaron cómo se modifican las curvas de retención al variar el contenido de arcilla. Los resultados mostraron que la adición de arcilla suaviza la caída de la curva y la desplaza hacia la derecha. Esto significa que la incorporación de finos a la arena cambia la distribución del tamaño de poros, la succión de entrada de aire y el grado de saturación residual. Fredlund et al.[10] obtuvieron experimentalmente las curvas de retención para arena sola y una mezcla 92-8 de arena-bentonita. El incremento de 8 % de bentonita aumenta 9 veces el valor succión de entrada de aire y también aumenta la capacidad de retención de agua. También se observa una modificación en la forma de la curva de retención la cual presenta una doble curvatura que se la denomina “curva de tipo bimodal” (ver Figura 2.38).

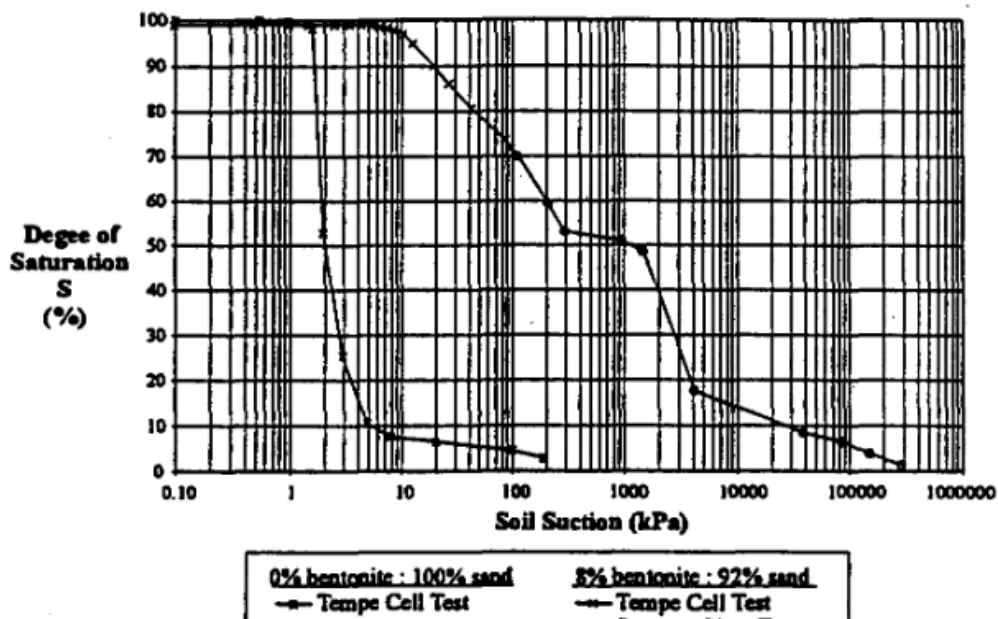


Fig. 2.38: Curvas de retención arena sola (unimodal) y arena-bentonita de (bimodal). (Adaptado de Fredlund et al. 1998).

### 3. Programa experimental

#### 3.1. Introducción

En esta sección se presentan las principales propiedades de los materiales utilizados y la metodología de trabajo empleada. A su vez se presenta el programa de ensayos y se realiza una breve descripción de cada uno de ellos.

#### 3.2. Materiales

Los materiales constituyentes de este estudio son tres: un material granular, un suelo fino con alto contenido de minerales arcillosos, y poliacrilamida aniónica (APAM). Para dar continuidad a la línea de investigación mencionada en la sección 1.1 se trabajó con los mismos materiales utilizados por Casagrande [25]. En los apartados siguientes se describen los materiales, su origen y los ensayos básicos de identificación que se realizaron en este trabajo. En la Tabla 3.5 se resumen los resultados.

Tabla 3.5: Propiedades físicas de los suelos utilizados.

Arcilla						
USCS	pasa#200	LL	IP	ARCILLA	$S_{esp}$	$G_s$
	[%]	[%]	[%]	[%]	[m <sup>2</sup> /g]	[-]
MH	96	63	18	20	187	2.77
Arena						
USCS	$C_u$	$C_c$	$D_{60}$	$D_{30}$	$D_{10}$	$G_s$
	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
SP	2.1	0.9	0.33	0.22	0.16	2.65

##### 3.2.1. Arena

###### Granulometría

Se utilizó como agregado grueso una arena proveniente del río Paraná provista por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. Se realizó un ensayo de granulometría según la norma ASTM D422 63. En la Figura 3.39 se presenta la curva granulométrica obtenida experimentalmente. Aplicando el Sistema único de clasificación de suelos ASTM resultó ser una arena pobremente graduada **SP**. En el Anexo A.1 se presentan amplían detalles del procedimiento.

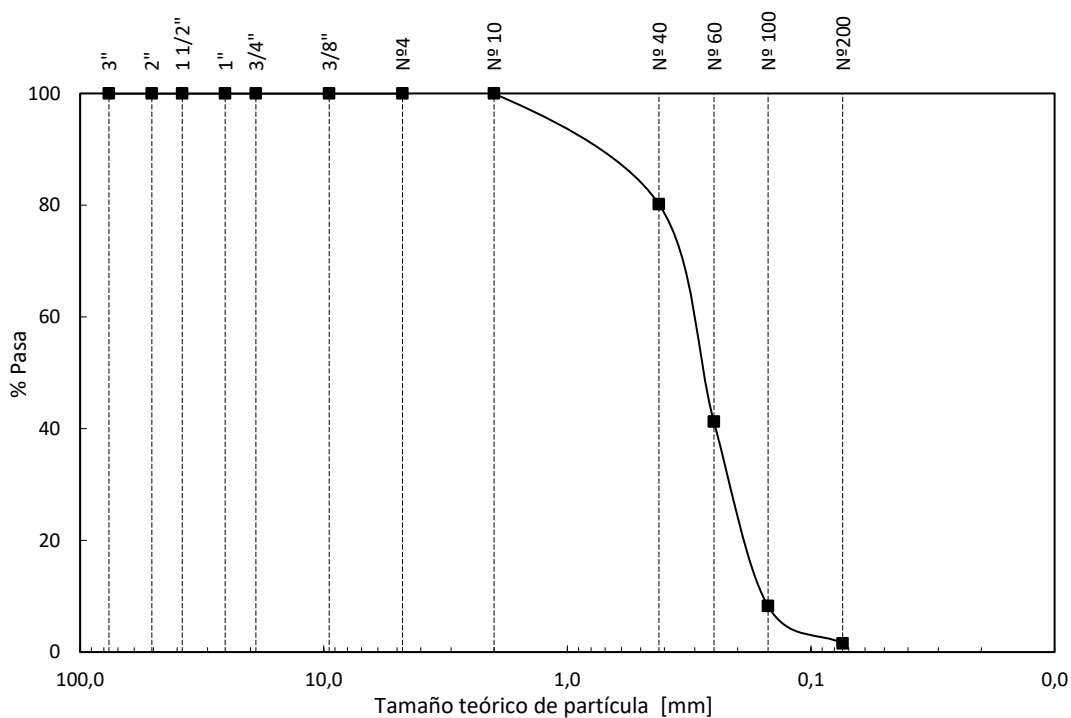


Fig. 3.39: Granulometría arena río Paraná.

A partir de la curva granulométrica se determinaron los parámetros  $D_{60}=0.33$ ,  $D_{30}=0.22$ ,  $D_{10}=0.16$ ,  $C_u=2.1$  y  $C_c=0.3$ .

### Gravedad específica $G_s$

Se determinó la gravedad específica de la arena para calcular con mayor precisión las variables que involucran al término  $G_s$ . El ensayo se realizó bajo la norma ASTM D854 02, Método B con picnómetro calibrado. El procedimiento detallado se presenta en el Anexo A.1.

El ensayo se realizó para dos muestras. Los resultados se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Gravedad específica arena río Paraná.

Muestra	$G_s$
1	2,64
2	2,65
<b>Promedio</b>	<b>2,65</b>

### 3.2.2. Arcilla

Se utilizó una arcilla proveniente de la zona costera de la ciudad de Comodoro Rivadavia, provincia de Chubut (ver Figura 3.40). Fue provista por la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Es una arcilla de origen marino que se encuentra fuertemente preconsolidada. Posee un elevado grado de expansión que es causante de patologías graves en viviendas y caminos de la ciudad. [41][42]. Fue extraída de canteras y se presenta como bloques sólidos al tacto con dureza baja. (ver Figura 3.41). Para poder utilizarla en los ensayos fue necesario fragmentar dichos bloques. Esto se logró sometiéndolos a ciclos de mojado y secado al aire libre. Luego se disgregaron las partículas con un mortero manual obteniendo un material de aspecto pulverulento. Una vez disgregada la arcilla se tamizó por la malla Nº10 para eliminar posibles partículas que queden sin disgregar. La presencia

de partículas sin disgregar no es deseada ya que constituyen nódulos que dificultan la hidratación y homogeneización de las mezclas a confeccionar.

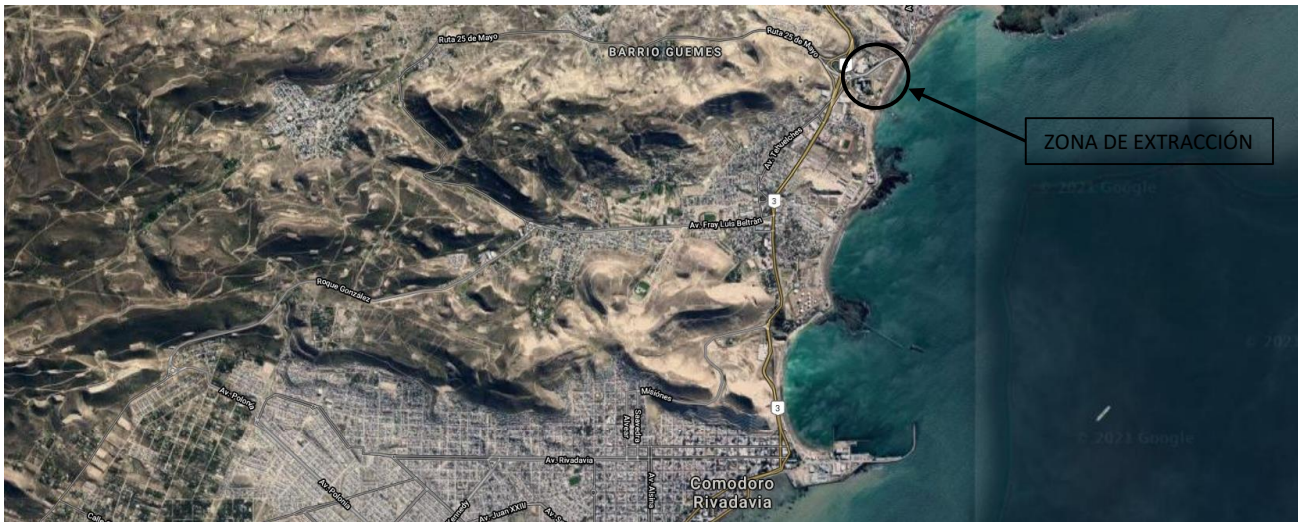


Fig. 3.40: Ubicación geográfica de la zona de extracción.



Fig. 3.41: Bloques de arcilla natural con características de roca blanda.

### Límites de Atterberg

Se realizaron ensayos de límites líquido y plástico, y se determinó el índice de plasticidad según la norma ASTM 4318 00. Para determinar el límite líquido se aplicó el método de tres puntos. Se obtuvo  $LL = 63$ ,  $LP = 44$  y un  $IP = 18$ . En la Figura 3.42 se observan los puntos obtenidos en el ensayo de límite líquido.

### Suelo pasante por el tamiz #200

Se determinó el porcentaje de suelo menor a  $75\mu m$  según la norma ASTM D1140 00 resultando en un **94 %**.

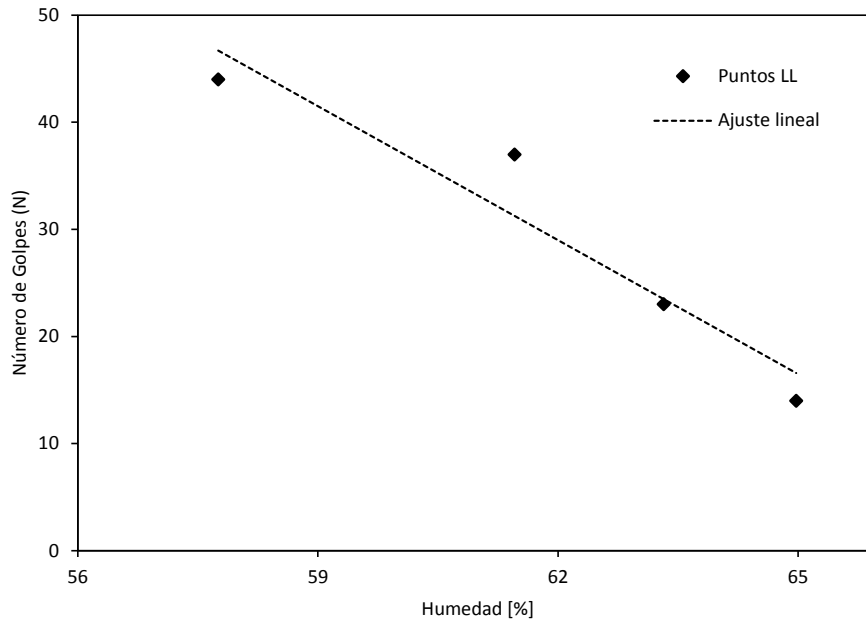


Fig. 3.42: Determinación Límite Líquido - Método tres puntos.

## Hidrometría

Se realizó un ensayo de hidrometría aplicando la norma ASTM D422 63. El ensayo permite conocer los porcentajes de los distintos diámetros de partículas que componen a este suelo. Para determinarlo se aplica la ley de Stokes la cual relaciona la velocidad de sedimentación de una partícula en suspensión con el diámetro teórico de dicha partícula. A medida que las partículas sedimentan la densidad del fluido disminuye. Para medir dicha densidad se introduce un hidrómetro calibrado en el fluido, el cual permite relacionar la densidad con la cantidad de masa aún en suspensión. En este caso, el fluido es agua con suelo disperso. Se utilizó el hidrómetro 152H. En la Figura 3.44 se presenta la curva granulométrica obtenida.

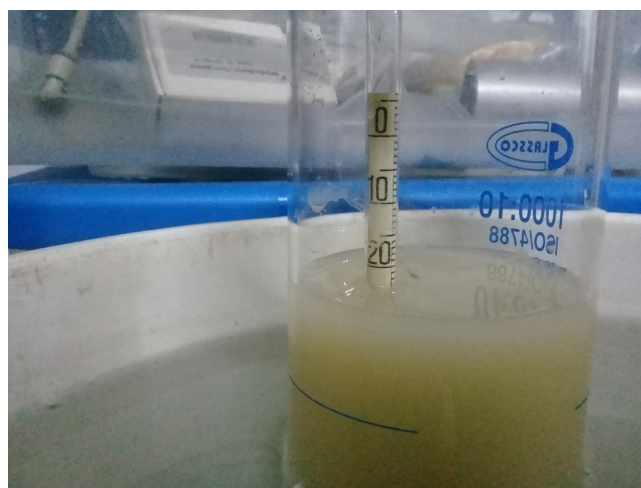


Fig. 3.43: Hidrómetro ASTM 152H durante la realización del ensayo.

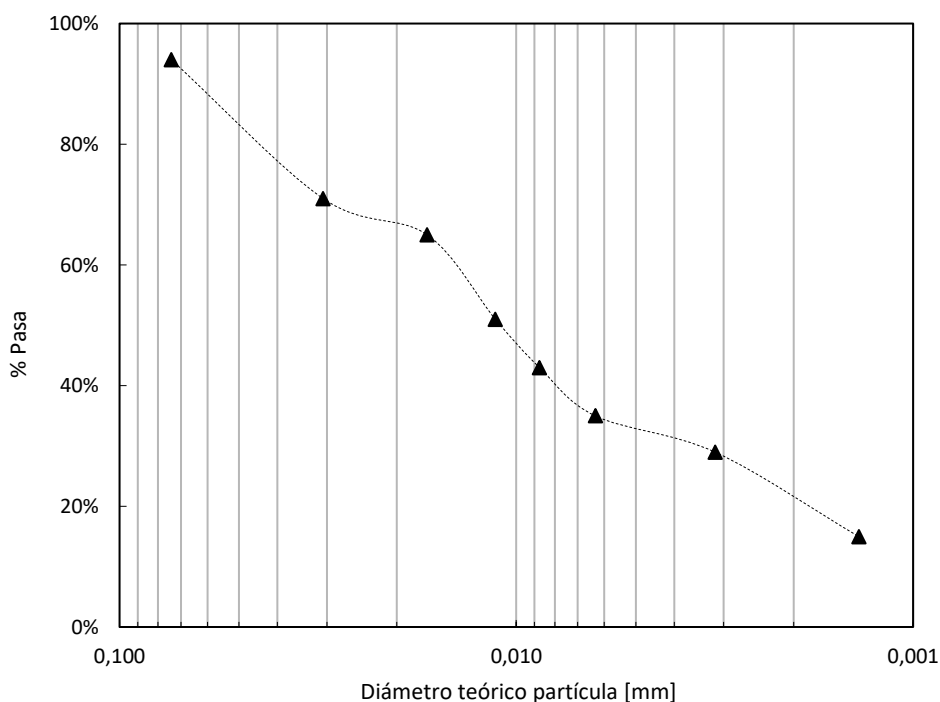


Fig. 3.44: Granulometría del suelo fino

En la Tabla 3.7 se muestran los resultados. Estos son consistentes con los desarrollados previamente en esta sección.

Tabla 3.7: Resultados hidrometría.

Limo	Arcilla	Pasante #200
74 %	20 %	94 %

### Clasificación según USCS

El suelo fino clasifica como **MH** (limo de alta plasticidad) en base al sistema unificado de clasificación de suelos (USCS) conforme a lo indicado en ASTM D2487-06 .

### Superficie Específica - Método adsorción de azul de metileno

La superficie específica  $S_e$  se define como la relación entre la superficie de una partícula y su masa. Su valor es importante ya que determina el balance entre fuerzas capilares, eléctricas y gravimétricas actuantes sobre las partículas [43] lo cual incide en la interacción fluido-partícula.

Para su determinación se empleó la técnica de adsorción de Azul de Metileno propuesta por el método Europeo [43]. Los cationes de una solución acuosa de cloruro azul de metileno son adsorbidos por las cargas negativas de la superficie de las partículas de arcilla. La  $S_e$  es computada en base a la cantidad de azul de metileno adsorbido.

Para ello se preparó una muestra de arcilla con agua destilada. A la muestra se le agregó un determinado volumen de azul de metileno en solución. Se mezcló para darle tiempo a los cationes de ser adsorbidos por la superficie del mineral. Luego se extrajo una gota de la suspensión y se la colocó sobre un papel filtro. Esto se volvió a repetir aumentando en cada paso la cantidad de cationes de azul de metileno de la solución con respecto al suelo en estudio. El proceso terminó al divisar un halo

azul claro concéntrico alrededor de la gota sobre el papel. Esto significa que la superficie de todo el mineral está rodeada de cationes AM y un porcentaje de ellos queda en solución. Ese excedente es el que forma el halo concéntrico. En cada gota se anotó el número de incrementos  $N$  (equivalentes a 0,5 ml) colocados en la solución.

Se realizaron dos ensayos. En el primero, se observó el halo azul claro a  $N = 310$ . En el segundo, se observó a  $N = 300$ . En la Tabla 3.8 se presentan los resultados. En las Figuras 3.45 a) y b) se observan las gotas de azul de metileno con suelo sobre papel filtro.

La  $S_e$  se computa como:

$$S_e = \frac{1gr}{319,87gr/mol} \times \frac{1}{200ml} \times (0,5[ml] \times N) \times N_{av} \times (A_{AM} \times A^2) \times \frac{1}{10gr} \quad (3.12)$$

donde:

- $N_{av}$  : número de Avogadro.
- $A_{AM}$  : área del catión de azul de metileno asumida generalmente en  $130 \text{ \AA}^2$ .
- $A = 10^{-10}$  : unidad armstrong por cada metro [m].

Tabla 3.8: Resultados de ensayos de superficie específica.

#	$S_e$
<b>Ensayo 1</b>	190 m <sup>2</sup> /g
<b>Ensayo 2</b>	184 m <sup>2</sup> /g
<b>Promedio</b>	187 m <sup>2</sup> /g

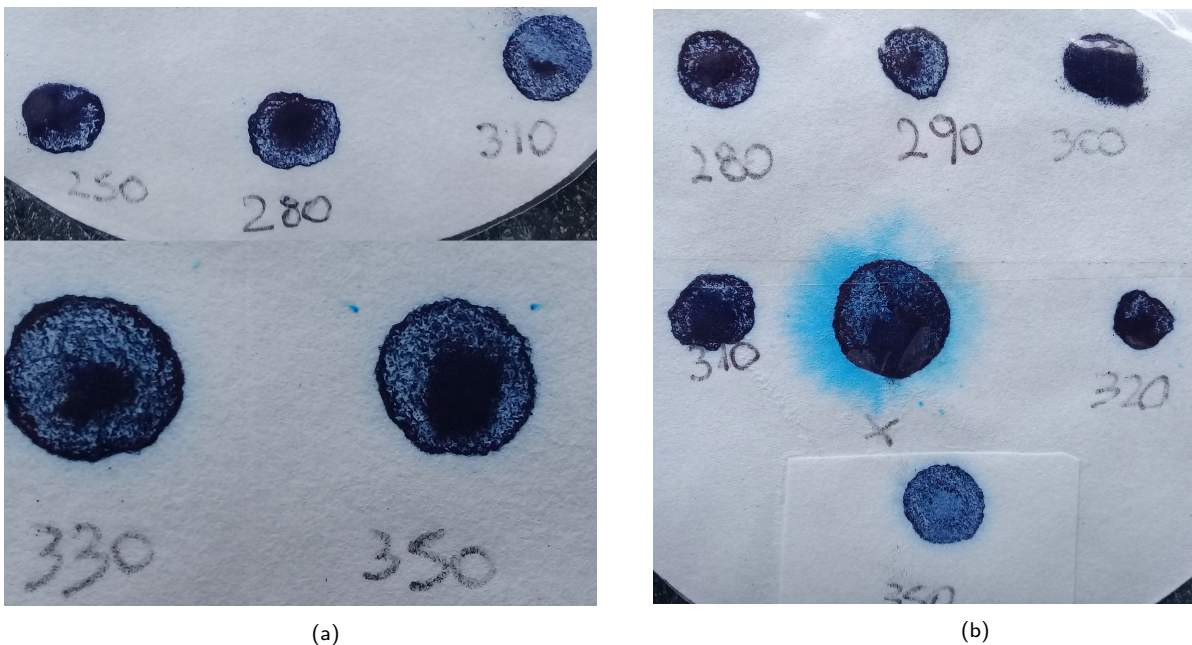


Fig. 3.45: Determinación de superficie específica con azul de metileno: (a) Ensayo 1 y (b) Ensayo 2.

### Gravedad específica $G_s$

Se determinó la gravedad específica de la arcilla de igual manera en que se describió para la arena. Para la arcilla el resultado se presenta en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Gravedad específica arcilla.

Muestra	$G_s$
1	2,78
2	2,75
<b>Promedio</b>	<b>2,77</b>

### 3.2.3. Poliacrilamida

La poliacrilamida utilizada en este trabajo es del tipo aniónica (APAM). Fue provista por Química Paípe S.R.L. de Argentina que la comercializa bajo el nombre *Paipafloc F-AN* como floculante aniónico para aguas contaminadas. Se presenta como un polvo de partículas frágiles y alargadas de color blanco (ver Figura 3.46). Es altamente higroscópica y en combinación con el agua forma un hidrogel.



Fig. 3.46: APAM sin hidratar.

La elección de la APAM se basa en la experiencia previa ya mencionada y antecedentes bibliográficos citados en la Sección 2.6 que prueban su aptitud y potencial como agente estabilizante de suelos finos.

## 3.3. Métodos y ensayos realizados

### 3.3.1. Preparación de mezclas

El programa experimental consiste en la caracterización física, mecánica e hidráulica de mezclas de arena-arcilla-APAM considerando su aplicación potencial como barrera impermeable de un relleno sanitario. Se realizaron ensayos de compactación, conductividad hidráulica saturada, compresión simple no confinada (UCS), capacidad de retención de agua (SWCC), e hinchamiento libre. Las variables en estudio son dos: el **porcentaje del contenido de APAM** y la **proporción arena-arcilla**.

Las proporciones de arena-arcilla de cada mezcla se expresan en relación a la masa total seca de la mezcla. La proporción de APAM se expresa sobre el porcentaje seco de la arcilla. La masa total seca de las mezclas necesaria para cada ensayo se determinó multiplicando el volumen del recipiente propio de cada ensayo por la densidad seca objetivo  $\gamma_{d_{objetivo}}$  (ver Ecuación 3.14). La densidad seca objetivo se estableció como el 95 % del promedio de la densidad seca máxima obtenida de los ensayos proctor estándar para cada mezcla (ver Ecuación 3.13). Dichos valores se presentan en la Tabla 4.12.



$$\gamma_{d_{objetivo}} = 0,95 * \gamma_{d_{medio}} \quad (3.13)$$

$$M_s = V * (\gamma_{d_{objetivo}}) \quad (3.14)$$

donde:

- $V$  : es el volumen del recipiente perteneciente a cada ensayo y que aloja a la mezcla compactada.
- $M_s$  : es la masa seca de la mezcla.

Para confeccionar las muestras de cada mezcla, la arena y la arcilla fueron secadas al horno (según se especifica en ASTM D2216-98) y mezcladas en seco. En el caso de mezclas con APAM, las muestras se mezclaron en seco con el polímero granulado. Luego se humectó con agua destilada aplicada con rociador alternando con el mezclado. Las muestras se almacenaron por 24 horas en condiciones de humedad y temperatura controladas. Todas las muestras fueron preparadas con la humedad óptima correspondiente a cada mezcla. La humedad óptima se obtuvo en los ensayos proctor estándar. Las muestras se compactaron de manera estática en una sola capa.

Al finalizar cada ensayo, se midieron la humedad [ASTM D2216-98], el peso y las dimensiones de las muestras. Con estos valores se calculó la densidad real que alcanzó cada muestra en la compactación.

En la Tabla 3.10 se presenta la serie de ensayos realizados para cada mezcla.

Tabla 3.10: Programa experimental.

[%S+ %C]	Proctor estándar	Conductividad hidáulica.	UCS	SWCC	Hinchamiento libre
<i>Ensayos sin APAM</i>					
80-20	si	si	si	si	si
85-25	si	-	-	-	-
70-30	si	si	si	si	si
<i>Ensayos APAM [1.5 %]</i>					
80-20	-	si	si	-	si
70-30	-	si	si	-	si
<i>Ensayos APAM [2.5 %]</i>					
80-20	-	-	si	-	-
70-30	-	-	si	-	-
<i>Ensayos APAM [3.5 %]</i>					
80-20	-	si	si	si	si
70-30	-	si	si	si	si

### 3.3.2. Proctor estándar

Se realizaron ensayos Proctor estándar para determinar la densidad seca máxima y la humedad óptima de compactación para mezclas arena-arcilla sin polímero en proporciones 80-20, 75-25 y 70-30. Se aplicó la norma ASTM D698-00 *Método A* con la salvedad de que todo el material fue tamizado por la malla N°10.

### 3.3.3. Curvas de retención

Se realizaron ensayos de succión sobre mezclas arena-arcilla con y sin APAM para determinar sus respectivas curvas de retención. Se prepararon muestras con mezclas arena-arcilla en porcentajes 80-20 y 70-30. Esto a su vez sin polímero y con polímero al 3.5 % de la fracción fina de la mezcla. Para abarcar el mayor rango posible del grado de saturación se ensayaron un mínimo de 8 muestras por mezcla. Todas se prepararon con la densidad seca objetivo obtenida en los ensayos proctor estándar (ver Tabla 4.52). El ensayo se realizó bajo norma ASTM D4829.

A continuación se detalla la metodología de trabajo empleada en cada ensayo:

- a . Dosificación en seco y humectación de la muestra.
- b . Compactación estática de la muestra en dos pastillas de diámetro interno 100 mm y altura 20 mm.
- c . Colocación de papel filtro entre las pastillas y protegido a su vez por dos papeles filtro de sacrificio para medir succión mátrica.
- d . Colocación de dos papeles filtro superiores separados de la muestra para medir succión total (ver Figura 3.47).
- e . Aislación del conjunto en recipiente hermético y dentro de cámara con temperatura constante a 18°C por un mínimo de 7 días.
- f . Medición de humedad de los papeles filtro.
- g . Determinación de humedad y densidad real de la muestra.

Se utilizó papel filtro calibrado "Schleicher & Schuell 589/2,  $\phi=70$  mm - White ribbon". Para obtener los valores de succión mátrica y total se utilizó la curva calibrada del papel filtro que relaciona el contenido de humedad del papel con la succión (ver Figura 3.48).



Fig. 3.47: Muestra en preparación. Se observan las dos pastillas de suelo y el papel filtro superior separado por un o-ring.

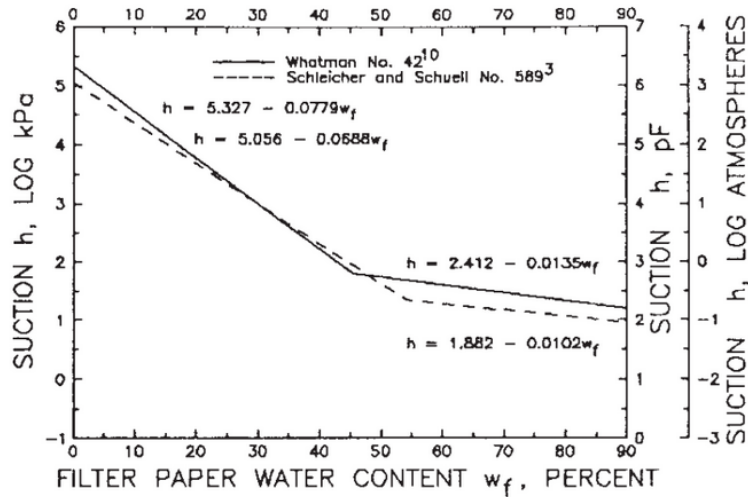


Fig. 3.48: Curvas calibradas para la relación succión-humedad del papel filtro.

### 3.3.4. Conductividad hidráulica saturada

Se realizaron ensayos para medir la conductividad hidráulica saturada  $k$  en mezclas de arena-arcilla con y sin APAM. Se ensayaron muestras con mezclas arena-arcilla en porcentajes 80-20 y 70-30. Se prepararon muestras sin polímero y con polímero al 1.5% y 3.5% de la fracción fina de la mezcla. Las muestras se prepararon con su humedad óptima correspondiente y densidad seca objetivo obtenidas en los ensayos proctor estandar (ver Tabla 4.52) y se compactaron estáticamente en cilindros de diámetro interno 100 mm y altura 50 mm. Para la ejecución del ensayo se aplicó la norma ASTM D5856-02 y se utilizó un permeámetro de carga variable de pared rígida con nivel de restitución constante. (ver Figuras 3.49 y 3.50).

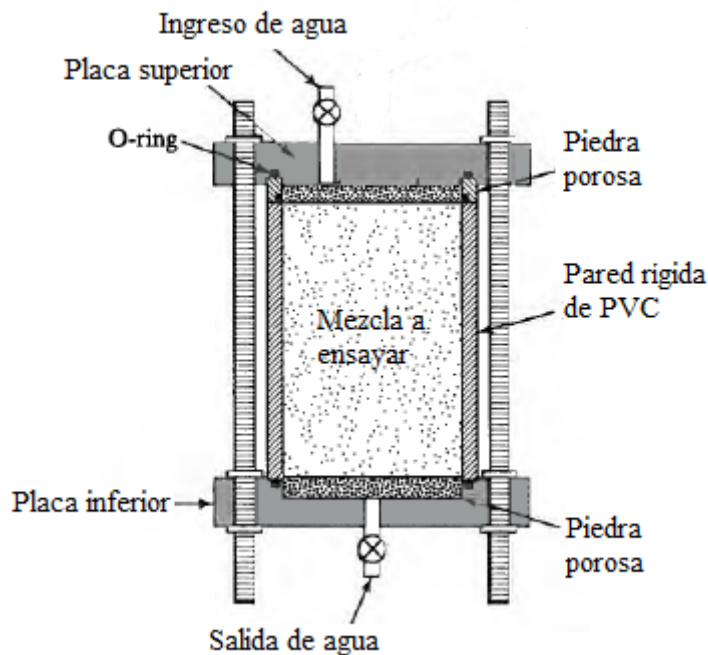


Fig. 3.49: Permeámetro de pared rígida.

Las muestras se saturaron aplicando un gradiente hidráulico constante hasta observar agua en el conducto de salida. Una vez saturadas las muestras se calculó la conductividad hidráulica aplicando

la Ecuación 3.15 .

$$k = \frac{a.L}{A.(t_2 - t_1)}. \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (3.15)$$

donde

- $a$  : área de la bureta
- $L$  : longitud de la muestra de suelo
- $A$  : área de la muestra de suelo
- $h_1$  : energía piezométrica a la que es sometida la muestra medida a tiempo  $t_1$
- $h_2$  : energía piezométrica a la que es sometida la muestra medida a tiempo  $t_2$  mayor a  $t_1$

Se realizaron repetidas mediciones con cada muestra para verificar que el valor de conductividad hidráulica  $k$  alcanzase un valor constante. Llegado a ese punto se consideró finalizado el ensayo. Posteriormente las muestras fueron desarmadas para inspección visual, medición geométrica, y medición de contenido de humedad en los extremos inferior y superior.



Fig. 3.50: Permeámetro durante ensayo. Pared confeccionada con tubo de PVC. El nivel de restitución constante se asegura por desborde.

Se restringió el hinchamiento axial de la arcilla ensayada mediante la colocación de un suplemento rígido y poroso dentro del permeámetro. La reducción del espacio de poros entre las partículas de arcilla al hidratarse genera una disminución de la conductividad hidráulica. Es por eso que fue necesario medir reiteradas veces el valor de  $k$  hasta que alcanzó un valor constante. En general, el tiempo que tardó en ocurrir esto fue similar al que necesitó la mezcla en el ensayo de hinchamiento libre para alcanzar el valor máximo de expansión.

### 3.3.5. Resistencia a compresión simple

Se realizaron ensayos de compresión simple no confinada en mezclas arena-arcilla con y sin APAM con el objeto de poder apreciar cambios en la resistencia, rigidez, y ductilidad en las mezclas analizadas.

Se ensayaron probetas con mezclas arena-arcilla en porcentajes 80-20 y 70-30. Se prepararon muestras sin polímero y con polímero al 1.5 %, 2.5 % y 3.5 % de la fracción fina de la mezcla. Se realizó una serie de ensayos sin curado y otra con curado en cámara húmeda cuyo tiempo se fijó de manera arbitraria en 40 días. Las probetas se confeccionaron aplicando las normas ASTM D2166-00. Cada mezcla se compactó dentro de un molde de diámetro interno 50 mm y altura 100 mm en una sola capa utilizando una prensa mecánica.

El ensayo se realizó bajo norma ASTM D2166-00 en una prensa de velocidad constante. La velocidad de deformación se estableció en 1.25 mm/min dentro del rango establecido por la norma. Se determinó como fin del ensayo cuando la resistencia del material alcanzó su valor máximo y el plano de falla era apreciable a la vista. (ver Figura 3.51).



Fig. 3.51: Probetas en falla.

La tensión desviadora  $q$  aplicada a las probetas se calculó según la Ecuación 3.16. La resistencia a la compresión no confinada  $q_u$  de cada mezcla es el valor máximo de  $q$ .

$$q = \frac{P_d}{A} \quad (3.16)$$

donde

- $P_d$  : carga desviadora aplicada
- $A = A_0/(1 - \epsilon)$  : área inicial  $A_0$  corregida por deformación
- $\epsilon$  : deformación específica para una carga dada

### 3.3.6. Hinchamiento libre

Se realizaron ensayos de hinchamiento libre para determinar el potencial de hinchamiento de mezclas arena-arcilla con y sin APAM. Se ensayaron muestras con mezclas arena-arcilla en porcentajes 80-20 y 70-30. Se prepararon muestras sin polímero y con polímero al 1.5 % y 3.5 % de la fracción fina de la mezcla. Las muestras se prepararon con su humedad óptima correspondiente y densidad seca objetivo obtenidas en los ensayos proctor estandar (ver Tabla 4.52). Se compactaron estáticamente en pastillas de diámetro interno 3" y altura 3/4". Para la ejecución del ensayo se utilizó como guía la norma ASTM D4829-03. Las muestras permanecieron inundadas con agua destilada en un edómetro bajo una sobrecarga de 4.9kPa durante todo el ensayo. El ensayo finalizó cuando la tasa de expansión resultó menor a 0.005 mm/h.

Se calculó en índice de expansión (EI) como:

$$EI = \frac{\Delta H}{H_i} 1000 \quad (3.17)$$

donde

- $\Delta H_f - H_i$
- $H_i$  : altura de la muestra al inicio del ensayo
- $H_f$  : altura de la muestra al final del ensayo

## 4. Resultados obtenidos

### 4.1. Introducción

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos para cada uno de los ensayos presentados en la sección anterior.

### 4.2. Proctor estándar

En la Figura 4.52 se presentan las curvas de compactación obtenidas de los ensayos Proctor estándar. Los ensayos se realizaron sobre muestras arena-arcilla sin polímero en proporciones 80-20, 75-25 y 70-30. Se incluye también la mezcla 85-15 realizada por Casagrande[25]. En la Tabla 4.11 se resumen los valores de densidad seca máxima con su correspondiente humedad óptima para cada mezcla.

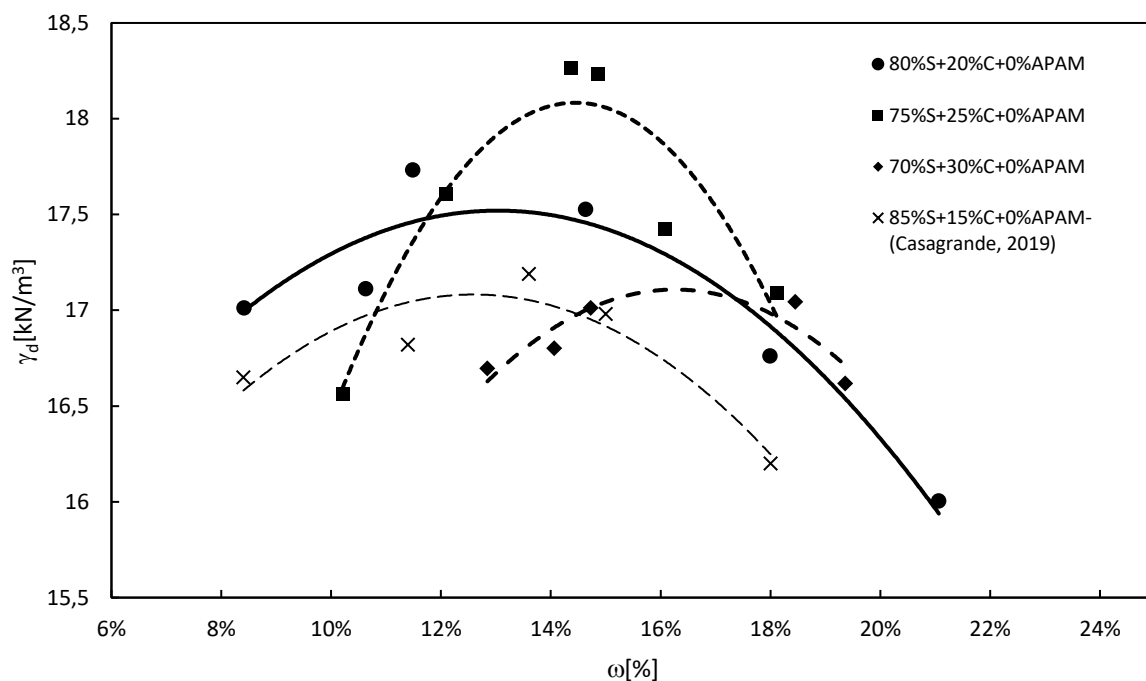


Fig. 4.52: Curvas de compactación.

Tabla 4.11: Resultados Proctor estándar.

Mezcla %S- %C	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\omega_{\acute{o}ptimo}$ [%]
80-20	17.5	13.5
75-25	18.2	14.3
70-30	17.2	16.1
Promedio	17.6	-

En la Tabla 4.12 se presentan los valores que finalmente se utilizaron para confeccionar las muestras.

Tabla 4.12: Valores de densidad seca y humedad utilizados para la confección de muestras.

Mezcla	$\gamma_d$	$\omega$
%S- %C	[kN/m <sup>3</sup> ]	[%]
80-20	16.7	13.5
70-30	16.7	16.1

### 4.3. Curvas de retención

En la Tabla 4.13 se presentan los pares de valores de succión mátrica ( $u_a - u_w$ ) y saturación  $S_r$  obtenidos de los ensayos de succión efectuados sobre distintas muestras de cada mezcla.

Tabla 4.13: Resultados experimentales de los ensayos de succión.

Mezcla - %APAM	80-20-0		80-20-3.5		70-30-0		70-30-3.5	
Nº muestra	$S_r$	$u_a - u_w$	$S_r$	$u_a - u_w$	$S_r$	$u_a - u_w$	$S_r$	$u_a - u_w$
	[%]	[kPa]	[%]	[kPa]	[%]	[kPa]	[%]	[kPa]
1	0.86	1.95			0.83	3.45	0.89	14.99
2	0.79	2.26	0.75	12.4	0.70	5.26	0.68	250
3	0.70	2.79	0.67	18.4	0.64	15.9	0.61	2314
4	0.63	3.58			0.50	120	0.55	5941
5	0.54	10.3			0.41	7617	0.51	8905
6	0.46	29.8			0.23	28476	0.42	19997
7	0.40	543			0.20	54154	0.29	35488
8	0.37	3818			-	-	-	-
9	0.21	16970			-	-	-	-

A la serie de datos obtenida para cada mezcla se le ajustó un modelo de curvas de retención bimodal propuesto por Durner [44] para suelos con una distribución de poros heterogénea. El modelo consiste en una superposición lineal de dos curvas del modelo de retención de van Genuchten según las Ecuaciones 4.18 y 4.19:

$$S_e = W_1 \left[ \frac{1}{1 + \alpha_1(u_a - u_w)^{n_1}} \right]^{m_1} + W_2 \left[ \frac{1}{1 + \alpha_2(u_a - u_w)^{n_2}} \right]^{m_2} \quad (4.18)$$

$$n_{1,2} = \frac{1}{1 - m_{1,2}} \quad (4.19)$$

donde:

- $S_e = \frac{S_r - S_{res}}{1 - S_{res}}$ : grado de saturación efectiva
- $S_r$ : grado de saturación de la muestra
- $S_{res}$ : grado de saturación residual de la muestra
- $W_i$ : ponderación de la subcurva  $i$  de van Genuchten
- $\alpha_i = \frac{1}{S_{ae}}$ : inversa del valor de entrada de aire ( $S_{ae}$ ) de la subcurva  $i$



- $m_i$ : índice de distribución de poros de la subcurva  $i$
- $u_a - u_w$ : succión mátrica

Debe cumplirse además que  $W_1 + W_2 = 1$ .

El ajuste se realizó con el software RETC [45] desarrollado por el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos dependiente de la USEPA. El programa permite utilizar los modelos paramétricos de Brooks-Corey, van Genuchten y Durner para predecir curvas de retención ajustadas a una serie de valores obtenidos experimentalmente. Para ello realiza una optimización no lineal de cuadrados mínimos. En la Figura 4.53 se observan los datos obtenidos con la curva ajustada correspondiente.

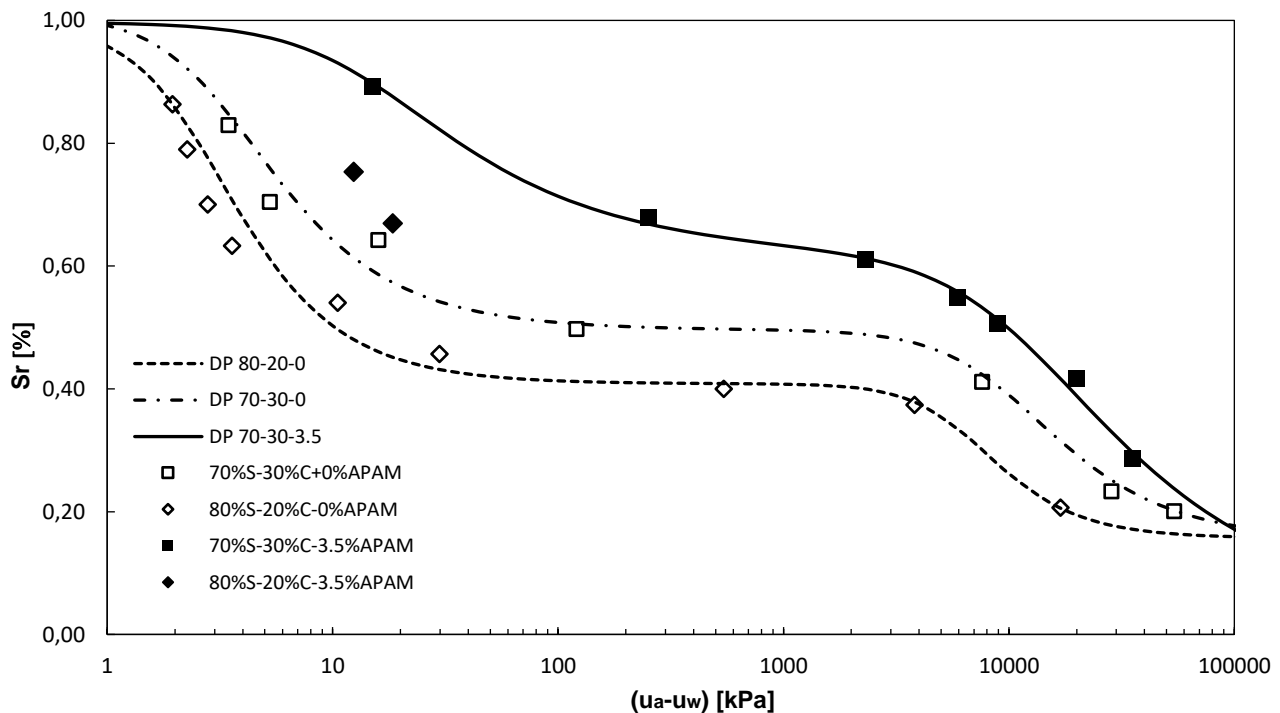


Fig. 4.53: Resultados experimentales y ajustes de curvas de retención de doble porosidad (DP).

En la Tabla 4.14 se presentan los parámetros de ajuste obtenidos de cada curva. Se reemplazaron los subíndices 1 y 2 por  $s$  y  $c$  para hacer referencia a la fracción arena y la fracción arcilla.

Tabla 4.14: Parámetros de ajuste del modelo bimodal para las distintas mezclas.

Mezcla - %APAM	$Sae_s$ [kPa]	$W_s$ [-]	$m_s$ [-]	$Sae_c$ [kPa]	$W_c$ [-]	$m_c$ [-]	$S_{res}$ [-]	$R^2$
80-20-0	2.5	0.70	0.57	66667	0.3	0.63	0.16	0.98
70-30-0	3.33	0.60	0.52	10000	0.40	0.53	0.16	0.99
70-30-3.5	14.3	0.39	0.41	11236	0.61	0.40	0.03	0.99

#### 4.4. Conductividad hidráulica saturada

En la Tabla 4.15 se presentan los resultados de ensayos de conductividad hidráulica saturada  $k$ . El valor de  $k$  informado es el promedio de las últimas cuatro mediciones realizadas a cada mezcla.

Tabla 4.15: Resultados de ensayos de conductividad hidráulica saturada.

Conductividad hidráulica saturada $k$ [m/s]		
Mezclas S+C	80-20	70-30
0% APAM	$3.3 \cdot 10^{-10}$	$1.3 \cdot 10^{-10}$
1.5% APAM	$3.1 \cdot 10^{-10}$	$1.6 \cdot 10^{-11}$
3.5% APAM	$1.5 \cdot 10^{-11}$	$1.2 \cdot 10^{-11}$

#### 4.5. Resistencia a compresión simple

En la Tabla 4.16 y en las Figuras 4.54 y 4.55 se presentan los resultados de los ensayos de compresión simple no confinada (UCS) realizados en mezclas 80-20 y 70-30 sin APAM y con contenido de APAM de 1.5 %, 2.5 % y 3,5 %.

Tabla 4.16: Resultados experimentales de ensayos UCS en mezclas 80-20 y 70-30 con un día y 40 días de curado.

Resultados de ensayos de compresión no confinada (UCS)						
Mezcla	APAM [%]	$\omega_i$ [%]	$\varepsilon_{falla}$ [%]	$q_{max}$ [kPa]	$E_{50}$ [kPa]	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]
<i>Un día de curado</i>						
80-20	0	13,5	1,82	20,2	1851	16,3
	1,5	13,3	2,16	34,0	2133	16,3
	2,5	13,6	2,76	39,7	2027	16,3
	3,5	13,9	2,15	44,1	3129	16,3
70-30	0	15,5	2,48	36,2	1749	16,4
	1,5	16,0	2,44	82,6	4590	16,4
	2,5	15,8	2,41	89,0	5279	16,6
	3,5	16,1	2,64	99,5	4915	16,3
<i>40 días de curado</i>						
80-20	0	14,3	2,73	21,8	1217	16,0
	1,5	13,3	3,00	45,8	1896	16,3
	2,5	13,8	3,42	47,0	1859	16,3
	3,5	14,0	3,45	48,6	1954	16,3
70-30	0	16,2	2,95	44,4	1875	16,3
	1,5	16,6	3,16	86,7	3216	16,3
	2,5	16,3	4,13	100,9	3394	16,3
	3,5	18,0	3,48	117,4	4564	16,4

Siendo:

- $w_i$ : humedad de la muestra al momento del ensayo.
- $\varepsilon_{falla}$ : deformación específica al momento de falla.

- $q_{max}$ : Tensión desviadora en la falla.
- $E_{50}$ : Módulo de elasticidad secante al 50% de la deformación específica.
- $\gamma_d$ : peso unitario seco real de la muestra ensayada.

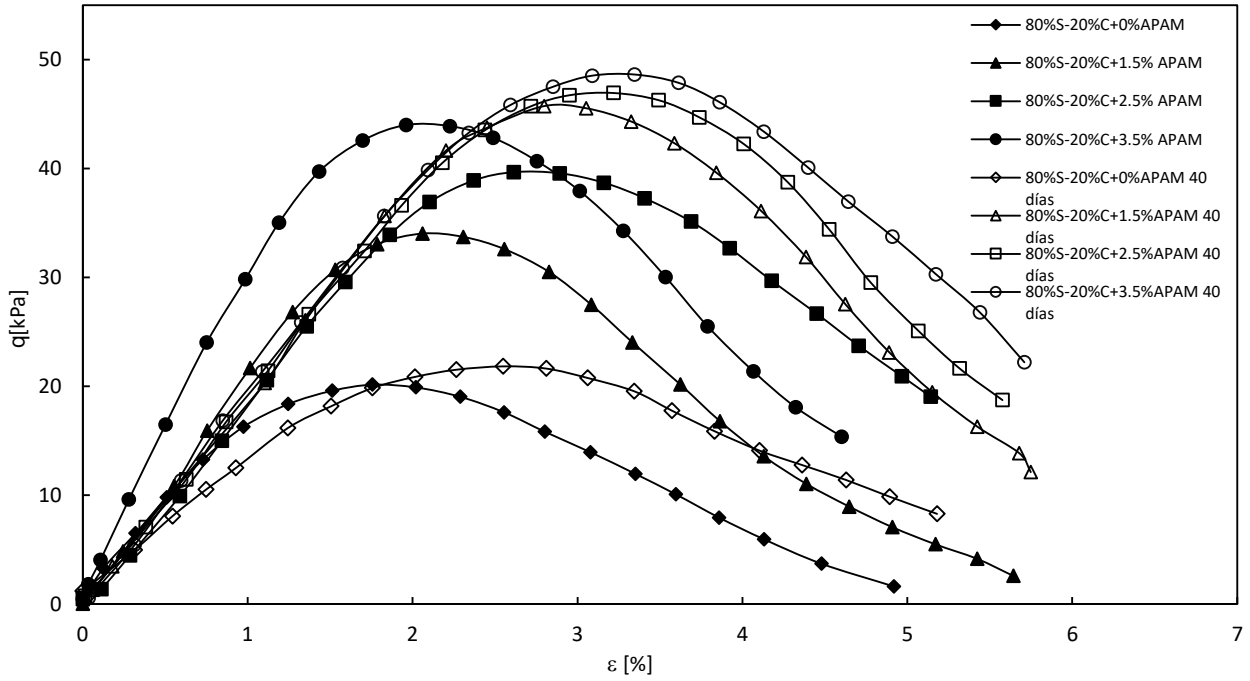


Fig. 4.54: Curvas tensión-deformación para mezclas 80-20 con un día y 40 días de curado.

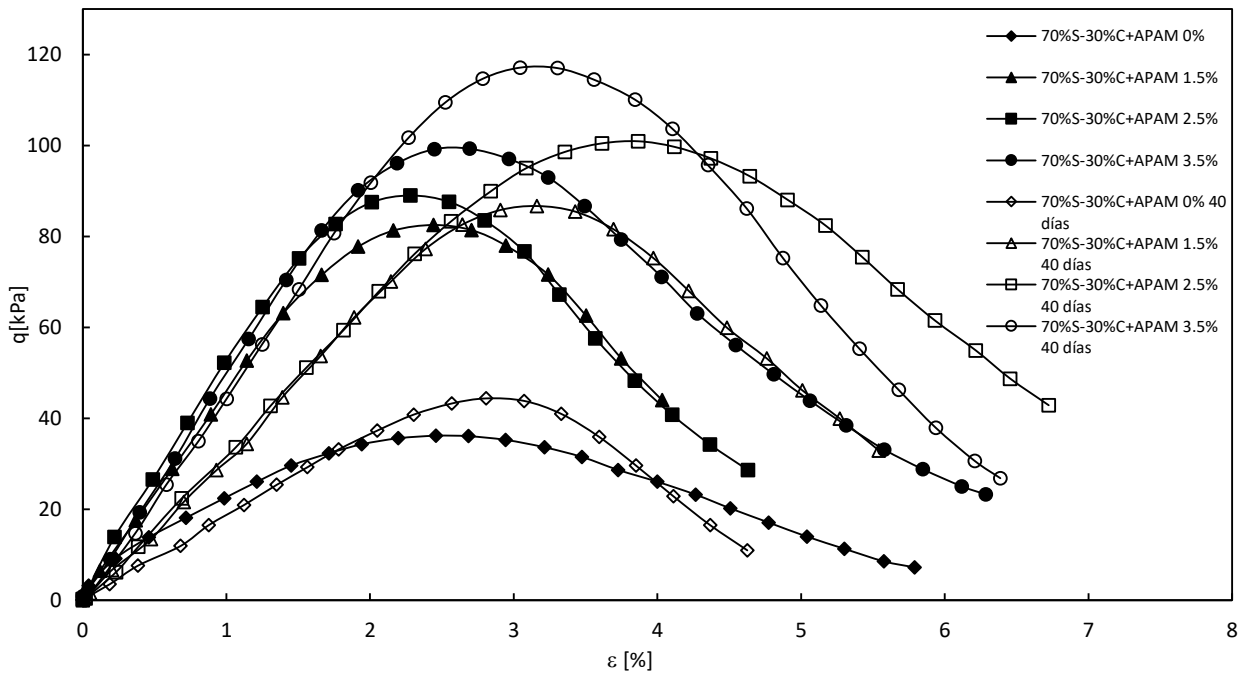


Fig. 4.55: Curvas tensión-deformación para mezclas 70-30 con un día y 40 días de curado

## 4.6. Hinchamiento libre

En las figuras 4.57 y 4.56 se presentan las curvas de hinchamiento para las dos mezclas arena-arcilla sin APAM y con APAM en porcentajes 1.5 % y 3.5 % de la fracción fina. En la Tabla 4.17 se presentan los valores finales de hinchamiento e índice de expansión.

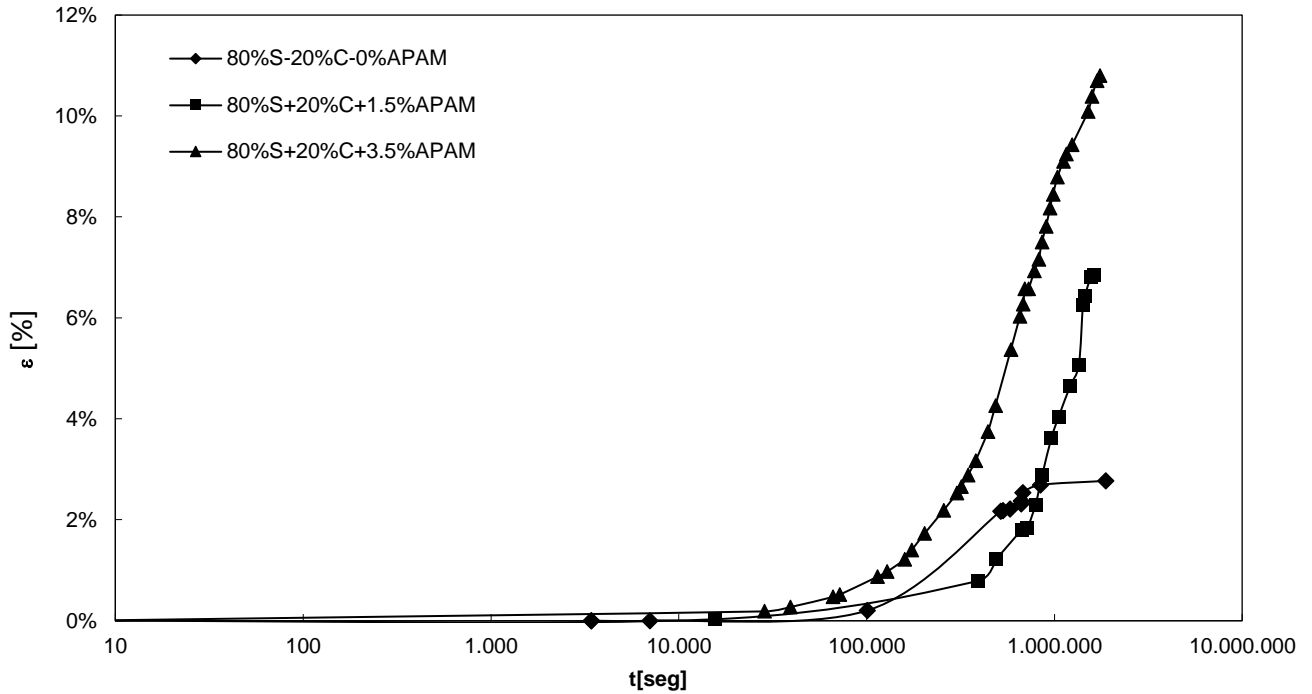


Fig. 4.56: Curvas de hinchamiento libre para mezclas 80-20.

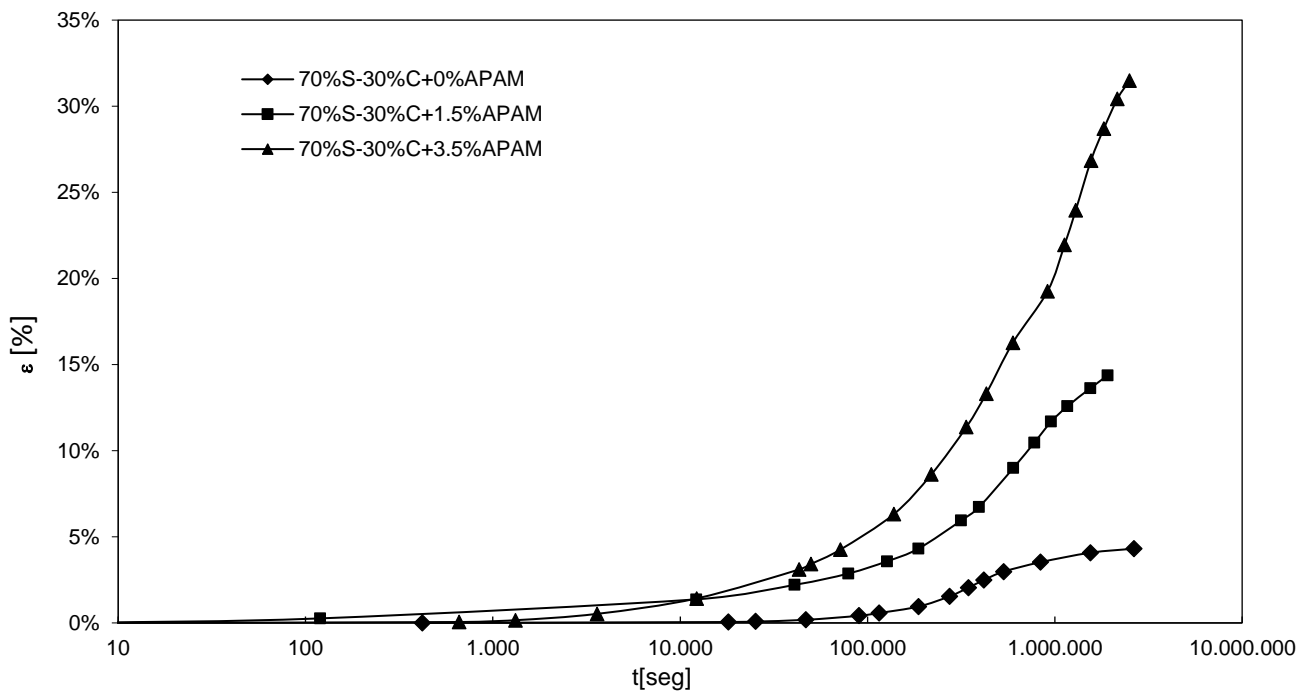


Fig. 4.57: Curvas de hinchamiento libre para mezclas 70-30.

Tabla 4.17: Hinchamiento libre e índice de expansión de mezclas arena-arcilla-APAM.

Mezcla	$\Delta H/H$ [%]	<i>EI</i>	Potencial de expansión
80-20-0	2.77	27.7	Bajo
80-20-1.5	6.84	68.4	Medio
80-20-3.5	11.2	112	Alto
70-30-0	4.31	43.1	Bajo
70-30-1.5	14.4	144	Muy alto
70-30-3.5	31.5	315	Muy Alto

## 5. Análisis y discusión de resultados

### 5.1. Introducción

A continuación se analizan los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos efectuados. Se presentan las tendencias de cambio en las propiedades de las mezclas analizadas teniendo en cuenta la variación del contenido de finos y APAM.

### 5.2. Curvas de compactación

En la Figura 5.58 se presenta la variación del peso unitario seco máximo de la mezcla en función del contenido de arcilla. Se incorporaron datos obtenidos por Casagrande [25] para la mezcla 85-15. Se observa un incremento del peso unitario seco máximo de apenas un 6 % para la mezcla 75-25 con respecto a la mezcla 85-15, mientras que para las mezclas 80-20 y 70-30 el incremento es inferior al 2 %. Estos valores permiten afirmar que para estas mezclas la fracción gruesa es dominante desde el punto de vista del peso unitario seco del material. Los mayores valores de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  obtenidos se fundamentan en que la nueva fracción de arcilla que se incorpora a la mezcla es capaz de ocupar los vacíos disponibles en la zona de macroporos generado por las partículas de arena. Por otro lado, mayor incorporación de arcilla implica mayor retención de agua de mezclado que también ocupa los vacíos y en consecuencia reduce el peso unitario seco máximo como es el caso de la mezcla 70-30.

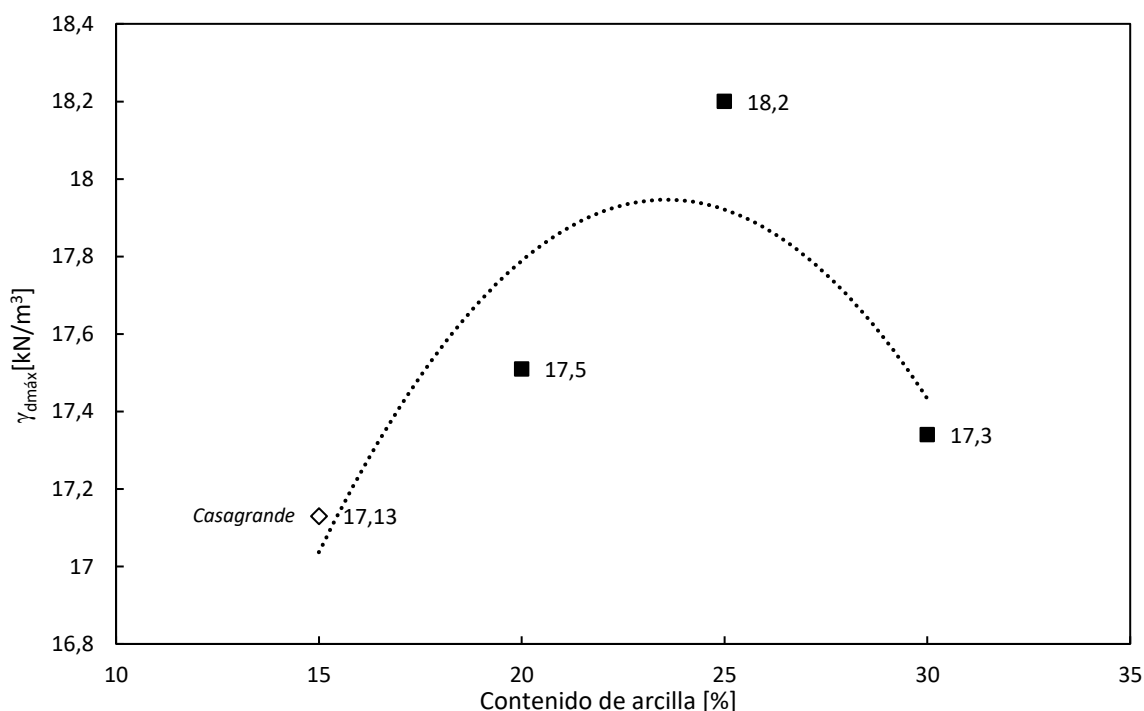


Fig. 5.58: Peso unitario seco máximo en función del contenido de arcilla obtenido de ensayos proctor estándar. Mezclas arena-arcilla sin APAM.

### 5.3. Curvas de retención

#### 5.3.1. Efecto del aumento del porcentaje de finos

En la Figura 5.59 se presentan nuevamente los resultados junto con los obtenidos por Marti [26] y Casagrande [25]. Al aumentar el contenido de finos de 15 a 30 % se registró un aumento

de los valores de entrada de aire  $Sae_s$  y  $Sae_c$ , del parámetro  $W_c$ , y una disminución del índice de distribución de poros. Se observa que el extremo derecho de la curva se aproximó a la curva de la arcilla sola por el aumento de  $Sae_c$  y  $W_c$ . Estos resultados confirman que el agregado de finos aumentan la capacidad de retención de agua de la mezcla y los valores de succión mátrica para un determinado porcentaje de saturación. La incorporación de mayor cantidad de finos a la mezcla reduce la cantidad y tamaño de macroporos y modifican los valores de succión mátrica según describe la ecuación de Laplace:

$$u_a - u_w = \frac{2T_s}{R} \quad (5.20)$$

donde:

- $u_a - u_w$  : succión mátrica.
- $T_s$  : tensión superficial en interfaz aire-agua.
- $R$  : radio de curvatura en la interfaz aire-agua.

La Ecuación 5.20 describe la proporcionalidad inversa entre el radio de curvatura  $R$  en la interfaz aire-agua relativo al tamaño de poros y la succión mátrica como se desarrolló en la Sección 2.4.

La desaturación de los macroporos comienza para succiones del orden de 5kPa mientras que la desaturación de los microporos comienza para succiones del orden de 8000kPa. Para un grado de saturación cercano a 45 % se observa en ambas mezclas un aumento de la succión sin pérdida de agua.

La curva de la mezcla 85-15 no presentó característica bimodal. En vista de como cambia la curva con el agregado de finos se estima que la forma bimodal debe existir pero sería necesario quitar mas humedad para observarlo. No fue posible hacer una conclusión sobre la evolución del grado de saturación residual ya que requería trabajar con valores de succión mátrica muy elevados que implican confeccionar muestras muy secas y muy poco manipulables.

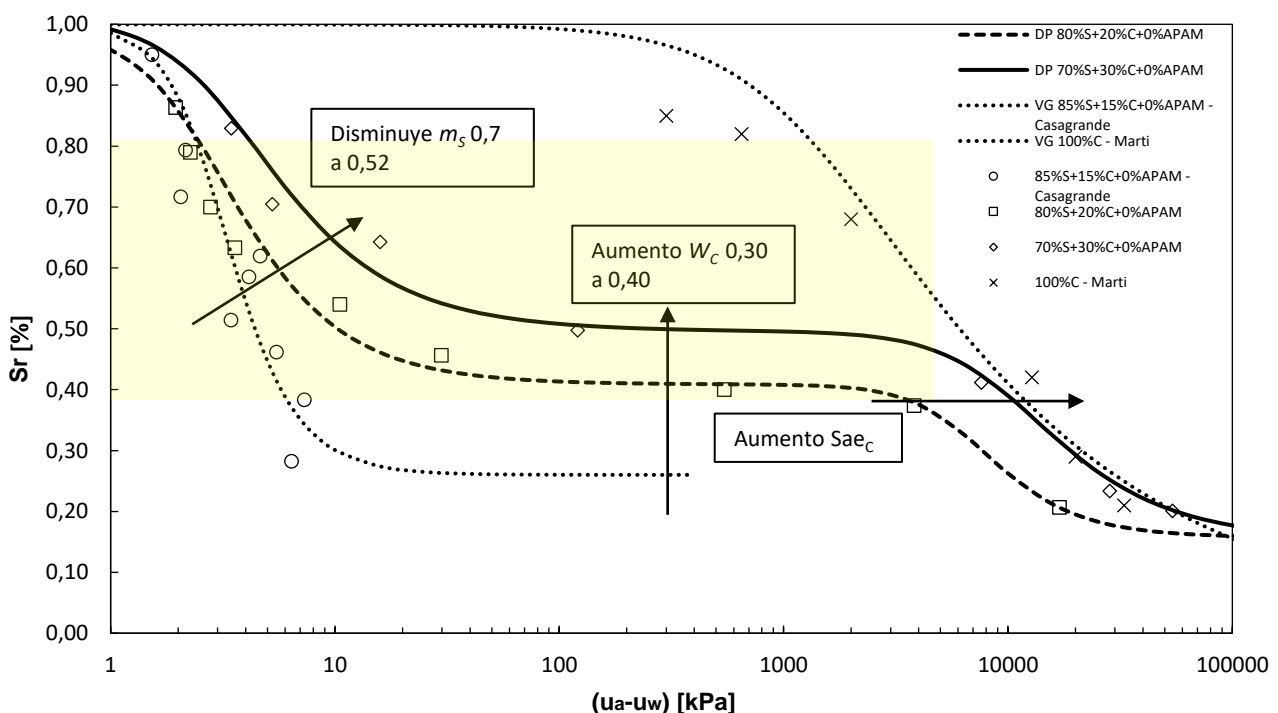


Fig. 5.59: Cambios en la curva de retención para mezclas sin APAM en función del contenido de finos de mezclas arena-arcilla. DP:ajuste doble porosidad. VG: ajuste de van Genuthchen.

La forma bimodal que adoptan las curvas para contenidos de finos del 20 % y 30 % indican que la distribución de tamaño de poros de las mezclas presentan también una forma bimodal o multimodal, lo cual se ve relativamente reflejado en la forma de la curva de distribución granulométrica de las mezclas arena-arcilla. La Figura 5.60 presenta la distribución granulométrica de la arena, la distribución granulométrica de la arcilla obtenida del ensayo de hidrometría y las curvas de distribución granulométricas de las mezclas 80-20 y 70-30 que surgen de combinar las dos primeras. Las curvas combinadas presentan una primera caída dada por la distribución mal graduada de la arena y luego se suaviza indicando el aporte de finos. Si bien la conformación del sistema de poros de una mezcla depende en gran parte del esfuerzo y humedad de compactación, estas curvas sugieren la posible formación de curvas de distribución de poros y de retención bimodales.

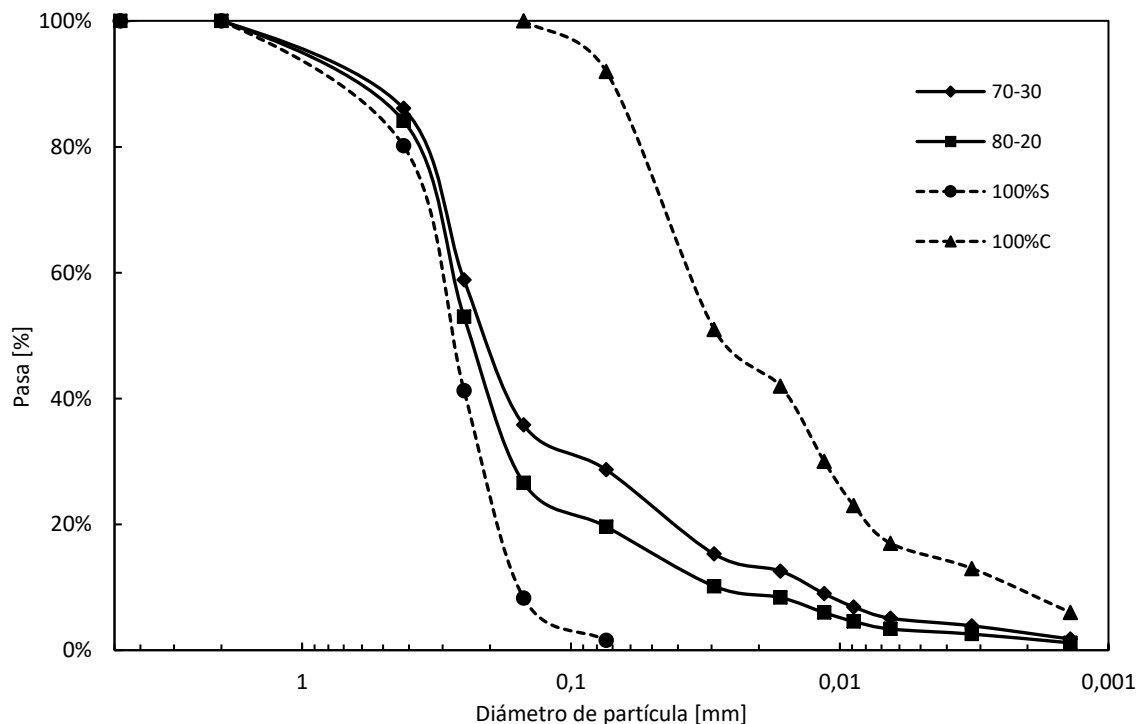


Fig. 5.60: Curvas de distribución granulométrica de mezclas arena-arcilla generadas a partir de combinar las curvas granulométricas individuales de la arena y de la arcilla.

### 5.3.2. Efecto de la incorporación de APAM

En la Figura 5.61 se presentan los resultados de la mezcla 70-30 con incorporación de 3.5 % de APAM. La incorporación de 3.5 % de APAM modificó la curva de retención en el mismo sentido en que se observó al aumentar el contenido de finos pero con cambios más contundentes. La forma completa de la curva tiende a la de la arcilla sola pero conservando la característica bimodal. Disminuyó el parámetro  $m_s$ , aumentó el parámetro  $W_c$  y se incrementaron los valores de succión de entrada de aire  $Sae_s$  y  $Sae_c$ . Estos resultados sugieren que el agregado de APAM uniformiza la distribución de poros, aumenta los valores de succión para una humedad dada y aumenta la capacidad de retención de agua.

En primera instancia se presume que el polímero uniformiza la distribución de poros al ocupar los vacíos existentes. En cuanto al aumento de la capacidad de retención de agua y de los valores de succión se estima que por un lado parte del agua de la mezcla se combina con el polímero y requiere más energía para su evaporación. Esto es así ya que las moléculas del agua de hidratación poseen una estructura molecular más ordenada que la del agua libre [4]. En un ensayo de papel filtro esto se evidencia en mayores valores de succión mátrica y total. Por otra parte la incorporación



de APAM disminuye el diámetro máximo de poros de la mezcla [26]. Como la succión mátrica es inversamente proporcional a dicho diámetro (ver Ecuación 5.20) es de esperar que los valores de succión aumenten.

La premisa de reducción del diámetro de poros por incorporación de APAM es coherente con los resultados obtenidos en las pruebas de conductividad hidráulica presentadas, en donde se observó una reducción de la conductividad hidráulica  $k$  al aumentar el contenido de APAM.

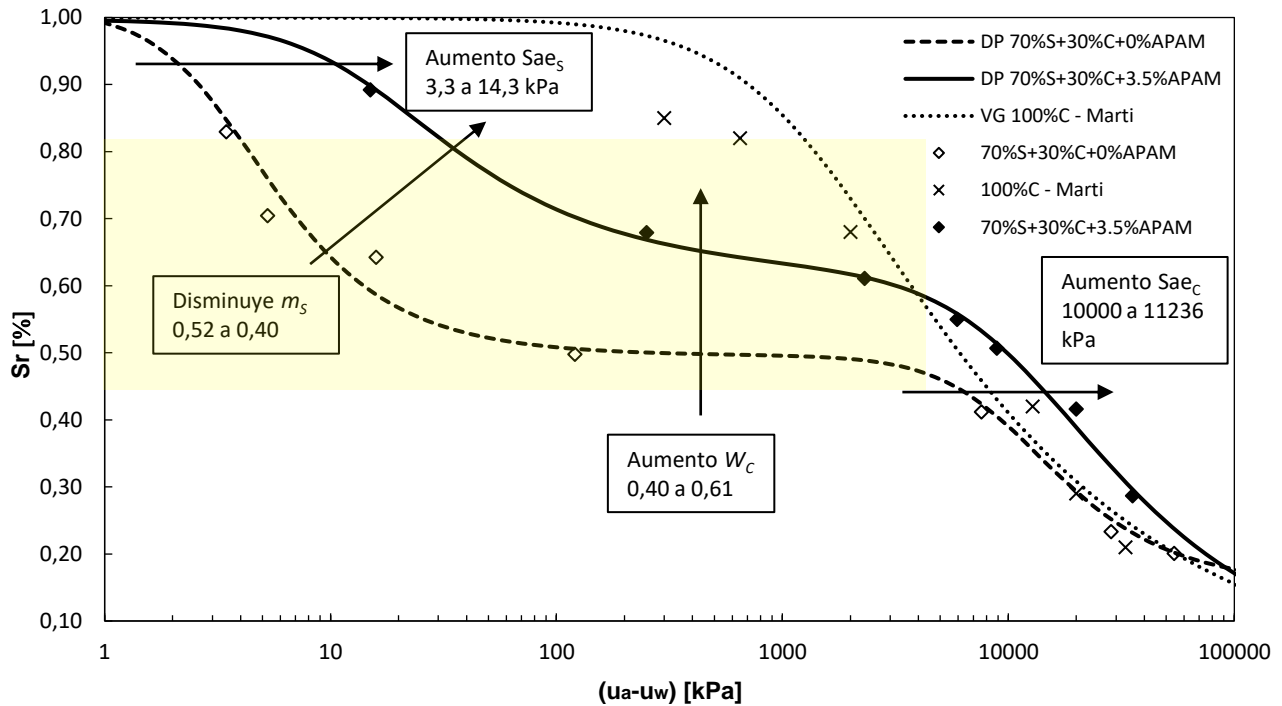


Fig. 5.61: Cambios en la curva de retención para mezclas arena-arcilla 70-30 en función del contenido de APAM. DP:ajuste doble porosidad. VG: ajuste de van Genuthchen.

En la Figura 5.62 se presentan los resultados de la mezcla 80-20 con incorporación de 3.5% APAM. Si bien esta serie de ensayos quedó incompleta y no es posible realizar un ajuste, se podría inferir que la adición de APAM en la mezcla 80-20 también aumenta la capacidad de retención de agua en la zona de macroporos y posiblemente aumente el valor de succión de entrada de aire  $S_{ae_s}$ .

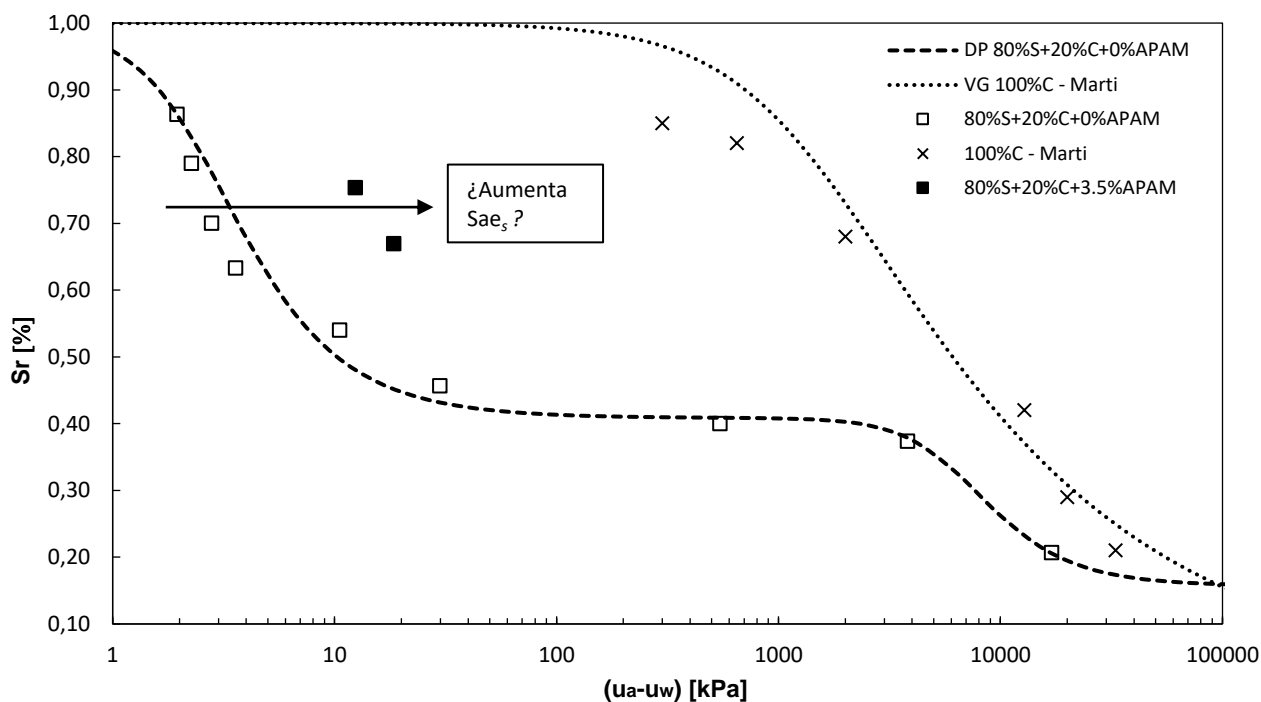


Fig. 5.62: Cambios en la curva de retención para mezclas arena-arcilla 80-20 en función del contenido de APAM. DP:ajuste doble porosidad. VG: ajuste de van Genuthchen.

## 5.4. Conductividad hidráulica

En la Tabla 5.18 se presentan nuevamente los valores de conductividad hidráulica saturada de cada mezcla incorporando los resultados de Casagrande[25] y Marti[26]. En las Figuras 5.63 y 5.64 se presenta la evolución del valor de conductividad hidráulica en función del contenido de finos y del contenido de APAM.

Tabla 5.18: Resultados de ensayos de conductividad hidráulica saturada.

Conductividad hidráulica saturada $k$ [m/s]				
Mezclas S+C	85-15	80-20	70-30	0-100
0 % APAM	$7.9 \cdot 10^{-10}$	$3.3 \cdot 10^{-10}$	$1.3 \cdot 10^{-10}$	$2.7 \cdot 10^{-11}$
1.5 % APAM	$7.3 \cdot 10^{-10}$	$3.1 \cdot 10^{-10}$	$1.6 \cdot 10^{-11}$	$1.5 \cdot 10^{-11}$
3.5 % APAM	-	$1.5 \cdot 10^{-11}$	$1.2 \cdot 10^{-11}$	-

### 5.4.1. Efecto del aumento del porcentaje de finos

La Figura 5.63 muestra que el aumento del contenido de finos disminuye la conductividad hidráulica de las mezclas. Estos resultados muestran que con un contenido de 20 % de arcilla (sin adición de APAM) es posible garantizar el valor límite exigido por norma ( $k \sim 10^{-9}$  m/s). La conductividad hidráulica de la mezcla 70-30 se ubica en el mismo orden de magnitud que la mezcla 80-20. El comportamiento asintótico ocurre con los tres porcentajes de APAM estudiados y resulta similar al observado por distintos autores (ver Sección 2.7) [34][35][32]. El hecho de que la conductividad hidráulica disminuya al aumentar el contenido de finos en un 5 % y de que tienda a una asíntota a partir de la mezcla 80-20 refuerza la hipótesis de que para porcentajes de finos inmediatamente

mayores al óptimo (mezcla que maximiza el peso unitario seco) las mezclas adquieren las características propias del material fino. En los resultados de ensayos proctor se determinó que la mezcla que proporciona la mayor densidad seca se ubica en torno a la mezcla 75-25 (ver Tabla 5.58), proporciones muy próximas a la mezcla 80-20 ensayada. Se evidencia que para contenidos de finos mayores al 20% la conductividad hidráulica es gobernada por la fracción fina presente en las mezclas.

La disminución de la conductividad hidráulica se fundamenta en los cambios de tamaño de distribución de poros que experimentan las mezclas. A mayor contenido de finos, se reducen los tamaños de poros, se incrementa la tortuosidad y crece el espesor de la doble capa difusa (ver Ecuación 2.17) por lo que la conductividad hidráulica disminuye.

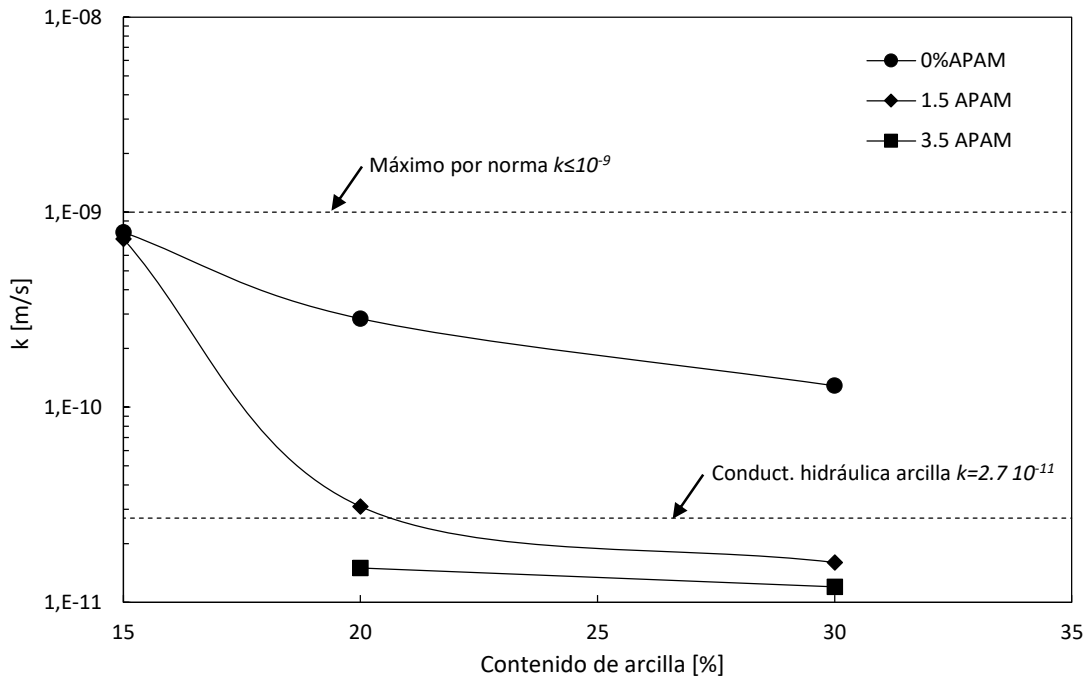


Fig. 5.63: Conductividad hidráulica  $k$  de mezclas arena-arcilla en función del contenido de arcilla.

### 5.4.2. Efecto de la incorporación de APAM

En la Figura 5.64 se presenta la conductividad hidráulica de las mezclas en función del contenido de APAM. La adición de APAM disminuyó la conductividad hidráulica a excepción de la mezcla 85-15 realizada por Casagrande [25]. En términos generales, los valores de conductividad hidráulica medidos se encuentran entre  $10^{-10}$  y  $10^{-11}$  m/s y verifican los valores admisibles exigidos por normas. Las tendencias de cambio para mezclas 80-20 y 70-30 presentan similitud frente a la incorporación de APAM, mostrando valores de conductividad hidráulica menores a mayor contenido de APAM, tendiendo a una asíntota para contenidos de APAM mayores al 1.5% con valores menores al de la arcilla sola.

El hecho de que la incorporación de APAM disminuya la conductividad hidráulica solo en mezclas con contenido de finos mayor al 20% sugiere que el mecanismo impermeabilizador del polímero depende de la presencia de finos electroquímicamente activos. Como se analizó anteriormente, la incorporación de APAM aumenta el hinchamiento libre de las mezclas de manera no lineal. Este fenómeno se atribuye a la formación de dobles capas difusas en la arcilla y en las cadenas de polímero que tienden a repelerse. En los ensayos de conductividad hidráulica efectuados, el hinchamiento libre estuvo restringido por lo que en consecuencia las mezclas expandieron dentro de los propios vacíos reduciendo el volumen total de vacíos y dificultando el camino de circulación del agua. Como efecto directo disminuyó de la conductividad hidráulica.

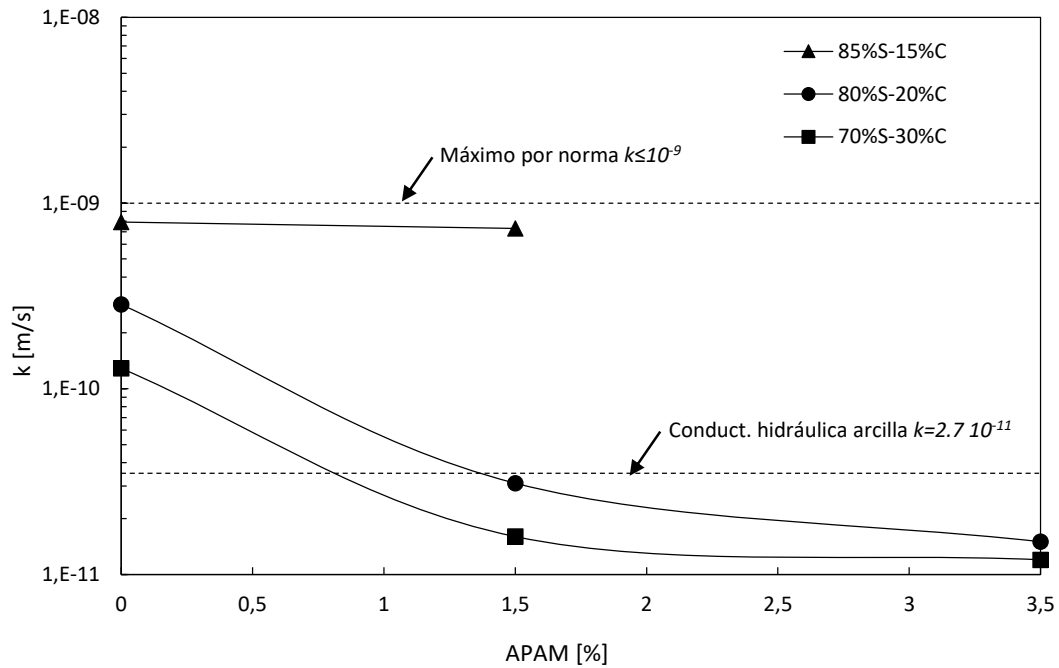


Fig. 5.64: Conductividad hidráulica  $k$  de mezclas arena-arcilla en función del contenido de APAM.

## 5.5. Resistencia y rigidez

### 5.5.1. Efectos del aumento del porcentaje de finos

#### Resistencia

En las Figuras 5.65 y 5.66 se presenta la evolución de la resistencia a compresión simple UCS y el módulo secante  $E_{50}$  en función del contenido del finos para un día y 40 días de curado. El aumento de la fracción de arcilla produjo aumentos en la resistencia a compresión simple de las probetas. Esto se evidenció para los dos tiempos de curado. El efecto se debe a que la mayor incorporación de fracción fina aumenta la succión mátrica de las mezclas y que a su vez genera un incremento de la resistencia al corte del material (ver Sección 2.4.2, Ec. 2.11).

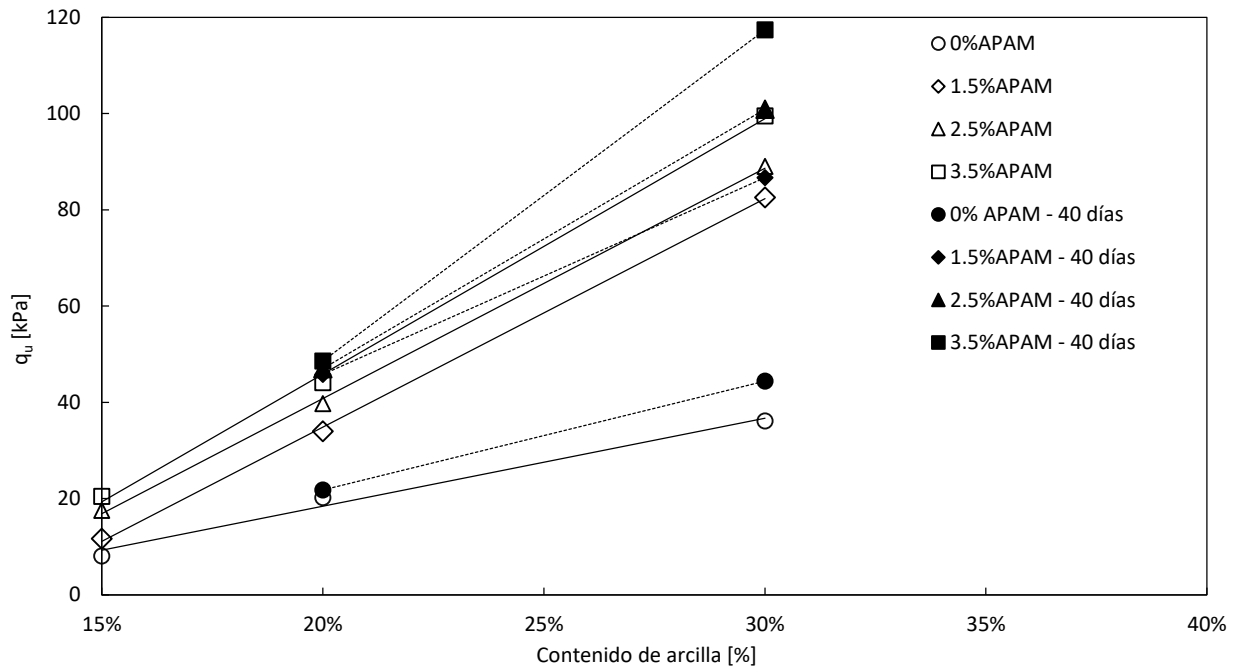


Fig. 5.65: Resistencia a compresión simple en función del contenido de arcilla para distintos porcentajes de APAM a un día y 40 días de curado.

### Rigidez

La rigidez tiende a aumentar con el incremento del contenido de finos aunque la tendencia no es tan clara. En la Figura 5.66 se observa que si bien la tendencia es creciente algunos valores disminuyen y luego vuelven a aumentar al variar los finos entre un 15 y 30 %.

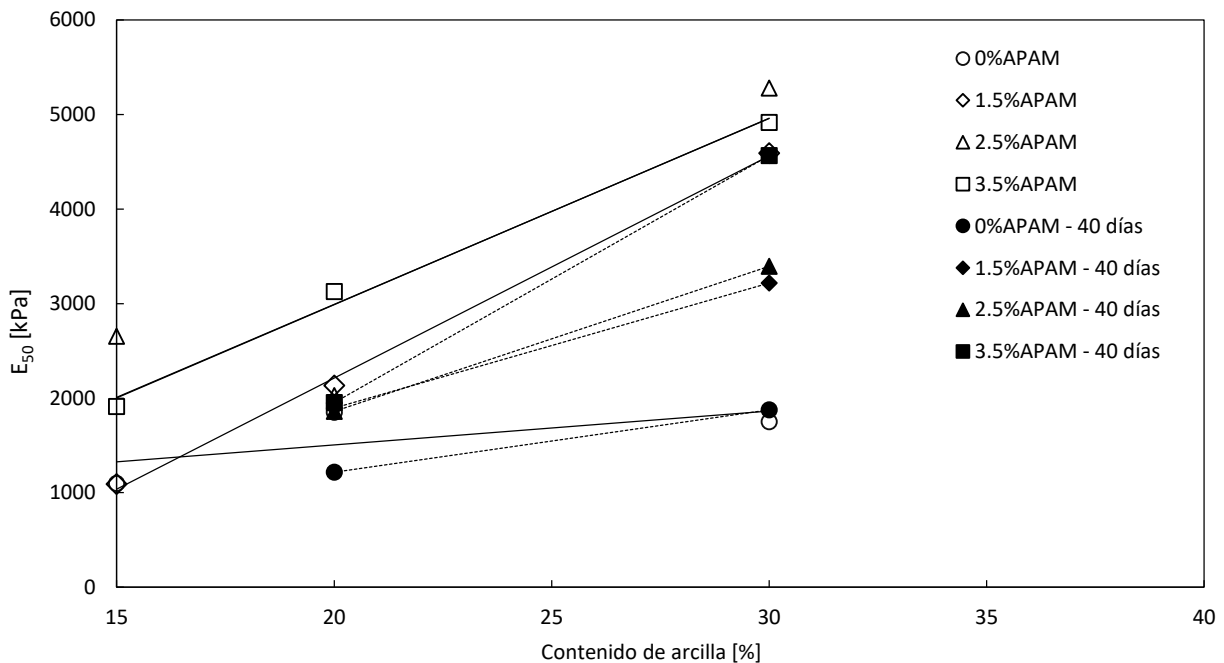


Fig. 5.66: Módulo de elasticidad al 50 % de la falla en función del contenido de arcilla para distintos porcentajes de APAM con un día y 40 días de curado.

## 5.5.2. Efectos de la incorporación de APAM

### Resistencia

En la Figura 5.67 y en la Tabla 5.19 se resumen los resultados y las tendencias de cambio de la resistencia a compresión simple en función del porcentaje de APAM para mezclas arena-arcilla 80-20 y 70-30 curadas a un día y a 40 días.

Tabla 5.19: Tendencia de la resistencia a compresión simple con la incorporación de APAM relativo a las mezclas sin polímero.

Mezcla/APAM [%]	Incremento UCS respecto a mezcla sin APAM [%]		
	1.5	2.5	3.5
85-15	44	116	152
80-20	68	97	118
70-30	129	147	176

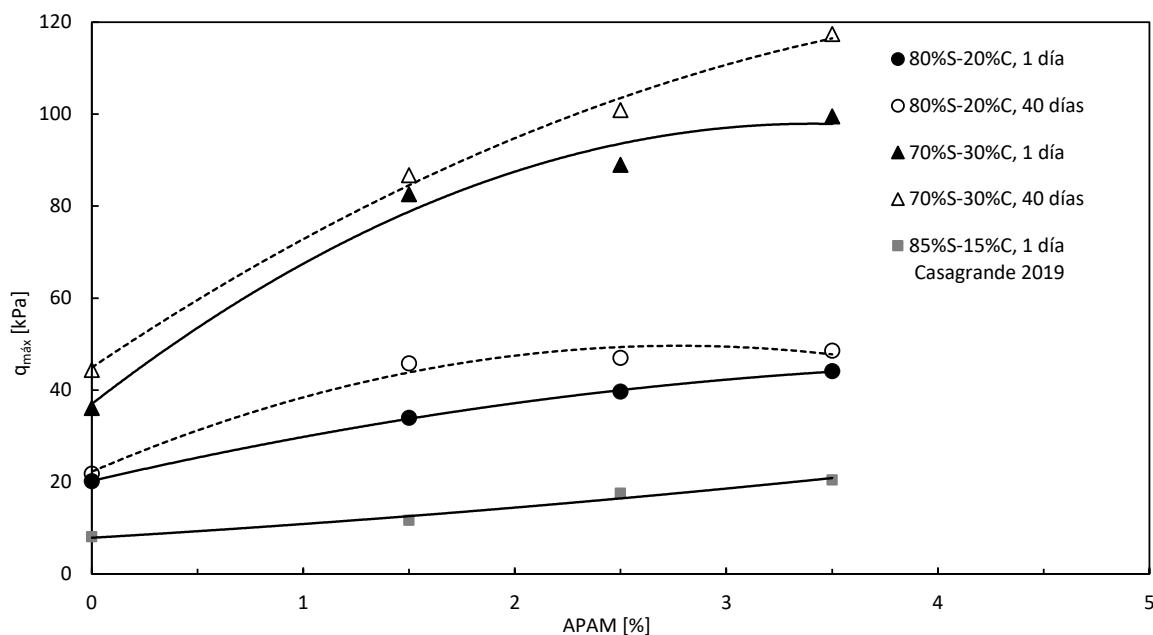


Fig. 5.67: Variación de resistencia en función del porcentaje de APAM a un día y 40 días de curado.

Se observa que la incorporación de APAM genera un aumento en la resistencia de las probetas. Los cambios resultan mas significativos para las mezclas 70-30 que para las mezclas 80-20. Esta característica se observó para los dos tiempos de curado. Es interesante notar que la adición de APAM en un 1.5 % produce un aumento mas significativo que con proporciones mayores.

El incremento de resistencia registrado por incorporación de APAM se debe principalmente a dos efectos. En primer lugar el polímero hidratado se adhiere tanto a las partículas finas como gruesas mejorando el comportamiento frente a la acción de esfuerzos de corte. En segundo lugar el aumento de la succión mátrica en las mezclas por incorporación de APAM incrementa la resistencia al corte del material según describe la Ecuación 2.11.

## Rigidez

En la Figura 5.68 se presenta la variación del módulo  $E_{50}$  en función del porcentaje de APAM. En todas las mezclas se registró un aumento de rigidez al aumentar el contenido de APAM. El efecto resulta mas significativo para la mezcla 70-30. El cambio de rigidez se atribuye al aumento de los valores de succión mátrica generado por la incorporación de APAM (ver Figura 5.61).

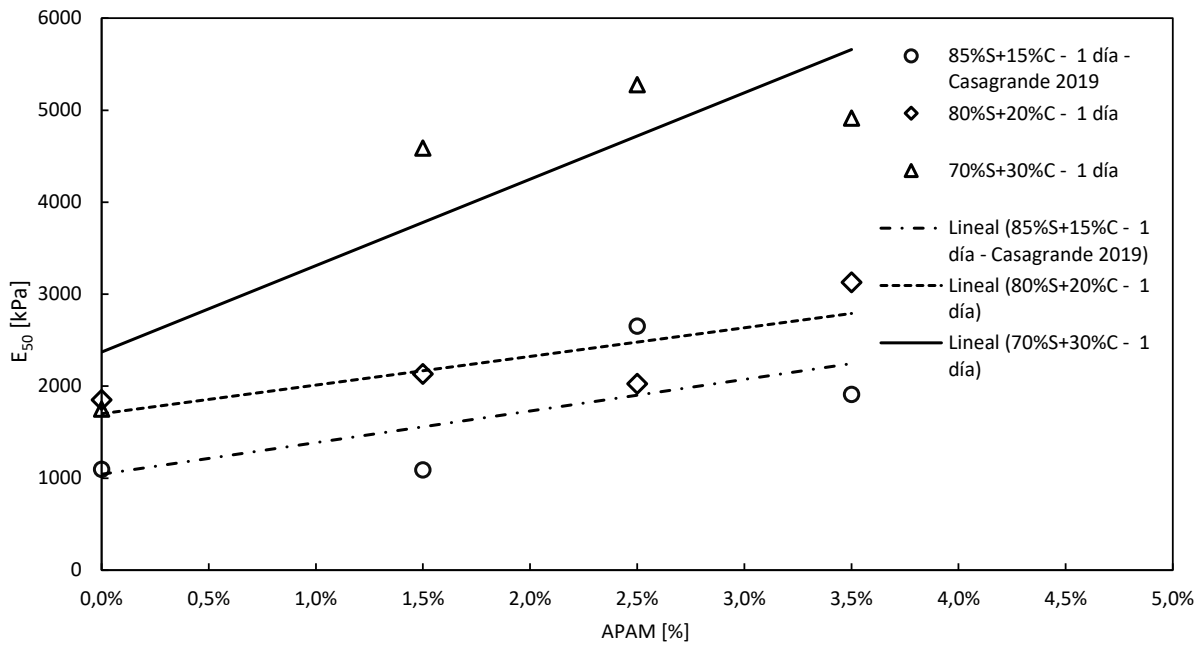


Fig. 5.68: Variación del módulo de elasticidad al 50 % de la deformación en función del porcentaje de APAM sin curado.

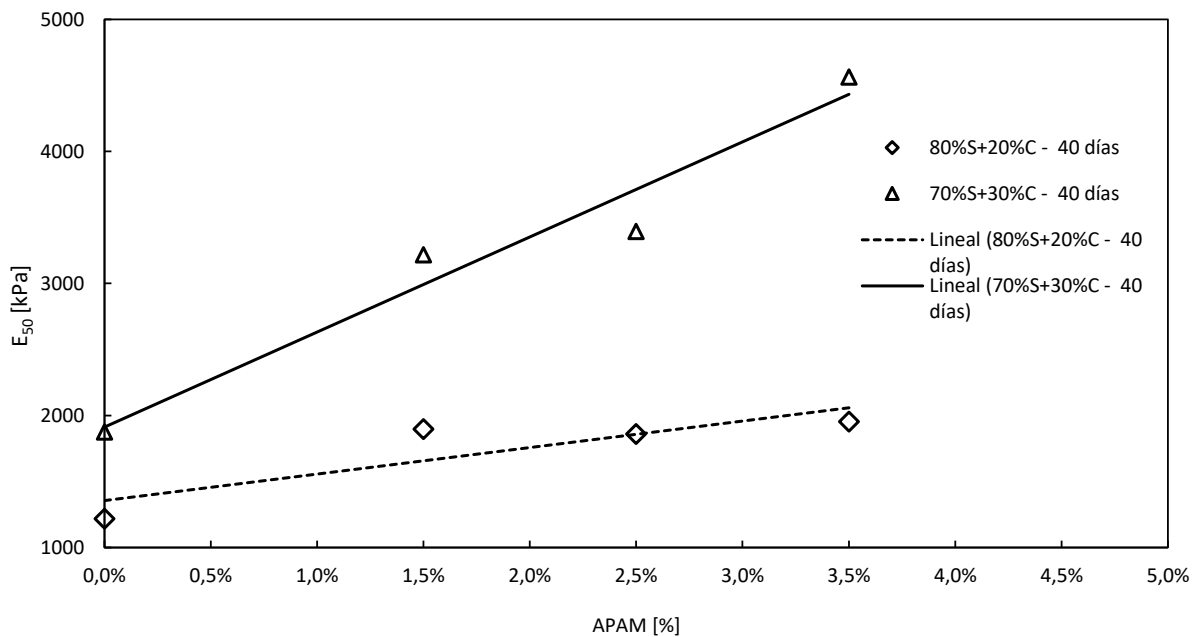


Fig. 5.69: Variación del módulo de elasticidad al 50 % de la deformación en función del porcentaje de APAM con 40 días de curado.

### 5.5.3. Efecto del paso del tiempo

Todas las probetas preparadas con APAM experimentaron un aumento de su resistencia al aumentar de uno a 40 días el tiempo de curado. Este aumento no fue tan significativo como el producido por la incorporación de APAM o el incremento de finos (ver Tabla 5.20 y Figura 5.67). En cuanto a las mezclas sin APAM, no se registraron cambios por aumento del tiempo de curado.

Tabla 5.20: Aumento de la resistencia a compresión simple con la incorporación de APAM a 40 días de curado relativo a las mezclas con un día de curado.

Mezcla/APAM [%]	1.5	2.5	3.5
80-20	35 %	18 %	18 %
70-30	5 %	13 %	18 %

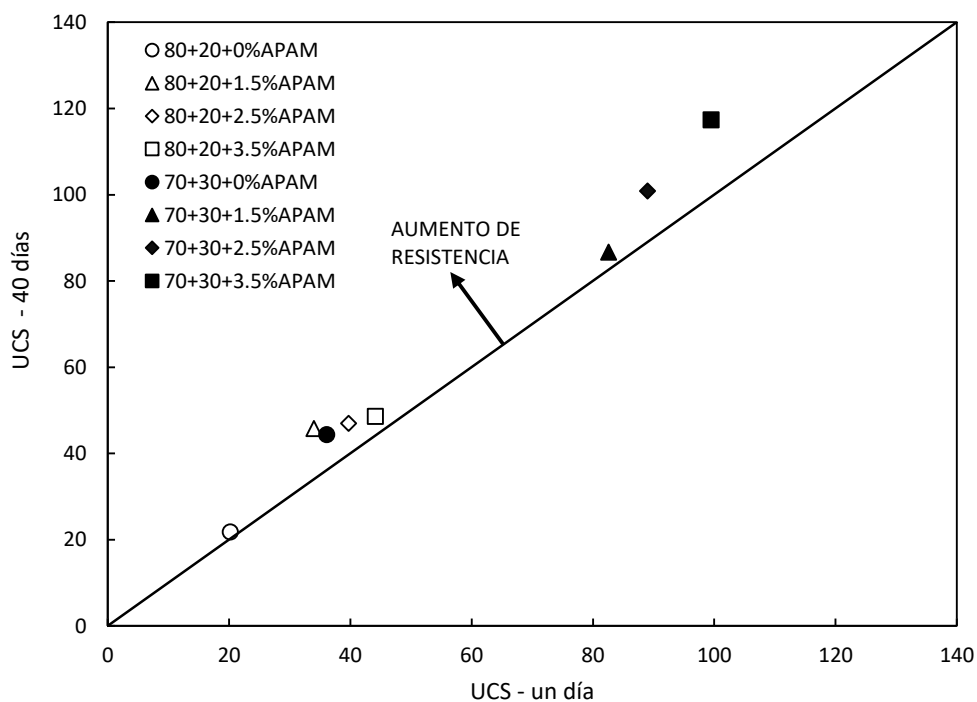


Fig. 5.70: Comparación UCS según los dos tiempos de curado.

Un aspecto importante del análisis fue corroborar que el incremento de la resistencia no fue producto de un incremento de succión mátrica por secado de las probetas durante el curado. Se estima que el paso del tiempo permite que continúe la hidratación del polímero generando mas puentes de unión y adherencia por lo que en consecuencia las probetas adquieren mayor resistencia.

El curado de las probetas no presentó aumento de la rigidez con respecto a los valores obtenidos sin curado. En la Figura 5.71 se graficaron los valores del módulo  $E_{50}$  para los dos tiempos de curado. Se aprecia que los puntos se ubican a la derecha de la línea de 45°.



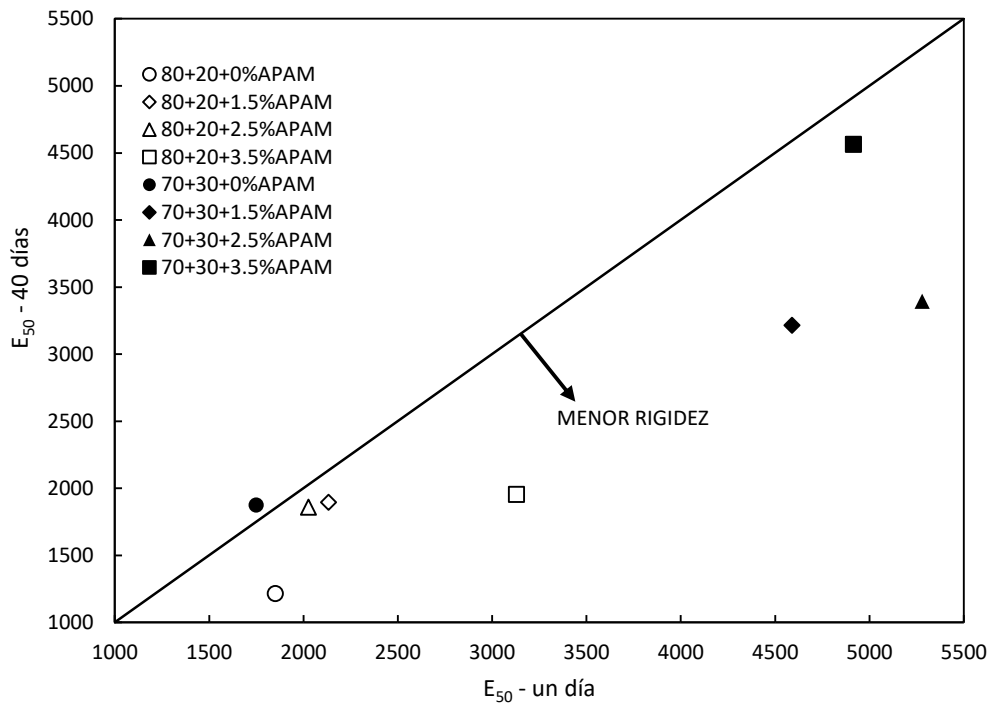


Fig. 5.71: Comparación  $E_{50}$  según los dos tiempos de curado.

## 5.6. Hinchamiento

En la Tabla 5.21 se presentan nuevamente los valores de hinchamiento final que presentó cada mezcla con distinto contenido de APAM combinado con los resultados obtenidos por Casagrande [25] y Marti [26] para mezclas arena-arcilla 85-15. En las figuras 5.72 y 5.73 se presentan los valores finales de hinchamiento en función del contenido de APAM y del contenido de finos.

Tabla 5.21: Hinchamiento libre de mezclas arena-arcilla con distintos contenidos de APAM.

Mezcla/	APAM 0 %	APAM 1.5 %	APAM 3.5 %
85-15	0 %	1.6 %	7.3 %
80-20	2.8 %	6.84 %	11.6 %
70-30	4.3 %	14.4 %	31.5 %
0-100	7.7 %	14.2 %	27.2 %

### 5.6.1. Efecto del aumento del porcentaje de finos

El aumento del contenido de finos incrementó los valores finales de hinchamiento libre (ver Figura 5.72). Se observa un cambio en el comportamiento en el que el hinchamiento tiende a una asíntota similar al valor de la arcilla sola cuando el contenido de finos se acerca al 30 %. Dicho valor es próximo al 25 % que maximiza el peso unitario seco (ver Figura 5.58). En primera instancia, estos resultados son consistentes con lo sostenido por otros autores (ver Sección 2.7) y refuerza el concepto de que mezclas con contenido de finos superior al óptimo poseen un comportamiento dominado por la fracción fina.

La característica expansiva de estas mezclas está dada por la presencia del mineral arcilla que genera una doble capa difusa al hidratarse y adsorbe agua en su superficie generando posteriormente un cambio de volumen y/o presión de hinchamiento por repulsión eléctrica (ver Sección 2.3). El fenómeno de presión de hinchamiento puede describirse con la ecuación de Van't Hoff:

$$\pi = RT \sum [c_i^{interp} - c_i^{fluido}] \quad (5.21)$$

donde  $\pi$  es la presión osmótica también conocida como presión de hinchamiento [4],  $c_i^{interp}$  es la concentración molar iónica en el espacio interpartícula (arcilla),  $c_i^{fluido}$  es la concentración molar iónica en el fluido hidratante (agua),  $R = 8,23LkPa/mol^\circ K$  es la constante universal de gases ideales y  $T$  es la temperatura absoluta. A mayor contenido de finos mayor es la concentración molar iónica interpartícula de la mezcla. Esta ecuación muestra que al aumentar  $c_i^{interp}$  la presión de hinchamiento también aumenta y en caso de que no exista restricción al movimiento se experimentará expansión hasta lograr el equilibrio de la solución.

Se tiene el caso particular para la mezcla 85-15 sin APAM en el que el hinchamiento libre registrado fue de 0%. Observando la Ecuación 5.21, puede suponerse que la cantidad de finos es lo suficientemente baja para que  $c_i^{interp}$  de la mezcla sea similar a la del fluido y por lo tanto  $\pi$  no genere cambio de volumen.

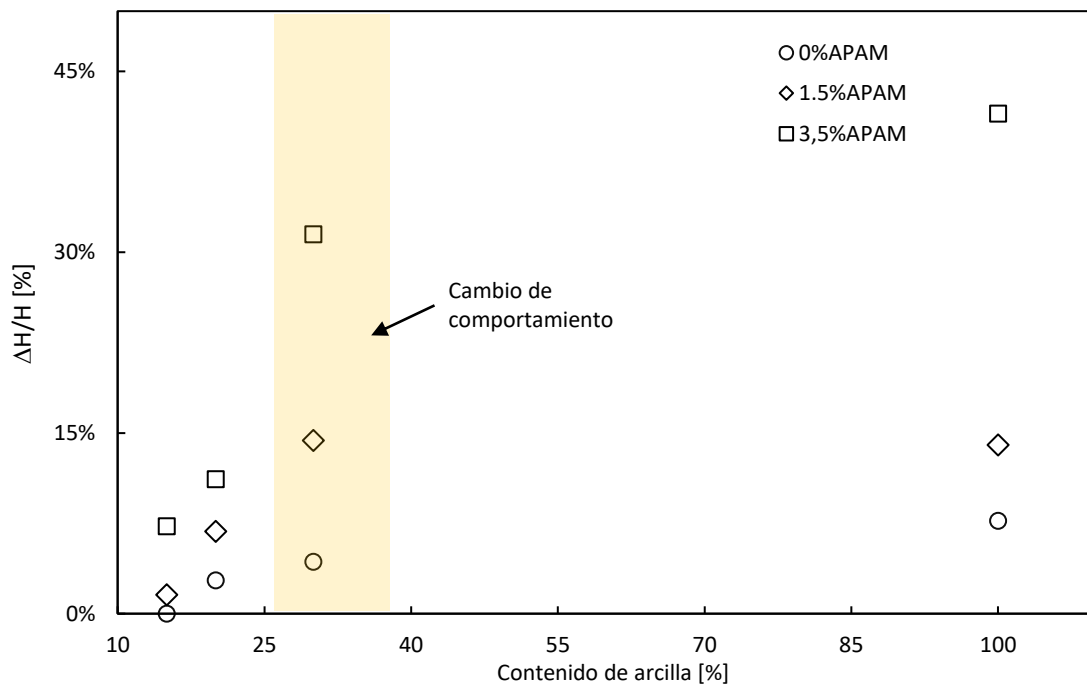


Fig. 5.72: Valores finales de hinchamiento libre en función del contenido de arcilla.

### 5.6.2. Efecto del contenido de APAM

La adición de APAM incrementó los valores de hinchamiento libre de todas las mezclas de manera no lineal (ver Figura 5.73). Como se mencionó anteriormente (ver Sección 2.3) la poliacrilamida es un hidrogel. Los hidrogeles tienen la característica de absorber agua entre 20 y 1000 veces su peso seco mediante la fijación de las moléculas agua y cuando lo hacen expanden su volumen. En el caso particular de la APAM, las moléculas de agua son atraídas por los co-monómeros electronegativos y generan una capa de hidratación. La interacción entre la capa de hidratación del polímero y la doble capa difusa de las partículas de arcilla genera fuerzas de repulsión electrostáticas que derivan en un aumento de volumen [46]. El aumento de las fuerzas de repulsión electrostática por adición de APAM también puede describirse con la Ecuación 5.21 en la que la adición de APAM incrementa  $c_i^{interp}$  dando como resultado un aumento de la presión osmótica o de hinchamiento.

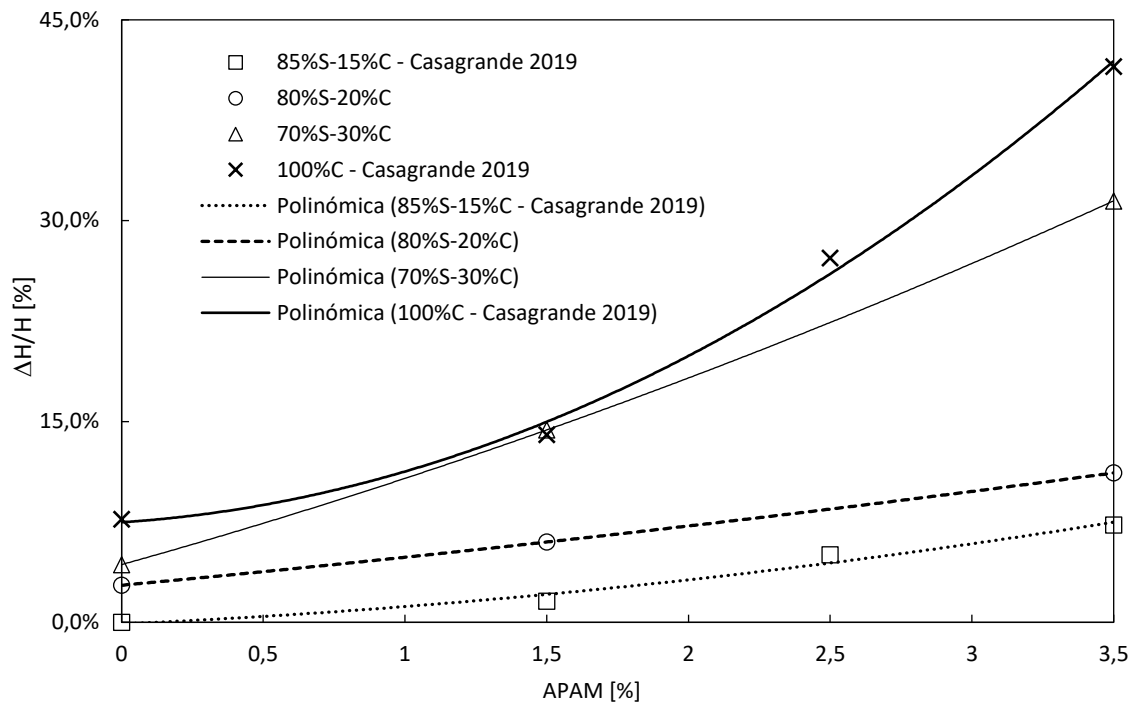


Fig. 5.73: Tendencia del hinchamiento libre en función del contenido de APAM.

## 6. Aplicación tecnológica: desempeño de mezclas arena-arcilla-APAM como barrera hidráulica frente al avance de lixiviados y transporte de contaminantes

### 6.1. Introducción

La aplicación tecnológica efectuada consistió analizar el desempeño de las mezclas estudiadas como barrera hidráulica inferior de un RS frente al avance de los lixiviados generados en su interior. Los análisis efectuados fueron:

- estudio de infiltración de lixiviados (transporte por advección).
- estudio de transporte de contaminantes (transporte por advección-dispersión-difusión).

El objetivo del primer análisis propuesto fue verificar si el uso de las mezclas estudiadas logra aislar los lixiviados durante la vida útil del RS. Los resultados hasta aquí presentados mostraron que las mezclas ya cumplen con el requisito de conductividad hidráulica exigido en normas y regulaciones. No obstante, es necesario considerar las características particulares de los materiales y de la operación del RS para corroborar su buen desempeño.

En un segundo análisis se consideró la composición química de un lixiviado típico perteneciente a un RS de una localidad de Argentina con el objetivo de evaluar cuanto tiempo tarda un contaminante en alcanzar una concentración límite en el extremo inferior de la barrera. Numerosas publicaciones muestran que si bien la conductividad hidráulica es el parámetro más importante a la hora de diseñar una barrera hidráulica, existen otros factores que pueden afectar significativamente el transporte de contaminantes a través de la misma [47][48][49][50][51]. Los contaminantes presentes en los lixiviados pueden migrar por difusión molecular debido al gradiente químico existente en el espesor de la barrera. Cuando la conductividad hidráulica es baja, la difusión molecular se vuelve un mecanismo de transporte importante y puede ocurrir que los contaminantes atraviesen la barrera antes que el líquido lixiviado. Esto ya fue evidenciado por Shackelford [47] en ensayos de difusión de contaminantes a través de barreras de distintas conductividades hidráulicas (ver Figura 6.74).

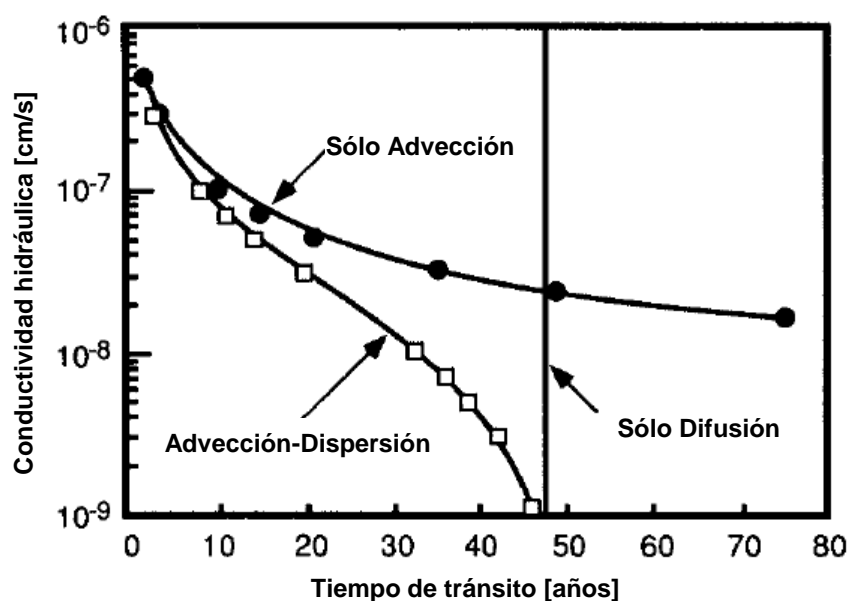


Fig. 6.74: Tiempo de tránsito para transporte de contaminantes a través de una barrera de arcilla de 91 cm con una porosidad de 0.5 y bajo un gradiente hidráulico de 1.33 (Adaptado de Shackelford, 1988).

## 6.2. Análisis de infiltración

En la mayoría de los casos la barrera hidráulica inferior no se encuentra saturada. Es por ello que se utilizó un modelo de infiltración en suelos no saturados para analizar la migración del lixiviado a través de la barrera. Para la modelación se utilizó el software libre Hydrus 1D desarrollado por la agencia de protección ambiental (EPA) de Estados Unidos. El programa permite obtener la conductividad hidráulica no saturada como función del grado de saturación efectivo  $k(S_e)$  a partir de la curva de retención del suelo y la conductividad hidráulica saturada mediante la resolución numérica de la ecuación de Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (6.22)$$

siendo:

- $\theta$  : humedad volumétrica.
- $h$  : energía piezométrica.
- $x$  : coordenada espacial de dirección predominante de infiltración.
- $\alpha$  : ángulo entre el flujo y la dirección vertical.  $\alpha = 0$  para flujos descendentes por gravedad.
- $K$  : conductividad hidráulica no saturada.
- $S$  : absorción por raíces.

HYDRUS 1D fue desarrollado en conjunto al ya mencionado software RETC de ajuste de curvas de retención lo que presenta la ventaja de que ambos programas utilizan los mismos parámetros. HYDRUS 1D admite el modelo de curva bimodal de Durner [44] y en ese caso resuelve una formulación modificada de la ecuación de Richards (ver Ec. 6.23). Esta formulación posee dos partes. La primera describe el movimiento del agua a través del sistema de macroporos mediante la ecuación de Richards. El segundo describe el movimiento del agua a través del sistema de microporos con un simple balance de masa.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{mo}}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S_{mo} - \Gamma_w \\ \frac{\partial \theta_{mi}}{\partial t} &= -S_{mi} - \Gamma_w \end{aligned} \quad (6.23)$$

- $\theta = \theta_{mo} + \theta_{mi}$  : humedad volumétrica compuesta por las humedades de los sistemas de macro y micro poros.
- $\Gamma_w$  : tasa de transferencia de fluido entre los dos sistemas de poros.

### 6.2.1. Geometría y propiedades de los casos analizados

La barrera hidráulica se representó con elementos finitos lineales (1D) ya que el flujo predominante es vertical. Se estableció un espesor  $L = 60cm$  que es el mínimo recomendado en la mayoría de las normas. Este espesor se discretizó en 100 elementos lineales. Las propiedades físicas de cada mezcla se representaron asignando al conjunto de elementos las curvas de retención obtenidas con RETC y los valores de conductividad hidráulica saturada correspondientes. Se realizaron tres modelos correspondientes a las mezclas 85-15 sin APAM y con APAM al 1.5 %; 80-20 sin APAM y con APAM al 3.5 %; y 70-30 sin APAM y con APAM al 3.5 %. Como se mencionó en la Sección 5.3.2, no fue

posible ajustar una curva de retención a la mezcla 80-20-3.5 debido a la poca cantidad de datos experimentales. De todas maneras, se propuso una curva de retención aproximada que considera a los dos puntos experimentales obtenidos y encuadra dentro de la tendencia general ya analizada para así poder ejecutar la simulación de todas las mezclas estudiadas.

### 6.2.2. Condiciones de borde

Las condiciones de borde solicitadas por HYDRUS 1D son:

- condición de borde superior
- condición de borde inferior
- valor inicial del contenido de humedad del suelo de la barrera

La condición de borde superior se estableció como una carga hidráulica constante  $h_i=30$  cm que representa la carga de lixiviado existente sobre la barrera (ver Fig. 6.75). Este valor es la carga máxima recomendada para el diseño de un RS [2]. Asumir que la carga es constante a lo largo del tiempo es conservador ya que cuando el RS se acerca al fin de la vida útil la carga de lixiviado disminuye. La condición de borde inferior se estableció como drenaje libre ya que en general el suelo de fundación posee una conductividad hidráulica mucho mayor que la de la barrera. El valor inicial del contenido de humedad volumétrica  $\theta_i$  de cada mezcla se fijó como el óptimo de compactación de cada una mas un 1 %, en correspondencia con lo adecuado para compactar con humedad natural del lado de la rama húmeda.

En la Figura 6.75 se presenta el modelo esquemático para el análisis de infiltración unidimensional de lixiviados a través de la barrera.

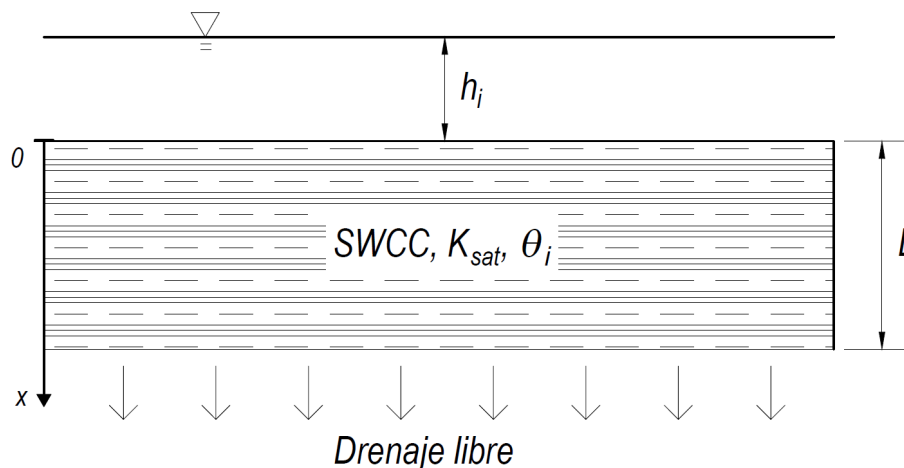


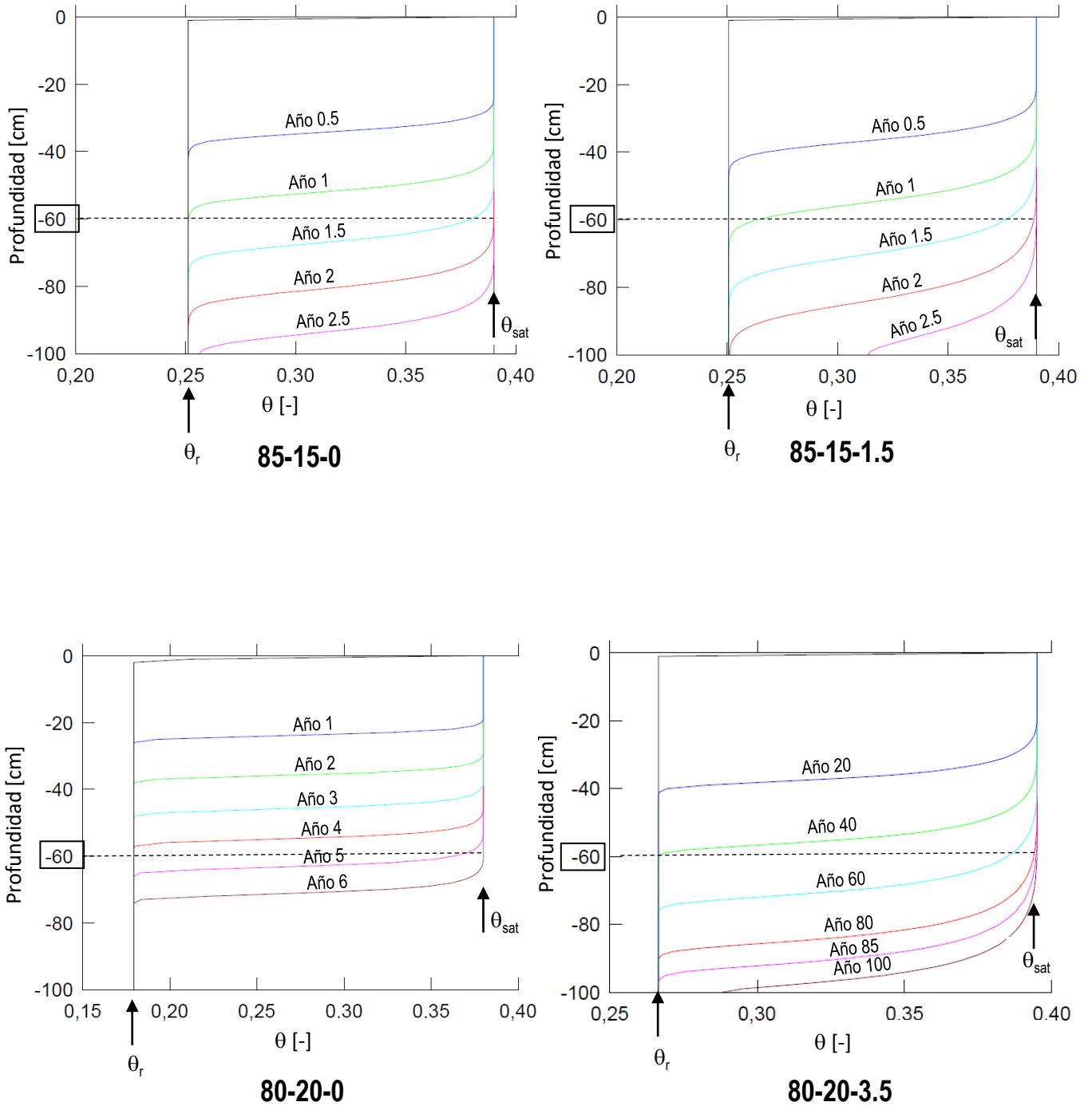
Fig. 6.75: Modelo esquemático para el análisis de infiltración de lixiviados a través de la barrera.

### 6.2.3. Criterio de análisis

El criterio de análisis consistió en evaluar cuánto tarda el extremo inferior de la barrera en alcanzar la saturación, siendo esta una situación crítica en la que podría comenzar a migrar fluido hacia el exterior de la barrera. Esto se comparó con el tiempo de vida útil de un RS. No existe un valor único de vida útil y depende principalmente de las normas y regulaciones de cada país y/o provincia. Para este trabajo se tomó la vida útil estipulada en el PGIRSU que es de 20 años.

### 6.2.4. Resultados

En la Figura 6.76 se muestran los resultados de los tres modelos. Se observa el contenido de humedad volumétrica que se alcanza en cada nivel a determinado tiempo. En la Tabla 6.22 se resume el tiempo que transcurre hasta alcanzar la saturación en el extremo inferior de la barrera.



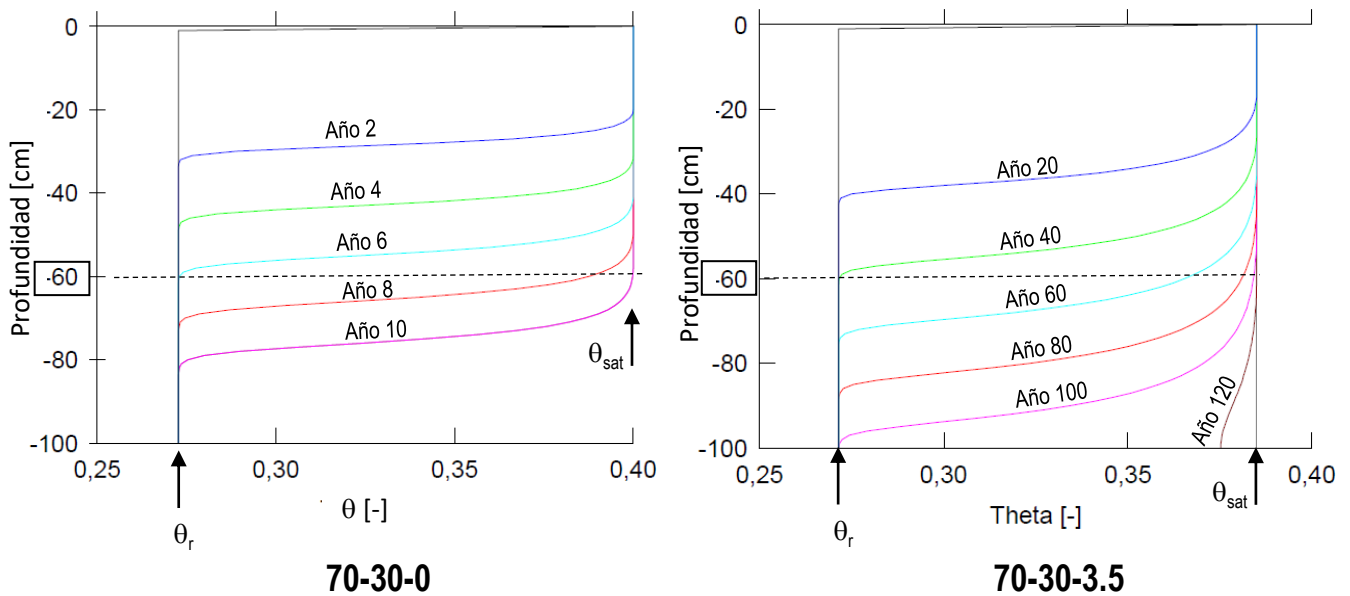


Fig. 6.76: Resultados del modelo.

Tabla 6.22: Tiempo requerido para que el fondo de la barrera alcance la saturación.

Mezcla/APAM	0 %	1.5 %
85-15	1.8 años	2.8 años
Mezcla/APAM	0 %	3.5 %
80-20	6 años	85 años
70-30	12 años	110 años

Para las mezclas 85-15 sin APAM y con APAM al 1.5 %, el tiempo transcurrido hasta la saturación es de 1.8 años y 2.8 años respectivamente y resulta menor al tiempo de diseño establecido en 20 años. Para las mezclas 80-20 y 70-30 sin APAM, el tiempo transcurrido es de 6 y 12 años respectivamente y también resulta menor al tiempo de diseño. Para las mezclas 80-20 y 70-30 con APAM al 3.5 %, el tiempo transcurrido es de 85 y 110 años respectivamente. En estas dos mezclas el tiempo transcurrido hasta alcanzar la saturación supera el tiempo de diseño.

### 6.3. Análisis de transporte de contaminantes

#### 6.3.1. Mecanismos de advección, difusión y dispersión

El transporte de contaminantes en medios porosos ocurre por tres fenómenos bien diferenciados: advección, dispersión y difusión molecular [52]. El flujo por advección es el proceso a través del cual el soluto inerte se transporta por acción de un gradiente hidráulico cuya velocidad de infiltración se representa con la ley de Darcy. El flujo por dispersión es el proceso a través del cual el soluto se transporta a través del medio poroso por un efecto de mezclado debido a la tortuosidad y velocidad de infiltración ya que el pasaje del fluido a través de poros con distintos tamaños produce cambios en la velocidad y genera el efecto de mezclado. El flujo por difusión molecular es el proceso a través del cual el movimiento de contaminantes se produce por acción de un gradiente químico de concentración. La difusión molecular puede ocurrir cuando el fluido no se mueve o incluso si



se mueve en sentido contrario por lo que el fenómeno adquiere importancia cuando se analiza el rendimiento de la barrera.

### 6.3.2. Ecuación general de transporte

A continuación se presenta la ecuación general de transporte de un contaminante por advección-dispersión-difusión según se formula en HYDRUS 1D:

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta D^w \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial q C}{\partial x} - w_k C \quad (6.24)$$

siendo:

- $C$  : concentración del contaminante  $\left[ \frac{M}{L^3} \right]$
- $\theta$  : humedad volumétrica  $\left[ \frac{L^3}{L^3} \right]$
- $D^w$  : coeficiente de dispersión hidrodinámica que representa tanto el efecto de dispersión mecánica como el de difusión molecular  $\left[ \frac{L^2}{T} \right]$
- $q$  : velocidad de infiltración  $\left[ \frac{L}{T} \right]$
- $w_k$  : termino en primer orden que modela la remoción de contaminante  $[T^{-1}]$
- $x$  : coordenada vertical  $[L]$

El coeficiente de dispersión hidrodinámica  $D^w$  posee dos componentes:

$$D^w = D_L + D^* \quad (6.25)$$

- $D_L$  : dispersión mecánica  $[T^{-1}]$
- $D^*$  : difusión efectiva  $[T^{-1}]$

La dispersión mecánica se describe con la expresión:

$$D_L = \alpha q \quad (6.26)$$

El término  $\alpha$  se denomina coeficiente de dispersividad y puede determinarse a través de ensayos de laboratorio o de campo. En caso de no contar con ensayos se puede utilizar la correlación propuesta por Gelhar et al. 1985 [53] que relaciona  $\alpha$  con la longitud del camino a recorrer por el fluido (ver Fig 6.77). La correlación es un ajuste exponencial realizado sobre una gran cantidad de ensayos cuya expresión es  $\alpha = 0,085L^{0,81}$  siendo  $L$  la longitud de infiltración. El término  $q$  corresponde a la velocidad de infiltración.

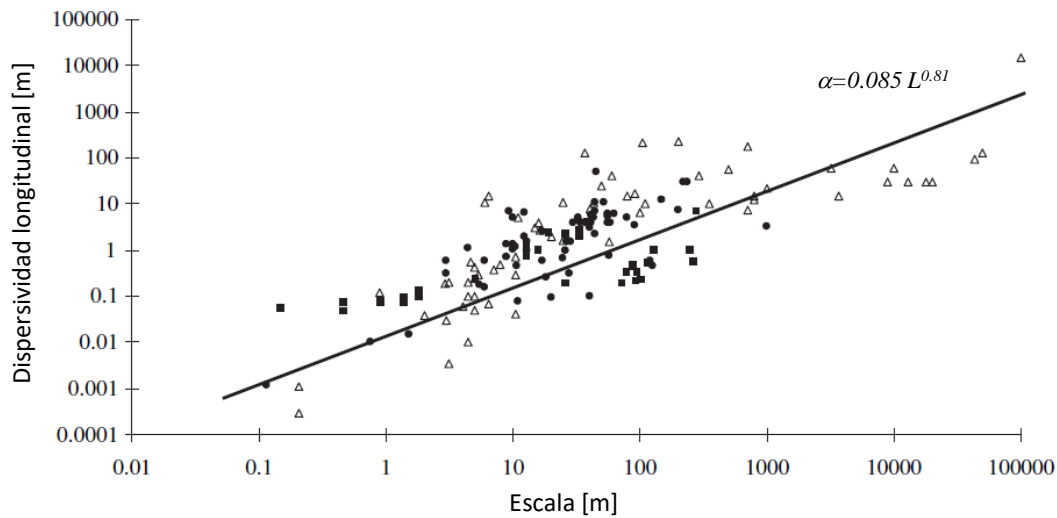


Fig. 6.77: Correlación entre la dispersividad y la longitud de infiltración (Adaptado de Schulze, 2004).

La difusión efectiva en el medio poroso se describe con la expresión:

$$D^* = \tau_0 D_0 \quad (6.27)$$

El término  $D_0$  corresponde al valor de difusión libre del soluto contaminante en agua destilada a 25 °C. El término  $\tau_0$  tiene en cuenta la tortuosidad del medio poroso.  $\tau_0$  es menor a uno por lo que  $D^* < D_0$

### 6.3.3. Determinación de coeficientes para las distintas mezclas

**Coefficiente de dispersividad  $\alpha$**  : la longitud de infiltración  $L$  es el espesor de la barrera hidráulica que es de 60 cm. Aplicando la correlación  $\alpha = 0,085L^{0,81}$ , resulta en  $\alpha = 6\text{cm}$ .

**Coefficiente de difusión efectiva  $D^*$** : según distintos autores, lo mas conveniente es determinar  $\tau_0$  mediante ensayos de laboratorio. En este caso no se cuenta con dichos ensayos sin embargo HYDRUS 1D permite estimarlo con la siguiente ecuación:

$$\tau_0 = \frac{\theta^{\frac{7}{3}}}{\theta_{sat}^2} \quad (6.28)$$

De esta manera,  $\tau_0$  se estima para cada mezcla a partir de la curva de retención correspondiente.

### 6.3.4. Selección del contaminante

Se consideró el transporte del ión cloro por ser un elemento común en todos los lixiviados domésticos. Su concentración inicial en el lixiviado se estimó en  $c=2000 \text{ mgL}^{-1}$  a partir de valores conocidos de la composición típica de líquidos lixiviados de origen domiciliario de Argentina (ver Anexo D). El valor admisible de cloro en agua potable corresponde al definido por el Código Alimentario Argentino y es  $c_{adm}=350 \text{ mgL}^{-1}$ . El coeficiente de difusión en solución libre del cloro es  $D_0 = 12.5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ .

### 6.3.5. Geometría y propiedades de los casos analizados

Aplican las mismas consideraciones expuestas en la Sección 6.2.1. Se realizaron seis modelos correspondientes a las mezclas 85-15 sin APAM y con APAM al 1.5 %, y 80-20 y 70-30 sin APAM y con APAM al 3.5 %. Adicionalmente fue necesario introducir como característica de cada material el coeficiente de dispersión mecánica  $D_L$  estimado en la Sección 6.3.3.

### 6.3.6. Condiciones de borde

HYDRUS 1D requiere especificar una condición de borde superior, una condición de borde inferior y un valor de inicial de la concentración del contaminantes,  $c_0$  del lixiviado. La condición de borde superior se estableció en una concentración de contaminante constante que representa el aporte del lixiviado contaminado sobre la barrera. Este valor se obtuvo de un análisis químico de lixiviado del RS de la ciudad de Carlos Paz (ver Anexo D). Asumir que la concentración es constante a lo largo del tiempo es conservador ya que cuando el RS se acerca al fin de la vida útil el valor disminuye. La condición de borde inferior se estableció como concentración nula  $c_b = 0$  suponiendo que el suelo de fundación no estaba contaminado previamente. El valor inicial de concentración del suelo de la barrera se consideró nulo,  $c_i = 0$ .

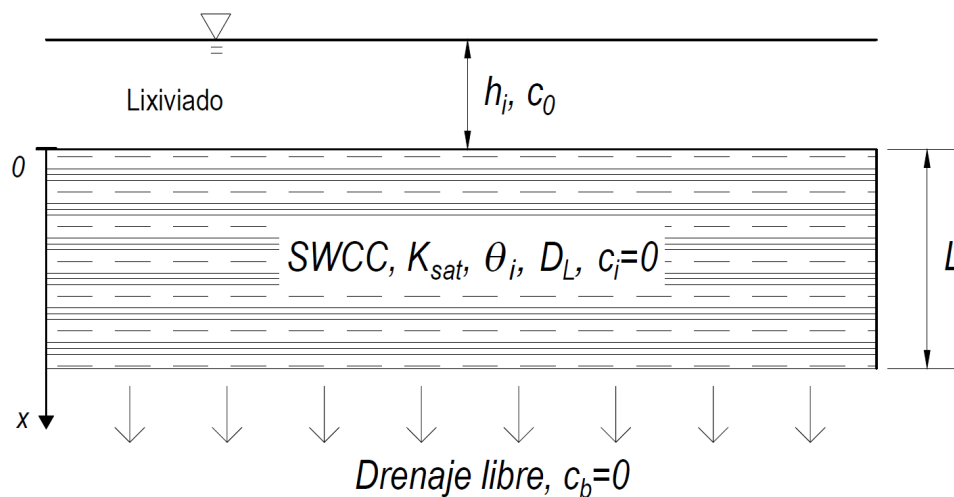


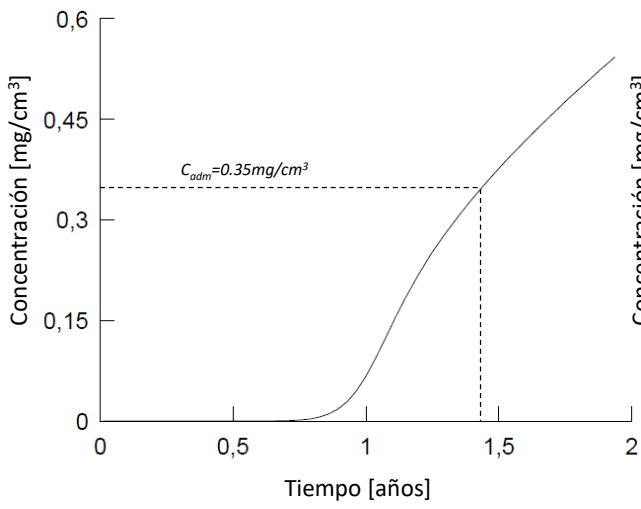
Fig. 6.78: Modelo esquemático para el análisis de transporte de contaminantes a través de la barrera.

### 6.3.7. Criterio de análisis

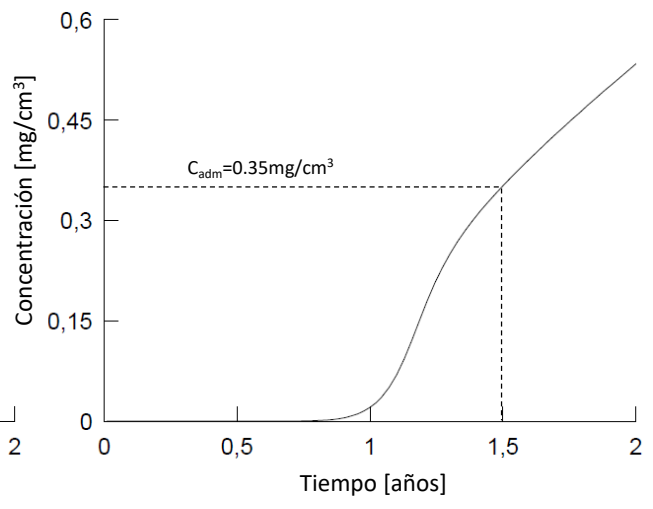
El criterio de análisis consiste en determinar el tiempo que transcurre hasta que la concentración del contaminante seleccionado alcance el valor admisible en el fondo de la barrera y compararlo con la edad de diseño establecida por el PGIRSU que es de 20 años.

### 6.3.8. Resultados

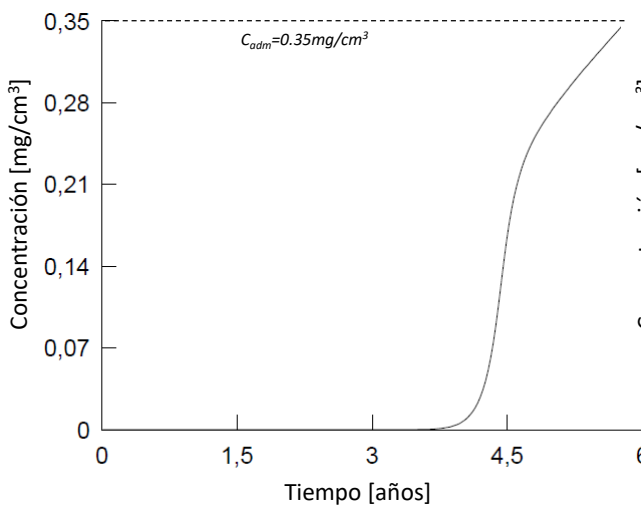
En la Figura 6.79 se presentan los resultados del modelo de transporte de contaminantes. Se observa la evolución temporal de la concentración en el fondo de la barrera modelada con las mezclas 85-15, 80-20, 70-30 sin y con APAM.



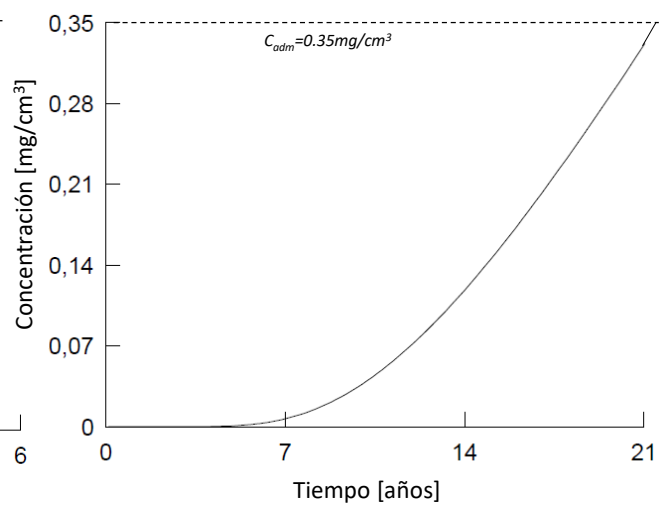
**85-15-0**



**85-15-1.5**



**80-20-0**



**80-20-3.5**

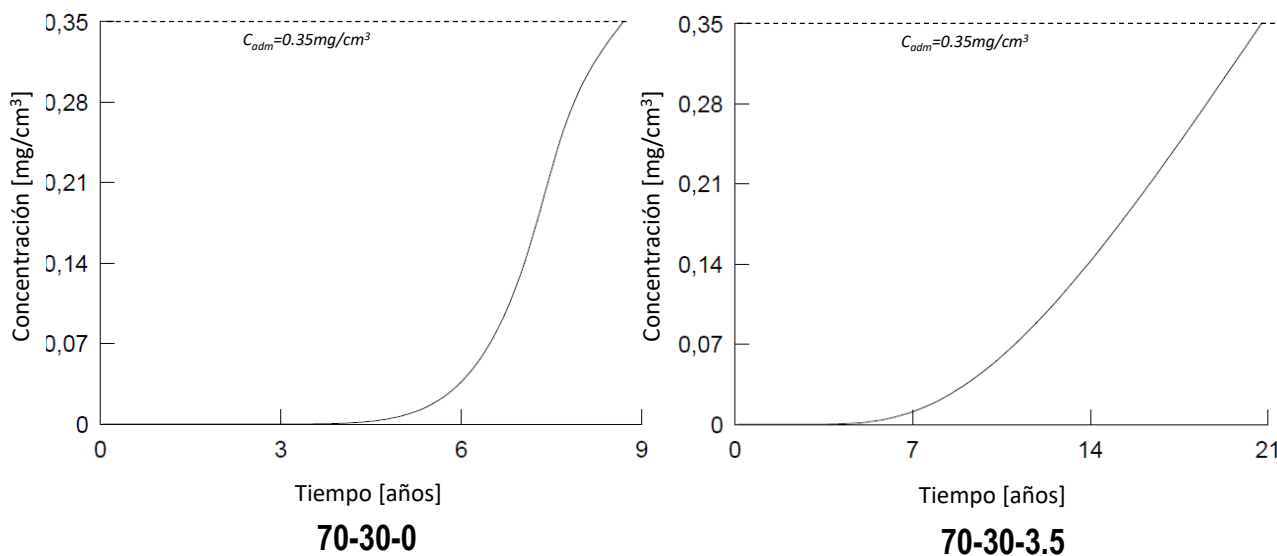


Fig. 6.79: Resultados del modelo. Evolución temporal de la concentración de cloruros en el fondo de la barrera según cada mezcla.

En la Tabla 6.23 se resume el tiempo requerido para que la concentración del ion cloro en fondo de la barrera alcance el valor admisible en cada mezcla.

Tabla 6.23: Tiempo requerido para que la concentración de cloro el fondo de la barrera alcance el valor admisible.

Mezcla/APAM	0 %	1.5 %
85-15	1.4 años	1.5 años
Mezcla/APAM	0 %	3.5 %
80-20	5.9 años	21 años
70-30	9 años	21 años

Para las mezclas 85-15 sin APAM y con APAM al 1.5 %, la concentración de cloro en el fondo de la barrera alcanza el valor admisible en 1.4 y 1.5 años respectivamente. Estos tiempos pueden considerarse prácticamente similares a los tiempos calculados por el modelo de infiltración expuesto en la sección 6.2.4. Para la mezcla 80-20 sin APAM el tiempo requerido es de 5.9 años el cual también puede considerarse similar al calculado por el modelo de infiltración. Lo mismo ocurre para la mezcla 70-30 sin APAM cuyo tiempo requerido es de 9 años. Para las mezclas 80-20 y 70-30 con APAM al 3.5 %, la concentración de cloro alcanza el valor admisible en 21 años. Este tiempo es mayor a 20 años lo que significa que ambas mezclas cumplen el criterio de concentración admisible durante el tiempo de diseño. El resultado fue cualitativamente idéntico al del modelo de infiltración en cuanto a que las mezclas 80-20 y 70-30 con APAM al 3.5 % cumplen el criterio temporal respectivo de cada modelo. Sin embargo los tiempos límite de ambos modelos son significativamente distintos. El modelo de infiltración estimó un tiempo de 85 y 110 años para las mezclas 80-20 y 70-30 con 3.5 % de APAM lo que implica una diferencia de 64 y 89 años con respecto al modelo de advección-dispersión difusión.

En la Figura 6.80 se comparan los tiempos resultantes de ambos modelos ordenando las mezclas según su valor de conductividad hidráulica. Los tiempos de tránsito que se obtienen únicamente por infiltración y los que se obtienen por la combinación de advección-dispersión-difusión para valores de conductividad hidráulica del orden de  $k \sim 10^{-9} \text{ms}^{-1}$ , son prácticamente idénticos. A medida que la conductividad hidráulica disminuye, la diferencia crece siendo el fenómeno de difusión el limitante.

Esto muestra la importancia de considerar el efecto de dispersión y difusión molecular ya que dichos fenómenos aumentan la tasa de transporte de contaminantes a través de la barrera. Por otro lado, refuerza la idea ya elaborada por otros autores [48][49][50] de que considerar a la conductividad hidráulica como único parámetro relevante de diseño lleva a sobreestimar el tiempo útil de la barrera. De esta manera, se concluye que la baja conductividad hidráulica es una condición necesaria pero no suficiente para el diseño de la barrera de un relleno sanitario.

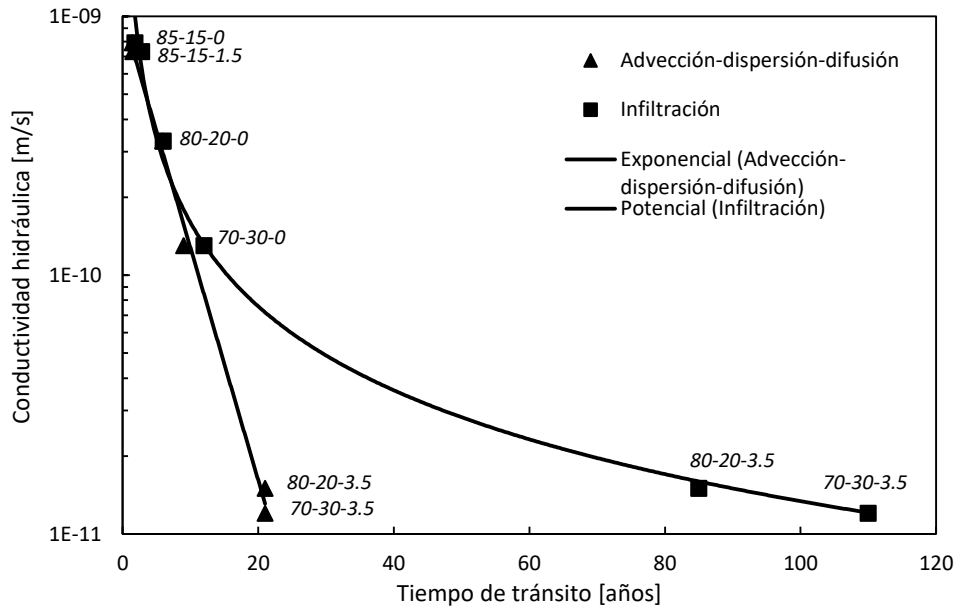


Fig. 6.80: Tiempo de tránsito en función de la conductividad hidráulica según cada modelo.

## 7. Conclusiones

### 7.1. Aspectos relevantes hallados

Se evaluaron mezclas arena-arcilla modificadas con poliacrilamida aniónica considerando su uso como barreras hidráulicas inferiores de rellenos sanitarios de origen doméstico. En la primera parte del trabajo se realizaron ensayos de caracterización física, mecánica e hidráulica con el objeto de comprender los mecanismos de interacción fluido-partícula y determinar un rango de mezclas que cumpla con los requisitos mínimos para barreras hidráulicas. En la segunda parte se realizó un análisis de desempeño de las mezclas estudiadas simulando el avance de un frente de saturación y el transporte de un contaminante. En base a los resultados obtenidos se presentan las siguientes conclusiones:

- Las nuevas mezclas arena-arcilla 80-20 y 70-30 con y sin incorporación de APAM mantienen el valor de conductividad hidráulica por debajo del valor límite establecido por normas.
- El aumento del contenido de finos en la mezcla arena-arcilla genera curvas de retención bimodales. A su vez, aumenta el valor de succión de entrada de aire y la capacidad de almacenamiento de agua de las mezclas.
- La resistencia a compresión simple aumenta a mayor contenido de finos y a mayor contenido de APAM. A su vez, la adición de APAM genera ductilidad en el comportamiento de las mezclas en rotura
- El hinchamiento libre aumenta a mayor contenido de finos pero tiende a una asíntota para un contenido mayor al 30 %. Con la adición de APAM, es siempre creciente y se ve potenciado por la arcilla. En base a los resultados obtenidos, se estima que incorporar finos en mas de un 30 % puede ser excesivo y que se debería limitar el contenido de APAM para controlar la expansividad por debajo de valores permitidos o aceptables para el diseño.
- La realización de modelos 1D de infiltración y de transporte de contaminantes mostraron que en condiciones de conductividad hidráulica menores a  $k \sim 10^{-10} \text{ms}^{-1}$ , el fenómeno de difusión molecular es limitante en el diseño de barreras hidráulicas.

Con el propósito de sintetizar y poder visualizar todos los resultados analizados en este trabajo se presenta en la Figura 7.81 una carta de combinación de mezclas en el que se ordena la terna de valores de *conductividad hidráulica*, *resistencia a compresión simple* e *hinchamiento libre* asociados a cada mezcla arena-arcilla-APAM empleada. Asumiendo de manera arbitraria un rango de mezclas arena-arcilla-APAM que cumple con el requisito de conductividad hidráulica  $k < 10^{-9} \text{ms}^{-1}$ , un hinchamiento libre  $\Delta H/H < 10\%$  y una resistencia a compresión simple  $\text{UCS} > 20 \text{ kPa}$ , se genera un área sombreada que a priori se denomina "zona óptima de mezclas". Vale destacar que estos primeros resultados son escasos y se requiere de una mayor cantidad de ensayos para definirla con mayor rigurosidad, pudiendo incluso ser modificada en caso de cambiar alguno de los criterios mencionados.

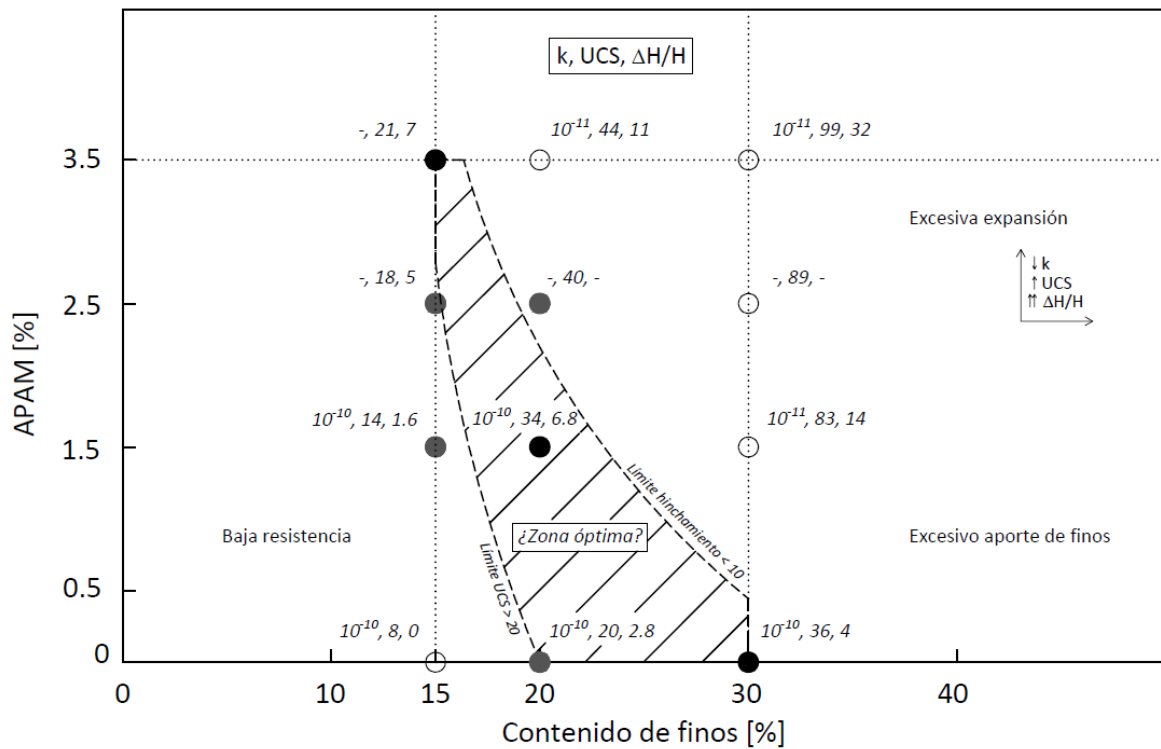


Fig. 7.81: Carta que representa la posible zona óptima de mezclas arena-arcilla-APAM que satisfacen requisitos de conductividad hidráulica, resistencia a compresión simple e hinchamiento.

Tabla 7.24: Resumen de resultados de conductividad hidráulica, resistencia a compresión simple e hinchamiento libre.

Mezcla/APAM	k [ms <sup>-1</sup> ]	UCS [kPa]	Δ H/H [%]
sin APAM			
85-15	7.9 10 <sup>-10</sup>	8.1	0
80-20	3.3 10 <sup>-10</sup>	20.2	2.8
70-30	1.3 10 <sup>-10</sup>	36.2	4.31
1.5 % APAM			
85-15	7.3 10 <sup>-10</sup>	14.2	1.6
80-20	3.1 10 <sup>-10</sup>	34	6.84
70-30	1.5 10 <sup>-11</sup>	82.6	11.2
2.5 % APAM			
85-15	-	18	5
80-20	-	39.7	-
70-30	-	89	-
3.5 % APAM			
85-15	-	21	7.3
80-20	1.5 10 <sup>-11</sup>	44.1	11.2
70-30	1.2 10 <sup>-11</sup>	99.5	31.5



## 7.2. Próximos trabajos

El desarrollo del programa experimental inicialmente propuesto tuvo que ser modificado debido a la emergencia sanitaria de público conocimiento. Para completar el programa y avanzar con la línea de investigación se recomienda continuar con los siguientes trabajos:

- Obtener las curvas de retención de agua de las mezclas faltantes.
- Estudiar la mezcla 75-25 con las proporciones de APAM ya utilizadas.
- Realizar ensayos de conductividad hidráulica saturada y no saturada sobre las mezclas presentadas con fluidos de distinta naturaleza iónica.
- Realizar una batería de ensayos que permita evaluar con mas certeza la influencia del tiempo de curado.
- Estudiar la influencia del agregado de APAM previamente hidratado sobre mezclas arena-arcilla.
- Modelar las mezclas ya estudiadas en combinación con geomembranas.

### 7.3. Divulgación académica

Este trabajo fue aceptado para ser presentado en el próximo Congreso argentino de mecánica de suelos e ingeniería geotécnica (CAMSIG) 2020 a realizarse los días 26, 27 y 28 de mayo de 2021 en la ciudad de Posadas.



**XXV CONGRESO ARGENTINO DE MECÁNICA DE SUELOS  
E INGENIERÍA GEOTÉCNICA - MISIONES / ARGENTINA  
26, 27 y 28 DE MAYO DE 2021**

#### **Caracterización hidromecánica de mezclas de arena-arcilla al 80-20% y 70-30% modificadas con poliacrilamida aniónica (APAM)**

*Agustín Pileggi<sup>1</sup>, Mauro Codevilla<sup>1</sup> y Diego Manzanal<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia (UNPSJB). Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina

<sup>3</sup> Instituto de Tecnología y Ciencias de la Ingeniería INTECIN-UBA-CONICET

Mail de contacto: [apileggi@fi.uba.ar](mailto:apileggi@fi.uba.ar)

#### **RESUMEN**

El Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la UBA continúa el estudio del comportamiento de mezclas de suelo grueso-fino modificados con adición de poliacrilamida aniónica (APAM) con propósitos geotécnico-ambientales.

El presente trabajo tiene como nuevo aporte evaluar la incidencia de la incorporación de APAM sobre mezclas de suelo grueso-fino en proporciones 80-20% y 70-30%, a diferencia de la mezcla en proporción 85-15% presentada en trabajos anteriores (Marti et. al. 2015; Casagrande et. al. 2018).

Sobre las nuevas mezclas de suelo grueso-fino se efectuaron ensayos de compresión simple (UCS), curvas de retención (SWCC), permeabilidad saturada e hinchamiento libre en condiciones edométricas con y sin el agregado de 3.5% APAM en peso sobre la fracción fina. Se analizan los resultados obtenidos y se compara esta nueva batería de ensayos con los resultados obtenidos con anterioridad para la mezcla grueso-fino en proporción 85-15%

**Palabras clave:** APAM, mezclas arena-arcilla, UCS, hinchamiento, SWCC

# ANEXOS

## A. Informes de avance

### A.1. Informe de avance N°1 - Caracterización materiales

#### Procedencia y adecuación del material

En este trabajo se utilizaron dos suelos de distintos orígenes y características. Uno constituye la fracción gruesa y el otro la fracción fina de las distintas mezclas a preparar. El primero de ellos se compone de arenas del río Paraná y el segundo de arcillas y limos provenientes de la zona costera de la ciudad de Comodoro Rivadavia, Pcia. de Chubut.

La arena contiene restos orgánicos como madera y hojas secas. Se pasó por el tamiz #10. La arcilla se presenta en forma de cascotes muy compactos y de baja dureza. Se disgregó en laboratorio aplicando ciclos de saturación y secado y fragmentándolo con un mortero. Al igual que la arena, se la pasó por el tamiz #10.

#### Ensayos realizados - Fracción fina

##### Límite Líquido

Se determinó el Límite Líquido aplicando las normas ASTM D4318-00. Se graficó número de golpes vs humedad y se realizó un ajuste lineal. Utilizando este ajuste se determinó la humedad correspondiente a 25 golpes. Se obtuvo un límite líquido de **LL=63**. (ver Figura 1.82)

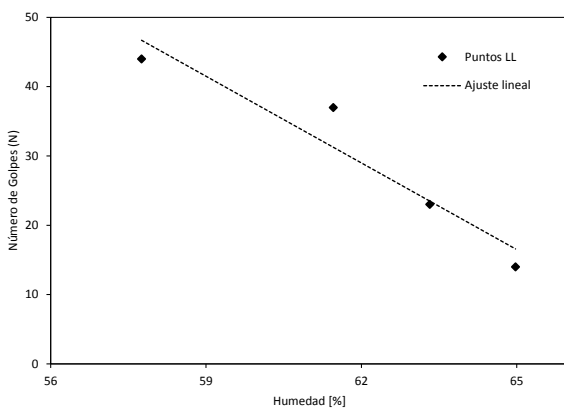


Fig. 1.82: Determinación Límite Líquido - Método tres puntos.

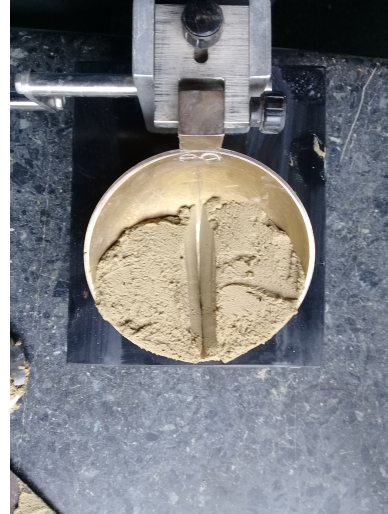


Fig. 1.83: Cascador de Casagrande y suelo de Comodoro Rivadavia

##### Límite Plástico

Se generaron rollos de suelo con la mano hasta que se quebraron al alcanzar 1.3 mm de diámetro. Luego se determinó la humedad de los mismos siendo esta el Límite Plástico.

LL	LP	IP
63	44	18

##### Suelo pasante por el tamiz # 200

Se determinó el porcentaje de suelo menor a  $75\mu m$ . Se realizó bajo la norma ASTM D1140-00. Se presenta el porcentaje pasante por la malla # 200.



Fig. 1.84: Suelo retenido en el tamiz #200

## Clasificación según ASTM

Aplicando el Sistema de clasificación de suelos unificado (USCS) definido por la norma ASTM D2487-00 el suelo resulta ser un limo de alta plasticidad **MH**.

## Hidrometría

La hidrometría se realizó aplicando las normas ASTM D422-63. Se preparó una muestra de 65 gr de suelo fino secada al horno pasante por el tamiz # 10. Se colocó en agente dispersante (Hexametáfosfato de Sodio al 4 %) por al menos 16 horas. Luego se agitó la mezcla en un agitador mecánico por UN minuto. Posteriormente se volcó la mezcla en una probeta de 100 ml la que se completó con agua destilada. La probeta se agitó a mano por 1 minuto y se la colocó en un baño térmico a 20 C. Pasado 1 minuto se realizaron mediciones con el hidrómetro a los 2, 5, 15, 30, 60, 250 y 1440 minutos.

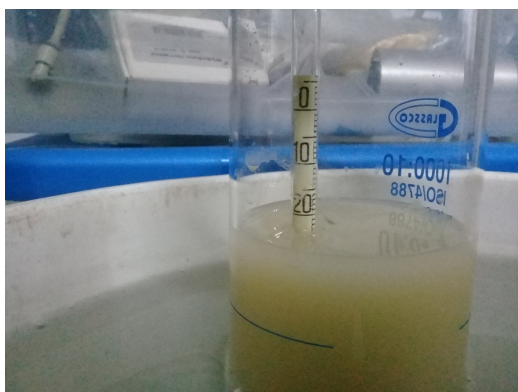


Fig. 1.85: Hidrómetro ASTM 152H.

En cada medición se registró la temperatura del baño térmico. Con las lecturas del hidrómetro y las correcciones por temperatura se confeccionó la curva granulométrica:

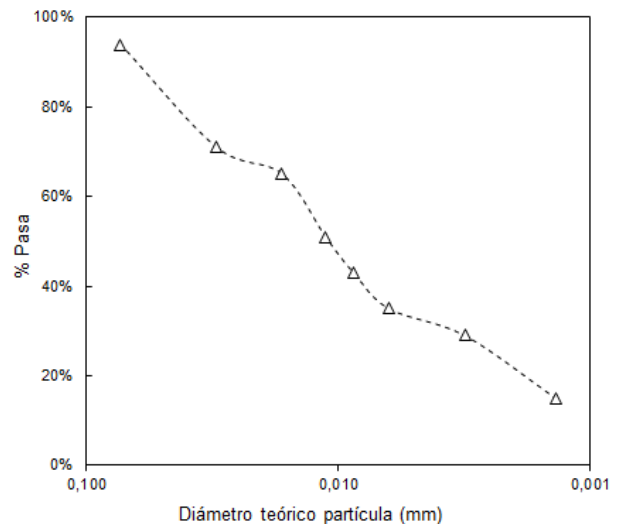


Fig. 1.86: Granulometría del suelo fino

Se determinaron los porcentajes de los distintos materiales que componen a este suelo.

Limo	Arcilla	Retenido #200
74 %	20 %	6 %

Estos resultados son consistentes con los desarrollados previamente en este informe.

## Superficie Específica

La Superficie Específica  $S_e$  se define como la relación entre la superficie de una partícula y su masa. Su valor es importante ya que determina el balance entre fuerzas capilares, eléctricas y gravimétricas actuantes sobre las partículas y afecta a la permeabilidad [43].

## Absorción de Azul de Metileno

La técnica de absorción de Azul de Metileno es un método sencillo para determinar la Superficie Específica. Los cationes de una solución acuosa de cloruro azul de metileno son adsorbidos por las cargas negativas de la superficie de las partículas de arcilla. La  $S_e$  es computada en base a la cantidad de azul de metileno adsorbido.

Para ello se preparó una muestra de arcilla con agua destilada. A la muestra se le agregó un determinado volumen de azul de metileno en solución. Se mezcló para darle tiempo al catión de ser adsorbido sobre la superficie del mineral.

Luego se colocó una gota de la suspensión sobre un papel filtro. Esto se volvió a repetir para aumentar así la cantidad de cationes de azul de metileno con respecto al suelo en estudio. El proceso terminó cuando al divisar un halo azul claro concéntrico alrededor de la gota sobre el papel. Esto significa que la superficie de todo el mineral está rodeada de cationes AM y un porcentaje de ellos queda en solución. En cada gota se anotó el número de incrementos de 0,5 ml colocados en la solución  $N$ .

Se realizaron dos ensayos. En el primero, se observó el halo azul claro a  $N = 310$ . En el segundo, se observó a  $N = 300$ .

La  $S_e$  se computa como:

$$S_e = \frac{1gr}{319,87gr/mol} \times \frac{1}{200ml} \times (0,5[ml] \times N) \times N_{av} \times A_{AM} \times \frac{1}{10gr}$$

	$S_e$
<b>Ensayo 1</b>	$190m^2/g$
<b>Ensayo 2</b>	$184m^2/g$
<b>Promedio</b>	$187m^2/g$

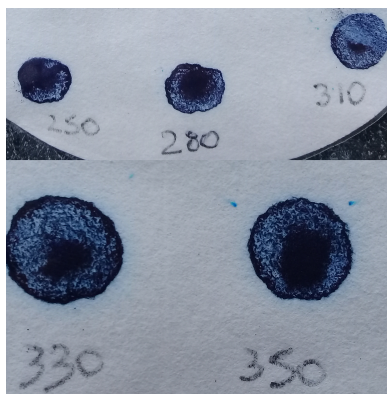


Fig. 1.87: Primer ensayo,  $N=310$

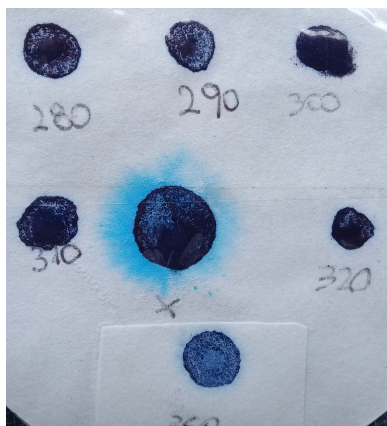


Fig. 1.88: Segundo ensayo,  $N=300$

## Gravedad Específica

### Procedimiento general con picnómetro

Para determinar la Gravedad Específica de la arena y la arcilla se utilizó la norma ASTM D854-02. Para el desarrollo del ensayo se utilizó agua destilada y desaireada al vacío durante dos horas. Se utilizó una bomba eléctrica de succión conectada directamente a un picnómetro de 250 ml. Las dos horas se midieron desde que el agua comenzó a desprender burbujas de aire.

### Calibración del picnómetro

Como primer paso se realizó la calibración del picnómetro ya que es necesario conocer el volumen real de agua que puede almacenar a cierta temperatura cuando se lo llena hasta la marca de calibración. Se obtuvo el volumen del picnómetro como:

$$V_p = \frac{(M_{pwc} - M_p)}{\rho_{wc}}$$

donde:

$M_{pwc}$  = la masa del picnómetro y el agua a la temperatura de calibración.

$M_p$  = la masa del picnómetro seco.

$\rho_{wc}$  = la densidad del agua a la temperatura de calibración.

<b>Volumen 1</b>	$250,09cm^3$
<b>Volumen 2</b>	$250,06cm^3$
<b>Promedio</b>	$250,08cm^3$

### Determinación de la Gravedad Específica, $G_s$

Se aplicó el método B de la norma que corresponde para muestras de suelo secadas previamente en horno.

La Gravedad Específica se obtuvo como:

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_{w,t}} = \frac{M_s}{(M_{pwst} - (M_{pwst} - M_s))}$$

donde:

$\rho_s$  = la densidad de los sólidos del suelo.

$\rho_{w,t}$  = la densidad del agua a la temperatura de ensayo.

$M_s$  = la masa de los sólidos secados al horno.

$M_{\rho_{wt}}$  = la masa del picnómetro, el agua y los sólidos a la temperatura de ensayo.

siendo:

$$M_{\rho_{wt}} = M_p + (V_p \times \rho_{wt})$$

$M_{\rho_{wt}}$  = la masa del picnómetro y el agua a la temperatura de ensayo.

Resultados:

Muestra	$G_s$
#1	2,78
#2	2,75
<b>Promedio</b>	<b>2,77</b>

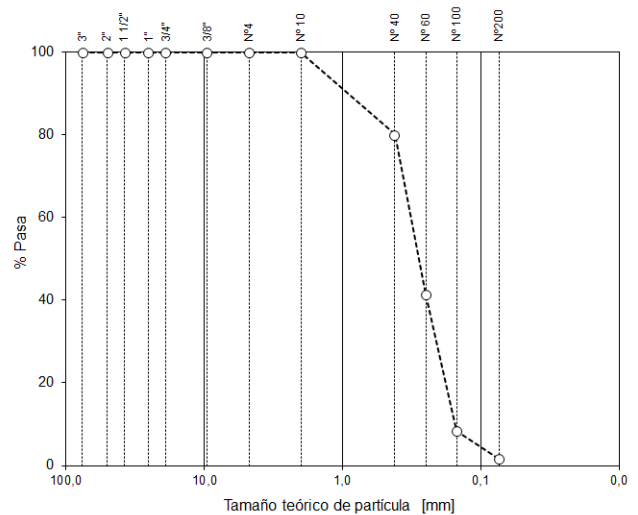


Fig. 1.89: Granulometría Arena río Paraná.

## Caracterización del suelo granular - Gravedad Específica Arena río Paraná

### Granulometría por vía húmeda

Se realizó el ensayo de granulometría siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D422-63. Como resultado se obtuvo que constituye una arena pobremente graduada **SP**.

$D_{60}$	$D_{30}$	$D_{10}$	$C_u$	$C_c$
0,33	0,22	0,16	2,1	0,9

Se determinó la gravedad específica de la arena de igual manera que se describió para el suelo fino. Para la arena el resultado fue:

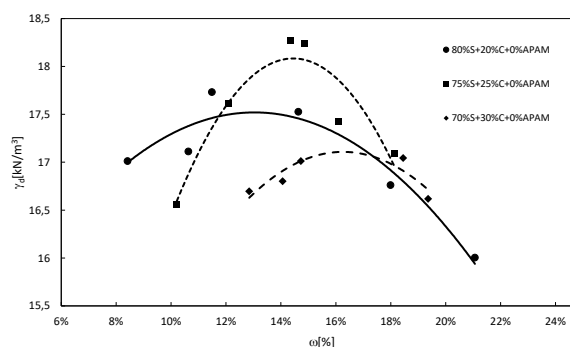
Muestra	$G_s$
1	2,64
2	2,65
<b>Promedio</b>	<b>2,65</b>

## A.2. Informe de avance N°2 - Ensayos Proctor

### Introducción

El presente informe resume los resultados de los ensayos de compactación Proctor Estándar como parte de la caracterización mecánica de la mezcla arena-arcilla. Dicho material consiste en una mezcla de arena tipo río Paraná y arcilla de Comodoro Rivadavia. Con la aplicación de este ensayo se determinaron la humedad y peso unitario seco óptimos para cada mezcla arena-arcilla 80 %-20 %, 75 %-25 % y 70 %-30 %.

### Resultados



Mezcla %S- %C	$\gamma_{dmax}$ [ $\text{kN/m}^3$ ]	$\omega_{optimo}$ [%]
80-20	17.5	13.5
75-25	18.2	14.3
70-30	17.2	16.1

### Trabajos realizados

El ensayo fue realizado utilizando la norma ASTM D698-00. Como única variante a éstas, el suelo utilizado fue tamizado por el tamiz N°10 y no el N°4 como especifica la norma. Para la preparación de las mezclas se secaron la arena y arcilla citadas en horno a  $100^\circ\text{C}$ . Una vez secas se prepararon 3 muestras de 2300 g para cada mezcla en sus respectivas proporciones. Todas las partes fueron pasadas por el tamiz N°10. Con el suelo aún seco se uniformizó la mezcla con espátula. Luego se hidrató con agua destilada hasta alcanzar la humedad objetivo y se dejó la mezcla en reposo por 24 hs. Para el análisis de resultados se buscó que existan al menos dos puntos de humedad-peso seco a cada lado de la humedad óptima determinada.

De las tres muestras preparadas para cada mezcla, dos fueron reutilizadas para poder realizar cinco muestras de cada mezcla. Para la reutilización de la muestra, la misma se disgregó a mano, se secó en horno y luego se volvió a disgregar utilizando un mortero. Previo a su reutilización, se pasó la muestra por el tamiz N°10.

### Análisis de resultados

Es de esperar que al aumentar la proporción de arcilla en relación a la de arena la humedad óptima aumente y la densidad óptima seca disminuya. En general se observa que el conjunto de ensayos responde de esta manera. La humedad óptima aumentó un de 13.5 % a 14.3 % y luego a 15.5 %. Sin embargo la densidad óptima de la mezcla 75-25 resultó mayor a las otras dos lo cual contradice lo esperado. Esto puede deberse al error inherente al operador. La densidad óptima de la mezcla 80-20 resultó mayor que la de la mezcla 70-30 lo cual si responde a lo esperado.

### Próximos trabajos

Para avanzar en la caracterización del material se realizará una hidrometría de la arcilla. Luego se realizará un análisis granulométrico por vía seca de la arena. Esto permitirá determinar las curvas granulométricas de las distintas mezclas. Posteriormente se determinará la gravedad específica del material.

## A.3. Informe de avance N°3 - Ensayos UCS

### Introducción

El presente informe resume los resultados de ensayos de compresión simple no confinada (UCS) realizados sobre probetas de mezclas de arena-arcilla con incorporación de polímero y con distintos períodos de curado. Se ensayaron probetas con mezclas de 80 % arena - 20 % arcilla (80-20) y 70 % arena - 30 % arcilla (70-30). Se prepararon muestras sin polímero y con polímero al 1.5 %, 2.5 % y 3.5 % de la fracción fina de la mezcla. El polímero utilizado es poliacrilamida aniónica (APAM). Se realizó una serie de ensayos sin curado y otra a los 40 días de curado en cámara húmeda.

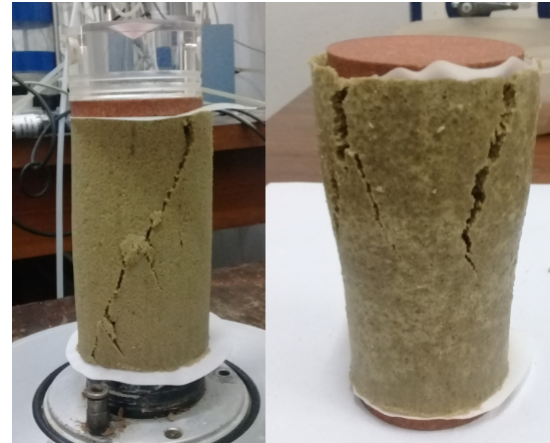


Fig. 1.90: Probetas en falla.

### Trabajos Realizados

#### Confección de probetas

Las probetas se confeccionaron aplicando las normas ASTM D2166-00. Cada mezcla se preparó con su humedad óptima correspondiente y densidad seca igual al 95 % de la óptima obtenida en los ensayos Próctor Estándar. Cada mezcla se compactó dentro de un molde de diámetro interno 50 mm y altura 100 mm en una sola capa utilizando una prensa mecánica. Las probetas sometidas a curado se almacenaron en cámara húmeda durante 40 días.

#### Montaje y ejecución de ensayos

Se estableció una velocidad de deformación constante de 1.25 mm/min recomendada por norma. El ensayo finalizó cuando el plano de falla era apreciable a la vista. (ver Figura 1.90).

### Resultados

Se presentan los gráficos y tablas resumen de los ensayos de compresión realizados sobre las distintas mezclas.

#### Mezclas 80-20 curadas a un día

APAM [%]	$\omega_i$ [%]	$\varepsilon_{falla}$ [%]	$\sigma$ [kPa]	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]
0	13,5	1,82	20,2	16,3
1,5	13,3	2,16	34,0	16,3
2,5	13,6	2,76	39,7	16,3
3,5	13,9	2,15	44,1	16,3

Tabla 1.25: Mezclas 80-20 ensayadas con un día de curado.

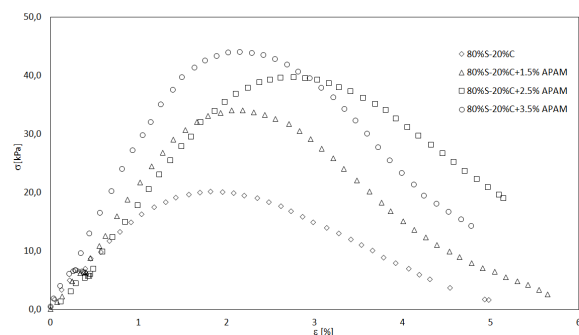


Fig. 1.91: Curvas tensión-deformación para mezclas 80-20 con un día de curado.



### Mezclas 80-20 curadas 40 días

APAM [%]	$\omega_i$ [%]	$\varepsilon_{falla}$ [%]	$\sigma$ [kPa]	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]
0	14,3	2,73	21,8	16,0
1,5	13,3	3,00	45,8	16,3
2,5	13,8	3,42	47,0	16,3
3,5	14,0	3,45	48,6	16,3

Tabla 1.26: Mezclas 80-20 ensayadas a 40 días.

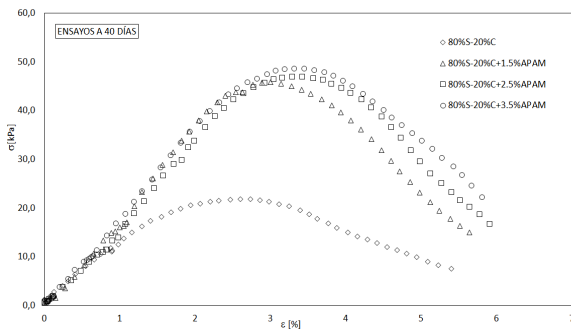


Fig. 1.92: Curvas tensión-deformación para mezclas 80-20 con cuarenta días de curado.

### Mezclas 70-30 curadas 40 días

APAM [%]	$\omega_i$ [%]	$\varepsilon_{falla}$ [%]	$\sigma$ [kPa]	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]
0	16,2	2,95	44,4	16,3
1,5	16,6	3,16	86,7	16,3
2,5	16,3	4,13	100,9	16,3
3,5	18,0	3,48	117,4	16,4

Tabla 1.28: Mezclas 70-30 ensayadas a 40 días.

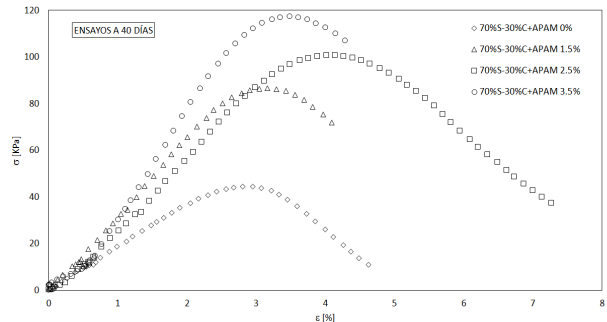


Fig. 1.94: Curvas tensión-deformación para mezclas 70-30 con cuarenta días de curado

### Mezclas 70-30 curadas a un día

APAM [%]	$\omega_i$ [%]	$\varepsilon_{falla}$ [%]	$\sigma$ [kPa]	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]
0	15,5	2,48	36,2	16,4
1,5	16,0	2,44	82,6	16,4
2,5	15,8	2,41	89,0	16,6
3,5	16,1	2,64	99,5	16,3

Tabla 1.27: Mezclas 70-30 con un día de curado.

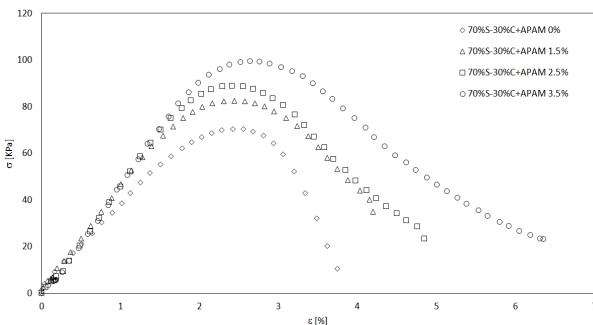


Fig. 1.93: Curvas tensión-deformación para mezclas 70-30 con un día de curado

### Efectos de la incorporación de APAM

En las tablas y gráficos anteriores se observa que la incorporación de APAM genera un aumento en la resistencia de las probetas. Los cambios resultan mas significativos para las mezclas 80-20 que para las mezclas 70-30. Para las mezclas 80-20 la incorporación de APAM al 1.5 %, 2.5 % y 3.5 % generó aumentos de resistencia en un 68 %, 96.5 % y 118.3 % respectivamente en relación a la muestra ensayada sin APAM (ver Figura 1.91). Para las mezclas 80-20 ensayadas a cuarenta días, la incorporación de APAM al 1.5 %, 2.5 % y 3.5 % generó aumentos de resistencia en un 110.1 %, 115.6 % y 122.9 % respectivamente en relación a la muestra ensayada sin APAM (ver Figura 1.92). Para las mezclas 70-30 la incorporación de APAM al 1.5 %, 2.5 % y 3.5 % generó aumentos de resistencia en un 7.8 %, 16 % y 30 % respectivamente en relación a la muestra ensayada sin APAM (ver Figura 1.93). Para las mezclas 70-30 ensayadas a cuarenta días, la incorporación de APAM al 1.5 %, 2.5 % y 3.5 % generó aumentos de resistencia en un 95.3 %, 127.2 % y 164.4 % respectivamente en relación a la muestra ensayada sin APAM (ver Figura 1.94).

## Efectos del paso del tiempo y del aumento del porcentaje de finos

Todas las probetas preparadas con APAM experimentaron un aumento de su resistencia. Para las mezclas 80-20 con incorporación de APAM al 1.5 %, 2.5 % y 3.5 % el paso del tiempo generó aumentos de resistencia en un 34,7 %, 18.4 % y 10.2 %. Para las mezclas 70-30 con incorporación de APAM al 1.5 %, 2.5 % y 3.5 % el paso del tiempo generó aumentos de resistencia en un 5.0 %, 13.4 % y 18.0 %. El paso del tiempo no generó cambios en la resistencia de la mezcla 80-20 sin APAM. La mezcla 70-30 sin APAM experimentó una disminución de su resistencia en un 58.0 % (ver Figura 1.95).

Aumentar el porcentaje de arcilla produjo aumentos significativos en la resistencia de las probetas. Para las mezclas preparadas sin APAM la resistencia aumentó un 245 % a cero días y un 103.6 % a cuarenta días de curado. Para las mezclas con incorporación de APAM al 1.5 %, 2.5 % y 3.5 % la resistencia aumentó en un 142.0 %, 124.2 % y 126.0 % a cero días y un 89.3 %, 114.6 % y 141.5 % a cuarenta días de curado (ver Figura 1.95).

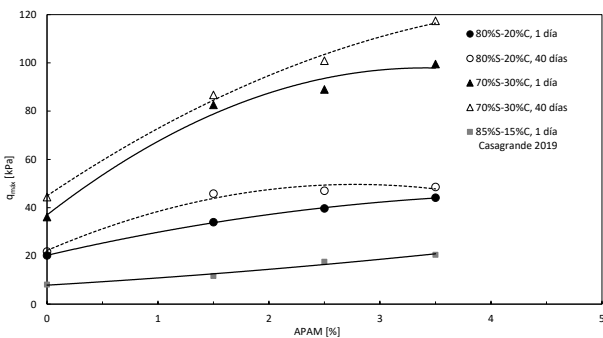


Fig. 1.95: Variación de resistencia en función del porcentaje de APAM con y sin curado.

A continuación se presentan los mismos resultados pero graficados de manera tal que permiten comparar las curvas tensión - deformación entre las distintas mezclas a distinto tiempo de ensayo para cada proporción de APAM (ver figuras 7, 8, 9 y 10).

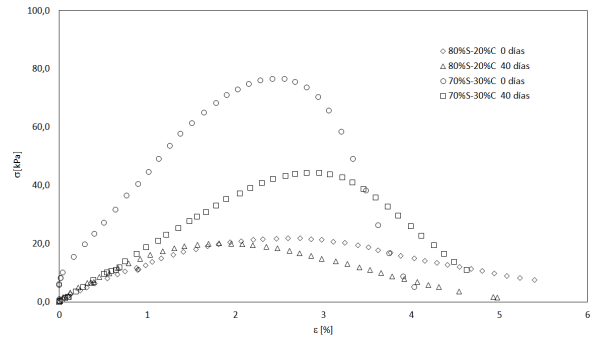


Fig. 1.96: Comparativa de curvas tensión-deformación en mezclas sin APAM.

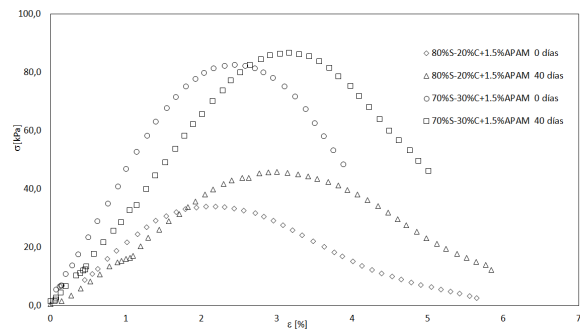


Fig. 1.97: Comparativa de curvas tensión-deformación en mezclas con 1.5 % APAM.

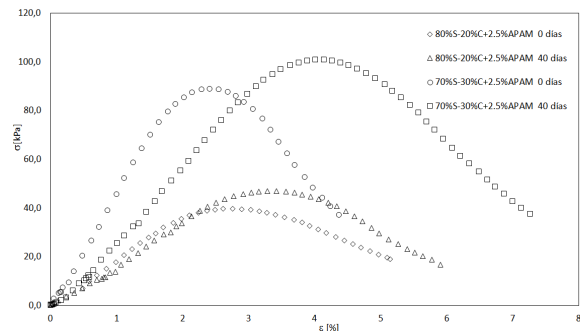


Fig. 1.98: Comparativa de curvas tensión-deformación en mezclas con 2.5 % APAM.

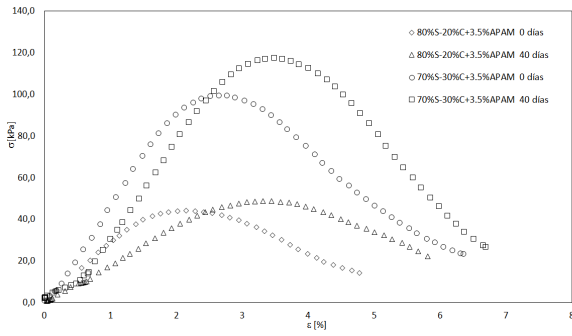


Fig. 1.99: Comparativa de curvas tensión-deformación en mezclas con 3.5% APAM.

## Trabajos futuros

Los próximos ensayos consisten en obtener las curvas de retención de agua (SWCC) para las dos mezclas ya mencionadas sin APAM y con incorporación de APAM en las mismas proporciones presentadas anteriormente.

## B. Hoja técnica APAM







     		
<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 Brook field (cps)	5,0 gr/lt	1740
	2,5 gr/lt	700
	1,0 gr/lt	200
Concentración de Operación recomendada (gr/lt)	1	
Concentración Máxima de Operación (gr/lt)	5	
Tiempo de disolución para una concentración de 1 gr/lt (min)	90	
Estabilidad de la solución 1 gr/lt en agua destilada en recipiente cerrado (días)	5	
Temperatura de Almacenaje (°C)	0 a 35	
Estabilidad (meses)	24	

Fig. 2.100: Hoja técnica de poliacrilamida aniónica utilizada en este trabajo provista provista por Química Paipe.

## C. Software utilizados

### C.1. RETC

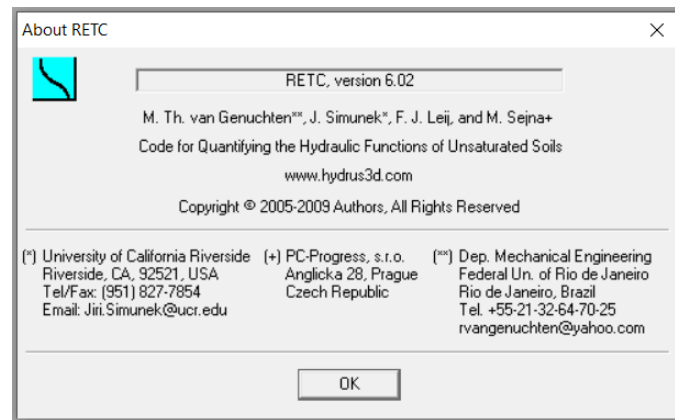


Fig. 3.101: Software utilizado para el ajuste de curvas de retención.

### C.2. Hydrus-1D

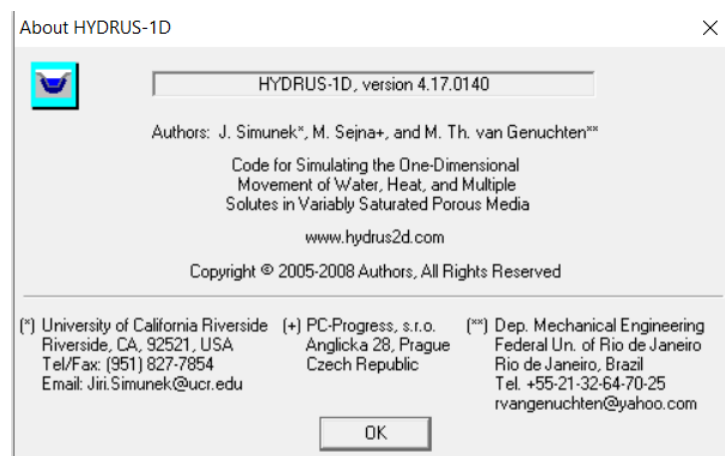


Fig. 3.102: Software utilizado para modelar la infiltración y el transporte de contaminantes.

## D. Composición química de lixiviados

En la Tabla 4.29 se presenta el rango típico de valores de la composición química de los contaminantes presentes en el lixiviado de origen doméstico. Los datos fueron extraídos de la memoria técnica para la confección de la planta de tratamiento de lixiviados de la localidad de Villa Carlos Paz, provincia de Córdoba.

Tabla 4.29: Composición típica de lixiviados de origen domiciliario en Argentina.

Parámetro	Relleno sanitario nuevo [mgL <sup>-1</sup> ]
pH	5.3-8.5
DBO	2000
DQO	3000
Sólidos suspendidos	1500
Nitrógeno orgánico	10-600
Nitrógeno amoniacal	10-800
Fósforo	4-80
Calcio	200-3000
Magnesio	50-1500
Potasio	200-2000
Sodio	200-2000
Cloro	100-3000
Sulfatos	100-1500
Hierro	50-600
Cadmio	0.01-1

## Referencias

- [1] SAYDS. (2005). *Estrategia nacional para la gestión integral de los residuos sólidos urbanos*.
- [2] Townsed, T., Powel, J. & Reinhart, D. (2015). *Sustainable practices for landfill design and operation*. Springer, New York.
- [3] Daniel, D. & Benson, C. (1990). Water content-density criteria for compacted soil liners. *Journal of geotechnical engineering*, 116(12).
- [4] Mitchell, J. K. (1992). *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley & Sons, Inc.
- [5] SAyDS. (2020). *Reglamento operativo del Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos-Préstamo BID N3249/OC-AR*.
- [6] Theng, B. K. (1979). *Formation and Properties of Clay-Polymer Complexes*. Elsevier Scientific Publishing Company.
- [7] Gray, D. H. & Mitchell, J. K. (1969). Fundamental aspects of electro-osmosis in soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(SM 6), 209-236.
- [8] Olsen, H. W. (1965). derivations from Darcy's law in saturated clay. *Soil Science Society of America*, 135-140.
- [9] Zhang, L. & col. (2005). Predicting bimodal soil-water characteristics curves. *Geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 131(n°5), pp. 666-670.
- [10] Fredlund, D. & col. (1998). The soil-water characteristics of sand-bentonite mixtures used for liners and covers. *Proceeding of the second international conference on unsaturated soils.*, 1, 143-148.
- [11] Burger, C. & Shackelford, C. (2001). Evaluating dual porosity of pelletized diatomaceous earth using bimodal soil-water characteristic curve functions. *Canadian Geotechnical*, 38, págs. 53-66.
- [12] Guezennec, A., Michel, C., Bru, K. & Touze, S. (2015). Transfer and Degradation of Polyacrylamide-based Flocculants in Hydrosystems: a review. *Environ Sci Pollut Res*, 22, 6390-6406.
- [13] Green, V. S. & Stott., D. E. (2001). Polyacrilamide: A Review of the Use, Effectiveness, and Cost of a Soil Erosion Amendment. *D. E. Stott, R. H. Mohtar and G. C. Steinhardt (eds).*, 384-389.
- [14] Inyang, H. I. & Bae, S. (2005). Polyacrilamide Sorption Opportunity on Interlayer and External Pore Surfaces of Contaminant Barrier Clays. *Chemosphere*, 58, 19-31.
- [15] *Polyacrylamide-based Polymers for Enhanced Oil Recovery*. (s.f.). <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=16933>
- [16] Orts, W., Sojka, R., G.Glenn & Gross, R. (1999). Preventing Soil Erosion with Polymer Additives. *Polymer News*, 24(12), 406-413.
- [17] Irurtia, C. B., Mon, R., Holzmann, R. & Pirolo, T. (s.f.). *Efecto de la Poliacrilamida en las propiedades físicas de un suelo arenoso*. <https://inta.gob.ar/documentos/efecto-de-la-poliacrilamida-en-las-propiedades-fisicas-de-un-suelo-arenoso>
- [18] de J. Gutiérrez Castañeda y col., I. (2008). Efecto del polímero AQUASTOCK® en la capacidad de retención de humedad del suelo y su efecto en el rendimiento de la acelga. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas.*, (7), 65-72.
- [19] Bavarnik, F. (1994). Polyacrylamide characteristics related to soil applications. *Soil science*, 158(4), 235-243.
- [20] Theng, B. K. G. (1982). Clay-Polymer Interactions: Summary And Perspectives. *Clays and Clay Minerals*, 30(1), 1-10.
- [21] Georgees, R. N. & Hassan, R. A. (2018). Stabilization of Subgrade Soil Using Polyacrilamide-Based Additive. *Shehata H., Poulos H. (eds) Latest Thoughts on Ground Improvement Techniques. GeoMEast 2018. Sustainable Civil Infrastructures. Springer, Cham*, 101-111.

- [22] Heller, H. & Keren, R. (2003). Anionic polyacrylamide polymer adsorption by pyrophyllite and montmorillonite. *Clays and Clay Minerals*, 51(3), 334-339.
- [23] Sojka, O., Orts, W. & Glenn, G. (1999). Preventing soil erosion with polymer additives. *Polymer News*, 24, 406-413.
- [24] Letey, J. (1994). Adsorption and desorption of polymers on soil. *Soil Science*, 158(4), 244-248.
- [25] Casagrande, C. (2019). *Estudio de suelo-polímero para uso en barreras hidráulicas en rellenos sanitarios*. Laboratorio de Mecánica de Suelos. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires.
- [26] Marti, L. (2015). *Suelos compactados con incorporación de polímeros*. Laboratorio de Mecánica de Suelos. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires.
- [27] Levy, G. & Col. (2010). Polyacrylamide effects on aggregate and structure stability with different clay mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74(5).
- [28] Mamedov, A. & Col. (2007). Aggregate stability as affected by polyacrylamide molecular weight, soil texture and water quality. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71(6), 1909-1918.
- [29] Haase, H. & Schanz, T. (2016). Compressibility and saturated hydraulic permeability of clay-polymer composites - experimental and theoretical analysis. *Appl. Clay Sci.*
- [30] Deng, Y., Dixon, J., White, N. & Loeppert, R. (2006). Bonding between polyacrylamide and smectite. *Sci. Direct.*, 281, 82-91.
- [31] Georgees, R. & Hassan, R. (2019). Stabilization of subgrade soil using polyacrylamide-based additive. *GeoMEast*, 101-111.
- [32] Elkady, T., Shaker, A. & Dhowain, A. (2015). Shear strengths and volume changes of sand-attapulguite clay mixtures. *Bull Eng Geol Environ*, 74, 595-609.
- [33] Srikanth, V. & col. (2016). A laboratory study on the geotechnical characteristics of sand-bentonite mixtures and the role of particle size of sand. *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.*, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.12.043>.
- [34] Abichou, T. & col. (2002). Micro-structure and hydraulic conductivity of simulated sand-bentonite mixtures. *Clays and clay minerals*, 50(5), 537-545.
- [35] Akgün, H. & col. (2017). Evaluation of sand bentonite mixtures as a shaft/borehole sealing material. *Applied clay science*, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.12.043>.
- [36] Sällfors, G. & col. (2002). Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes. *Geotechnical and Geological Engineering.*, 20, 65-80.
- [37] Al-Rawas, A., Mohamedzein, Y., Al-Shabibi, A. & Al-Katheiri, A. (2006). Sand-attapulguite clay mixtures as a landfill liner. *Geotechnical and geological engineering*, 24, 1365-1383.
- [38] Jeong, S. & col. (2008). Effect of clay content on well-graded sands due to infiltration. *Engineering geology.*, 102, 74-81.
- [39] Elkady, T. & col. (2013). Effect of soil water characteristics curves of sand-clay mixtures. *Int. J. of Geomate.*, 4(2), 528-532.
- [40] Al-Mahbashi, A. & Dafalla, M. (2019). Shear strength prediction for an unsaturated sand clay liner. *Journal of geotechnical engineering*.
- [41] Orlandi, S. & Col. (2015). A case study on expansive clays on Comodoro Rivadavia city. *Fundamentals to application in geotechnics*, 2276-2283.
- [42] Piqué, T. & Col. (2019). Preliminary results of polymer enhanced soils mixture for potential use as covers or liners in landfill systems. *Environmental geotechnics*.
- [43] Santamartina, J. & Narsilio, G. (s.f.). Clasificación de suelos: Fundamento físico, prácticas actuales y recomendaciones.
- [44] Durner, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structures. *Water resources research*, 30(2), 211-223.
- [45] van Genuchten, M. & Yates, L. (1991). *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. USEPA.



- [46] Garg, S. & Garg, A. (2016). Hydrogel: Classification, properties, preparation and technical features. *Asian journal of biomaterial research*, 2(6), 163:170.
- [47] Shackelford, C. (1988). Diffusion as a transport process in fine-grained barrier materials. *Geotechnical news*, 6(2), págs. 24-27.
- [48] Bouazza, A. & Van Impe, W. (1998). Liner design for waste disposal sites. *Environmental Geology*, 35(1), págs. 41-54.
- [49] Katsumi, T. & Col. (2001). Performance-based design of landfill liners. *Engineering Geology*, 60, págs. 139-148.
- [50] Jingjing, F. & Col. (2014). Leakage performance of the GM+CCL liner system for the MSW landfill. *Hindawi*.
- [51] Garg, A. (2020). Modelling contaminant transport in fly ash-bentonite composite landfill liner: mechanism of different types of ions. *Scientific reports*, 10.
- [52] Sharma, H. & Reddy, K. (2004). *Geoenvironmental engineering*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- [53] Schulze, D. (2005). Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior. *Ground water*, 43(3), págs. 443-456.
- [54] De Camillis, M. & Col. (2016). Hydraulic conductivity and swelling ability of a polymer modified bentonite subjected to wet-dry cycles in seawater. *Geotextiles and geomembranes*, 1(9).
- [55] Kim, D. & Col. (2018). Effect of clay content on the shear strength of clay-sand mixture. *Journal of geoengineering*, 9(19).
- [56] Vallejo, L. & Col. (2000). Porosity influence on the shear strength of granular material-clay mixtures. *Engineering geology*, 58, 125-136.
- [57] Hongyu, T. (s.f.). *Prediction of the variaton of swelling pressure and 1-D heave of expansive soils with respect to soil suction*. Universidad de Ottawa.