

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

A. Pileggi y M. Codevilla

apileggi@fi.uba.ar; mcodevilla@fi.uba.ar

Universidad de Buenos Aires / Facultad de Ingeniería

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 y modificación del contenido de arcilla 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. Sobre las nuevas mezclas de suelo grueso-fino se efectuaron ensayos de compresión simple (UCS), curvas de retención (SWCC), conductividad hidráulica saturada, e hinchamiento libre en condiciones edométricas, sin APAM y con el agregado de APAM al 1.5% y 3.5% en peso sobre la fracción fina. Se analizan los resultados obtenidos y se compara esta nueva batería de ensayos con los resultados obtenidos anteriormente para la mezcla grueso-fino en proporción 85-15%.

Palabras clave: ARENA-ARCILLA – APAM – UCS – SWCC – CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA – HINCHAMIENTO LIBRE

1 INTRODUCCIÓN

Los rellenos sanitarios (RS) son imprescindibles para una correcta disposición de los residuos sólidos urbanos. Uno de los aspectos fundamentales al momento de proyectar un RS es el diseño de las barreras hidráulicas de fondo y de cobertura. Estas estructuras tienen como objetivos principales prevenir el escape de lixiviados y gases producidos por los residuos y limitar el ingreso de agua de lluvia. El desempeño de la barrera a lo largo de su vida útil debe asegurar un determinado valor de conductividad hidráulica, ser volumétricamente estable y ser resistente a la sobrecarga generada por el relleno.

Por lo general el diseño de las barreras hidráulicas implica el uso de mezclas arena-arcilla que logran cumplir con los tres criterios mencionados (Daniel and Benson [1]). La Tabla 1-1 muestra los requerimientos técnicos para la barrera de fondo y de cobertura y las problemáticas principales asociadas a cada una.

Tabla 1-1 – Requerimientos básicos y problemáticas para barrera inferior y superior (Adaptado de Bavernik, 1994 [2]).

Barrera superior		Barrera inferior	
Requerimientos	Problemática	Requerimientos	Problemática
- $k < 10^{-7}$ m/s	-Penetración de raíces	- $k < 10^{-9}$ m/s	-Percolación de lixiviados
-Resistencia superficial a la erosión	-Ciclos de congelamiento y deshielo	-Resistencia	-Acortamiento de vida útil
-Flexibilidad	-Tránsito vehicular	-Flexibilidad	
-Buen escurrimiento superficial	-Asentamiento diferencial		
-Aislar residuos de vegetación			
-Recolección de gases			
-Control de olores			

El presente trabajo tiene por objeto el estudio del comportamiento hidromecánico de mezclas arena-arcilla con adición de poliacrilamida aniónica (APAM) considerando su uso como barreras hidráulicas inferiores de un relleno sanitario de residuos domiciliarios y constituye la continuación del trabajo realizado anteriormente en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad de Buenos Aires por Marti et al. 2015 [3] y Casagrande, 2019 [4]. En un primer trabajo realizado por Marti [3], se realizó 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 resultados experimentales de la interacción del APAM con distintos materiales. En un segundo trabajo realizado por Casagrande [4], se estudiaron 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. El trabajo aquí desarrollado tuvo por objetivo particular modificar la mezcla original 85-15 arena-arcilla aumentando el contenido de finos en proporciones 80-20 y 70-30, y manteniendo los porcentajes de APAM de 1.5% y 3.5%. Para estas nuevas dosificaciones se obtuvieron las curvas de retención de agua con la técnica de papel de filtro para caracterizar su condición no saturada y se realizaron ensayos de conductividad hidráulica saturada para evaluar las propiedades hidráulicas. Se realizaron ensayos de compresión simple

para analizar el comportamiento mecánico y de hinchamiento libre para evaluar la estabilidad volumétrica de las mezclas.

2 MATERIALES UTILIZADOS

2.1 Arena y arcilla

Se utilizó una arena de origen fluvial a la que se le realizaron los ensayos de granulometría según ASTM D422-63 y gravedad específica según ASTM D854-02. La arcilla utilizada proviene de la zona costera de la ciudad de Comodoro Rivadavia, provincia de Chubut (ver Figura 2-1). Es una arcilla de origen marino que se encuentra fuertemente preconsolidada (Orlandi et al. 2015 [5]). Posee un elevado grado de expansión que es causante de patologías graves en viviendas y caminos de dicha localidad (Manzanal et al. 2019 [6]). Se realizaron ensayos de límites de Atterberg, pasante tamiz 200, hidrometría, gravedad específica y superficie específica con el método de Azul de Metileno (Santamartina et al. [7]). En la Tabla 2-1 se resumen los resultados obtenidos.



Figura 2-1 – Ubicación geográfica de la zona de extracción.

Tabla 2-1 – Propiedades de la arena y arcilla utilizadas						
ARCILLA						
USCS	pasa#200	LL	IP	ARCILLA	S_{esp}	G_s
	[%]	[%]	[%]	[%]	[m ² /g]	[-]
MH	96	63	18	20	187	2.77
ARENA						
USCS	C_u	C_c	D_{60}	D_{30}	D_{10}	G_s
SP	2.1	0.9	0.33	0.22	0.16	2.65

2.2 Poliacrilamida aniónica (APAM)

Se utilizó un polímero aniónico denominado poliacrilamida aniónica (APAM). La APAM es un polímero iónico súper absorbente de elevado peso molecular sintetizado a partir de monómeros de acrilamida y que posee comonómeros de carga iónica negativa. Los parámetros más importantes de la APAM y que definen su interacción con el medio en el que se halle inmerso son, la densidad de carga y el peso molecular. La densidad de carga se define como el porcentaje de monómeros que contienen el grupo funcional cargado en relación con el 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 APAM 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 2-2 se presentan algunas propiedades físicas de la APAM sólida.

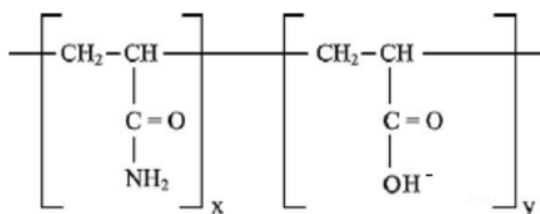


Figura 2-2 – Estructura molecular de la APAM

Tabla 2-2 – Propiedades de la APAM utilizada

Propiedad	APAM
Peso Molecular [Mg/mol]	10-20
Densidad g [kN/m3]	7.85
D50 [mm]	0.30
Temperatura de transición vítrea Tg [°C]	84
Densidad de carga aniónica [mol %]	>30
Absorción [%]	60

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

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 mediante ensayos de conductividad hidráulica saturada, resistencia a compresión simple, curva de

retención de agua 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 estudiadas son 80-20 y 70-30. Dichas mezclas se estudiaron sin APAM y con APAM al 1.5% y 3.5% del peso seco de la arcilla. En la Tabla 3-2 se resume el programa experimental realizado.

Las muestras fueron preparadas en seco y luego hidratadas con la humedad óptima correspondiente. Previo a su utilización se almacenaron durante un mínimo de 24 horas en recipiente hermético y a temperatura constante. La humedad óptima y la densidad de compactación se obtuvo de ensayos Proctor estándar según ASTM D698-00 *Método A*. La densidad de compactación de cada mezcla se definió como el 95% del promedio del peso unitario seco máximo de cada mezcla analizada en los ensayos Proctor estándar. En la Tabla 3-1 se resumen los valores de densidad seca y humedad objetivo determinados para cada mezcla. Todas las muestras se confeccionaron mediante compactación estática.

Tabla 3-1 – Valores de peso unitario seco y humedad para compactación de muestras

Mezcla [%S-%C]	γ_d [kN/m ³]	ω [%]
80-20	16.7	13.5
70-30	16.7	16.1

3.2 Curva de retención de agua

Las curvas de retención de agua se obtuvieron aplicando la norma ASTM D5298. Se utilizó papel filtro calibrado "Schleicher & Schuell 589/2, $\phi=70$ mm - White ribbon" para obtener los valores de succión mátrica y total. En la Figura 3-1 se observa una muestra en preparación con dos pastillas de suelo compactado que envuelven al papel filtro para medir succión mátrica. Por encima se coloca papel filtro para medir succión total.



Figura 3-1 – Muestra en preparación para ensayo de curva de retención

3.3 Conductividad hidráulica saturada

El ensayo de conductividad hidráulica se realizó bajo los lineamientos de la norma ASTM D5856-02 utilizando un permeámetro de carga variable con pared rígida y nivel de restitución constante. Se

confeccionaron muestras de diámetro 100 mm y altura 50 mm a las que se le aplicaron un gradiente hidráulico de entre 30 y 35.

3.4 Compresión simple no confinada (UCS)

Los ensayos de compresión simple se realizaron según la norma ASTM D2166-00 utilizando una prensa de velocidad constante. La velocidad de deformación se estableció en 1.25 mm/min que se ubica 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.



Figura 3-2 – Probetas en falla

3.5 Hinchamiento libre

Para el ensayo de hinchamiento libre se compactaron estáticamente las muestras de cada mezcla 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 4.9 kPa durante todo el ensayo. El ensayo finalizó cuando la tasa de expansión resultó menor a 0.005 mm/h.

Tabla 3-2 – Programa experimental

[%S+%C]	Conductividad hidráulica	UCS	SWCC	Hinchamiento libre
<i>Ensayos sin APAM</i>				
80-20	sí	sí	sí	sí
70-30	sí	sí	sí	sí
<i>Ensayos con APAM [1.5%]</i>				
80-20	sí	sí	-	sí
70-30	sí	sí	-	sí
<i>Ensayos con APAM [3.5%]</i>				
80-20	sí	sí	sí*	sí
70-30	sí	sí	sí	sí

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Curvas de retención

En la Tabla 4-1 y Figura 4-1 se presentan los pares de valores de saturación S_r y de succión mátrica ($u_a - u_w$) obtenidos de los ensayos de succión efectuados sobre distintas muestras de cada mezcla. Las mezclas 80-20 y 70-30 con 1.5% de APAM no pudieron ser realizadas y la mezcla 80-20-3.5 quedó incompleta. Las series obtenidas muestran una doble caída del grado de saturación en función de la succión mátrica. Se observan dos valores de succión de entrada de aire S_{ae1} y S_{ae2} , y dos valores de humedad volumétrica residual S_{res1} y S_{res2} . Esta doble caída describe una curva de retención de agua del tipo bimodal que se presenta en suelos o mezclas de suelos que poseen dos densidades de tamaños de poros bien definidas y con distinto orden de magnitud (Zangh et al., 2005 [8]; Fredlund et al., 1998 [9]).

Tabla 4-1 – Resultados de ensayos de curvas de retención de agua

Mezcla- %APAM	80-20-0		80-20-3.5		70-30-0		70-30-3.5	
N° muestra	Sr [%]	ua-uw [kPa]	Sr [%]	ua-uw [kPa]	Sr [%]	ua-uw [kPa]	Sr [%]	ua-uw [kPa]
1	0.86	1.95	0.75 0.67	12.4 18.4	0.83	3.45	0.89	15.0
2	0.79	2.26			0.70	5.26	0.68	250
3	0.70	2.79			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, 1994 [10] según las Ecuaciones 1 y 2. El modelo consiste en una superposición lineal de dos curvas de retención unimodales del modelo de retención de van Genuchten. La primera curva describe a la distribución de poros intergranular generada por los vacíos existentes entre partículas de arena y arcilla. La segunda curva describe a la distribución de poros intragranular generada por los vacíos existentes entre las láminas de arcilla. El ajuste se realizó con el software RETC [11] desarrollado por el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos. En la Tabla 4-2 se presentan los parámetros de ajuste.

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

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

Dónde:

- $S_e = \frac{S_r - S_{res}}{1 - S_{res}}$: 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 de la subcurva i

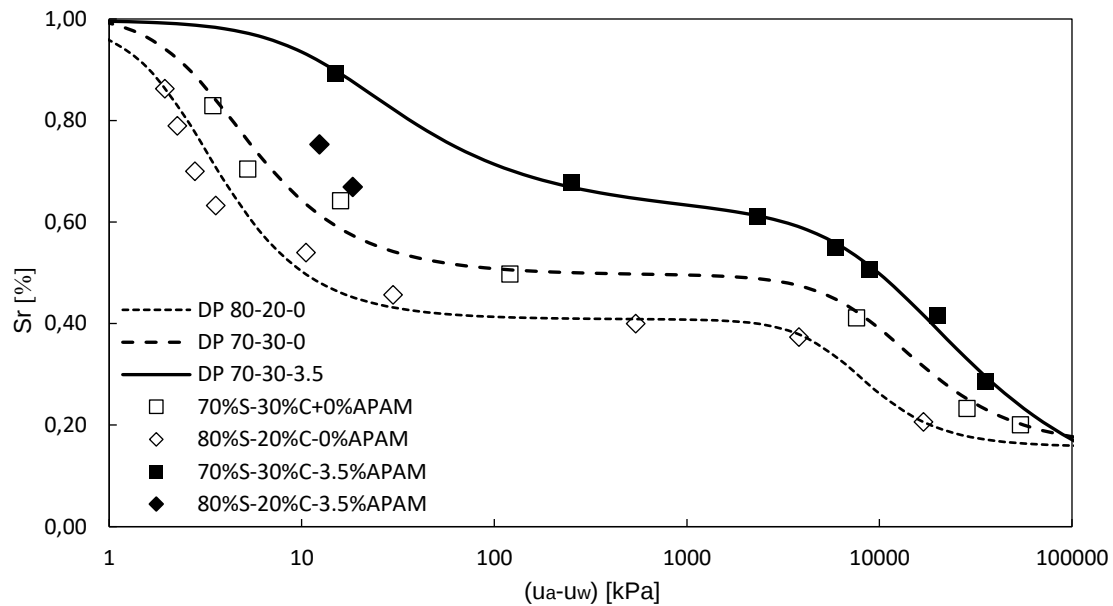


Figura 4-1 – Resultados experimentales de ensayos de curva de retención y ajuste de curvas de retención bimodales. DP: ajuste modelo de doble porosidad.

Tabla 4-2 – Parámetros de ajuste del modelo bimodal para las distintas mezclas.

Mezcla - %APAM	S_{ae1} [kPa]	W_1 [-]	m_1 [-]	S_{ae2} [kPa]	W_c [-]	m_2 [-]	S_{res2} [-]	R2
80-20-0	2.5	0.70	0.57	66667	0.30	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

4.2 Conductividad hidráulica

En la Tabla 4-3 se presentan los resultados de conductividad hidráulica de cada mezcla. En todos los casos se obtuvieron valores de conductividad hidráulica k menores a 10^{-9} m/s que es el máximo admisible para barreras hidráulicas inferiores de un relleno sanitario.

Tabla 4-3 - 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	$1.5 \cdot 10^{-11}$	$1.2 \cdot 10^{-11}$

4.3 Resistencia a compresión simple

En la Tabla 4-4 y la Figura 4-2 se presentan los valores de resistencia a compresión simple para cada mezcla arena-arcilla en función del contenido de APAM. La incorporación de APAM generó un aumento en la resistencia de las probetas para ambas mezclas. Los cambios resultaron más significativos para las mezclas 70-30 que para las mezclas 80-20. El incremento de la fracción fina también produjo aumento en la resistencia a compresión simple de las probetas. Este aumento es más significativo para mezclas con contenido de APAM que las que no poseen APAM.

Tabla 4-4 - Resultados de ensayos de compresión no confinada (UCS)						
Mezcla	APAM	q_{max}	E_{falla}	E_{50}	$W_{inicial}$	γ_d
	[%]	[kPa]	[-]	[-]	[%]	[kN/m ³]
80-20	0	20.2	1.82	1851	13.5	16.3
	1.5	34.0	2.16	2133	13.3	16.3
	2.5	39.7	2.76	2027	13.6	16.3
	3.5	44.1	2.15	3129	13.9	16.3
70-30	0	36.2	2.48	1749	15.5	16.4
	1.5	82.6	2.44	4590	16.0	16.4
	2.5	89.0	2.41	5279	15.8	16.6
	3.5	99.5	2.64	4915	16.1	16.3

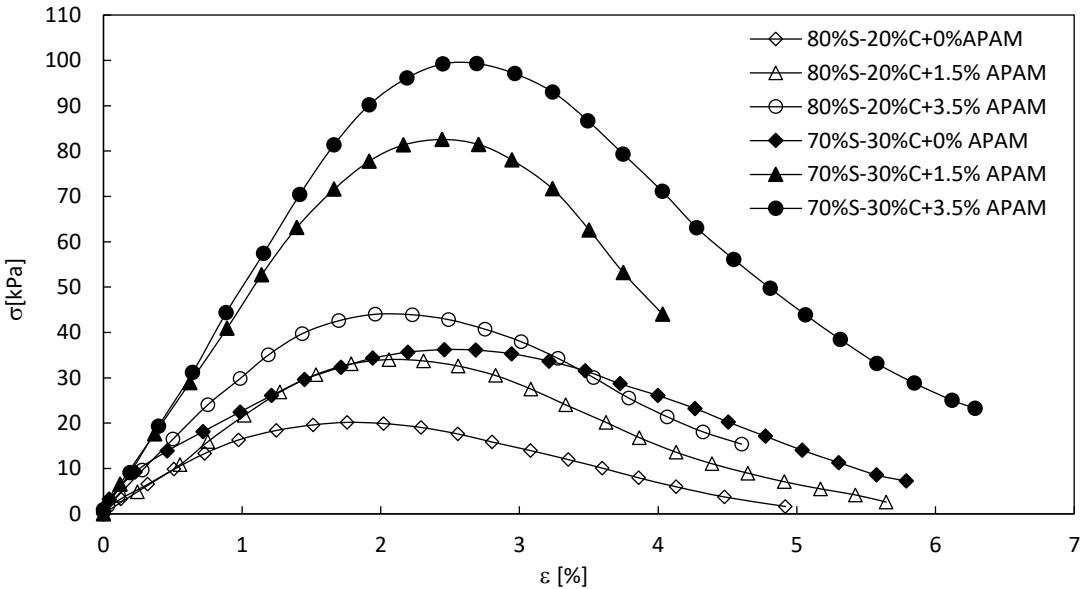


Figura 4-2 – Curvas tensión deformación para mezclas 80-20 y 70-30.

4.4 Hinchamiento libre

En la Figura 4-3 y la Tabla 4-5 se presentan las curvas de hinchamiento para las mezclas arena-arcilla 80-20 y 70-30 sin APAM y con APAM en porcentajes 1.5% y 3.5% de la fracción fina. En la Tabla 4-5 se presentan los valores finales de hinchamiento e índice de expansión.

La incorporación de APAM aumentó los valores finales de hinchamiento libre en todas las mezclas. Para la mezcla 80-20, la incorporación de APAM en un 1.5% y 3.5% aumentó los valores de hinchamiento 2,3 y 4 veces con respecto a la mezcla sin APAM. Para la mezcla 70-30 la incorporación de APAM en mismas proporciones aumentó los valores finales de hinchamiento libre 3,3 y 7,3 veces con respecto a la mezcla sin APAM.

El aumento del porcentaje de finos también incrementó los valores finales de hinchamiento libre para todas las mezclas. Los valores de hinchamiento alcanzados por mezclas con 30% de arcilla resultaron 1,5, 2 y 2.8 veces mayor con respecto a mezclas con 20% de arcilla con proporciones de APAM de 0%, 1.5% y 3.5%.

Tabla 4-5 – Resultados de hinchamiento libre e índice de expansión de mezclas arena-arcilla-APAM

Mezcla	$\Delta H/H$	Índice de expansión (EI)	Potencial de expansión
80-20-0	2.77	27.7	Bajo
80-20-1.5	6.48	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

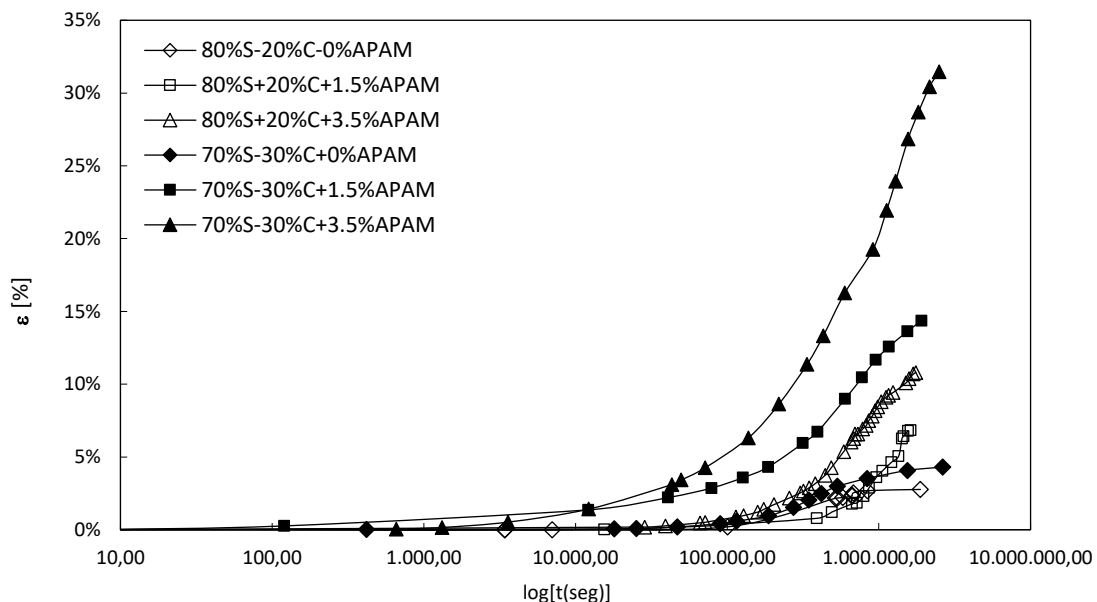


Figura 4-3– Curvas de hinchamiento libre para mezclas 80-20

5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

5.1 Hinchamiento – Efectos del aumento del porcentaje de finos

En la Figura 5-1 se presenta la tendencia de hinchamiento por aumento del porcentaje de finos para mezclas sin APAM, 1.5% de APAM y 3.5% de APAM. El aumento del contenido de finos incrementó los valores finales de hinchamiento libre. 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 %. Esto es esperable ya que el valor máximo de hinchamiento no puede exceder al que describe una mezcla 100% de arcilla. 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. Los cambios de volumen pueden describirse considerando el fenómeno de presión de hinchamiento según la ecuación de Van't Hoff [11]:

$$\pi = RT \sum [c_i^{interp} - c_i^{fluido}] \quad (3)$$

El término π es la presión osmótica también conocida como presión de hinchamiento, 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), $R = 8,23 \text{ LkP a/mol}^\circ\text{K}$ 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 3, 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 π no genere cambio de volumen.

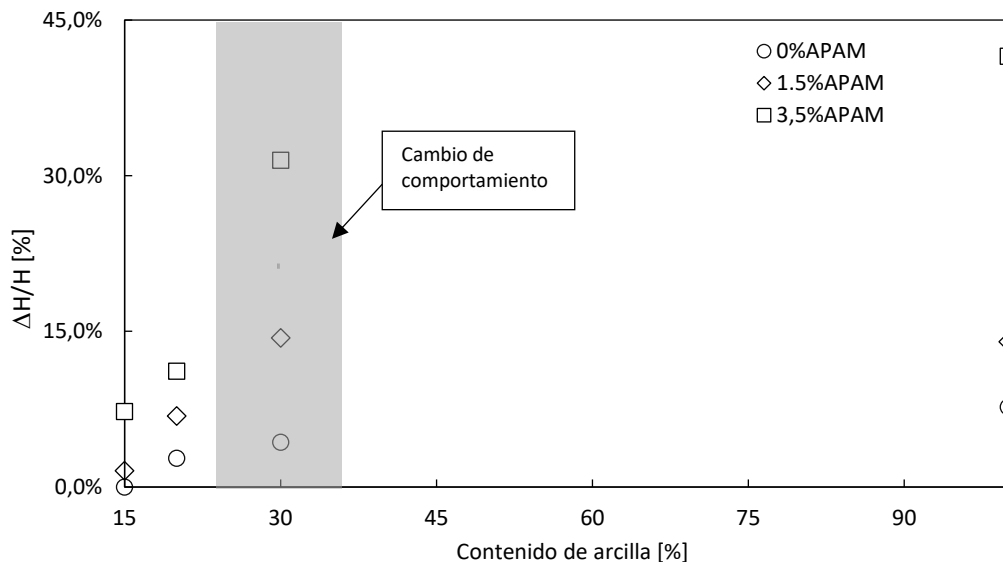


Figura 5-1 – Valores finales de hinchamiento libre en función del contenido de arcilla.

5.2 Hinchamiento – Efectos de la incorporación de APAM

La Figura 5-2 muestra la variación de los valores de hinchamiento libre en función del contenido de APAM para mezclas 85-15 (Casagrande, 2019 [4]), 80-20, 70-30 y 0-100 (Marti, 2015 [3]). La incorporación de APAM aumenta los valores de hinchamiento libre de manera no lineal para todas las mezclas.

Los cambios en los valores de hinchamiento pueden explicarse analizando los cambios en la presión osmótica según describe la ecuación de van't Hoff (ver Ecuación 3). La adición de APAM incrementa c_i^{interp} ya que posee una alta carga iónica negativa que incrementa la concentración de cationes entre las partículas de arcilla y la APAM. El incremento de c_i^{interp} da como resultado un aumento de la presión osmótica o de hinchamiento que tiende a equilibrar la solución y, dado que el hinchamiento no está restringido se registra una expansión de las mezclas.

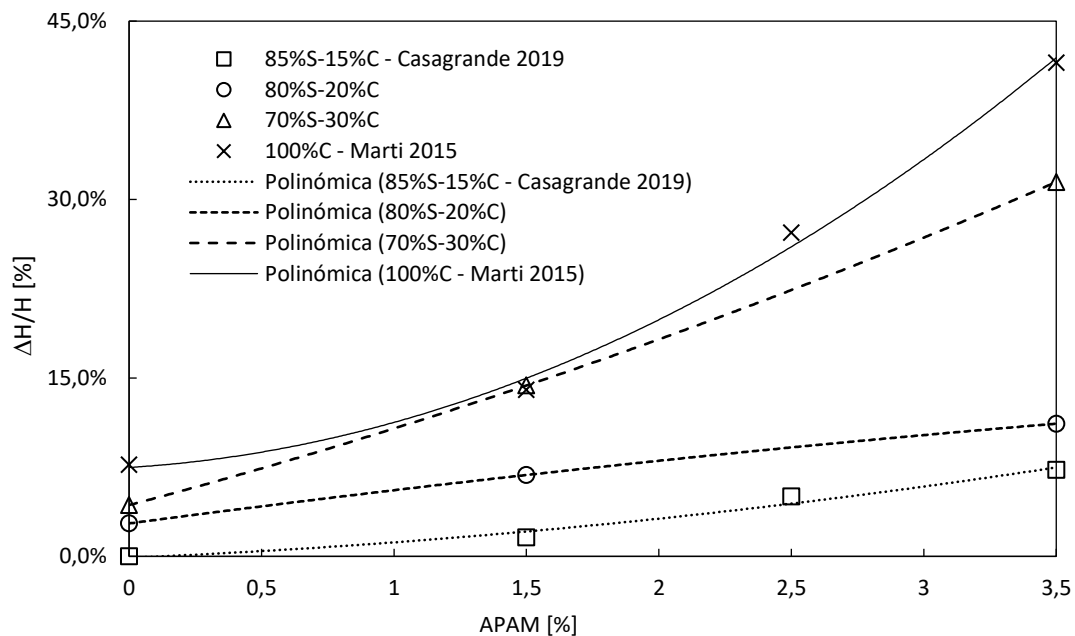


Figura 5-2 – Valores finales de hinchamiento libre en función del porcentaje de APAM.

5.3 Conductividad hidráulica saturada – Efecto del aumento del porcentaje de finos

En la Figura 5-3 se presentan los valores de conductividad hidráulica saturada para las mezclas 80-20 y 70-30 sin APAM y con contenido de APAM de 1.5% y 3.5%. Se incluyen los resultados obtenidos por Casagrande, 2019 [4] para la mezcla 85-15 sin APAM y con 1.5% de APAM. Los 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) para barreras hidráulicas de rellenos sanitarios. La conductividad hidráulica de la mezcla 70-30 se ubica en el mismo orden de magnitud que la mezcla 80-20. Se observa un comportamiento asintótico al aumentar el contenido de finos de un 15% a un 20% para los porcentajes

de APAM estudiados. Se estima que a partir de dicho porcentaje la arcilla ocupa gran parte de los vacíos intergranulares generando una matriz similar a la de una mezcla con contenido 100% arcilla.

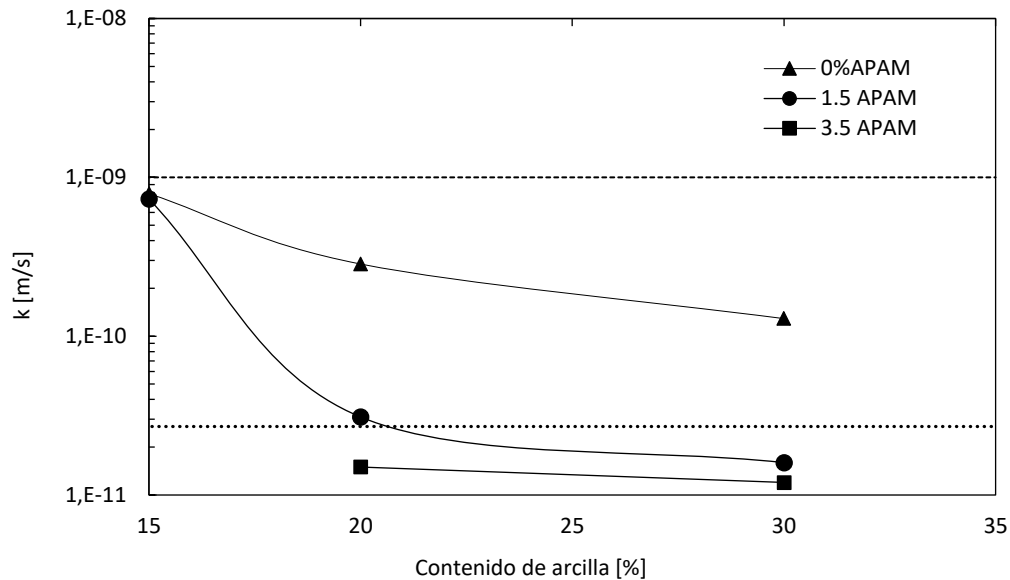


Figura 5-3 – Valores de conductividad hidráulica en función del porcentaje de arcilla.

5.4 Conductividad hidráulica saturada – Efecto de la incorporación de APAM

En la Figura 5-4 se presentan los resultados de conductividad hidráulica de las mezclas en función del contenido de APAM. La incorporación de APAM disminuyó los valores de conductividad hidráulica en las mezclas 80-20 y 70-30. No se registró una disminución significativa en la mezcla 85-15. La disminución de la conductividad hidráulica por la incorporación de APAM es consistente con el aumento de volumen que experimentaron las mezclas. Según el análisis de los resultados de hinchamiento libre, la incorporación de APAM aumentó el hinchamiento libre de las mezclas. 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. A mayor contenido de APAM, mayor hinchamiento. Como efecto directo disminuyó de la conductividad hidráulica saturada al aumentar el contenido de APAM. 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.

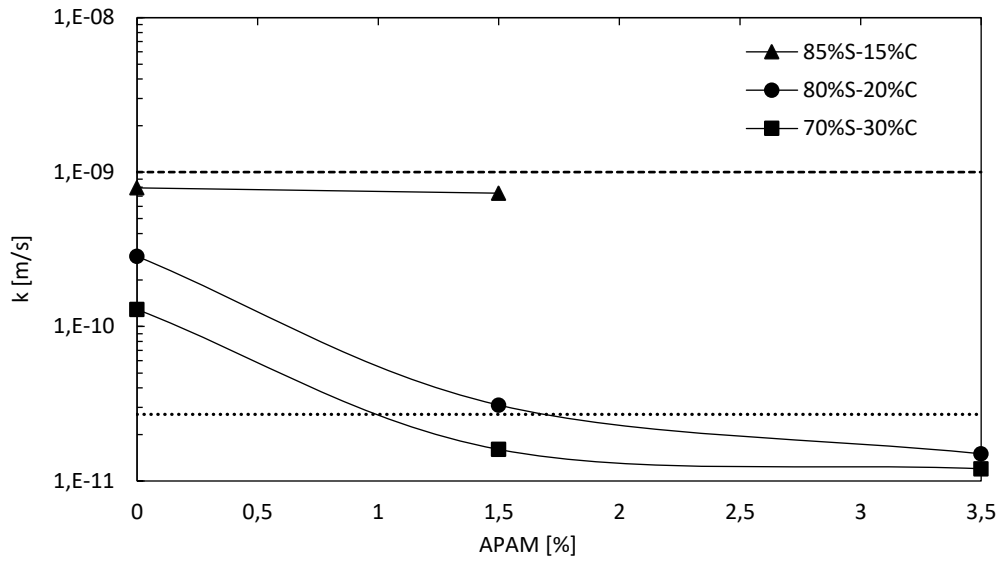


Figura 5-4 – Valores de conductividad hidráulica en función del contenido de APAM.

5.5 Curvas de retención – Efecto de la incorporación de finos

En la Figura 5-5 se presentan nuevamente los resultados junto con los obtenidos por Marti, 2015 [3] y Casagrande, 2015 [4]. Al aumentar el contenido de finos de 15 a 30 % en mezclas sin APAM se registró un aumento de los valores de entrada de aire Sae_1 y Sae_2 , del parámetro W_c , y una disminución del índice de distribución de poros m_1 . Se observa que el extremo derecho de la curva se aproximó a la curva de retención de la arcilla sola por el aumento de Sae_2 y W_2 . Estos resultados indican que el agregado de finos aumenta la capacidad de retención de agua de la mezcla y aumenta los valores de succión mátrica para un determinado porcentaje de saturación. Esto puede entenderse considerando el hecho de que el aumento 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:

$$u_a - u_b = \frac{2T_s}{R} \quad (4)$$

Dónde:

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

La Ecuación 4 describe la proporcionalidad inversa entre el radio de curvatura R en la interfaz aire-agua relativo al tamaño de poros y la succión mátrica. Una disminución del tamaño de poros genera una disminución del radio de curvatura R que implica un aumento de la succión mátrica ($u_a - u_w$).

La curva de la mezcla 85-15 no presentó característica bimodal. En vista de cómo cambia la curva con el agregado de finos se estima que la forma bimodal debe existir, pero sería necesario quitar más humedad en los ensayos para observarlo.

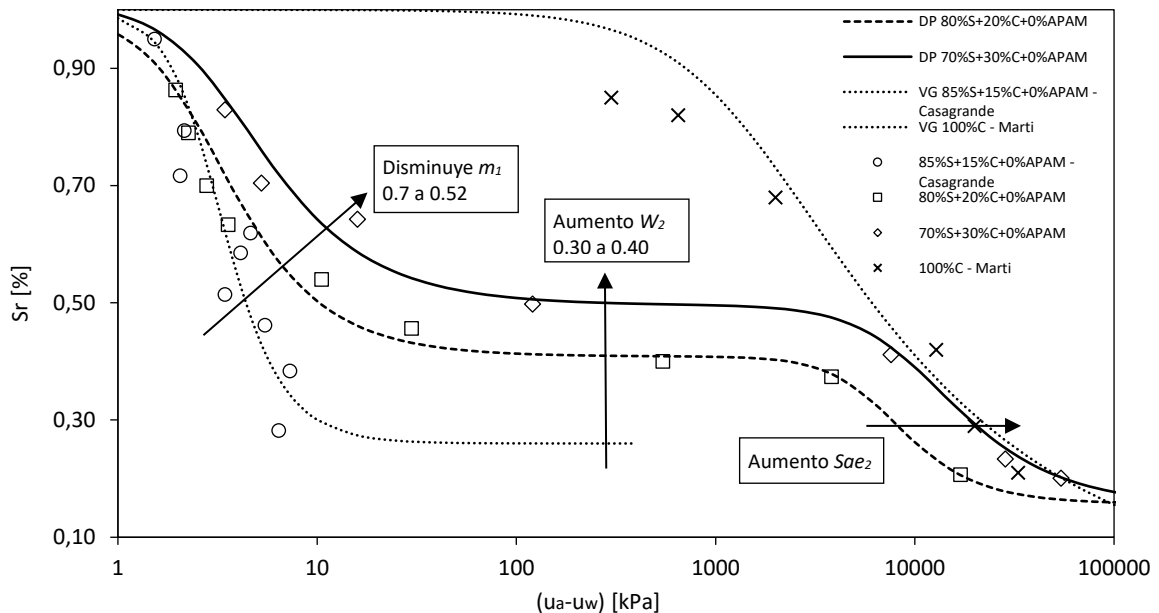


Figura 5-5 – Cambios en curva de retención por agregado de finos. DP: modelo doble porosidad. VG: modelo de van Genuchten.

5.6 Curvas de retención – Efecto de la incorporación de APAM

En la Figura 5-6 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_1 , aumentó el parámetro W_2 y se incrementaron los valores de succión de entrada de aire S_{ae1} y S_{ae2} . 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 (Mitchell [12]). 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 (Marti, 2015 [3]). Como la succión mátrica es inversamente proporcional a dicho diámetro (ver Ecuación 3) 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 presentados, en donde se observó una reducción de la conductividad hidráulica k al aumentar el contenido de APAM.

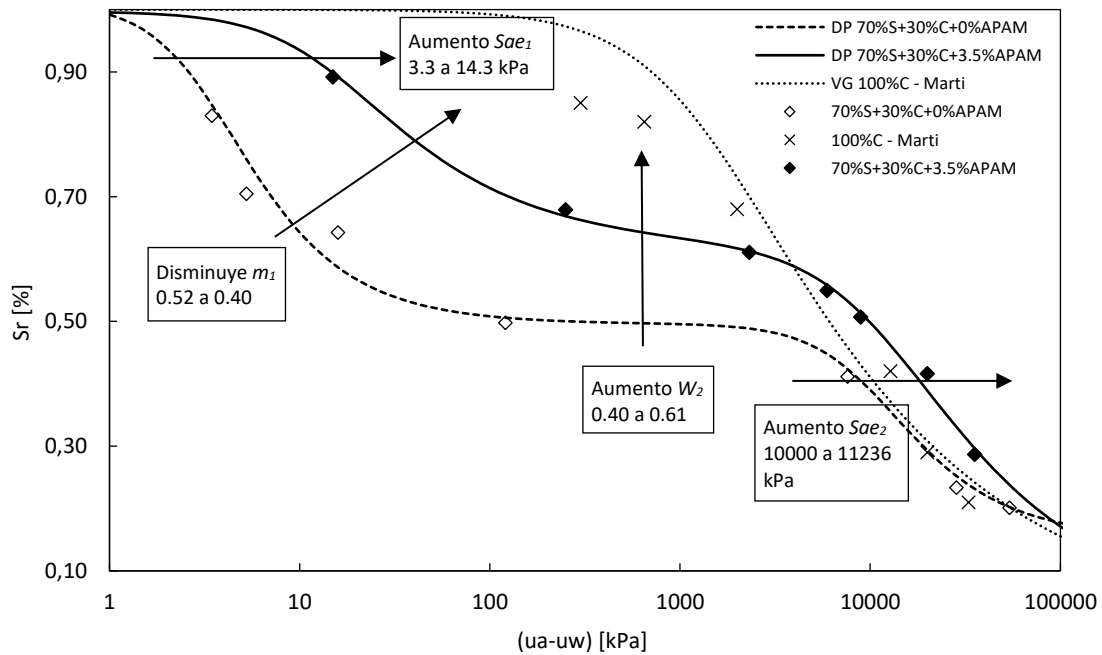


Figura 5-6 – Cambios en la curva de retención para mezclas arena-arcilla 70-30 en función del contenido de APAM. DP: modelo doble porosidad. VG: modelo de van Genuchten.

5.7 Resistencia a compresión simple – Efectos de la incorporación de APAM

En la Figura 5-7 se presenta la tendencia de la resistencia a compresión simple para mezclas 85-15, 80-20 y 70-30 en función del contenido de APAM. Se observa que la incorporación de APAM genera un aumento en la resistencia de las probetas para todas las mezclas. Los cambios resultan más significativos para las mezclas 70-30 que para las mezclas 80-20 y 85-15. Se observa a su vez que la adición de APAM en un 1.5 % produce un aumento más significativo que con proporciones mayores. El incremento de resistencia registrado por incorporación de APAM puede deberse principalmente a dos efectos. En primer lugar, se estima que 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, se estima que el aumento de la succión mátrica en las mezclas por incorporación de APAM incrementa la resistencia al corte del material. Esto puede interpretarse con la ecuación de resistencia al corte en suelos no saturados propuesta por (Fredlund et al., 1993 [13]) (Ecuación 5) que muestra que un aumento de la succión mátrica ($u_a - u_b$) implica un aumento en la tensión de corte en el plano de falla τ .

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_b)\tan\phi^b \quad (5)$$

Donde:

- c' : cohesión efectiva del material con succión mátrica nula
- τ : esfuerzo de corte en el plano de falla
- σ : Esfuerzo normal en el plano de falla
- ϕ' : ángulo de fricción interna efectivo del material relacionado con el esfuerzo normal neto
- ϕ^b : ángulo que indica la tasa de incremento de la resistencia al corte relativo a la succión mátrica
- $(u_a - u_b)$: succión mátrica

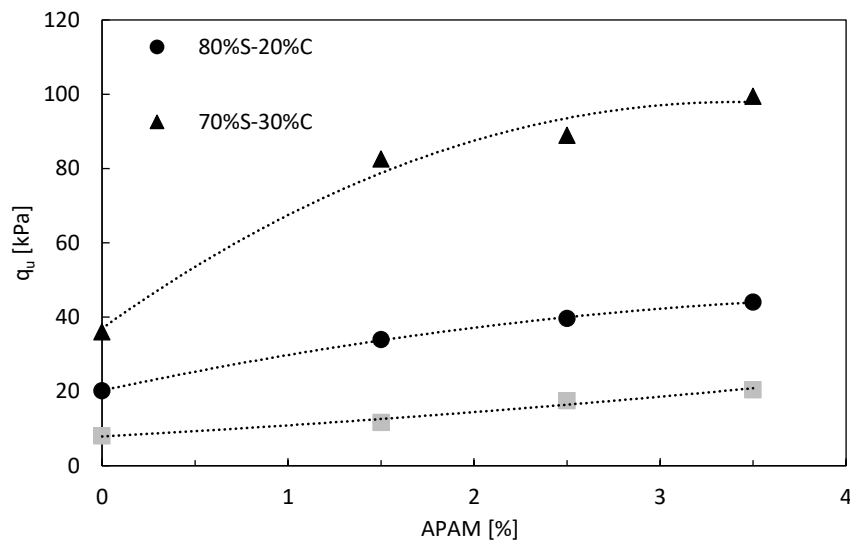


Figura 5-7 – Resistencia a compresión simple en función del porcentaje de APAM.

5.8 Resistencia a compresión simple – Efectos del aumento del porcentaje de finos

En Figura 5-8 se presenta la evolución de la resistencia a compresión simple en función del contenido de finos. El aumento de la fracción de arcilla produjo aumentos en la resistencia a compresión simple de las probetas. El efecto puede deberse 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 como se describió con la Ecuación 4.

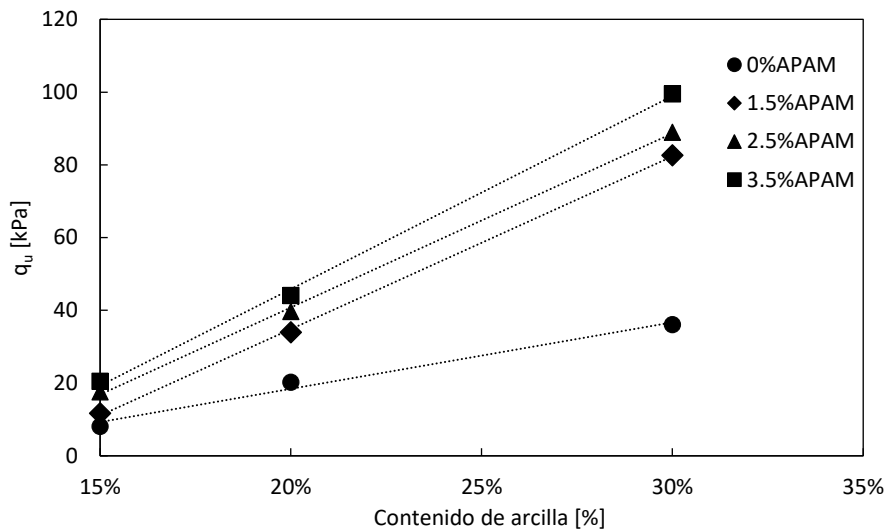


Figura 5-8 – Resistencia a compresión simple en función del contenido de arcilla.

6 CONCLUSIONES

Se evaluaron mezclas arena-arcilla modificadas con poliacrilamida aniónica considerando su uso como barreras hidráulicas de rellenos sanitarios de origen domiciliario. 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 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.
- 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.

REFERENCIAS

- [1] Daniel, D. y Benson, C. *Water content-density criteria for compacted soil liners*. Journal of geotechnical engineering, 116, 12, 1991, pp: 1811-1830.
- [2] Bavernik, F., *Polyacrylamide characteristics related to soil applications*. Soil science, 158, 4, 1994, pp: 235-243.
- [3] Marti, L. (2015), *Suelos compactados con incorporación de polímeros*. Laboratorio de Mecánica de Suelos. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires.

- [4] Casagrande, C. (2019), *Caracterización de suelo-polímero para uso en barreras hidráulicas en rellenos sanitarios*, Laboratorio de Mecánica de Suelos. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires.
- [5] S. Orlandi, D. Manzanal, A. Ruiz, M. Avila, M. Graf., *A case study on expansive clays on Comodoro Rivadavia city*. Fundamentals to Applications in Geotechnics, IOS Press, 2015. pp: 2276-2283.
- [6] D. Manzanal, S. Orlandi, J.C. Barria. *Swell characterization of expansive clays from Comodoro Rivadavia - Argentine*. XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019 pp: 17-20.
- [7] Santamartina, J. & Narsilio, G. *Clasificación de suelos: Fundamento físico, prácticas actuales y recomendaciones*.
- [8] Zhang, L. & col. *Predicting bimodal soil-water characteristics curves*. Geotechnical and geoenvironmental engineering, 131, 5, 2005, pp. 666-670.
- [9] Fredlund, D. & col. *The soil-water characteristics of sand-bentonite mixtures used for liners and covers*. Proceeding of the second international conference on unsaturated soils., 1, 1998 pp: 143-148.
- [10] Durner, W. *Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structures*. Water resources research, 30, 2, 1994, pp: 211-223.
- [11] van Genuchten, M. & Yates, L. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. USEPA, 1991.
- [12] Mitchell, J. K., *Fundamentals of Soil Behavior*. 3a ed., New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [13] Fredlund, D, Rahardjo, H., *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1993, p.228.