



XXVI

CAMSIG

Congreso Argentino de Mecánica de  
Suelos e Ingeniería Geotécnica

30 y 31 de agosto y 1 de septiembre de 2023



XXVI

CAMSIG

# Modelación micromecánica de la resistencia al corte no saturada de suelos granulares

**Juan Pablo Ibañez**

*Área Geotecnia - Instituto IMERIS, Facultad de Ingeniería de la Universidad  
Nacional de Cuyo, Centro Universitario (M5502KFA), Mendoza, Argentina*

## INTRODUCCION

- El comportamiento mecánico de los suelos no saturados es controlado por la interacción del agua en el espacio poroso.
- En el caso de suelos arenosos, el agua se organiza en la forma de meniscos capilares que son formados en las zonas de contacto entre granos, ocupando parcialmente el espacio poroso.
- La succión en estos meniscos modifica sustancialmente las características:
  - rigidez,
  - compresibilidad,
  - resistencia al corte y
  - permeabilidad del suelo.



## LA CONDICION NO SATURADA

- El fenómeno de flujo comprende un conjunto de transferencias de masa: entre poros, **entre meniscos**, y entre poro y menisco.
- En el menisco se genera una deficiencia de presión denominada **succión**.

$$\Delta M_{ij}/\Delta t = K_{ij}(p_j - p_i)$$

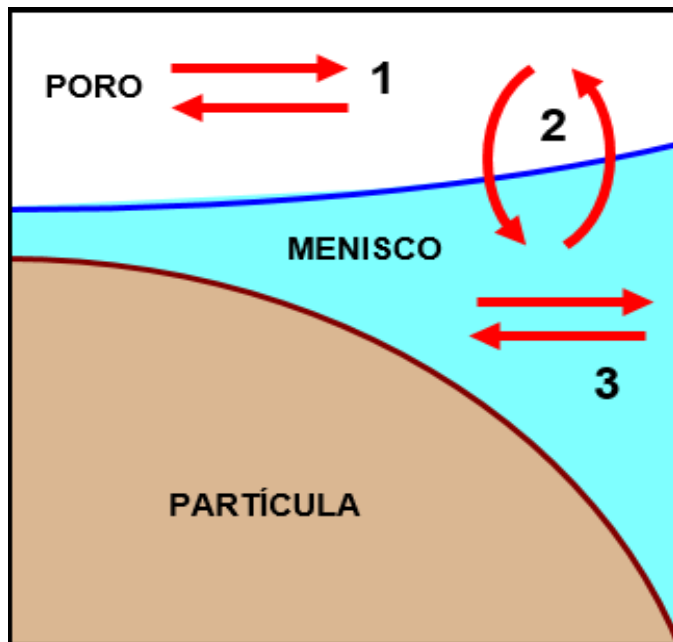


Figura 1. Interacciones en un menisco.

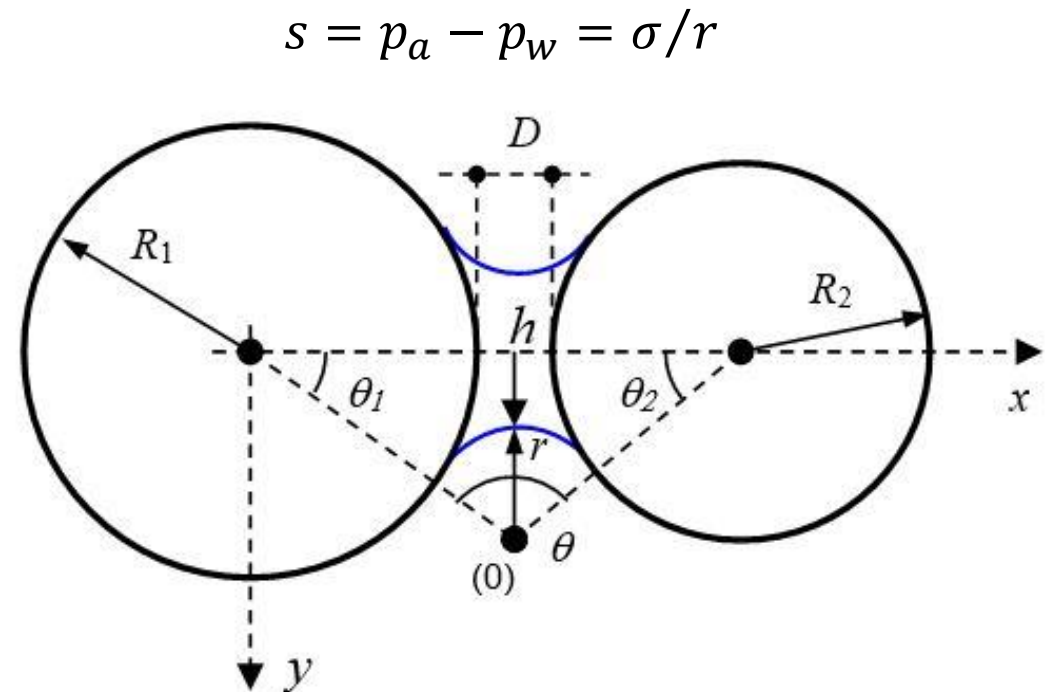
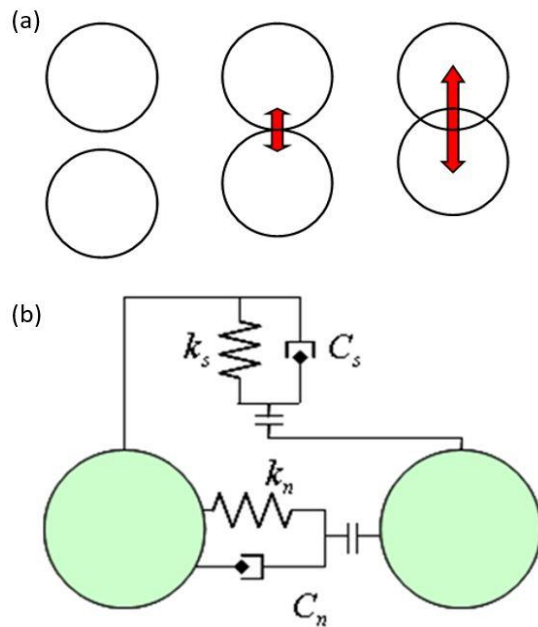


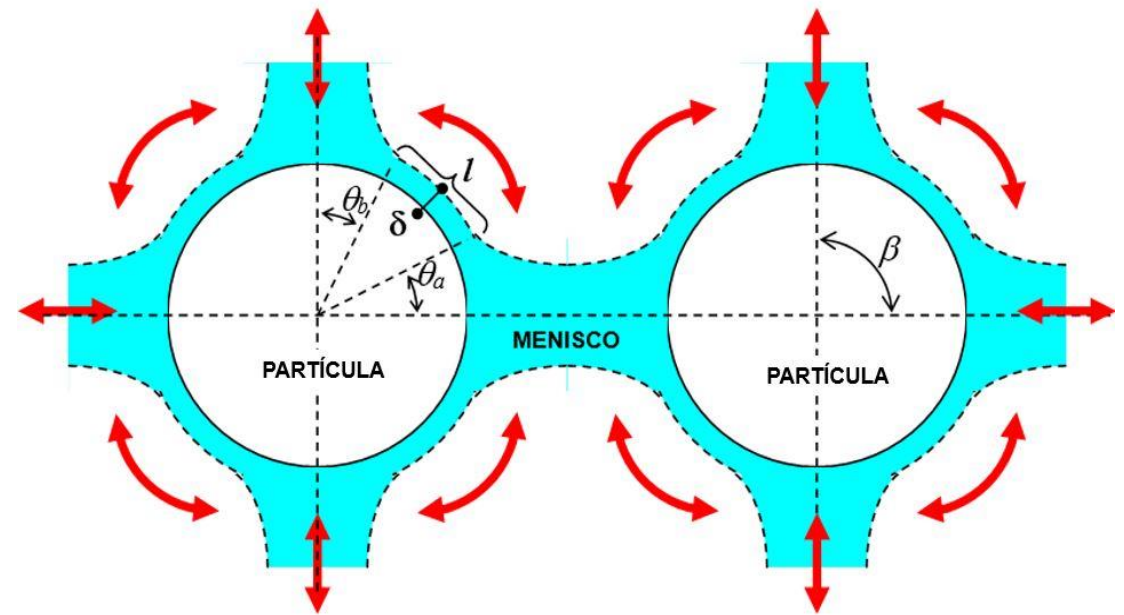
Figura 2. Geometría idealizada del menisco capilar.

## MODELO MICROMECHANICO

- Para analizar cualitativamente la influencia de esta condición en la resistencia al corte se desarrolló un modelo numérico micromecánico específico.
- Se utilizó el método de los elementos discretos en dos dimensiones.
- Las partículas de suelo son representadas por discos circulares rígidos, y los meniscos son definidos en los puntos geométricos de contacto entre partículas.
- Los meniscos, a su vez, están interconectados para formar una red de flujo.



**Figura 4.** Método de los elementos discretos. (a) Método de penalización para crear contactos entre elementos; (b) Modelo de contacto para las direcciones normal y tangencial.

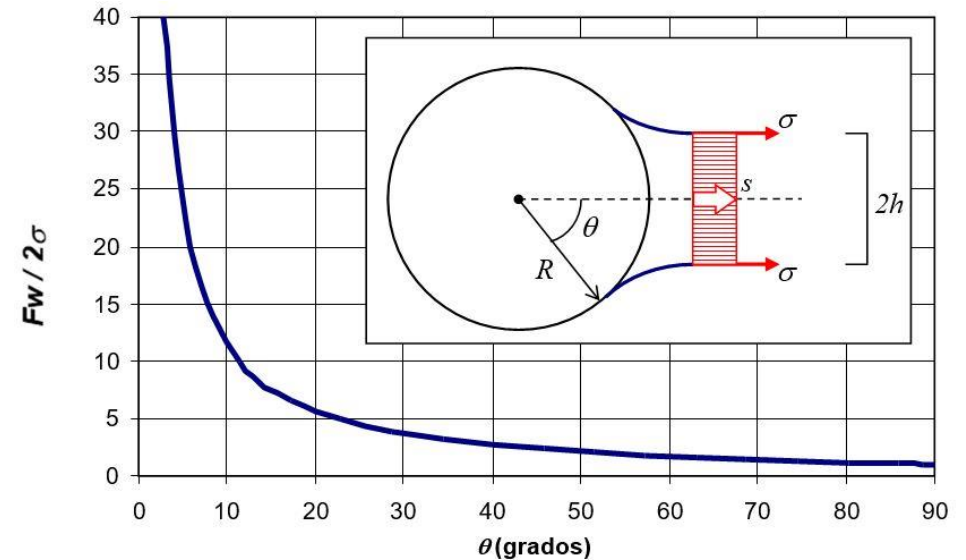


**Figura 5.** Red de meniscos con indicación de direcciones de flujo.

## CALCULO FLUJO-MECANICO

- El cálculo mecánico y de flujo ha sido acoplado en el modelo por la aplicación integrada de las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y balance de agua.
- Los meniscos generan fuerzas de atracción entre las partículas sólidas.
- El desequilibrio de fuerzas en las partículas modifica la configuración geométrica del espacio poroso, alterando el balance de agua y succión en los poros.

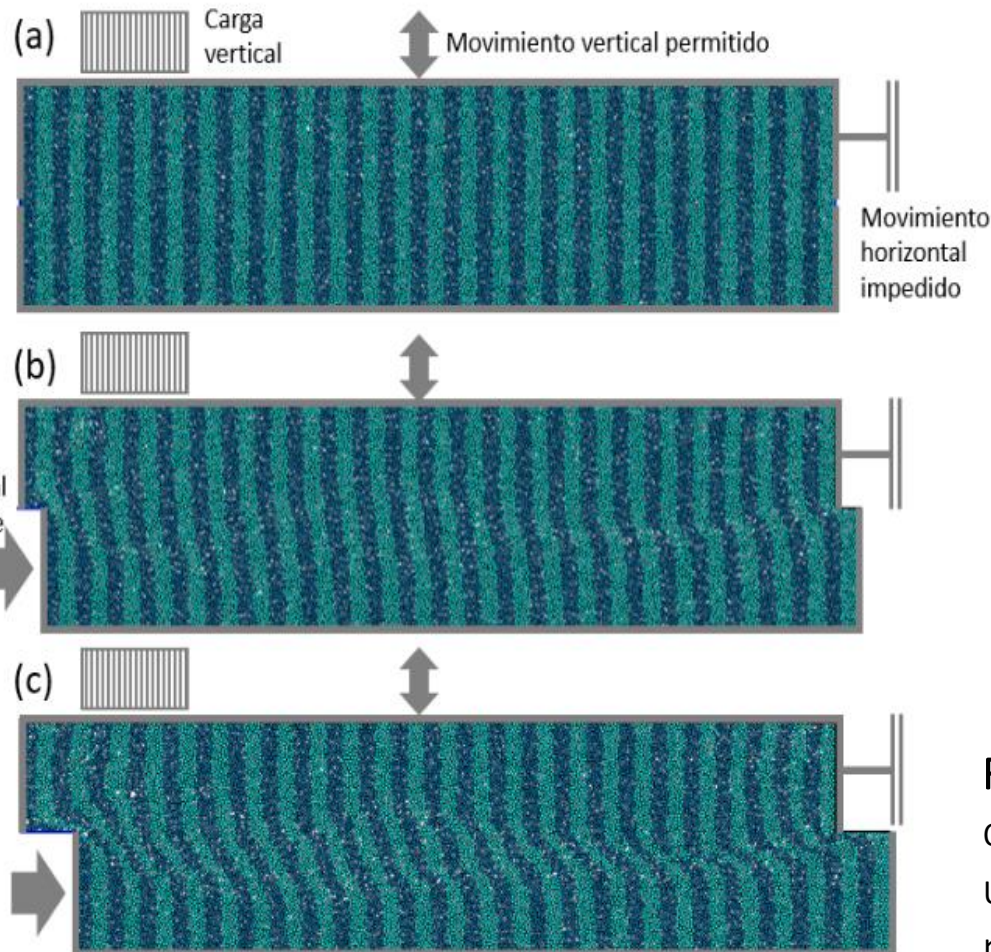
- Paso de **cálculo mecánico**.
- por los desplazamientos de las partículas se modifican la **geometrías de los meniscos**.
- manteniendo constante el volumen de agua en cada menisco, se actualiza la geometría y la **succión** en los meniscos existentes.
- Se realiza el **cálculo de flujo**.
- Hay **transferencia de masa** de agua entre meniscos vecinos, en función del gradiente de presión existente entre ellos.
- las **fuerzas capilares** son actualizadas.
- Nuevo paso de **cálculo mecánico**.



**Figura 3.** Evolución de la fuerza capilar normalizada (adimensional) en función del ángulo de mojado del menisco.

## SIMULACION NUMERICA

- Se realizaron simulaciones numéricas de configuraciones de corte directo para diferentes niveles de succión (25, 50, 75, 100 e 150 kPa) y confinamientos de 300 y 600 kPa.



Se diseñó una probeta básica, con 18.225 elementos de tres tamaños diferentes (ver Tabla 1). Esta configuración clasifica como SP en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

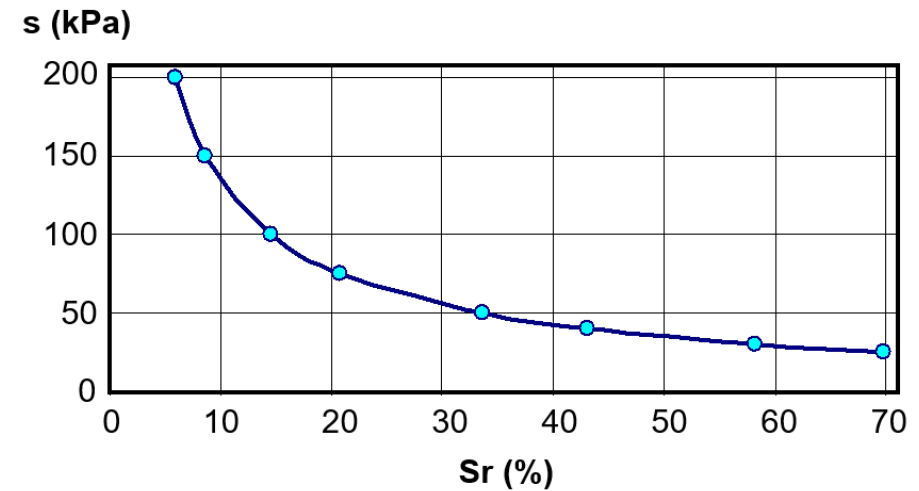
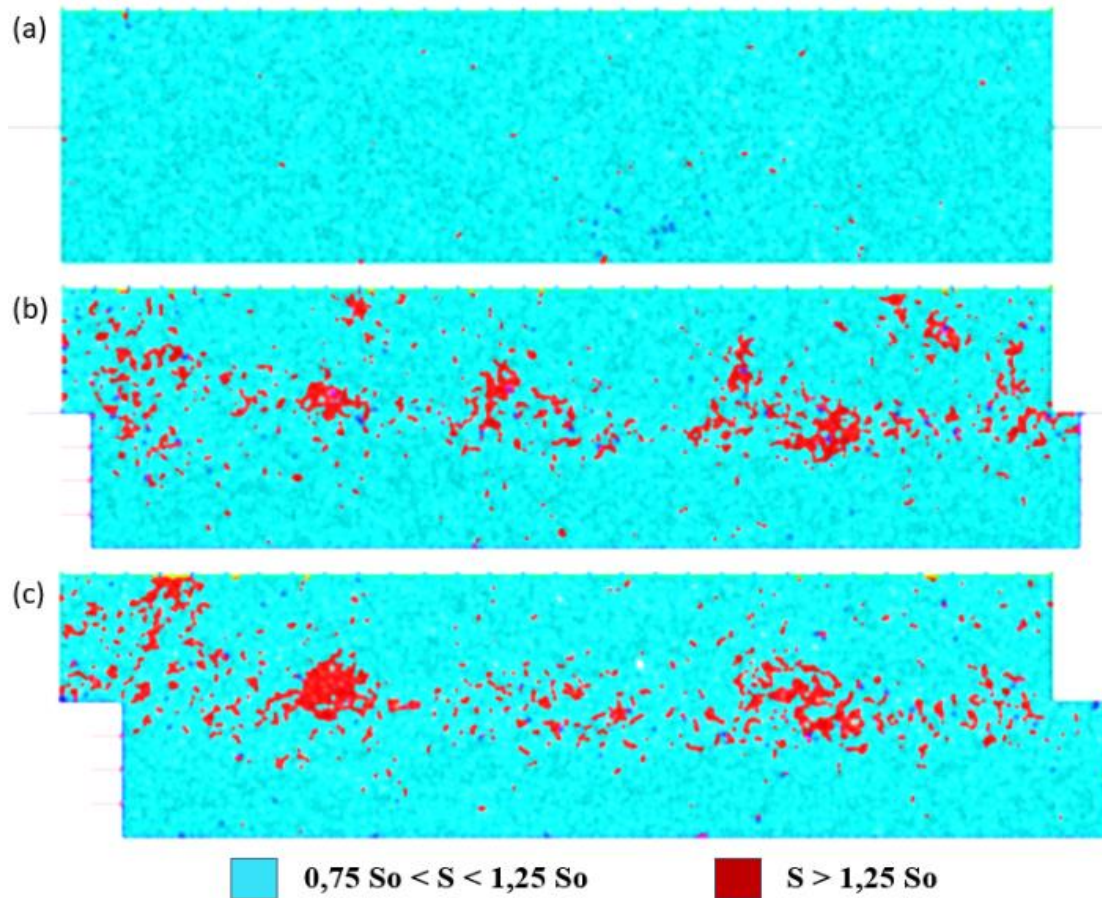
**Tabla 1.** Granulometría de la probeta de elementos discretos.

radio (mm)	Cantidad	% peso	$D_{10}$	0,090
0,10	6.075	16,3%	$D_{30}$	0,110
0,15	6.075	36,6%	$D_{60}$	0,205
0,17	6.075	47,1%	$C_c$	0,66 < 1,0
Total	18.225	100,0%	$C_u$	2,28 < 6

**Figura 6.** Modelado de una configuración de corte directo. a) Configuración inicial; b) Configuración para un desplazamiento horizontal de 2 mm; c) Configuración para un desplazamiento horizontal de 5 mm.

## RESULTADOS

- Los resultados reprodujeron cualitativamente la influencia de la interacción suelo-agua.



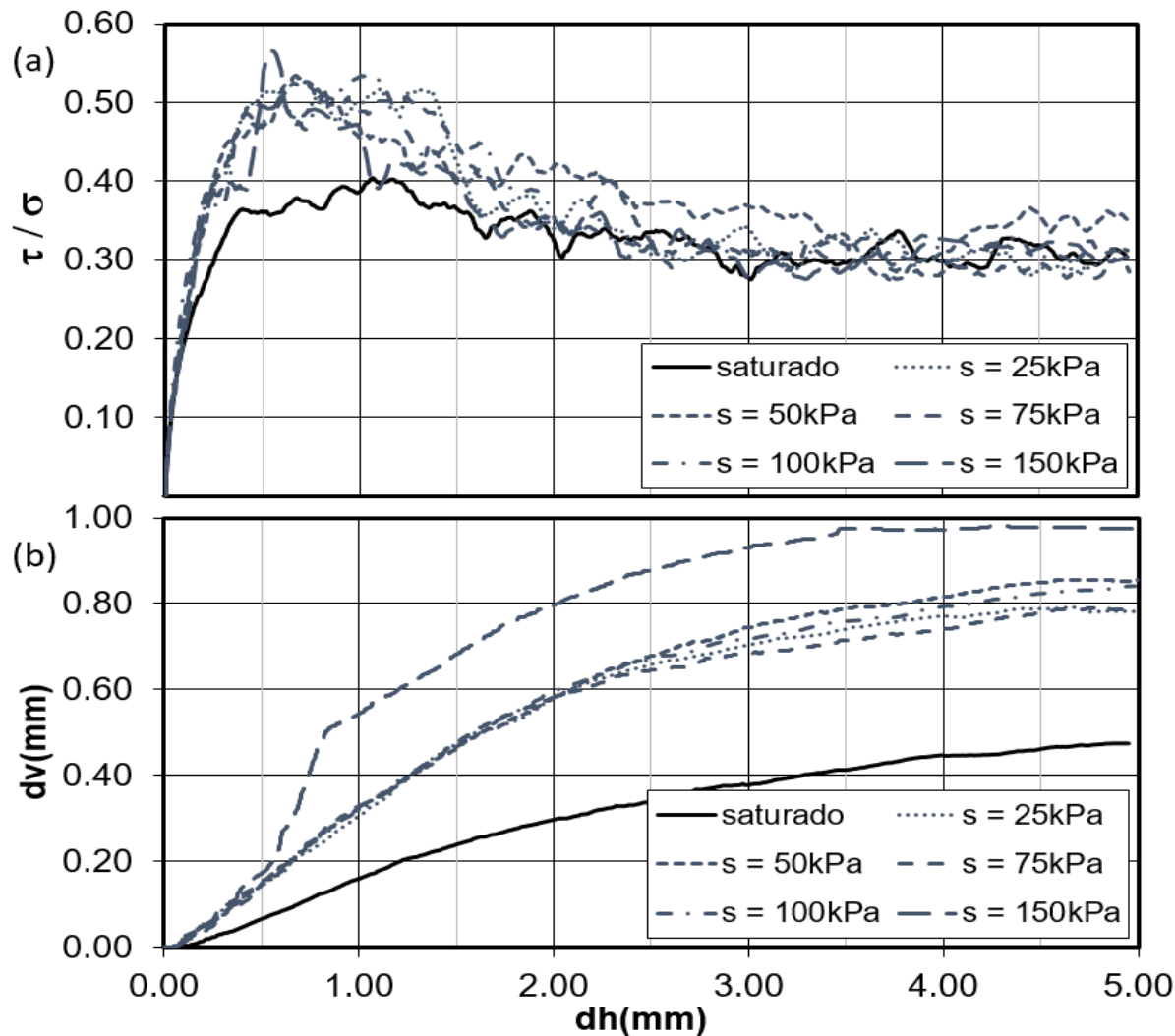
**Figura 7.** Curva característica succión ( $s$ ) x grado de saturación ( $S_r$ ) de la probeta de elementos discretos.

**Figura 9.** Evolución de la succión con el desplazamiento horizontal de la caja de corte. a) Condición inicial; b) Condición a 2 mm de desplazamiento; c) Condición a 5 mm de desplazamiento.



## RESULTADOS

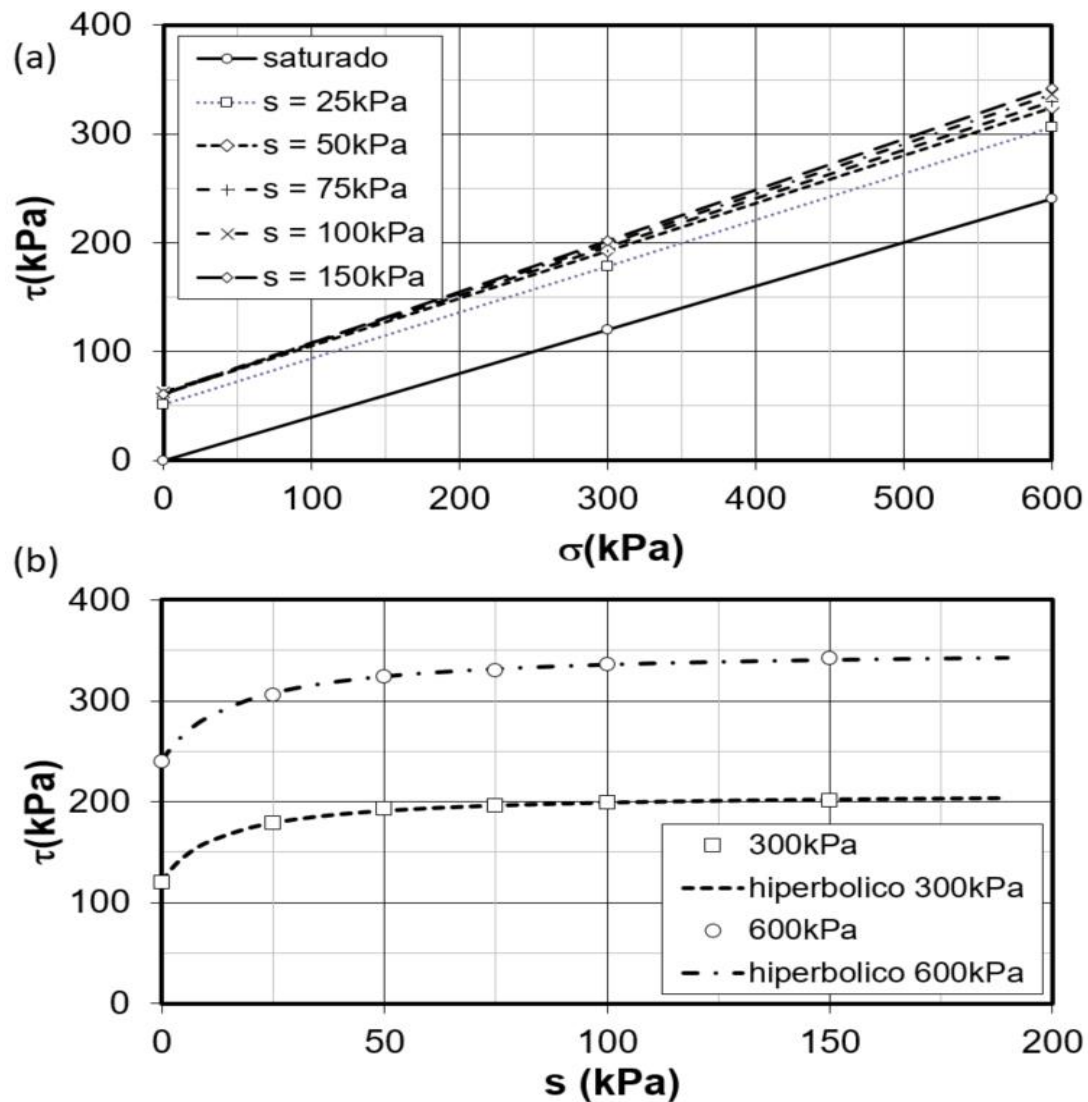
- Los resultados reprodujeron cualitativamente la influencia de la interacción suelo-agua.



**Figura 8.** Resultado de simulación de corte directo en probeta virtual para tensión vertical de 600 kPa y niveles de succión de 25, 50, 75, 100 y 150 kPa. a) Curvas de resistencia al corte normalizada vs. desplazamiento horizontal; b) Curvas de desplazamiento vertical vs. desplazamiento horizontal.

## RESULTADOS

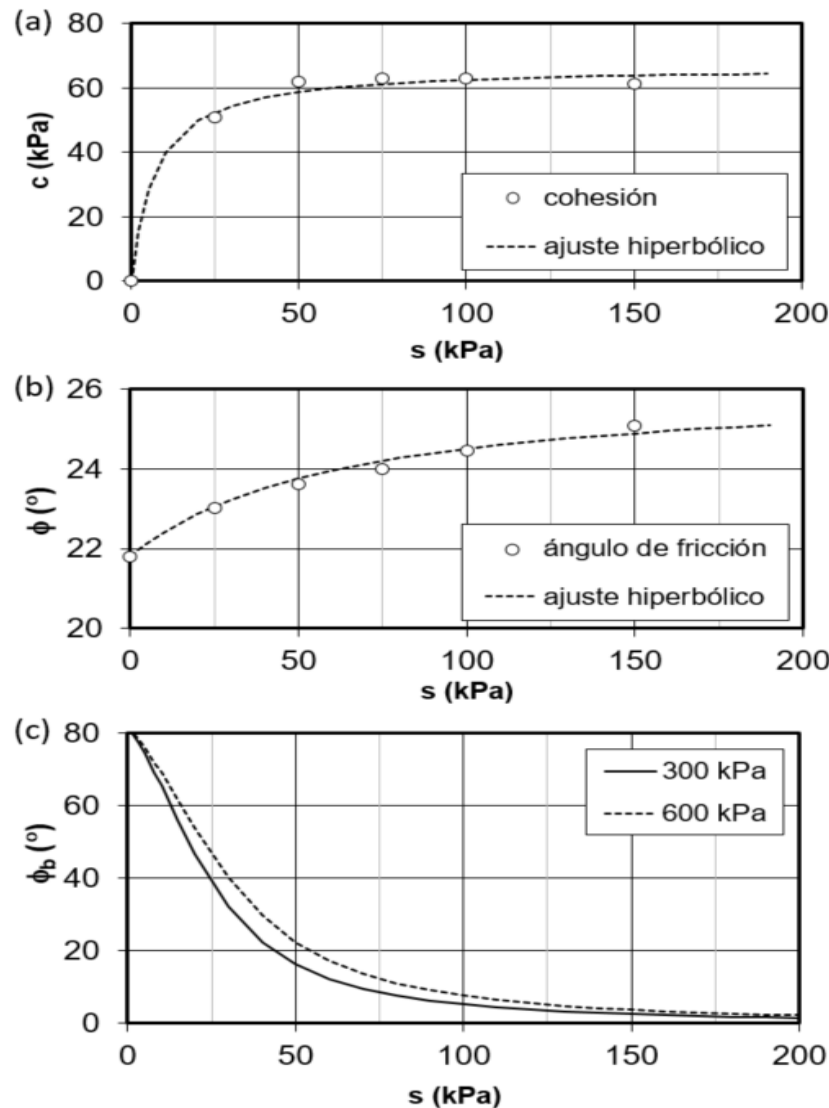
- Los resultados reprodujeron cualitativamente la influencia de la interacción suelo-agua.



**Figura 10.** Curvas envolventes de resistencia al corte de pico para tensiones verticales hasta 600 kPa y niveles de succión de 0 hasta 200 kPa. a) Envolventes en el plano  $\tau \times s$  con ajuste lineal; b) Envolventes en el plano  $\tau \times s$  con ajuste hiperbólico.

## RESULTADOS

- Los resultados reprodujeron cualitativamente la influencia de la interacción suelo-agua.



**Figura 11.** Evolución de los parámetros de resistencia al corte de pico para niveles de succión hasta 200 kPa. a) Cohesión; b) Ángulo de fricción interna; c) Parámetro de fricción de Fredlund.

$$\tau = c' + (\sigma - p_a)\tan\phi + (p_a - p_w)\tan\phi_b$$

El **parámetro de fricción de Fredlund**, a partir de un valor elevado para bajas succiones, presenta una rápida caída en su valor con el aumento de la succión, tendiendo a cero para altas succiones. Esta evolución confirma las limitaciones de la expresión lineal de Fredlund.

## CONCLUSIONES

- Fue implementado un modelo numérico de partículas para el análisis micromecánico de suelos granulares, basado en el método de los elementos discretos.
- Para la simulación del estado no saturado, fue implementada la entidad menisco capilar en el espacio poroso en torno de los puntos de contacto entre partículas.
- Estos meniscos fueron integrados en una red de flujo no saturado, y el cálculo de flujo (transferencia de masa entre meniscos) fue acoplado al cálculo mecánico.
- Se modelaron probetas discretas para reproducir el ensayo de corte directo.
- El modelo simuló cualitativamente, y de forma satisfactoria, las principales características del comportamiento mecánico de suelos no saturados, pues consiguió reproducir el efecto de la succión en la rigidez inicial y en la resistencia al corte del suelo.
- El modelo también reprodujo el carácter no lineal de este efecto, conforme reflejado en los estudios experimentales.
- La evolución de la envolvente de resistencia y los parámetros de Mohr-Coulomb fueron ajustados por hipérbolas, lo que demuestra que el efecto de la succión crece rápidamente para bajas succiones, alcanzando un valor asintótico para altas succiones.



XXVI  
CAMSIG

MUCHAS GRACIAS

[www.camsig.saig.org.ar](http://www.camsig.saig.org.ar)