

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

## Micromechanical modeling of unsaturated shear strength of granular soils

**Juan Pablo Ibañez**

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

**RESUMEN:** 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 de rigidez, compresibilidad, resistencia al corte y permeabilidad del suelo. Para analizar cualitativamente la influencia de esta condición en la resistencia al corte se desarrolló un modelo numérico micromecánico específico, utilizando el método de los elementos discretos en dos dimensiones. En este modelo, 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. 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 y el desequilibrio de fuerzas en las partículas modifica la configuración geométrica del espacio poroso, alterando el balance de agua y succión en los poros. Se realizaron simulaciones numéricas de configuraciones de corte directo para diferentes niveles de succión y confinamiento. Los resultados reprodujeron cualitativamente la influencia de la interacción suelo-agua en la resistencia al corte, confirmando la no linealidad de la envolvente de resistencia.

**ABSTRACT:** The mechanical behavior of unsaturated soils is controlled by the interaction of water in the pore space. In the case of sandy soils, water is organized in the form of capillary menisci that are formed in the contact zones between grains, partially occupying the pore space. Suction on these menisci substantially modifies the characteristics of stiffness, compressibility, shear strength, and permeability. To qualitatively analyze the influence of this condition on shear strength, a specific micromechanical numerical model was developed, using the two-dimensional discrete element method (DEM). In this model, the soil particles are represented by rigid circular disks, and the menisci are defined at the geometric contact between particles. The menisci, in turn, are interconnected to form a flow network. The mechanical and flow calculation is coupled in the model by the integrated application of the force and water balance equations. The menisci generate attractive forces between the solid particles and the imbalance of forces in the particles modifies the geometric configuration of the pore space, affecting the balance of water and suction. Numerical simulations of direct shear configurations for different levels of suction and confinement were performed. The results qualitatively reproduced the influence of soil-water interaction on shear strength, confirming the non-linearity of the strength envelope.

**PALABRAS CLAVE:** SUELO – MODELOS – SUCCION – RESISTENCIA – NO SATURADO

**KEYWORDS:** SOIL – MODELING – SUCTION – STRENGTH – UNSATURATED.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los suelos, en su composición física, suelen describirse como un compuesto de tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida es constituida por las distintas partículas minerales presentes, organizadas según arreglos de características particulares, que a su vez define un espacio de vacíos intergranulares que conforman un volumen poroso. Este espacio es ocupado, de una forma dinámica, por las fases líquida (el agua) y gaseosa (el aire). Cuando el espacio poroso está totalmente ocupado por agua, el suelo se denomina saturado, y cuando el espacio poroso está totalmente ocupado por aire el suelo se denomina seco. Entre estos dos estados límite se encuentran los suelos parcialmente saturados – o no saturados – donde el espacio poroso está ocupado por agua y aire.

El comportamiento mecánico de los suelos no saturados está fuertemente afectado por la presencia e interacción del agua y el aire en sus poros. En los suelos granulares en general, y arenosos en particular, el agua se organiza en la forma de meniscos capilares en las zonas de contacto entre las partículas. La

geometría de estos meniscos es definida a partir del equilibrio de presiones y humedad en el poro. La diferencia de presión entre aire y agua en el poro se denomina succión, y esta modifica sustancialmente las características de rigidez, compresibilidad, resistencia y permeabilidad del suelo (Fredlund et al, 1978; Escario & Saez, 1986; De Campos, 1997).

El estudio del comportamiento de los suelos granulares en condición no saturada viene siendo objeto de investigación teórica y de laboratorio en las últimas décadas, y su análisis mediante modelado numérico representa un desafío complejo, dada la influencia de la interacción de las fases en la respuesta del suelo. Diversos modelos constitutivos han sido propuestos, basados en la mecánica del continuo, formulados en la macro escala y pensados para su aplicación utilizando el método de los elementos finitos (Alonso et al, 1990; Khogho et al, 1993). Sin embargo, el tipo de complejidad del fenómeno en cuestión ha llevado a una exploración creciente de modelos micromecánicos basados en la mecánica de medios discretos, utilizando el métodos de los elementos discretos 2D y 3D (Iwashita & Oda, 2000; Gili & Alonso, 2002; Jiang et al, 2004).

El presente trabajo se enmarca en esta última línea de modelado 2D, e pretende analizar las características de la resistencia al corte de los suelos granulares no saturados a partir del modelado de la condición no saturada como un fenómeno de la microestructura, explicitando las tres fases constitutivas así como la interacción entre ellas.

## 2 LA CONDICIÓN NO SATURADA

### 2.1 El menisco y la interacción entre fases

La modelación micromecánica discreta de suelos no saturados requiere básicamente de la consideración de las fases sólido, agua y aire, así como de la formulación de un algoritmo para el cálculo de flujo que se pueda acoplar al cálculo mecánico. El fenómeno de flujo dentro del espacio poroso del suelo comprende un conjunto de transferencias de masa: entre poros (que alojan la fase aire), entre meniscos (que alojan la fase agua) y entre poro y menisco, como detallado en la figura 1. En el caso de suelos finos, se debería incluir el flujo entre la fase líquida y la fase sólida, debido a la capacidad de los grumos arcillosos para almacenar y expulsar agua de su interior (Ibañez, 2008).

Todos los procesos de transferencia considerados pueden ser descriptos por una ley de flujo de masa lineal, con la forma general de la ecuación 1:

$$\frac{\Delta M_{ij}}{\Delta t} = K_{ij}(p_j - p_i) \quad (1)$$

donde  $\Delta M$  es la masa transferida para el incremento de tiempo  $\Delta t$  entre las entidades  $i$  e  $j$ , siendo  $p_i$  y  $p_j$  la presión o concentración en las respectivas entidades. La ley de proporcionalidad viene dada por el coeficiente de transferencia  $K$  que incluye las características geométricas de las entidades así como los parámetros de flujo.

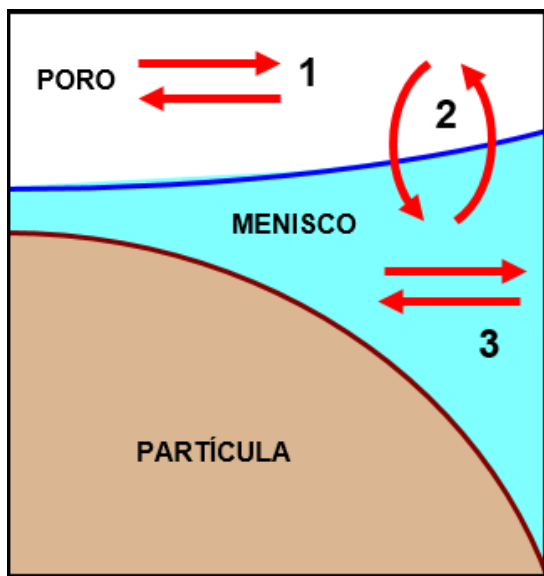


Figura 1. Interacciones en un menisco en suelo granular: (1) Poro-poro; (2) Poro-menisco; (3) Menisco-menisco.

Las transferencias poro-poro (tipo 1) incluyen el flujo de aire por gradiente de presión y el flujo de vapor por difusión molecular. Las transferencias poro-menisco (tipo 2) incluyen el equilibrio entre el aire gaseoso en el poro y el aire disuelto en el menisco (Ley de Henry), y el equilibrio entre vapor de agua en el poro y el agua líquida en el menisco (Ley Psicrométrica). Finalmente, las transferencias menisco-menisco (tipo 3) incluyen

el flujo de agua por gradiente de presión y el flujo de aire disuelto por difusión molecular (Fredlund et al, 1978).

Para una simulación simplificada se asumió que el flujo en los poros es despreciable durante el tiempo que duran las simulaciones de los ensayos. Asimismo, al tratarse de simulaciones de ensayos con succión controlada (condición de contorno de succión constante), se considera que hay equilibrio entre las fases líquida y gaseosa, por lo cual no hay flujo entre poro y menisco. Dado que el flujo del aire disuelto en el agua es despreciable en el tiempo de simulación de los ensayos, resta solamente la simulación del flujo de agua entre meniscos por causa de los gradientes de presión generados.

### 2.2 Representación del menisco y fuerza capilar

Los meniscos son formados en las zonas de contacto o cuasi contacto entre partículas sólidas. La superficie libre del menisco puede ser modelada en 2D por un arco de circunferencia tangente a las superficies de las partículas, como muestra la figura 2. El menisco queda definido por los ángulos de mojado  $\theta_1$  y  $\theta_2$ , y por el parámetro de distancia  $D$  según la ecuación 2:

$$D = d_{1-2} - (R_1 + R_2) \quad (2)$$

donde  $d_{1-2}$  es la distancia entre los centroides de las partículas, y  $R_1$  y  $R_2$  son los radios de las partículas. Así como las partículas son definidas en 2D como discos de espesor unitario, el menisco tiene espesor unitario con área constante. El espesor mínimo del menisco es de  $2h$ .

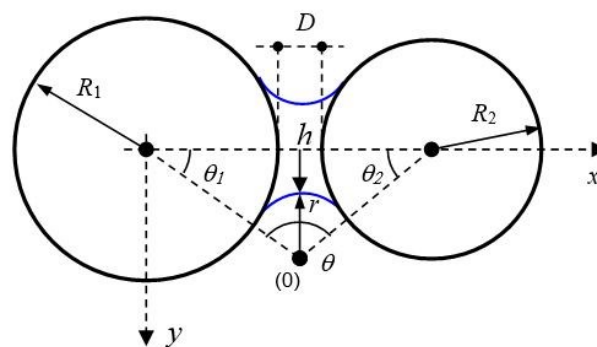


Figura 2. Geometría idealizada del menisco capilar.

La succión matricial  $s$  se define como la diferencia entre la presión  $p_a$  en el aire (poro) y  $p_w$  en el agua (menisco), y puede ser calculada por la ecuación 3, a partir de la ecuación de Laplace adaptada al caso 2D:

$$s = p_a - p_w = \sigma / r \quad (3)$$

siendo  $\sigma$  la tensión superficial del agua, y  $r$  el radio del menisco. La fuerza capilar resultante  $F_w$  actuando en el contacto es resultante de la tensión superficial actuante y la presión de agua dentro del menisco. Haciendo cálculos geométricos se llega a una expresión de esta fuerza capilar en función del ángulo de mojado  $\theta$ , según la ecuación 4 (Ibañez, 2008):

$$F_w = 2\sigma \frac{\tan \theta}{((1/\cos \theta) - 1)} \quad (4)$$

La figura 3 muestra la variación de la fuerza capilar con el ángulo de mojado  $\theta$ , donde la fuerza tiende a infinito para un ángulo tendiendo a cero, cayendo rápidamente cuando éste crece.

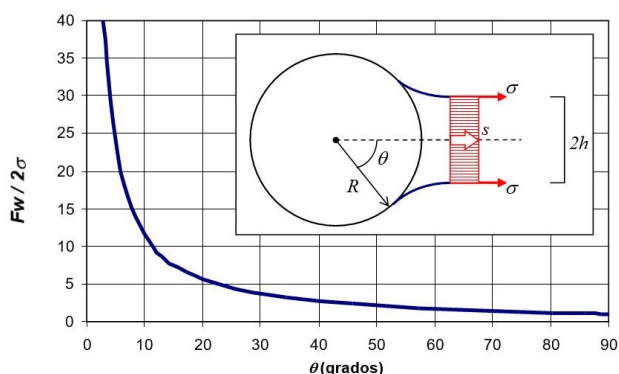


Figura 3. Evolución de la fuerza capilar normalizada (adimensional) en función del ángulo de mojado del menisco.

### 3 MODELO MICROMECAÍNICO

#### 3.1 Método de los elementos discretos

El modelador utilizado es el código académico DEMlib, que implementa el método de los elementos discretos (DEM) dentro de un ambiente gráfico que permite la visualización de los sistemas modelados (Ibañez et al, 2010; Ibañez, 2016).

En este método la representación geométrica del dominio del problema, para análisis 2D, se realiza mediante elementos discretos de forma circular, que definen discos de espesor unitario en profundidad.

La mecánica del contacto entre elementos se define mediante un modelo dinámico tipo Voigt (resorte-amortiguador en paralelo) acoplado en serie con un desconector para inhibir la generación de fuerzas de tracción (ver figura 4). La interacción de los elementos se genera a partir del contacto entre ellos. El contacto es definido por superposición, aplicando el método de penalización. Así, en la medida en que hay superposición entre elementos se generan fuerzas de repulsión proporcionales a la magnitud de la superposición. Esto se aplica a las fuerzas normales y tangenciales de contacto. Los parámetros son las rigideces normal y tangencial ( $k_n$ ,  $k_s$ ), y los coeficientes de amortiguamiento ( $C_n$ ,  $C_s$ ).

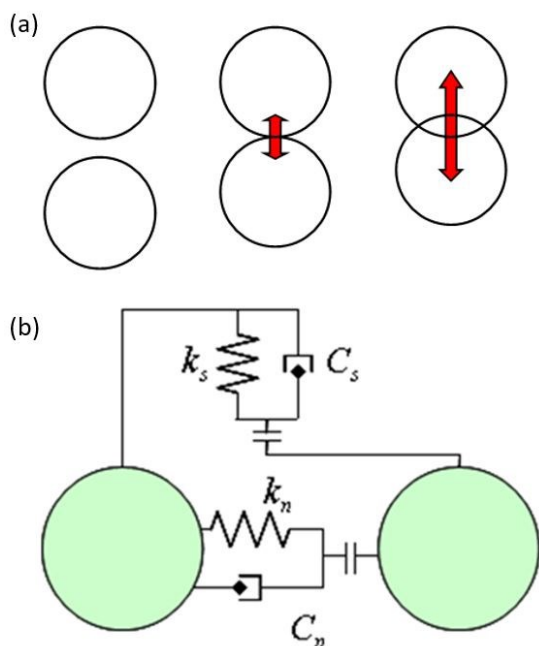


Figura 4. Método de los elementos discretos. (a) Método de penalización para crear contactos entre elementos; (b) Modelo de contacto para las direcciones normal y tangencial.

El algoritmo de cálculo utilizado es el de relajación dinámica, basado en la ley de movimiento amortiguado, y aplicado a cada elemento discreto de forma desacoplada de los otros elementos. El cálculo es iterativo, donde el movimiento de las partículas se produce por la acción de las fuerzas desequilibradas, que son amortiguadas a cada paso de tiempo. De esta forma, se procura obtener la solución estática a través de una formulación dinámica. El algoritmo es explícito en el tiempo, por lo que la estabilidad depende de la magnitud del paso de tiempo, que debe acotarse para garantizar la hipótesis de cálculo desacoplado.

Como no son permitidas fuerzas de tracción en el contacto, los contactos entre elementos se crean y destruyen dinámicamente con total libertad. Las tensiones de corte entre elementos son controladas por un criterio de fricción que establece un máximo para el desarrollo de las mismas.

#### 3.2 Implementación de la red de meniscos

El elemento básico de la red de flujo no saturado lo constituye el propio menisco, que actúa como conducto ligando dos partículas próximas en las que se estableció un contacto hidráulico. Estos conductos almacenan una cierta cantidad de agua en equilibrio con la fase aire, lo que se refleja en la geometría del menisco y su valor de succión. En el caso general mostrado en la figura 5 las partículas tienen varios meniscos asociados, pero pueden llegar a tener apenas uno, o ninguno y en ese caso no participan de la red de flujo. La conectividad de la red varía en la medida que el modelo es sometido a cargas y flujo, pues las partículas se mueven pudiendo dar lugar a nuevos contactos, que generaran nuevos meniscos. Da igual manera, contactos pueden dejar de existir, y con ellos los respectivos meniscos. Se asume que las partículas están recubiertas por una película fina de agua adherida que vincula los meniscos de cada partícula, de modo que habrá flujo entre ellos en función de las diferencias de succión (Kovacs, 1981).

La red de flujo fue implementada en la red de contactos entre elementos discretos del modelador. Se especificó una entidad menisco para cada contacto, con gerenciamiento de la conectividad entre los meniscos presentes en cada elemento.

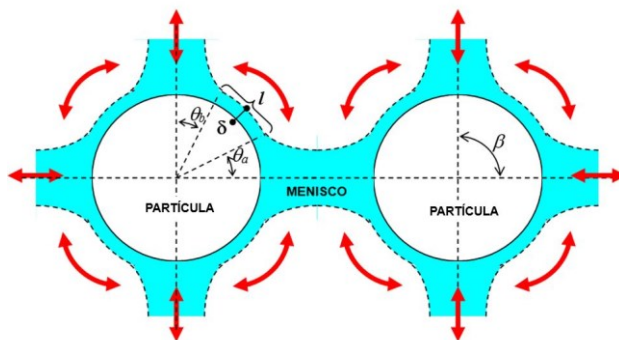


Figura 5. Red de meniscos con indicación de direcciones de flujo.

#### 3.3 Cálculo flujo-mecánico acoplado

El cálculo mecánico del método fue modificado para incluir el acoplamiento con el cálculo de flujo no saturado. La interacción flujo-mecánica se da según la secuencia a seguir:

- Después del paso de cálculo mecánico, la geometría del modelo es actualizada por los desplazamientos de las partículas, lo que también modifica la geometría de los meniscos.
- Para la nueva posición relativa de las partículas, y 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, donde habrá transferencia de masa de agua entre meniscos vecinos, en función del gradiente de presión existente entre ellos.
- Adicionalmente, puede ocurrir la ruptura o creación de meniscos. En ese caso hay redistribución de la masa de agua, considerando una masa de agua total constante.
- Después del cálculo de flujo, las fuerzas capilares son actualizadas e incorporadas a las fuerzas de contacto de las respectivas partículas en el cálculo mecánico.

#### 4 SIMULACIÓN DE CORTE DIRECTO

##### 4.1 Calibración de parámetros del modelo

Para la simulación del ensayo de corte directo fue realizada la calibración de los siguientes parámetros de contacto del método de los elementos discretos (ver figura 4):

- rigidez normal  $kn$ : fue calibrada por dos criterios límite. Por un lado, se estableció un límite inferior para garantizar que la superposición entre elementos discretos no supere el 5% del radio de dichos elementos (una superposición de área de 1,33%) para la mayor fuerza de contacto estimada. Por otro lado, fue establecido un valor máximo para garantizar estabilidad del método, ya que una rigidez muy elevada puede generar excesiva oscilación de los elementos.
- rigidez tangencial  $ks$ : calibrada a partir del criterio de garantizar la generación de la totalidad de las fuerzas de fricción entre elementos discretos cuando haya un desplazamiento tangencial relativo entre ellos correspondiente al 20% de radio del elemento.
- amortiguamiento  $C_n$  y  $C_s$ : ambos fueron calibrados en 0.85 (siendo 0.0 totalmente dinámico y 1.0 totalmente estático) siguiendo dos criterios límite. Se estableció un límite inferior para garantizar la estabilidad del método y evitar oscilaciones excesivas, y un límite superior para asegurar una velocidad mínima de la convergencia hacia la solución final.

##### 4.2 Modelado de caja de corte y probetas

Se eligió una caja de corte cuadrada de 75mm de lado, y 10mm de altura entre la base y el plano de corte. La misma se modeló mediante elementos de pared rígidos, que materializan las condiciones de borde del dominio discreto: La parte inferior de la caja se desplaza horizontalmente con velocidad constante, y la parte superior permanece fija, con posibilidad de desplazamiento vertical de la tapa, que también recibe la tensión vertical confinante.

Con respecto al montaje de la probeta, se emplearon elementos discretos circulares tipo disco 2D de diferentes radios. El suelo a modelar fue definido como una arena sin finos de granos redondados.

La generación de las probetas de elementos discretos envuelve dos desafíos en la búsqueda de garantizar la representatividad del modelo: el número y la variedad de tamaños de los elementos discretos empleados. Representar la masa de suelo con los tamaños reales de las partículas se torna generalmente inviable dada la elevada cantidad de elementos necesarios y su correspondiente variedad de tamaños, que tornan el costo computacional muy oneroso y hasta imposible. Para solucionar esta limitación la técnica de *upscaling* propone disminuir el número de elementos discretos del modelo trasladando hacia los gruesos la curva granulométrica del suelo a simular. De esta forma se representa las partículas reales de suelo por otras mayores que guardan la misma relación de tamaños entre si. De la misma forma, se concentran los tamaños de elementos en algunos pocos valores representativos de la curva granulométrica del suelo real. Esta técnica tiene sus limitaciones y su rango de utilización debe ser evaluado en cada caso particular. De todos modos, es una herramienta útil para zanjarse

la limitación computacional antes apuntada (Cheng et al, 2004; Zhang & Thornton, 2007).

A los efectos prácticos, y buscando estudiar cualitativamente el fenómeno no saturado sin un gasto computacional excesivo, se optó por una probeta relativamente simple (Probetas con mayor número de elementos y diversidad de tamaños fueron también implementadas, y se pueden consultar en Ibañez, 2008). Así, 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

La simulación de ensayos de corte directo con succión controlada fue realizada aplicando una succión inicial constante en toda la probeta. Durante el ensayo se aplicó la condición de contorno de succión constante en la base y la tapa de la caja de corte. En las paredes laterales de la caja se aplicó la condición de contorno impermeable. Los valores de succión aplicada fueron 25, 50, 75, 100 e 150 kPa, para tensiones verticales de 300 y 600 kPa.

En todas las paredes de la caja se midieron fuerzas normales y tangenciales, así como desplazamientos. A partir de estas mediciones fueron obtenidas las magnitudes significativas para el ensayo: las tensiones normal y tangencial en el plano de falla, y el desplazamiento horizontal y vertical de la caja. La figura 6 muestra la simulación del ensayo, donde se destaca la formación de una zona de cizalla en torno del plano de falla impuesto.

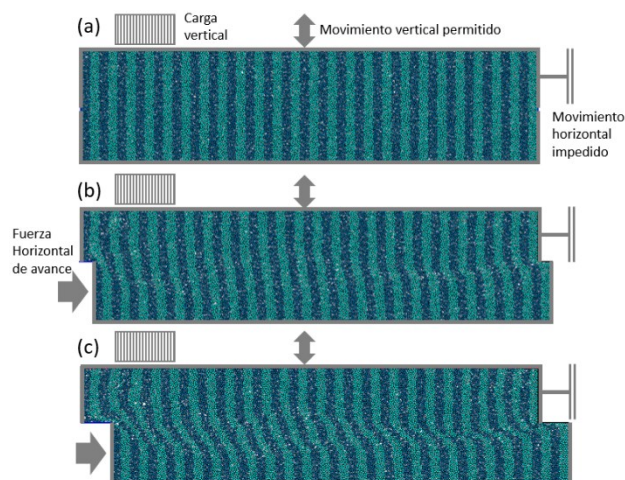


Figura 6. Modelado de una configuración de corte directo. a) Configuración inicial; b) Configuración para un desplazamiento horizontal de 2 mm; c) Configuración para un desplazamiento horizontal de 5 mm.

## 5 RESULTADOS

La relación entre la succión aplicada y la humedad en la probeta, expresada aquí en términos del grado de saturación, se denomina curva característica o de retención. La curva, mostrada en la figura 7, fue obtenida para la probeta de elementos discretos, variando el nivel de succión y midiendo el volumen de agua contenido en la probeta. La misma presenta una forma general similar a las curvas características que se observan en suelos granulares.

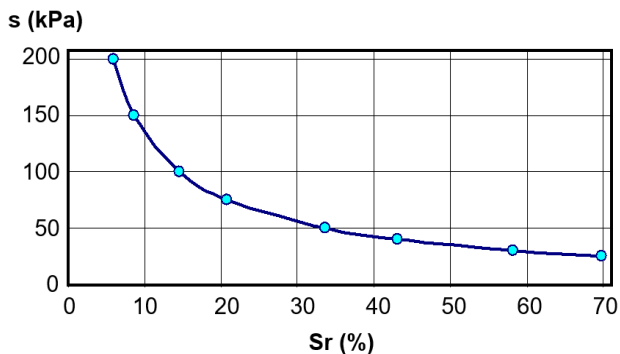


Figura 7. Curva característica succión (s) x grado de saturación (Sr) de la probeta de elementos discretos.

La figura 8 muestra los resultados de la simulación para el caso de una tensión vertical de 600 kPa, para los diferentes niveles de succión establecidos. Los resultados de la figura 8a mostraron un crecimiento de tipo no lineal en la rigidez inicial y en la resistencia al corte de pico debido a la succión, mientras que la resistencia residual no se vió mayormente alterada. Esto se relaciona a que, con el avance del desplazamiento horizontal de la caja de corte, suceden dos fenómenos: ocurre dilatancia en la probeta (como muestra la figura 8b), y los meniscos se rompen y rehacen en toda la zona en torno del plano de falla.

Esto último queda claro en la figura 9, que presenta la evolución de la succión en los meniscos de la probeta a medida que ocurre el corte. Se puede observar que en la zona en torno al plano de falla se produce un aumento de la succión, lo que indica indirectamente el proceso de rotura de meniscos y posterior formación de nuevos meniscos por cizalla de los granos. Por otro lado, en los límites inferior y superior de la probeta la succión se mantiene relativamente estable, al sufrir menos distorsiones angulares, y por estar cerca de la condición de borde de succión controlada.

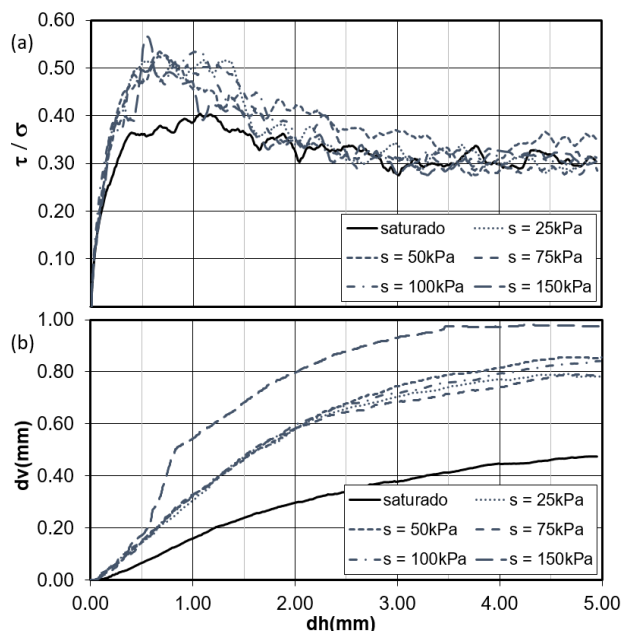


Figura 8. Resultado de simulación de corte directo en probeta virtual para tensión vertical de 600 kPa y niveles de succión de 25, 50, 75, 100 y 150 kPa. a) Curvas de resistencia al corte normalizada vs. desplazamiento horizontal; b) Curvas de desplazamiento vertical vs. desplazamiento horizontal.

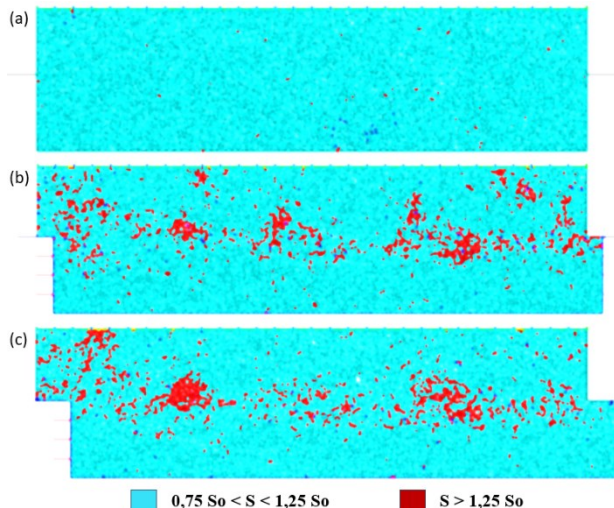


Figura 9. Evolución de la succión en los meniscos de la probeta con el desplazamiento horizontal de la caja de corte. a) Condición inicial; b) Condición a 2 mm de desplazamiento; c) Condición a 5 mm de desplazamiento.

La figura 10a presenta las curvas envolventes de pico en el plano de tensiones normales y tangenciales  $\tau$  x  $\sigma$ , donde se verifica el efecto de la succión como un aumento no lineal en el valor de la cohesión aparente. La figura 10b, por otro lado, presenta las curvas envolventes de pico en el plano de succión y tensiones tangenciales  $\tau$  x s. Se percibe claramente una evolución no lineal, del tipo hiperbólico, de la envolvente con el aumento de la succión en ambos planos. Esto se corresponde con lo planteado por Escario & Saez (1986), contrariamente a la propuesta de evolución lineal mas simple propuesta por Frenlund (1978).

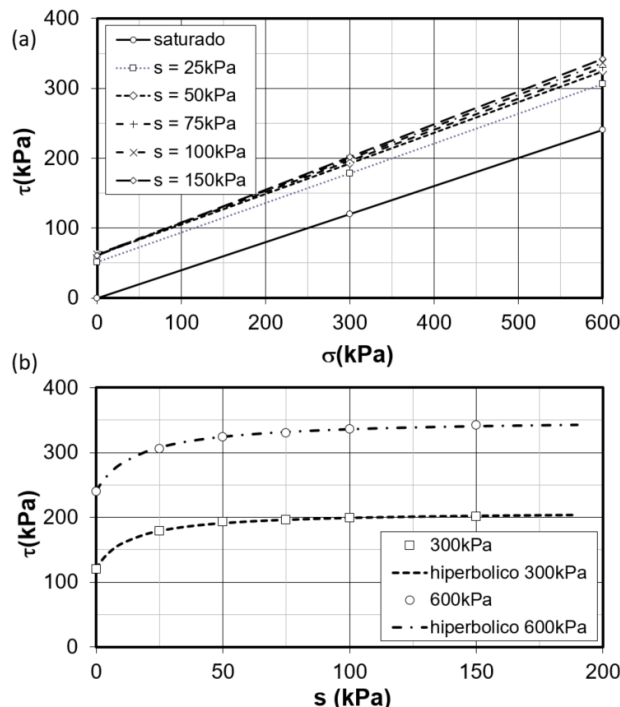


Figura 10. Curvas envolventes de resistencia al corte de pico para tensiones verticales hasta 600 kPa y niveles de succión de 0 hasta 200 kPa. a) Envolventes en el plano  $\tau$  x  $\sigma$  con ajuste lineal; b) Envolventes en el plano  $\tau$  x s con ajuste hiperbólico.

Fredlund et al (1978) propuso una extensión de la expresión de Mohr-Coulomb para la envolvente de resistencia al corte de suelos no saturados. La extensión se dá incluyendo un parámetro de fricción  $\phi_b$  que controla el crecimiento, asumido lineal, de la resistencia al corte con la succión (ver ecuación 5).

$$\tau = c' + (\sigma - p_a) \tan \phi + (p_a - p_w) \tan \phi_b \quad (5)$$

La figura 11 presenta la evolución de los parámetros de resistencia al corte de pico de la ecuación (5), a partir de los resultados de las simulaciones. La figura 11a presenta la evolución de la cohesión aparente debida a la condición no saturada, cuyo crecimiento con la succión pudo ser ajustado hiperbólicamente. La figura 11b muestra el acotado crecimiento del ángulo de fricción interna con la succión, que también pudo ser ajustado hiperbólicamente. Finalmente, la figura 11c presenta el parámetro de fricción de Fredlund que, 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 (ecuación 5) en correspondencia con los estudios experimentales de Escario & Saez (1986).

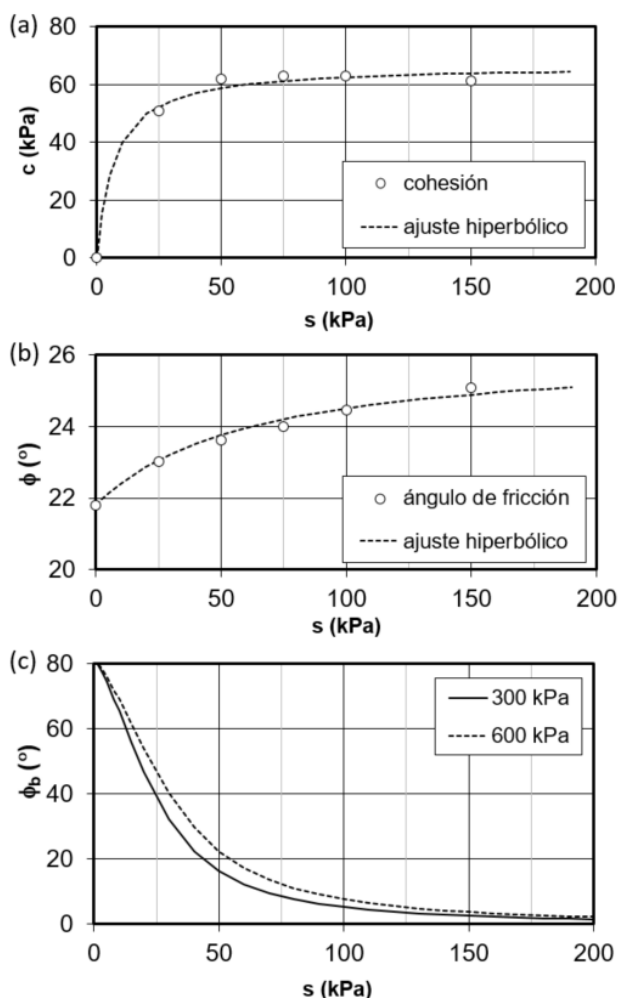


Figura 11. Evolución de los parámetros de resistencia al corte de pico para niveles de succión hasta 200 kPa. a) Cohesión; b) Ángulo de fricción interna; c) Parámetro de fricción de Fredlund.

Cabe destacar que las limitaciones en cuanto al número de partículas empleado (18.225 elementos discretos) y su distribución de tamaños (apenas 3 tamaños diferentes) afecta la

representatividad de los resultados, como puede verse en los bajos valores del ángulo de fricción interna y la tendencia excesivamente dilatante de las probetas. Estas limitaciones son de gasto computacional y no del modelo. Simulaciones realizadas con mayor número y variedad de partículas muestran un acercamiento notable al comportamiento esperado (Ibañez, 2008). No obstante esto, el valor de estas simulaciones está en la variación relativa y en las tendencias de crecimiento de los parámetros, más que en los valores absolutos de los mismos.

## 6 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.

## 7 REFERENCIAS

- Alonso, E. E.; Gens, A.; Josa, A. (1990) A constitutive model for partially saturated soils. *Geotechnique*, V 40, No. 3, pp 405-430.
- Cheng, Y.P., Bolton, M.D. & Nakata, Y. (2004) Crushing and plastic deformation of soils simulated using DEM, *Geotechnique*, V. 54, No 2, pp 131-141.
- Escario, V.; Saez, J. (1986) The strength of partially saturated soils. *Geotechnique*, V. 36, No. 3, pp 453-456.
- De Campos, T.M. (1997) Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados, Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, ñsat'97, Rio de Janeiro, pp 399-417.
- Escario, V.; Saez, J. (1986) The strength of partially saturated soils. *Geotechnique*, V. 36, No. 3, pp 453-456.
- Khogo, Y., Nakano, M., Miyazaki, T. (1993) Theoretical aspect of constitutive modelling for unsaturated soils. *Soils and Foundations*, Jap. Soc. Of Soil Mech. And Found. Eng., No. 4, pp 49-63.
- Fredlund, D. G.; Morgenstern, N. R.; Widger, R. A. (1978) The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*. No 15, pp 313-321.
- Gili, J.A. & Alonso, E.E. (2002) Microstructural deformation mechanism of unsaturated granular soils, *Int. Jnl. for Num. and Anl. Meth. in Geomech.*, V. 26, 2002, pp 433-468.
- Ibañez, J.P. (2016) Modelación micromecánica de suelos granulares incluyendo el fenómeno de cementación de partículas. XXIII CAMSIG, Santa Fe, Argentina. p. 237-251.
- Ibañez, J.P.; Vargas Jr, E. A.; de Campos, T.M.P. (2010) Modelación micromecánica de suelos granulares incluyendo el fenómeno de rotura de partículas, XX CAMSIG, Mendoza, Argentina. p. 55-62.
- Iwashita, K. & Oda, M. (2000) Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element model. *Powder Technology*, 109, pp 192-205.
- Jiang, M.J., Leroueil, S. & Konrad, J.M. (2004) Insight into shear strength functions of unsaturated granulates by DEM analyses, *Computers and Geotechnics*, V. 31, pp 473-489.
- Kovacs, G. (1981) *Seepage Hydraulics. Developments in Water Science.* Elsevier: Amsterdam. 730 pp.
- Zhang, L. & Thornton, C. (2007) A numerical examination of the direct shear test, *Geotechnique*, V. 57, No. 4, pp 343-354.