



Modelación micromecánica de suelos granulares incluyendo el fenómeno de cementación de partículas.

J. P. Ibañez

jpibanez@fing.uncu.edu.ar

Instituto IMERIS, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo

RESUMEN: El comportamiento mecánico de los suelos granulares es influenciado por sus características mineralógicas, el tipo de fábrica y el grado de compacidad. También es controlado por fenómenos microestructurales, como puede ser la acción de cementación de contacto o la de rotura de partículas bajo carga. La cementación de los granos, en particular, puede deberse a la deposición o precipitación de minerales, alteración química o soldadura fría bajo presiones elevadas. Un modelo numérico basado en el análisis micro mecánico de elementos discretos fue desarrollado para simular el comportamiento de suelos granulares en dos dimensiones. Esta representación permite modelar las partículas de suelo explícitamente mediante discos circulares rígidos con libertad de movimiento. En este modelo se incluyó la simulación del fenómeno de cementación débil, con resistencia a tracción y de corte, pero permitiendo rotación relativa de las partículas. Simulaciones numéricas fueron realizadas para evaluar la influencia de este fenómeno en el comportamiento mecánico de suelos granulares. Los resultados de análisis edométrico y de corte directo mostraron la influencia de la cementación en la rigidez inicial del suelo, el aporte de una resistencia cohesiva y la no linealidad de la envolvente de resistencia. Los resultados numéricos son discutidos y contrastados con resultados experimentales.

Palabras clave: suelos, resistencia, modelos discretos, cementación, corte directo.

ABSTRACT: The mechanical behavior of granular soils is influenced by their mineralogical characteristics, the type of fabric and the degree of density. Also it is controlled by microstructural phenomena, such as grain bonding or particles breakage under load. The grain bonding, in particular, can be due to deposition or precipitation of minerals, chemical alteration or cold welding under high pressures. A numerical model based on the micromechanical analysis using discrete elements was developed to simulate the behavior of granular soils in two dimensions. By this representation soil particles are explicitly modelled with rigid circular discs that have freedom to move in the box. In this model it was included the option of weak cementation, by tensile and shear forces between particles, but allowing relative rotation. Numerical simulations were performed to assess the influence of this phenomenon on the mechanical behavior of granular soils. Results of analysis under confined compression and direct shear showed the influence of bonding on the initial stiffness, the gain of a cohesive strength and nonlinear resistance envelope. The numerical results are discussed and compared with experimental results.

KEY WORDS: soils, strength, discrete models, bonding, direct shear

1 INTRODUCCIÓN

1.1 La cementación en suelos

El comportamiento mecánico de los suelos granulares es influenciado por sus características internas como material compuesto de partículas. Estas características son las mineralógicas de sus partículas constituyentes, y las estructurales. Las características estructurales se relacionan a la disposición física de los minerales en la masa de suelo, e incluyen el ordenamiento de los granos o fábrica, la agregación y cementación de éstos, la distribución de tamaño de poros y otros trazos relacionados con su historia formativa (Ref. [1]).

La influencia de la estructuración del suelo sobre la resistencia, la deformabilidad y la compresibilidad puede ser entendida como la conjunción de dos efectos principales, debidos a la fábrica y a la cimentación (Ref. [2]). La fábrica, o arreglo intrincado de las partículas en una organización cerrada, produce una mayor fricción interna. Ya la cimentación, que provee ligaciones entre los granos, confiere al suelo una rigidez adicional contra las deformaciones, pudiendo afectar expresivamente la compresibilidad y resistencia de los suelos.

La cementación en suelos es un fenómeno físico-químico, donde óxidos y minerales son fijados en los contactos entre partículas constituyendo ligaciones débiles o fuertes según su origen (figura 1). Vaughan (Ref. [3]) señala que estos cementos pueden tener su origen en la deposición de carbonatos, hidróxidos o materia orgánica, en la precipitación de silicatos anteriormente disueltos, o ser un subproducto de la alteración química de ciertos minerales, o inclusive ser fruto de una soldadura fría de los contactos bajo presiones elevadas.

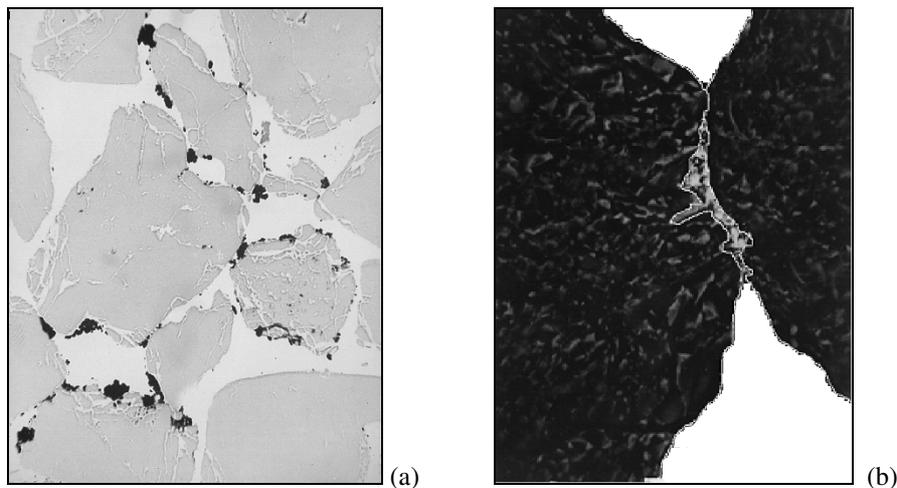


Figura 1. Imagen de microscopia electrónica de una arena cementada: a) Arreglo de los granos e incrustaciones cementiceas; b) Detalle de cimentación en un contacto (Ref. [4]).

1.2 Influencia de la cementación en la compresión confinada

Diversos autores (Ref. [4][5][6][7]) analizaron la influencia de la resistencia de las ligaciones variando la cantidad de cemento agregado a una arena carbonática artificialmente cementada. Bajo compresión isotrópica se observó que el cemento hacía al suelo inicialmente más rígido y elástico. Una vez quebradas las ligaciones, el efecto cayó rápidamente y el suelo tendió naturalmente para la línea de compresión isotrópica intrínseca correspondiente al suelo no cementado.

Así, el efecto de la cementación puede ser entendido, en el marco de la teoría de estado crítico, como una tensión virtual de preconsolidación equivalente a la resistencia de los contactos, que define una superficie de fluencia inicial en cuyo interior el suelo se comporta elásticamente (Ref. [3]). La figura 2 muestra esquemáticamente este comportamiento.

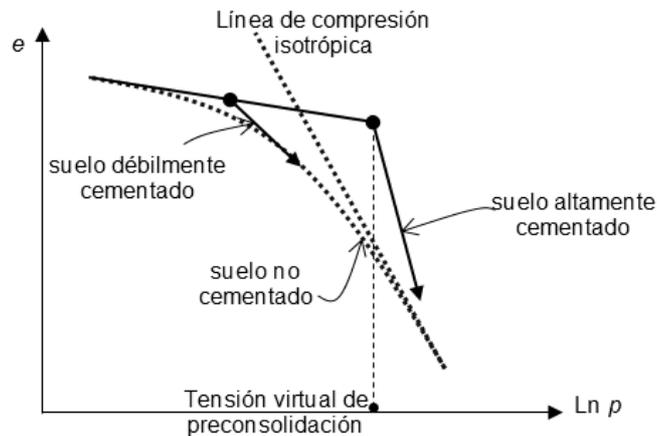


Figura 2. Esquema de compresión isotrópica en suelo cementado y no cementado.

1.3 Influencia de la cementación en la resistencia al corte

Sometido a corte, el tipo de respuesta depende del confinamiento inicial. Con bajo confinamiento, menor que la resistencia de los contactos cementados, el comportamiento es rígido-elástico hasta una rotura de pico definida, seguida de ablandamiento plástico hasta alcanzar el estado crítico a grandes deformaciones. Para confinamientos intermedios, la fluencia ocurre antes de alcanzar la línea de estado crítico, no hay pico y la fricción controla a rotura. Si el confinamiento es mayor que la resistencia de las ligaciones, estas se rompen y el comportamiento es dúctil, sin influencia de la cementación (ver figura 3). La figura 4 muestra este efecto en la resistencia al corte de una calcarenita natural (Ref. [5]).

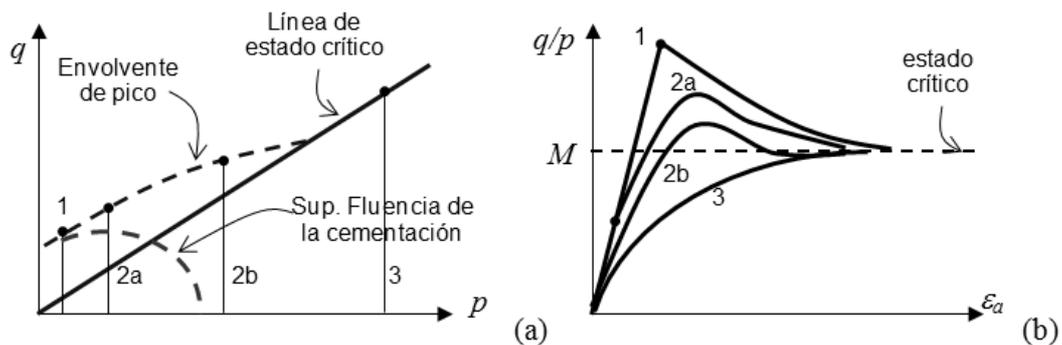


Figura 3. Esquema de modos de resistencia al corte en suelos cementados.

Así, el efecto de la estructura en suelos puede resumirse en los tópicos siguientes:

- La cementación controla el comportamiento inicial del suelo antes de llegar a fluencia y le confiere al suelo elevada rigidez elástica que no depende del confinamiento. La resistencia es del tipo cohesiva, hasta alcanzar el pico de resistencia cuando ocurre rotura del tipo frágil.
- Luego de la degradación de la cementación, la fábrica pasa a controlar las características de la fluencia plástica mediante mecanismo friccional.

- La fábrica confiere al suelo un fuerte mecanismo de resistencia friccional, induciendo un comportamiento dilatante que acompaña la degradación de la fábrica y controla el ablandamiento post pico.
- La rigidez al corte es mayor en suelos estructurados que en suelos no estructurados.

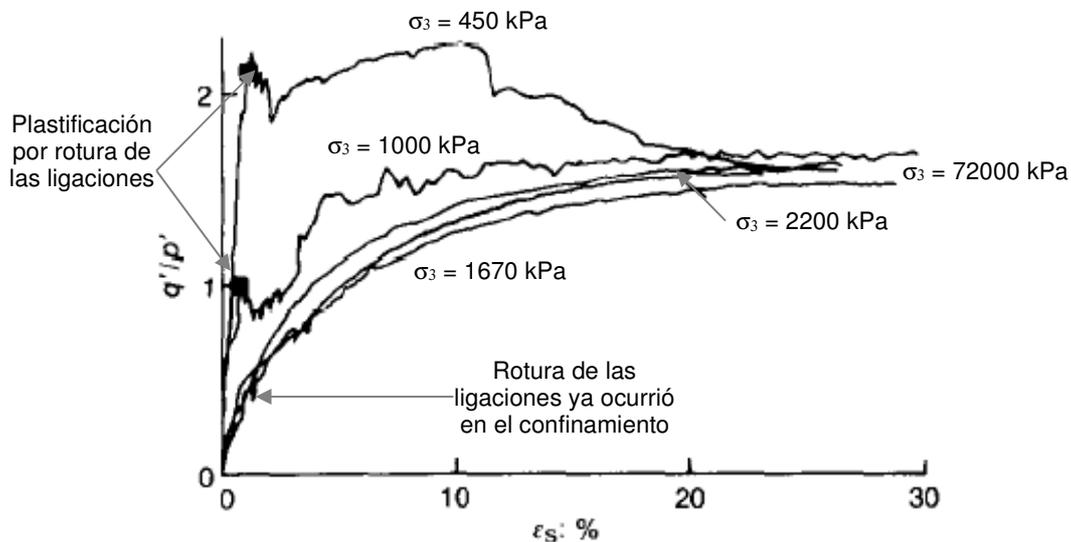


Figura 4. Ensayo triaxial de calcarenita natural (Ref. [5]).

1.4 Modelado discreto de suelos cementados

En la búsqueda de profundizar el entendimiento de la influencia de la cementación en el comportamiento de los suelos, se propone el modelado numérico discreto en la microescala. El tipo de modelado propuesto responde a la limitación que significa usar métodos de la mecánica del continuo formulados en la escala macroscópica para abordar el estudio de este fenómeno de la microescala del suelo. En tal sentido, la modelación basada en la mecánica clásica a escala de la partícula se torna una alternativa atractiva. Esta permite la posibilidad de explicitar las características intrínsecas del suelo al idealizarlo como un sistema particulado.

El método de los elementos discretos (DEM) es la herramienta numérica que hace posible este tipo de modelación (Ref. [8][9][10][11][12][13]). En lo que sigue se plantea un modelo discreto para simular suelos granulares cementados en la microescala basado en DEM, y se muestran y discuten los resultados de la simulación de ensayos de compresión confinada y corte directo.

2 MODELADO DISCRETO

2.1 Código DEMlib

El método de los elementos discretos (DEM) es utilizado para la modelación de sistemas de partículas en general. La libertad de movimiento de cada bloque o partícula, el carácter dinámico del cálculo, la modelación de grandes desplazamientos y la actualización de las condiciones de contorno durante el cálculo son las principales potencialidades de este método. Diversos autores han aplicado este método

para simular al suelo y sus diferentes características de composición y comportamiento (Ref. [14][15][16][17][18][19][20][21][22][23]).

El programa usado para las simulaciones presentadas en este artículo es el código académico DEMlib, que implementa el DEM dentro de un ambiente gráfico que permite la visualización dinámica de los sistemas modelados (Ref. [19][22][23]). La representación geométrica de los elementos discretos es circular para el caso 2D. La mecánica del contacto se resuelve mediante un doble sistema resorte-amortiguador (Ver Fig. 5) y el algoritmo de cálculo es el de relajación dinámica, un método incremental explícito en el tiempo que describe la ley de movimiento (segunda ley de Newton) para cada elemento discreto.

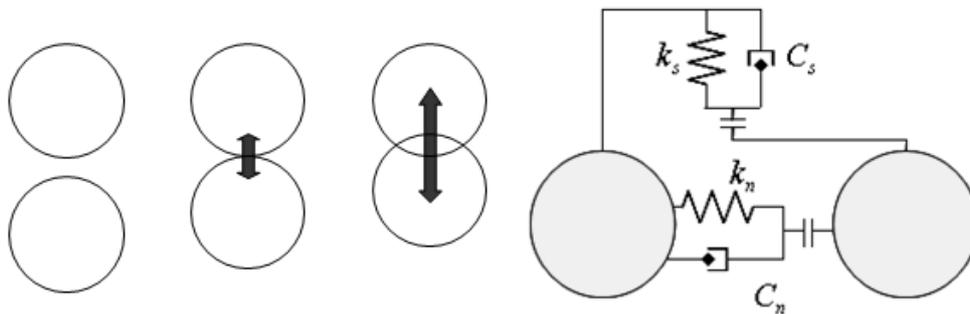


Figura 5. Modelo de contacto dinámico en DEM.

El simulador discreto DEMlib fue calibrado y validado para simular suelos en las configuraciones de los ensayos edométrico y de corte directo. Los parámetros de contacto, rigideces y amortiguadores, fueron calibrados para garantizar la premisa de no superposición de elementos y la estabilidad del algoritmo dinámico. El simulador se mostró capaz de reproducir las características del comportamiento mecánico de los suelos granulares, como la influencia del confinamiento, el mecanismo de fricción, envolvente lineal de resistencia, resistencia de pico y residual, y la tendencia a la dilatancia o contracción en función de la compacidad y confinamiento (Para una descripción mas detallada consultar Ref. [19][22][23]).

2.2 Modelado de la cementación

Se asumió la hipótesis de cementación puntual y débil para desarrollar una formulación matemática que describa el comportamiento del contacto cementado, siguiendo los lineamientos generales propuestos en Ref. [24]. Con estas hipótesis, el cemento limita los desplazamientos relativos normales y tangenciales entre las partículas conectadas hasta el límite de resistencia del cemento, pero permite la rotación relativa entre ellas.

La figura 6 grafica el efecto de la cementación de contacto, que incorpora una resistencia a la tracción y al corte definidas por las fuerzas N_c y S_c respectivamente. Cuando las fuerzas de tracción y corte solicitan el contacto, la cementación genera fuerzas opuestas (de igual módulo y sentido contrario) hasta el límite de resistencia dado por N_c y S_c . Superado cualquier de estos límites la cementación quiebra y el contacto pasa a comportarse como contacto no cementado. O sea,

- Si: ($F_{tracción} \leq N_c$), entonces ($N_{cemento} = - F_{tracción}$)
- Si: ($F_{corte} \leq S_c$), entonces ($S_{cemento} = - F_{corte}$)
- Si: ($F_{tracción} > N_c$) o ($F_{corte} > S_c$), entonces ($N_c = S_c = 0$)

El modelo necesita de dos parámetros del cemento, correspondientes a las fuerzas de tracción y corte máximas admisibles para las cuales se produce el quiebre de la cementación.

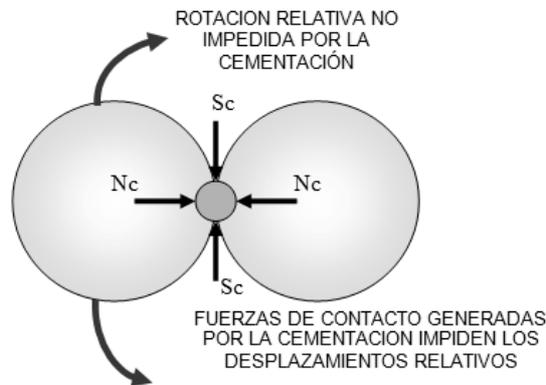


Figura 6. Modelo de contacto cementado.

2.3 Generación de las probetas de elementos discretos

Para las simulaciones fueron generadas dos configuraciones de probetas virtuales. Las probetas fueron generadas utilizando 18.225 elementos, con tres tamaños diferentes (radios de 0.10, 0.15 y 0.17mm). El recinto que modela el edómetro y la caja de corte fue llenado de elementos discretos utilizando la técnica de caída por gravedad. Manipulando los parámetros de contacto (rigidez normal y tangencial) fueron logradas dos probetas para simular los estados de agregación denso y suelto. La porosidad en la probeta densa fue de 0.203, en tanto que fue de 0.264 en la probeta suelta, para una tensión vertical de 100kPa.

En cuando al modelado del recinto, fueron utilizados elementos discretos tipo pared rígida, sobre los cuales se aplican las condiciones de contorno de carga distribuida, desplazamiento prescripto o apoyo fijo según cada caso. La figura 7 muestra un ejemplo de probeta de material granular suelto siendo ensayada a corte directo.

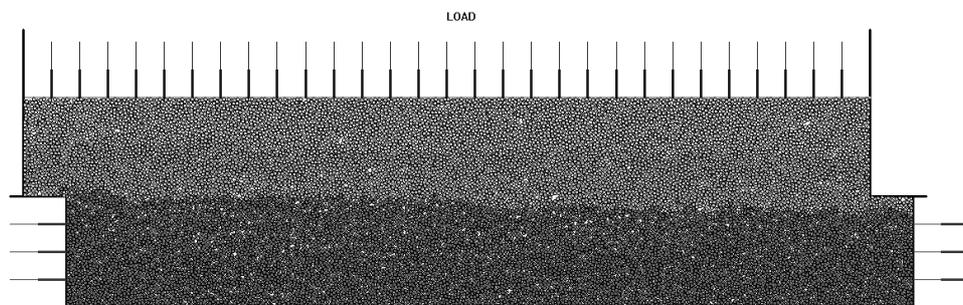


Figura 7. Probeta en recinto simulando una caja de corte.

3 COMPORTAMIENTO EN COMPRESIÓN CONFINADA

3.1 Simulaciones

Se realizaron simulaciones de ensayos de compresión confinada para diferentes escalones de carga vertical en probetas densas, variando las siguientes características:

- Resistencia de la cementación: Se analizó variando la resistencia del cementante F_c (0.2N, 0.5N, 1.0N y 5.0N).

- Persistencia de la cementación: Se analizó variando el porcentaje de contactos cementados en la probeta (0%, 25%, 50% y 100%).

3.2 Influencia de la resistencia del cementante

La influencia de la resistencia del cementante se estudió aplicando a probetas densas un cementante de resistencia creciente ($F_c = 0.2N, 0.5N, 1.0N$ y $5.0N$) a todos los contactos entre elementos. Las probetas en un recinto rígido fueron sometidas a escalones crecientes de carga vertical a partir de $100kPa$. La influencia del tipo de cementante sobre la compresibilidad del material se mostró altamente no lineal. Para el caso de cementante débil, $F_c = 0.2$ y $0.5N$, la influencia de la cementación fue poco relevante, y no alteró el comportamiento del material de forma apreciable. Ya en el caso de cementante más resistentes, $F_c = 1.0$ y $5.0N$, la influencia fue notoria. La figura 8 presenta la comparación de una probeta densa con cementante de $F_c = 5N$ sometida a compresión confinada, y se compara con la respuesta de la misma probeta no cementada.

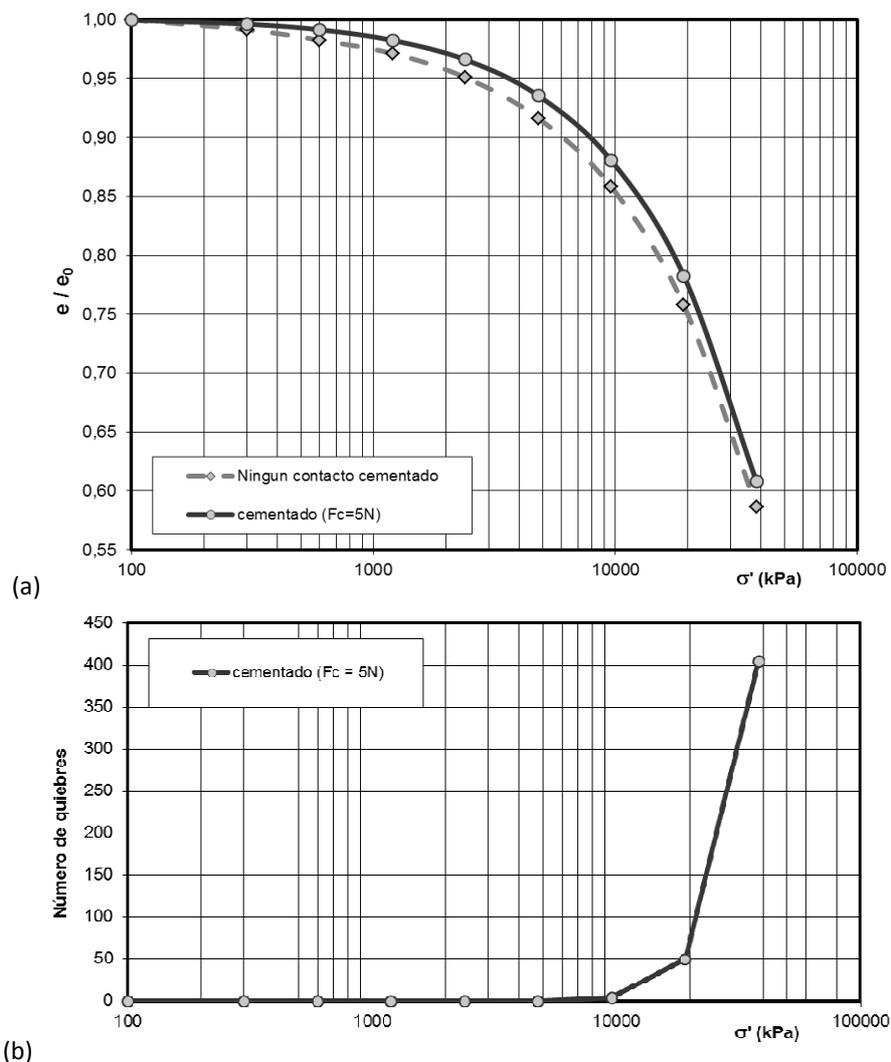


Figura 8. a) Curva de compresión confinada en probeta densa con y sin cementación de contacto, b) Evolución de quiebres de contactos cementados en la probeta cementada.

Se puede apreciar que la probeta con cementante se mostró mas rígida para bajos valores de presión vertical, con escasa ocurrencia de quiebre de contactos cementados. A partir de los 10.000 kPa ocurre un masivo quiebre de contactos, por lo que la probeta pierde rigidez y se aproxima de la curva de compresión de la probeta sin cementante. El aumento en la tensión virtual de preconsolidación fue del 5% (de 20.000kPa pasó a 21.000kPa), y el aumento en el índice de compresión creció en un 9% (pasó de 0,21 a 0,23).

La figura 9 compara el ritmo de quiebre de los contactos cementados en función de la tensión vertical aplicada, para distintos valores de resistencia del cementante. Se puede apreciar que el número de quiebres cae rápidamente con el aumento de la resistencia del cementante. Este comportamiento se reflejó en un crecimiento no lineal, parabólico con el cuadrado del valor de resistencia del cementante, de los parámetros de compresibilidad (ver figura 10). Para el caso de la probeta sin cementante, los valores obtenidos fueron de:

- Tensión virtual de preconsolidación = 2000kPa
- Índice de compresión = 0,21

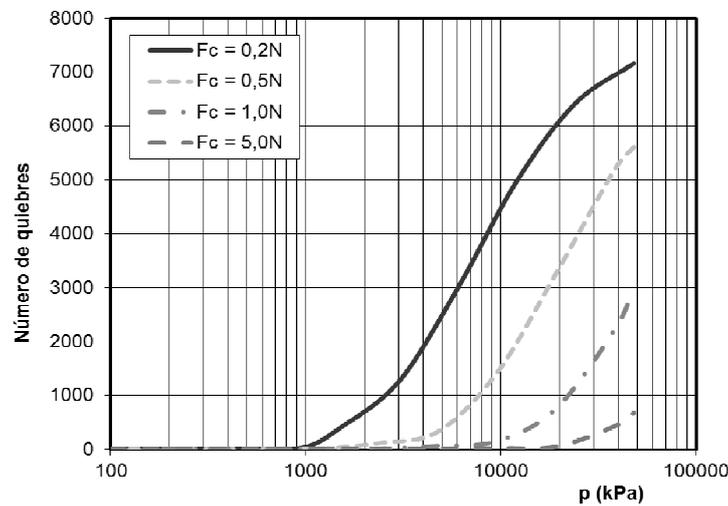


Figura 9. Evolución del quiebre de contactos con la resistencia del cementante.

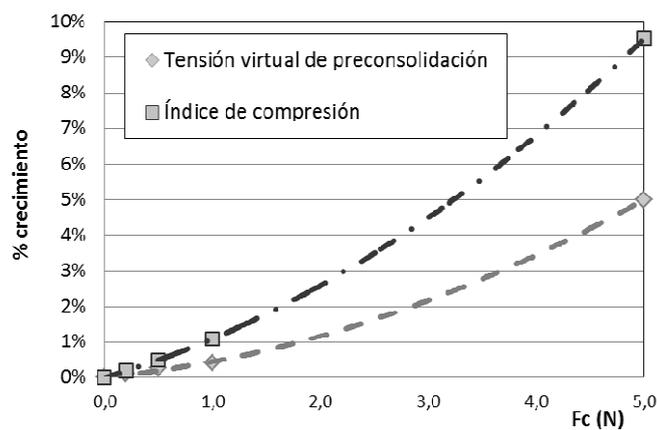


Figura 10. Crecimiento porcentual de los parámetros de compresión confinada con la resistencia del cementante.

3.3 Influencia del porcentaje de contactos cementados

Como resultado de la campaña de ensayos variando el porcentaje de contactos cementados se obtuvieron curvas de crecimiento para la la tensión virtual de preconsolidación y el índice de compresión, en función del porcentaje de contactos cementados (ver Figura 11). Para el caso de la probeta sin cementante, los valores obtenido fueron de:

- Tensión virtual de preconsolidación = 2000kPa
- Índice de compresión = 0,21

En ambos casos el crecimiento de estos parámetros con el porcentaje de contactos cementados fue del tipo lineal.

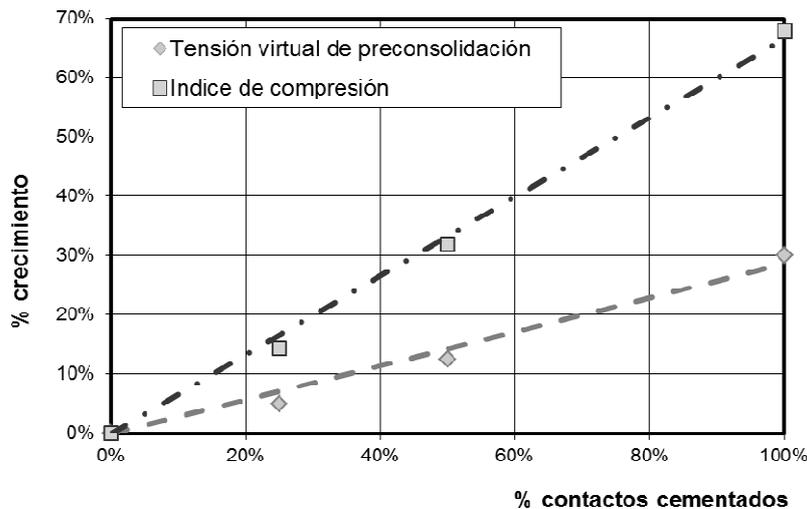


Figura 11. Evolución de la tensión virtual de preconsolidación y del índice de compresión con el porcentaje de contactos cementados, para una probeta suelta con $F_c = 5N$.

4 COMPORTAMIENTO EN CORTE DIRECTO

4.1 Simulaciones

Las simulaciones de corte directo se realizaron con dos tipos de probetas, suelta y densa, para dos niveles de resistencia del cementante (0,2 y 0,5N), y con un 33% de los contactos entre partículas cementados al inicio de las simulaciones. También se varió tensión vertical aplicada a la caja de corte en 100, 300, 600 y 1000 kPa.

La figura 10 muestra, a modo de ejemplo, el ritmo de quiebre de los contactos en las probetas sueltas y densas, para determinado valor de la tensión vertical. En todos los casos se verificó un ritmo elevado de quiebres en el primer milímetro de desplazamiento, y a partir de esa instancia el ritmo decayó hasta el final del ensayo. Este comportamiento se corresponde con el desarrollo de la resistencia de pico y su posterior ablandamiento plástico, como muestra la figura 11. A partir de 1mm, el pico de resistencia causado por la cementación desaparece, y la resistencia pasa a ser friccional, sin influencia significativa de la cementación. Este efecto es mas marcado para mayores resistencias del cementante utilizado.

(a)

(b)

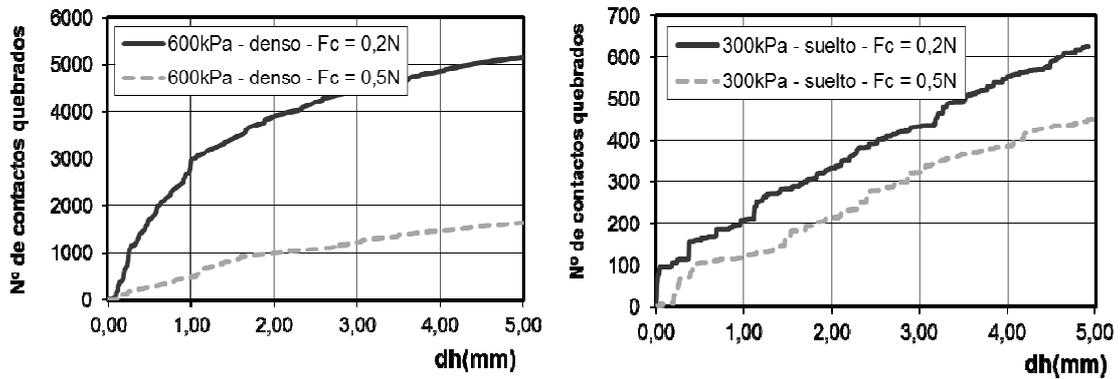


Figura 11. Evolución del quiebre de contactos cementados en corte directo.

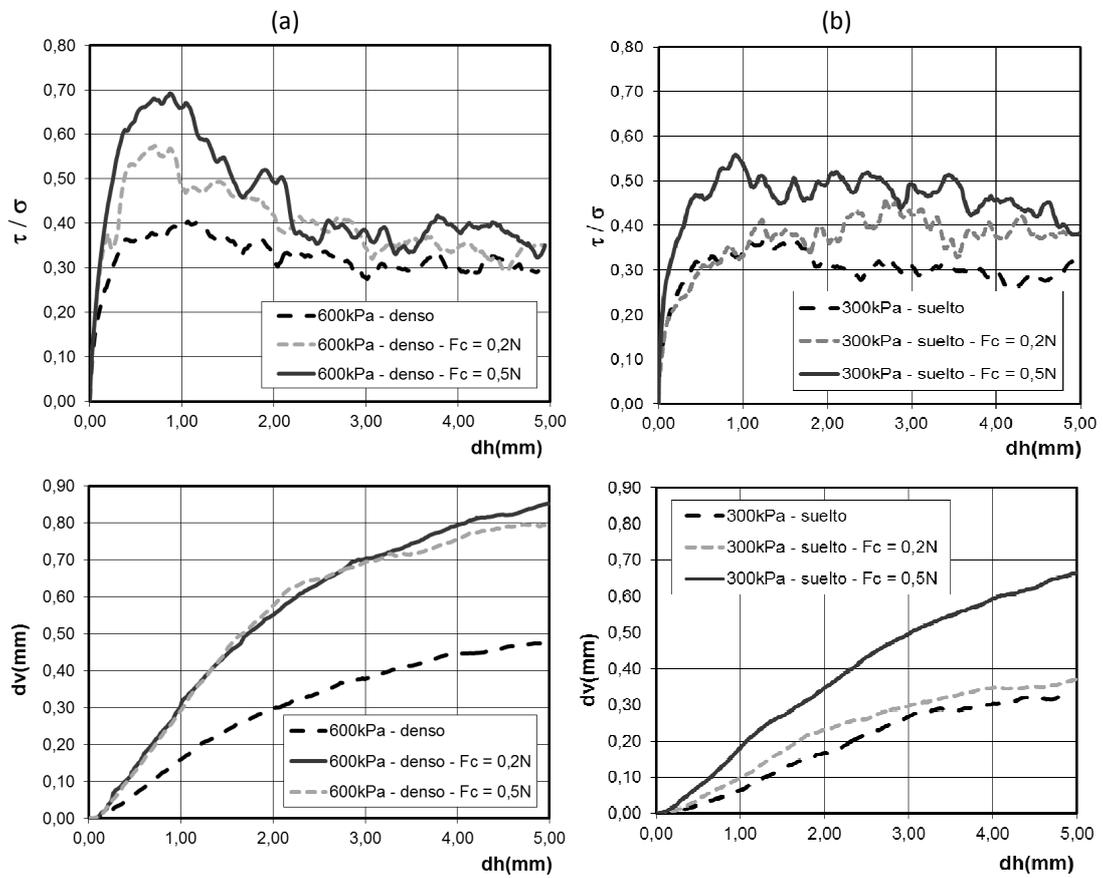


Figura 12. Simulación de ensayo de corte directo. Curva tensión x desplazamiento horizontal y curva desplazamiento vertical x desplazamiento horizontal. a) probeta densa para tensión vertical de 600kPa, b) probeta suelta para tensión vertical de 300kPa.

Como muestra la figura 12, las distorsiones se concentraron en torno del plano de falla inducido por el desplazamiento relativo de la caja, y fue en esa región que se produjo el quiebre masivo de contactos cementados en todos los casos.

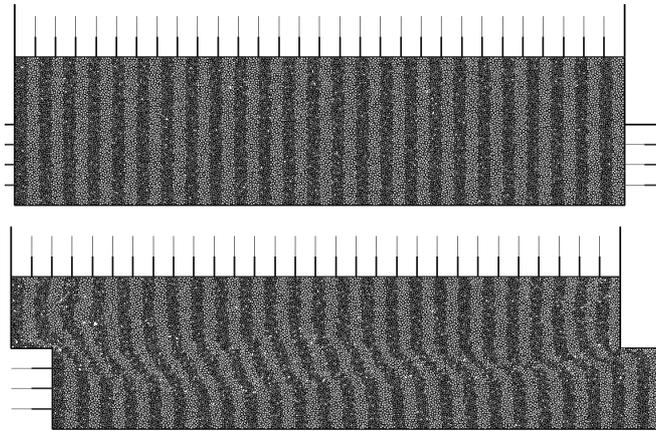


Figura 12. Simulación del ensayo de corte directo.

4.2 Envolvente de resistencia

Las figuras 13a y 13b muestran las envolventes de resistencia al corte obtenidas para los casos de probetas densas y sueltas. En todos los casos analizados se verificó una curvatura en la envolvente, causada por la presencia de cementante, cuando comparadas con la envolvente para la misma probeta no cementada. Para elevados confinamientos, el efecto del cementante tiende a desaparecer ya que las elevadas presiones rompen los contactos antes de aplicar el corte a la probeta.

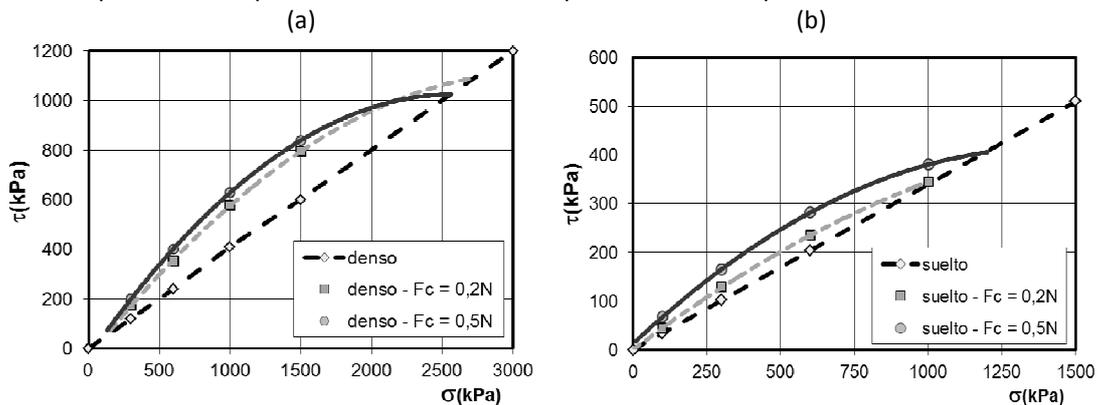


Figura 13. Envolvente de resistencia al corte en probetas no cementadas y cementadas ($F_c = 0.2N$ y $0.5N$). a) Densas; b) Seltas.

Un análisis cualitativo de los resultados obtenidos en las envolventes se muestra en las figuras 14 y 15. Estas figuras presentan el crecimiento de la resistencia al corte de pico por efecto del cementante en el caso de material denso y suelto respectivamente, en función de la tensión vertical aplicada. En todos los casos la resistencia creció con la resistencia del cementante, pero esta ganancia fue mayor para bajas tensiones verticales, y disminuyó para altas tensiones verticales. Este decaimiento en la resistencia al corte con la tensión vertical se ajustó a una ley parabólica en los materiales densos. Para los sueltos, el decaimiento pasó de lineal ($F_c = 0.2N$) a exponencial negativo ($F_c = 0.5N$). Asimismo se verificó mayor crecimiento en la resistencia a menor número de quiebres para 1mm, dado que el quiebre masivo de contactos elimina el efecto rigidizante de la cementación.

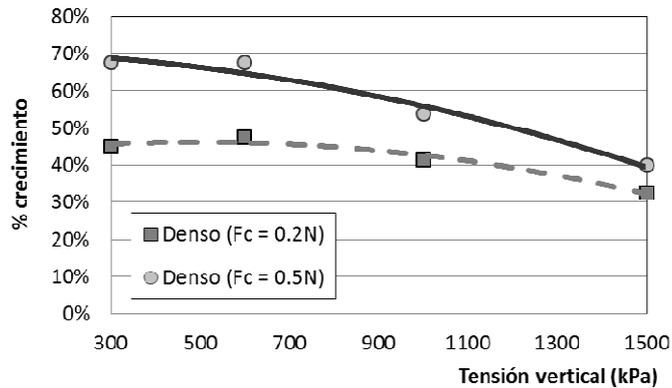


Figura 14. Crecimiento de la resistencia al corte de pico por efecto del cementante en material denso y en función de la tensión vertical aplicada.

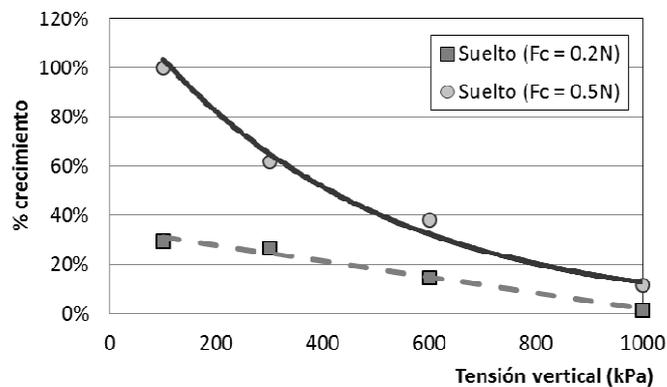


Figura 15. Crecimiento de la resistencia al corte de pico por efecto del cementante en material suelto y en función de la tensión vertical aplicada.

5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1 Compresión confinada

Los resultados mostraron de forma consistente un efecto de rigidización del material por efecto de la cementación, que creció linealmente con el porcentaje de contactos cementados, y de forma cuadrática con la resistencia del cemento. De este modo se verificó cualitativamente la influencia de la cementación en el comportamiento edométrico. En resumen se puede destacar:

- La cementación actuó rigidizando el material.
- Esta rigidización crece proporcionalmente al porcentaje de contactos cementados.
- Esta rigidización crece de forma cuadrática con la resistencia del cementante, siendo esta despreciable para muy bajas resistencias.
- El efecto de la rigidización se pierde en la medida que los contactos cementados son quebrados.
- El fenómeno de quiebre se produjo de forma distribuída en toda la probeta, sin concentrarse en un sector específico.

5.2 Corte directo

Los resultados mostraron un efecto de rigidización inicial del material sometido a corte por efecto de la cementación, tanto en las probetas densas como sueltas. Esto se verificó hasta el primer milímetro de desplazamiento, acompañado por un pico de resistencia y comportamiento dilatante. Luego la resistencia al corte disminuyó hasta un valor residual para mayores desplazamientos, aproximándose de la resistencia al corte experimentada por la probeta sin cementante. Las envolventes obtenidas mostraron aspecto no lineal, verificando cualitativamente la influencia de la cementación observada en laboratorio (ver figura 17). En resumen se puede destacar:

- La cementación actuó rigidizando el material en el primer milímetro del ensayo de corte directo, tanto en probetas densas como sueltas.
- El quiebre de contactos cementados fue intenso en ese primer milímetro, donde la resistencia alcanzó un valor de pico con fuerte dilatancia.
- El efecto de pico de resistencia y dilatancia fue mayor en las probetas densas. En las probetas sueltas el efecto fue mas suave.
- El efecto de pico de resistencia y dilatancia fue mayor para una mayor resistencia del cementante (menor número de contactos quebrados).
- El efecto de la rigidización y resistencia de pico se pierde en la medida que los contactos cementados son quebrados masivamente.
- Después del primer milímetro se manifiesta una rotura de tipo frágil, donde el efecto de la cementación empieza a disminuir. Para mayores desplazamientos el ritmo de quiebres cae, y el material se comporta como friccional.
- El fenómeno de quiebre se produjo de forma concentrada en la región en torno del plano inducido de falla. En los otros sectores de la probeta el quiebre fue comparativamente bajo.
- El valor de la resistencia del cementante afectó de forma diferente a ls probetas densas y sueltas.

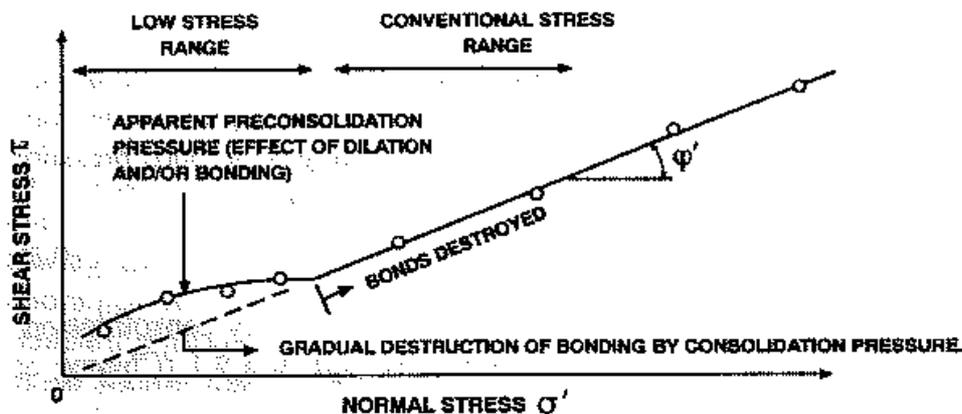


Figura 17. Esquema teórico de la envolvente de resistencia al corte en un suelo cementado (figura modificada de Ref. [25]).

6 CONCLUSIONES

La influencia de la cementación en el comportamiento mecánico de suelos granulares fue estudiada utilizando un modelo micro mecánico 2D basado en el método de los elementos discretos. En el mismo se incluyó una formulación específica para modelar contactos cementados entre elementos discretos tipo disco, a través de restricciones en la dirección normal y tangencial, e incluyendo un criterio de

rotura para el mismo. Se realizaron simulaciones de compresión confinada y corte directo en probetas virtuales densas y sueltas. Los resultados reprodujeron el efecto rigidizador de la cementación, dependiendo de la resistencia del cementante y el porcentaje de contactos cementados. Este efecto es marcante al inicio de los ensayos, para pequeñas deformaciones. A medida que las deformaciones avanzan, los contactos comienzan a quebrar, y cuando esta rotura es masiva el efecto rigidizador se pierde y el suelo pasa a comportarse como no cementado.

En el caso de compresión confinada, la cementación generó un aumento en la tensión virtual de preconsolidación y en el índice de compresión. En el caso de corte directo, la cementación provocó un pico de resistencia mas acentuado con una fuerte dilatancia asociada. Asimismo, las envolventes de resistencia al corte mostraron un aspecto curvo en todos los casos. Las tendencias observadas en las simulaciones con elementos discretos acompañaron el comportamiento observado en suelos reales. De esta forma, la herramienta presentada se mostró capaz de reproducir cualitativamente las características mecánicas de los suelos granulares cementados.

7 REFERENCIAS

- [1] Blight, G.E., 1997. Origin and formation of residual soils. In *Mechanics of Residual Soils*. Blight (ed), Rotterdam: Balkema, Ch 1: 1-15.
- [2] Burland, J.B., On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique*, V. 40, No. 3, 1990, pp 327-378.
- [3] Vaughan, P.R., 1988. Characterising the mechanical properties of in-situ residual soils. Proc. 2st Int. Conf. on Geomech. in Tropical Soils, Singapore: 469-487.
- [4] Cuccovillo, T. & Coop, M.R., Yielding and pre-failure deformations of structured sands. *Géotechnique*, V. 47, No. 3, 1997, pp 491-508.
- [5] Coop, M.R. & Atkinson, J.H., The mechanics of cemented carbonated sands. *Géotechnique*, V. 43, No. 1, 1993, pp 53-67.
- [6] Cuccovillo, T. & Coop, M.R., The influence of bond stress on the mechanics of carbonated soft rocks. Proc. Int. Symp. on geotech. Engng. of hard soils – soft rocks, Athens, V. 1, 1993, pp 447-455.
- [7] Cuccovillo, T. & Coop, M.R., On the mechanics of structured sands. *Géotechnique*, V. 49, No. 6, 1999, pp 741-760.
- [8] Sitharam, T.G., 2000. Numerical simulation of particulate materials using discrete element modeling, *Curr. Science*, V. 78, N. 7: 876-886.
- [9] Bolton, M.D., 2000. *The Role of Micro-Mechanics in Soil Mechanics*, CUED/D-Soils/TR313, Cambridge University, 24pp.
- [10] Bolton, M.D. & Cheng, Y.P., 2002. *Micro-Geomechanics*, CUED/D-Soils/TR323, Cambridge University, August 2002, 12p.
- [11] Lemos, J.V., 2004. Discrete element models in geomechanics – Evolution and future trends, *Geotecnia*, No 100, Lisboa, Portugal: 333-343.
- [12] Cundall, P.A., 1971. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems, Proc. Symp. Rock Fracture (ISRM), Nancy, Vol 1, paper II-8.
- [13] Cundall, P.A. & Strack, O.D.L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, vol 29, No. 1: 47-65.
- [14] Iwashita, K. & Oda, M., 2000. Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element model. *Powder Technology*, 109: 192-205.

- [15] 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: 433-468.
- [16] Sullivan, C.O. & Cui, L., 2004. Three-dimensional discrete element simulations of direct shear tests, *Numer. Modeling in Micromechanics via Particle Methods*, Shimizu, Hart & Cundall (eds.), London:Taylor & Francis Group: 373-382.
- [17] Katzenbach, R. & Schmitt, A., 2004. Micromechanical modeling of granular materials under triaxial and oedometric loading. *Num. Mod. in Micromech. via Particle Methods*, Shimizu, Hart & Cundall (eds.), London: Taylor & Francis: 313-322.
- [18] 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: 473-489.
- [19] Ibañez, J.P., 2008. Modelagem micro-mecânica discreta de solos residuais., Tese de doutorado, CTC - PUC-Rio, 394 pp.
- [20] Velloso, R.Q., Vargas Jr, E.A., Campos, J.L.E., Gonçalves, C., 2003. A Numerical Implementation to Simulate Fluid-Mechanical Process in Sand Production Using DEM. *Proc. 4TH Int. Workshop Appl. of Comp. Mech. in Geotech. Eng. Ouro Preto, Brasil*: 237-248.
- [21] Lee, K. & Seed, H.B., 1967. Drained strength characteristics of sand. *Journal of SMFD, ASCE, SM6*, 117-148.
- [22] Ibañez, J.P.; Vargas Jr, E. A.; de Campos, T.M.P., Modelación micromecánica de suelos granulares incluyendo el fenómeno de rotura de partículas, *XX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica - CAMSIG, Mendoza, Argentina. 6 a 9 de Octubre de 2010*, p. 55-62.
- [23] Ibañez, J.P., Modelación vía elementos discretos del comportamiento mecánico de suelos arenosos parcialmente saturados. *8 EIPAC 2009 (Encuentro de Investigadores y Profesionales Argentinos de la Construcción)*, 1 a 4 de Septiembre de 2009, Mendoza, Argentina.
- [24] Potyondy, D.O. & Cundall, P.A., A bonded-particle model for rock, *Int. Jnl. of Rock Mech. & Mining Sc.*, V. 41, 2004, pp 1329-1364.
- [25] Vargas, M. 1974. Engineering properties of residual soil from south-central region of Brazil. *2nd Int. Congress, Int. Assoc. Eng. Geol., Sao Paulo, Brasil*, 1(5).