

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

J.P. Ibañez

*jpibanez@fing.uncu.edu.ar, jpablo@tegraf.puc-rio.br
Instituto IMERIS, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo*

E.A. Vargas Jr.

*vargas@puc-rio.br
Dpto. de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro, Brasil*

T.M.P. de Campos

*tacio@puc-rio.br
Dpto. de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro, Brasil*

RESUMEN: El comportamiento mecánico de los suelos granulares es influenciado por las características mineralógicas de sus granos, el tipo de fábrica de la micro estructura y el grado de compactación de su masa. También es controlado por fenómenos microestructurales, como la presencia de cementación de contacto o la ocurrencia de rotura de partículas bajo carga. La rotura de partículas, en particular, puede deberse a la presencia de granos débiles o fisurados, o a la acción de elevados confinamientos sobre granos angulosos. Todas estas características y fenómenos pertenecen a la microescala del suelo, y afectan las características de rigidez, compresibilidad, resistencia y permeabilidad del suelo. Un modelo numérico basado en el análisis micro mecánico fue desarrollado para simular el comportamiento de suelos granulares, utilizando el método de los elementos discretos (DEM) en dos dimensiones. La representación vía DEM permite modelar las partículas de suelo explícitamente mediante discos circulares rígidos que tienen libertad de movimiento. En este modelo se implementó una simulación del fenómeno de rotura de partículas, basada en el mecanismo de ruptura a tracción por compresión diametral. Simulaciones numéricas fueron realizadas para evaluar la influencia de este fenómeno en el comportamiento mecánico de suelos granulares. Los resultados de análisis edométricos y de corte directo mostraron que la rotura de partículas modifica la distribución granulométrica, provoca contracciones volumétricas plásticas y altera la linealidad de la envolvente de resistencia. Los resultados numéricos fueron contrastados con la información laboratorial existente.

Palabras clave: suelos, resistencia al corte, modelos discretos, microestructura, rotura de partículas.

ABSTRACT: The mechanical behavior of granular soils is influenced by the mineralogical characteristics of grains, the type of factory in the microstructure and the degree of compactness. It is also controlled by micro structural phenomena such as contact cementation or the occurrence of grain crushing under loading. Breakdown of grains may be due to the presence of weak or cracked grains, or the action of high confinement over irregular-shape grains. All these features and phenomena belong to micro scale, and affect the characteristics of stiffness, compressibility, soil strength and permeability. A numerical model based on micro-mechanical analysis was developed to simulate the behavior of granular soils using the discrete element method (DEM) in two dimensions. DEM representation allows particle modeling by rigid circular disks that have freedom of movement. In this model was implemented a simulation of grain crushing, based on the mechanism of rupture for tension due diametric compression. Numerical simulations were conducted to assess the influence on the mechanical behavior of granular soils. The oedometer and direct shear test results showed that the phenomenon produces changes in the grain size distribution, causes plastic contraction and alters the linearity of the strength envelope. The numerical results were compared with experimental information.

Key Words: soil – shear strength – discrete models – microstructure – grain crushing

1 INTRODUCCIÓN

El comportamiento mecánico de los suelos granulares es influenciado por las características mineralógicas de sus partículas constituyentes, el tipo de fábrica y el grado de compacidad. También es controlado por fenómenos de la microescala como la rotura de partículas bajo carga, debido a la presencia de partículas débiles, fisuradas, o de forma angulosa (Ver Fig. 1). Este fenómeno afecta la rigidez, compresibilidad, resistencia de los suelos. Análisis realizados en arenas carbonáticas y silíceas densas con fábrica cerrada indicaron la rotura de partículas como el fenómeno responsable por la deformación plástica bajo compresión volumétrica para grandes tensiones. (Ref. [1][2]).

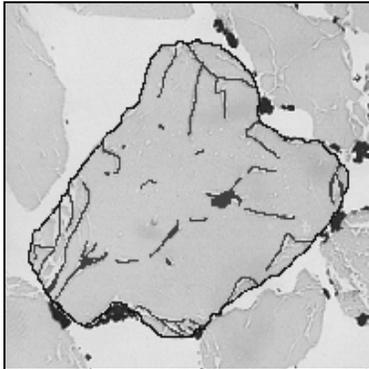


Figura 1. Microscopia de un suelo granular. Detalle de partícula microfisurada.

En suelos de origen residual es característica la presencia de granos y paquetes de partículas de resistencia mecánica variada, producto de la alteración de minerales primarios con desigual resistencia a la alteración química (Ref. [3]). Así, es común la rotura de estas partículas y paquetes bajo carga. Este fenómeno provoca un corrimiento hacia los finos de la curva granulométrica del suelo, y un reordenamiento localizado de las partículas con disminución de volumen (Ref. [4]).

Vaughan (Ref. [5]), analizando la composición de suelos residuales, indica que las partículas se presentan generalmente amalgamadas en pequeños bolsones, y que partículas de mayor tamaño se pueden presentar debilitadas por la presencia de microfisuras. Bajo carga es común la rotura de estas partículas y agregados, lo que genera un aumento en la compresibilidad del suelo.

Hardin (Ref. [4]) cuantificó la rotura de partículas en un suelo residual de granito por el índice B , definido como el área encerrada entre las curvas granulométricas del suelo antes y después de la rotura. La rotura se debe a la acción de las fuerzas de contacto intergranular, y por esto el valor de B es fuertemente influenciado por la distribución granulométrica, el índice de vacíos inicial, la forma de las partículas y la tensión aplicada. Se verificó una relación de crecimiento monótono entre B y la tensión isotrópica p en el estado crítico (Ver Fig. 2). La partición de las partículas amalgamadas y el rompimiento de partículas fisuradas fueron apuntados como los principales mecanismos responsables por la contracción volumétrica plástica experimentada durante una compresión isotrópica o un esfuerzo cortante (Ref. [6]).

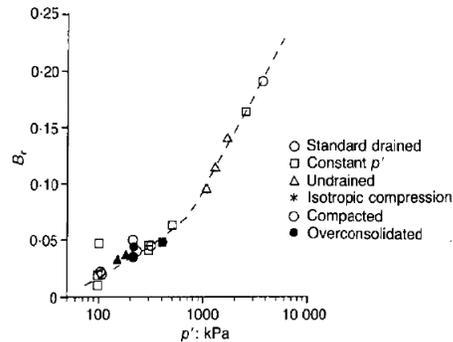


Figura 2. Índice B en función de la tensión isotrópica p para un suelo residual (Ref. [6]).

La influencia del fenómeno de la rotura de partículas bajo carga puede ser resumida como sigue:

- El fenómeno es gobernado por las fuerzas en los contactos intergranulares.
- En suelos residuales el fenómeno se da por la desagregación de amalgamas de partículas y el rompimiento de partículas microfisuradas.
- Provoca un corrimiento para los finos en la curva de distribución granulométrica del suelo.
- Provoca contracción volumétrica plástica.
- Partículas con una forma angulosa son más susceptibles que partículas redondeadas.
- La rotura crece con la tensión de confinamiento.
- Alta densidad relativa y fábrica intrincada del suelo favorecen la rotura de partículas.
- Provoca un aumento en la compacidad del suelo, que resulta en un endurecimiento y en el aumento en la resistencia mecánica post rotura.

2 EL FENÓMENO DE LA ROTURA DE PARTICULAS

El problema de la rotura de una partícula aislada, generalmente de cuarzo, ha sido abordado teórica y experimentalmente. El análisis Hertziano ofrece una solución analítica para la distribución de las tensiones en el interior de un sólido elástico, isótropo y homogéneo (Ver Ref. [7]).

En el campo experimental, se han comprimido esferas y granos de diversos materiales, incluyendo monocristales de cuarzo cargados diametralmente entre dos placas rígidas hasta la rotura (Ref. [8]). Cuatro configuraciones de rotura distintas fueron distinguidas, como muestra la Fig. 3.

El fenómeno, en el caso de partículas microfisuradas o amalgamas, se da a través de superficies de rotura predefinidas por planos de debilidad y fisuración de orientación aleatoria. Bajo esta condición, cuando el campo de tracción normal al plano de debilidad vence su baja resistencia, ocurre la rotura. Este mecanismo se asemeja al modo (d) del análisis experimental de la Fig. 3, y coincide con la configuración de rotura del ensayo brasilero de tracción por compresión diametral.

El valor de la tracción de rotura para el ensayo brasilero es dado por la expresión

$$\sigma_t = (2F)/(\pi Dt) \quad (1)$$

donde F es la fuerza de compresión aplicada, D el diámetro y t el largo de la probeta.

Del comportamiento observado fueron asumidas las siguientes hipótesis para el modelo numérico:

- La partícula es rígida hasta la rotura.
- La partícula es isótropa o tiene microfisuras de orientación aleatoria.
- La rotura ocurre por tracción según el criterio del ensayo brasilero (modo de rotura (d)).

3 MODELACIÓN MICROMECAÁNICA DEL SUELO

En los suelos, las características de comportamiento se definen por fenómenos de la microescala, como la presencia de meniscos capilares, cementación de contacto, la rotura de partículas, anisotropía o presencia de grumos arcillosos. Cuando se procura estudiar el efecto de estas características y fenómenos, la modelación a escala macroscópica basada en la mecánica del continuo es limitada.

En este contexto, la modelación basada en la mecánica clásica a escala de la partícula se torna

una alternativa poderosa, pues 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. [9][10][11][12][13][14]).

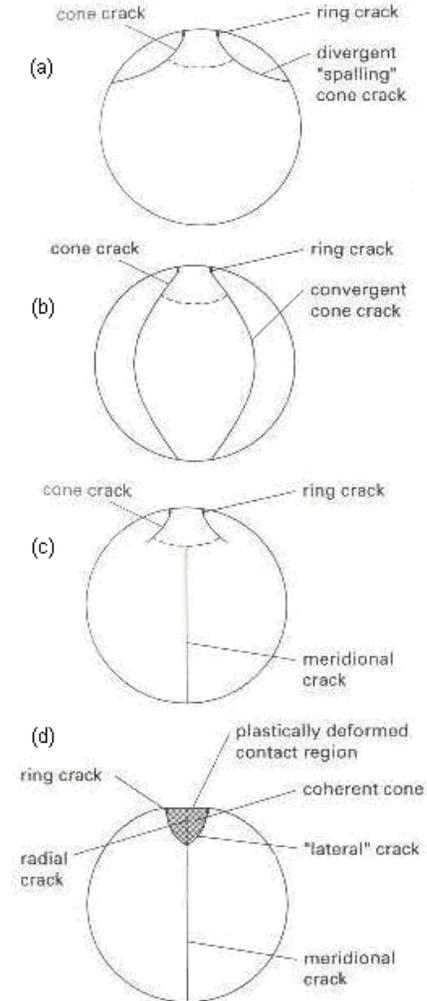


Figura 3. Modos de rotura de un grano de cuarzo comprimido diametralmente (Ref. [8]).

El DEM, nacido para modelar sistemas de bloques rocosos, evolucionó 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. [15][16][17][18][19][20][21][22]).

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. [22][23]). La representación geométrica de los elementos discretos es circular (caso 2D). La mecánica del contacto se resuelve mediante un doble sistema resorte-amortiguador (Ver Fig. 4) 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.

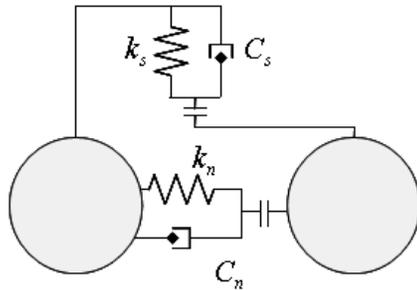


Figura 4. Modelo de contacto dinámico.

4 MODELACIÓN MICROMECAÍNICA DE LA ROTURA DE PARTICULAS

La rotura de partículas fue implementada como un atributo de los elementos discretos tipo disco 2D, y se incluyó el procesamiento de las fuerzas de contacto, el cálculo de las tracciones en el interior del elemento y el control de quiebre mediante la aplicación de un criterio de ruptura. Caso haya rotura el elemento es quebrado, dando lugar a dos nuevos elementos en su lugar (Ver Fig. 5, Ref. [22]). La resistencia a tracción *Scrush* de los granos es pasada como parámetro vía archivo de datos. El parámetro de configuración *Crushing* define cuales elementos del modelo son susceptibles de quebrar. Las configuraciones son:

- NINGUN *elemento* puede quebrar;
- TODOS los *elementos* pueden quebrar;

- Un PORCENTAJE determinado de *elementos* pueden quebrar, elegidos aleatoriamente;
- Una BANDA de un dado espesor e inclinación es compuesta por *elementos* que pueden quebrar.

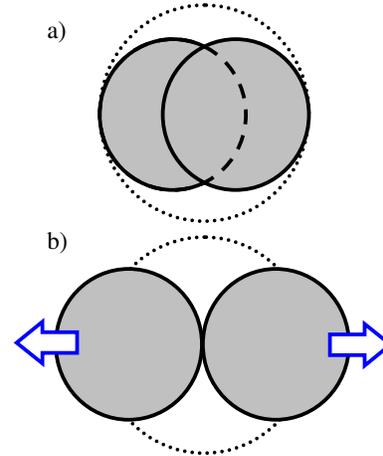


Figura 5. Modelo discreto de rotura. a) Nuevos elementos superpuestos; b) Separación.

A partir de las fuerzas de contacto de cada elemento en un determinado instante, se calculan las fuerzas resultantes en la dirección de la mayor fuerza de contacto, y en la dirección perpendicular. Con estas fuerzas se obtiene el valor del esfuerzo de tracción en el elemento discreto empleando la ecuación (1). Caso esta tensión alcance o sobrepase el valor de la resistencia *Scrush*, el elemento rompe. Las dos partes resultantes son representadas mediante nuevos elementos tipo disco de un área dada por

$$A_{nuevo} = 1/2 A_{inicial} \quad (2)$$

a fin de conservar la masa del elemento que quebró. Así, los nuevos elementos tendrán un radio

$$r_{nuevo} = r_{inicial} / \sqrt{2} \quad (3)$$

Los nuevos elementos son creados superpuestos y circunscriptos en el perímetro del elemento eliminado. Esta superposición produce una fuerza de repulsión que simula la dilatación local que ocurre al momento de la rotura. Enseguida estos nuevos elementos hacen contacto con los elementos vecinos y se incorporan al proceso de cálculo (Ver Fig. 5).

La figura 6 muestra el instante de la rotura de una partícula en la simulación vía elementos discretos, y la expansión localizada producida, seguida de un acomodamiento de las partículas vecinas.

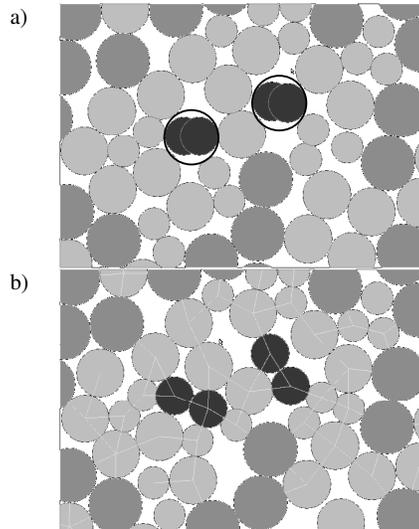


Figura 6. Simulación discreta de la rotura de partículas. a) Instante de la rotura b) Reacomodación de las nuevas partículas.

5 SIMULACIONES

5.1 Calibración del modelo y de los ensayos

El simulador discreto DEMlib (Ref. [22]) 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.

Las probetas virtuales 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 utilizando la técnica de caída por gravedad. Manipulando los parámetros de contacto fueron generadas cuatro probetas para simular los estados de agregación denso, muy denso, suelto y muy suelto.

5.2 Ensayo edométrico

Fueron realizados ensayos en la probeta densa, para tres configuraciones: a) Sin rotura; b) Partículas de radio 0.15mm pueden romper, con resistencia al quiebre $Sc = 4N$ y; c) $Sc = 5N$. La Fig. 7 presenta las curvas de consolidación obtenidas.

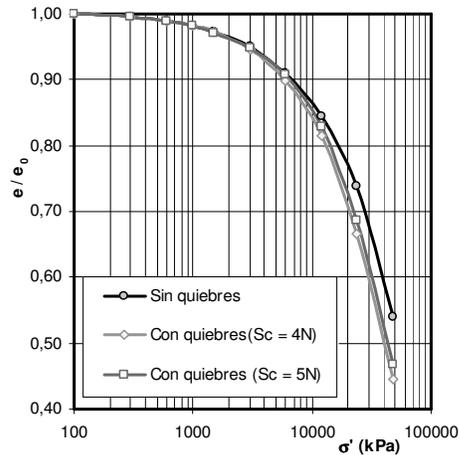


Figura 7. Ensayo edométrico en probeta densa.

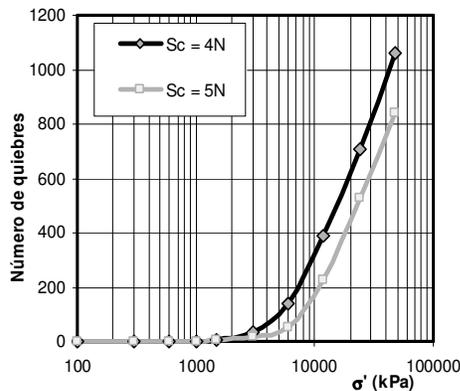


Figura 8. Número de roturas ocurridas durante el ensayo de consolidación.

En la figura 8 se muestra la evolución del número de roturas durante el ensayo. Se verifica un mayor número de quiebres para el caso de partículas más débiles ($Sc = 4N$). El ritmo de quiebres fue casi nulo para bajos confinamientos, aumentando linealmente con $\log(\sigma')$ a partir de una tensión próxima a la tensión de preconsolidación. El mayor ritmo de

queiebres indujo una mayor compresibilidad, aumentando el valor del índice de compresión en un 11 y 10% para los casos (b) y (c) respectivamente. Igualmente, la rotura de partículas produjo una disminución de la tensión de preconsolidación, del orden de 17 y 12% % para los casos (b) y (c) respectivamente. Se confirma así que este fenómeno indujo una mayor deformabilidad en las probetas.

5.3 Ensayo de corte directo

Fueron ensayadas al corte directo las cuatro probetas para confinamientos elevados (600, 1000 y 1500 kPa), a fin de evaluar la influencia de la rotura de partículas en la resistencia al corte. La figura 9 muestra número total de roturas durante la cizalla para las cuatro probetas, donde estas crecieron de forma cuadrática con la tensión vertical aplicada.

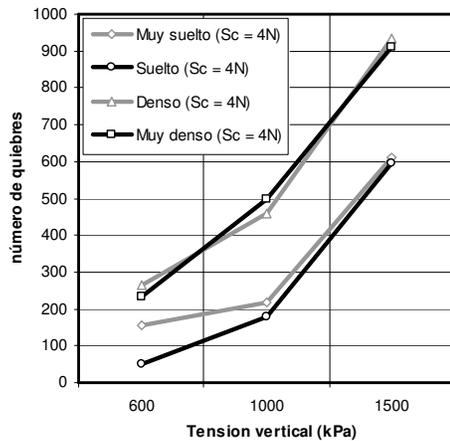


Figura 9. Número total de roturas durante el corte directo en función de la tensión vertical aplicada.

La figura 10 muestra la tasa de roturas durante la cizalla. Las probetas densas sufrieron mayor número de roturas que las sueltas, debido a que su fábrica mas cerrada incrementa el valor de las fuerzas de contacto entre las partículas. No obstante, la probeta muy densa experimentó menos roturas que la densa, e igualmente la probeta muy suelta experimentó más roturas que la suelta. Esto se debe a que la menor compacidad genera la concentración de las fuerzas intergranulares en pocos contactos, lo que provoca mayores tracciones en las partículas. Las figuras 11 y 12 muestran las envolventes de resistencia obtenidas para las probetas suelta y densa respectivamente, con y sin rotura.

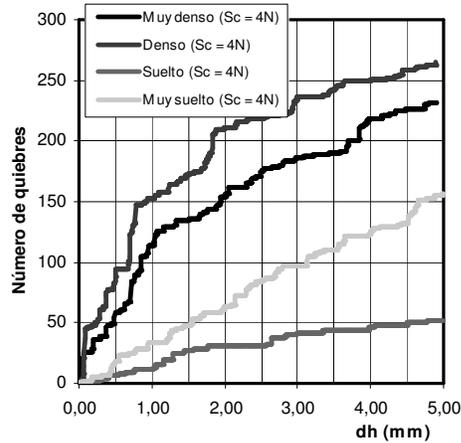


Figura 10. Evolución de las roturas durante la cizalla, para una tensión vertical de 600kPa.

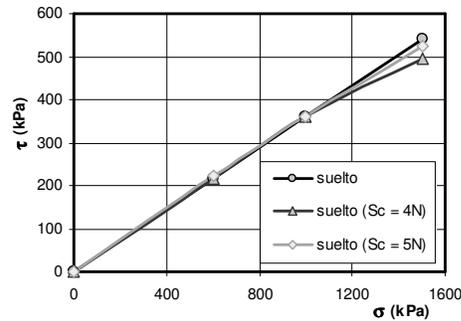


Figura 11. Envolventes de resistencia de la probeta suelta con y sin rotura de partículas.

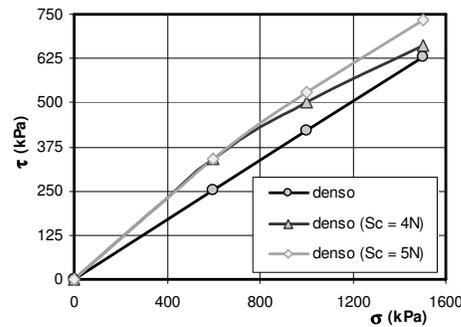


Figura 12. Envolventes de resistencia de la probeta densa con y sin rotura de partículas.

La figura 13 muestra, para la probeta densa, la evolución de las tensiones de corte y el comportamiento volumétrico durante la cizalla. Se observa un aumento del pico de resistencia y una mayor dilatación debido a la rotura de partículas. Finalmente, la figura 14 muestra la simulación de la cizalla en la caja de corte, donde se puede apreciar la formación de la banda de cizalla en torno del plano inducido de falla, en la cual se concentran las distorsiones angulares (Ref. [22]).

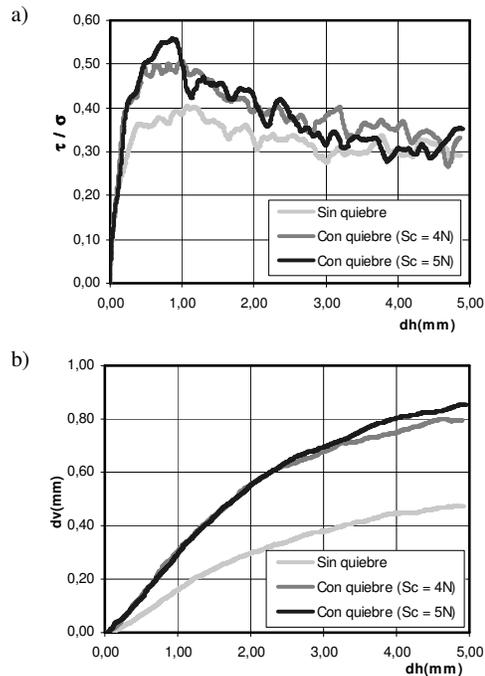


Figura 13. Ensayo de corte directo en probeta densa, para tensión vertical de 600kPa. a) Tensión de corte normalizada b) Desplazamiento vertical.

6 DISCUSION

Estudios sobre el efecto de la rotura de partículas en suelos (Ref. [20][21][24][25]) señalan una envolvente de resistencia no lineal, variando el ángulo de fricción interna. Esta variación es controlada por la compactación del suelo, la resistencia al quiebre de las partículas y la tensión vertical aplicada (Ver Fig. 15). Las simulaciones mostraron que para bajas tensiones confinantes hubo un aumento de resistencia debido a la rotura de

partículas, pero para confinamientos más elevados este aumento fue menor o se transformó en pérdida de resistencia. Esto está relacionado a la tasa de quiebres, que creció de forma exponencial – no lineal – con la tensión confinante (Ver Fig. 9). La curvatura de la envolvente es más pronunciada para menor resistencia de las partículas. Esto sugiere que la curvatura, o sea, la ganancia o pérdida de resistencia está asociada al número total de quiebres. La ganancia en la resistencia decrece con el aumento de ocurrencias de quiebres. Además, en las probetas sueltas hubo una contracción volumétrica adicional, y en las densas se produjo una dilatación adicional.

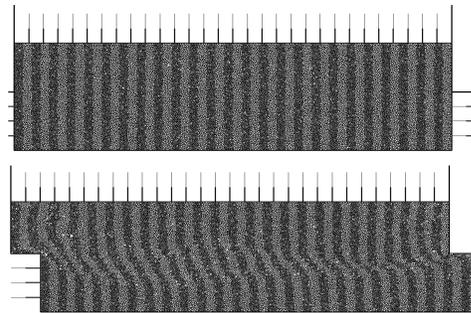


Figura 14. Simulación del ensayo de corte directo.

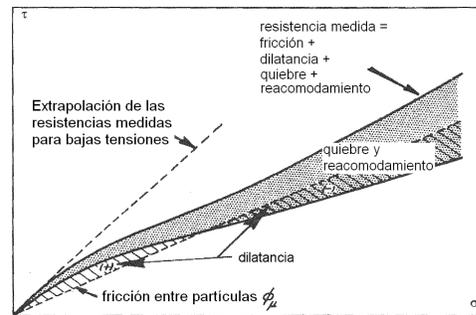


Figura 15. Contribución de la fricción, dilatación, quiebre y acomodamiento de partículas en la envolvente de resistencia de Mohr para ensayos drenados en arenas (Ref. [24]).

7 CONCLUSIONES

Ha sido implementado un modelo micro mecánico para el estudio del comportamiento de suelos, basado en el DEM. Se propuso además una modelación discreta del fenómeno de la rotura de partículas, para estudiar su influencia en la respuesta

mecánica de suelos granulares. El modelo representó satisfactoriamente la no linealidad de la envolvente de resistencia y mostró el efecto de la rotura de partículas en el comportamiento volumétrico del suelo y en la resistencia al corte.

8 REFERENCIAS

- [1] Coop, M.R., 1990. The mechanics of uncemented carbonate sands. *Géotechnique*, V. 40, No. 4: 607-626.
- [2] Coop, M.R. & Lee, I.K., 1993. The behaviour of granular soils at elevated stresses. In *Predictive Soil Mechanics*, London: Thomas Telford: 186-198.
- [3] Blight, G.E., 1997. Origin and formation of residual soils. In *Mechanics of Residual Soils*. Blight (ed), Rotterdam: Balkema, Ch 1: 1-15.
- [4] Hardin, B.O., 1985. Crushing of soil particles. *J. Geotech. Engng. Div. Am. Soc. Civ. Engrs.*, V. 114, No. 10: 1177-1192.
- [5] 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.
- [6] Lee, I.K. & Coop, M.R., 1995. The intrinsic behaviour of a decomposed granite soil. *Géotechnique*, V. 45, No. 1: 117-130.
- [7] Brzesowsky, R., 1995. Micromechanics of sand grain failure and sand compaction. *Geologica Ultraiectina*, Universiteit Utrecht, Nederlands. No 133.
- [8] Gallagher, J.J., 1976. Fracturing of quartz sand grains. In: *Site characterization*, preprint-proceedings 17th Symposium on Rock Mechanics: 2 A4-1 – 2 A4-8.
- [9] Sitharam, T.G., 2000. Numerical simulation of particulate materials using discrete element modeling, *Curr. Science*, V. 78, N. 7: 876-886.
- [10] Bolton, M.D., 2000. *The Role of Micro-Mechanics in Soil Mechanics*, CUED/D-Soils/TR313, Cambridge University, 24pp.
- [11] Bolton, M.D. & Cheng, Y.P., 2002. *Micro-Geomechanics*, CUED/D-Soils/TR323, Cambridge University, August 2002, 12p.
- [12] Lemos, J.V., 2004. *Discrete element models in geomechanics – Evolution and future trends*, *Geotecnia*, No 100, Lisboa, Portugal: 333-343.
- [13] 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.
- [14] Cundall, P.A. & Strack, O.D.L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, vol 29, No. 1: 47-65.
- [15] Iwashita, K. & Oda, M., 2000. Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element model. *Powder Technology*, 109: 192-205.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Cheng, Y.P., Bolton, M.D. & Nakata, Y., 2004. Crushing and plastic deformation of soils simulated using DEM, *Geotechnique*, V. 54, No 2: 131-141.
- [21] Lobo-Guerrero, S. & Vallejo, E., 2005. Discrete Element Method Evaluation of Granular Crushing Under Direct Shear Test Conditions, *Jnl. of Geotech. and Geoenv. Eng.*, V. 131, No. 10: 1295-1300.
- [22] IBAÑEZ, J.P., 2008. *Modelagem micro-mecânica discreta de solos residuais.*, Tese de doutorado, CTC - PUC-Rio, 394 pp.
- [23] 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.
- [24] Lee, K. & Seed, H.B., 1967. Drained strength characteristics of sand. *Journal of SMFD, ASCE, SM6*, 117-148.
- [25] Fedá, J., 2002. Notes on the effect of grain crushing on the granular soil behavior, *Eng. Geol.*, V. 63, No. 1: 93-98.