





EL FENÓMENO DE ROTURA DE PARTÍCULAS EN SUELOS ARENOSOS

Sebastián Maureira (1); Ramón Verdugo (2)

(1) CMGI Ltda. (2) Universidad de Chile smaureira @cmgi.cl; rverdugo @cmgi.cl

Resumen

Para evaluar el fenómeno de rotura de partículas se llevó a cabo un programa de laboratorio que consideró, principalmente, la ejecución de ensayos de consolidación isótropa y ensayos de compresión triaxial no drenados, en un rango de presiones de confinamiento entre 1 y 50 kg/cm².

Con el objetivo de comparar el efecto de la densidad y la forma de las partículas en la magnitud de la rotura de partículas, se confeccionaron probetas en estado suelto y denso de dos diferentes arenas: arena de Relaves, la cual presenta partículas de cantos angulosos y arena de Ottawa, reconocida por la esfericidad de sus partículas.

Considerando el rango de niveles tensionales utilizados en el presente estudio, los resultados obtenidos indican que el mayor responsable de la generación del fenómeno de rotura de partículas es la aplicación del esfuerzo desviador. Por otra parte, se observó consistentemente que, para un mismo material, en especímenes densos se produce una mayor cantidad de rotura en comparación con probetas sueltas sometidas a las mismas condiciones de ensayo.

Palabras-Clave: Rotura de Partículas, Altas presiones, Suelos Arenosos, Arena de Relaves

Abstract

A program of laboratory tests consisting in isotropic consolidation and conventional undrained shear triaxial tests, in a range of confining pressures from 1 to 50 kg/cm², was conducted in order to assess the phenomenon of particle breakage of the specimens.

Additionally, loose and dense specimens were reconstituted considering two different sands in order to evaluate the effect of density and particle shape in the extent of particle breakage: Tailings sands having particles of rather angular shape, and the well-known Ottawa sand, recognized by the sphericity of its particles.

In the range of stress level considered in the analyses, the results indicate that the main responsible of producing the phenomenon of particle breakage in both soils tested, is the deviator stress. On the other hand, it was observed consistently that, for the same material, denser specimens generate larger amount of breakage in comparison with loose specimens, when subjected to the same test conditions.

Keywords: Particle Breakage, High Pressure tests, Sandy Soils, Tailings Sand







1 Introducción

Un material granular al ser sometido a altas presiones experimenta el fenómeno de rotura de partículas, que consiste en la fragmentación de los granos que conforman el esqueleto granular. Esto debido a que los esfuerzos inter-partículas superan la resistencia propia del material que los constituye. Numerosos estudios acerca de este tema indican que la rotura de partículas, además de generar una variación en la distribución granulométrica del material, tiene por consecuencia que el comportamiento tensión-deformación, la compresibilidad y la resistencia del suelo sufran cambios importantes. De hecho, a niveles de presiones suficientemente altos, la rotura de partículas es el factor más importante que controla el comportamiento de suelos granulares. El inicio de la rotura de partículas y la magnitud de ésta depende de varios factores, entre los cuales los de mayor importancia son la forma de las partículas, el material que las compone y el estado tensional al cual está sujeta.

Para evaluar el fenómeno de rotura de partículas en suelos arenosos, se llevó a cabo un programa de ensayos de laboratorio que consideró, principalmente, la ejecución de ensayos de consolidación isótropa hasta 50 kg/cm² y ensayos triaxiales CIU en compresión, a una presión de confinamiento de 20 kg/cm². Adicionalmente, con el objetivo de comparar el efecto de la densidad de ensayo y forma de las partículas, se utilizaron muestras sueltas y densas de dos arenas de diferentes orígenes. La primera corresponde a arena de relave constituida por partículas de cantos angulosos, mientras que la segunda es la arena de Ottawa, reconocida por la esfericidad de sus partículas.

2 Material Ensayado y Programa de Ensayos

La arena de relaves utilizada proviene del muro El Torito, de la mina de cobre El Soldado, ubicada en las cercanías de la localidad de El Melón, V Región. La arena se obtuvo luego del proceso de ciclonaje. El material en estudio corresponde a una arena fina bien graduada de color gris claro, con partículas angulosas y sub-angulosas generadas por el proceso de obtención del mineral que involucra tronaduras, chancado y molienda.

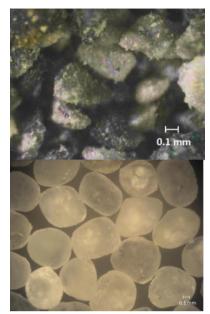
Con el objetivo de comparar las características del fenómeno de rotura en partículas angulosas y redondeadas, se utilizó además una arena natural, denominada arena de Ottawa, que se caracteriza por la esfericidad de sus partículas. La arena de Ottawa se encuentra constituida por una arena media uniforme de partículas redondeadas y sub-redondeadas, de color blanquecino, compuestas por mineral de cuarzo. En particular, la muestra de arena utilizada en este estudio es la ASTM 20/30 distribuida por la planta de Ottawa, Illinois de U.S. Silica Company, correspondiente a una arena normalizada en conformidad con lo dispuesto en ASTM C778.

En la Fig. 1 se presentan fotografías microscópicas y la distribución granulométrica de cada arena, mientras que en la Tabla 1 se entregan las propiedades índices de las arenas en estudio.

El programa de ensayos contempló la ejecución de ensayos triaxiales monótonos no drenados en muestras de arena densa y suelta. Los ensayos fueron ejecutados a una presión media efectiva inicial igual a 20 kg/cm².

Por otra parte, se llevaron a cabo ensayos de consolidación isótropa con el objetivo de evaluar las características del fenómeno de rotura de partículas del material bajo solicitación hidrostática.





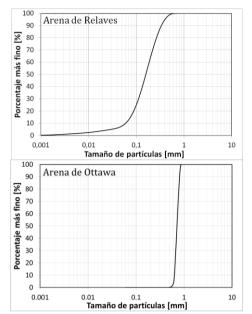


Fig. 1 – Fotografía microscópica y distribución granulométrica de la arena de relaves.

IΡ **USCS** Material %Finos G_s D_{100} \mathbf{C}_{C} \mathbf{C}_{U} e_{max} e_{min} NP Arena de Relaves 14 2.75 1.184 0.503 0.63 1.12 3.13 SM 0.723 0.99 Arena de Ottawa 0 2.65 0.507 0.93 1.17 SP

Tabla 1 – Propiedades índices de la arena de relaves.

El equipo triaxial de altas presiones utilizado en esta investigación fue diseñado e implementado en el Laboratorio de Sólidos y Medios Particulados de la Universidad de Chile por Solans [Ref. 1]. Este equipo permite la ejecución de ensayos monótonos y cíclicos a presiones de confinamiento de hasta 60 kg/cm², en probetas de 10 por 20 cm y 5 por 10 cm (diámetro-altura).

Posterior a la ejecución de los ensayos antes mencionados, se realizaron análisis granulométricos de las muestras ensayadas, con el fin de evaluar la degradación de la curva granulométrica debido a la rotura de partículas. Este análisis se llevó a cabo mediante el equipo Mastersizer 2000 perteneciente al Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Este equipo, además de determinar la distribución granulométrica del material en un rango de tamaño entre 0.02 a 2000 µm, evalúa la superficie específica de la muestra, Sw, asumiendo para estos efectos que las partículas son esferas perfectamente lisas. Adicionalmente, mediante el uso de un microscopio, se registraron fotográficamente muestras representativas de material ensayado, con el objetivo de evaluar el grado y características de la rotura de partículas.

3 Evaluación de Rotura de Partículas

Existen numerosos intentos por cuantificar el grado de rotura que ha sufrido un suelo bajo altas presiones de confinamiento, los cuales consideran, en general, que la variación entre la distribución granulométrica inicial y post-ensayo es un indicador adecuado de la magnitud de





rompimiento sufrido por el material granular. En este sentido, Leslie [Ref. 2] propuso utilizar el porcentaje más fino a la malla donde el material original era 100% retenido y Nakata et al. [Ref. 3], utilizando este mismo concepto, definió el factor de rotura de partícula B_f. Más tarde, Leslie utilizó el aumento en el porcentaje más fino a la malla donde el material original era retenido en un 90% [Ref.4]. Marsal [Ref. 5] definió el parámetro B_g como la suma de las diferencias positivas en los porcentajes retenidos registrados en cada malla entre la muestra original (PR_{iORIGINAL}) y postensayo (PR_{iPOST-ENSAYO}), es decir:

$$\Delta PR_i = PR_{i_{ORIGINAL}} - PR_{i_{POST-ENSAYO}}.$$

$$B_a = \sum \Delta PR_i \quad \forall \ \Delta PR_i > 0.$$
(1)

Asimismo, Lee and Farhoomand [Ref. 6] utilizó el término "rotura relativa" ("relative crushing") definido como la razón D_{15i}/D_{15f} ; donde D_{15i} y D_{15f} son los tamaño de partícula asociados al 15% de la muestra más fina, original y ensayada, respectivamente.

Colliat-Dangus et al. [Ref. 7] propusieron el coeficiente de rotura Cc ("crushing coefficient") definido como un décimo del porcentaje más fino al tamaño de partícula donde el 90% de la muestra original es retenido. De forma similar, Lade et al. [Ref. 8] propuso el factor de rotura de partícula B₁₀ que está definido en términos del D₁₀ en la siguiente forma:

$$B_{10} = 1 - \frac{D_{10_f}}{D_{10_i}}. (2)$$

Donde, D_{10i} y, D_{10f} representan los tamaños de partícula asociados al 10% de la muestra más fina, original y ensayada, respectivamente.

Como es posible apreciar, los métodos para cuantificar rotura anteriormente mencionados coinciden en comparar un solo valor de tamaño de partícula, analizando de forma discreta las curvas granulométricas. Por el contrario, Hardin [Ref. 9] propuso utilizar los conceptos de potencial de rotura y rotura total para definir el parámetro rotura relativa. A diferencia de los métodos anteriores, el potencial de rotura y la rotura total son una medida que compara de forma continua las curvas granulométricas inicial y post-ensayo. El potencial de rotura B_p es igual al área entre la línea vertical que pasa por el diámetro D=0.074 mm (Malla #200 ASTM) y la parte de la curva granulométrica donde D>0.074 mm. De la misma forma, la rotura total B_t corresponde al área definida entre las curvas granulométricas inicial y post-ensayo para diámetros mayores a D=0.074 mm. Con estos parámetros se define la rotura relativa B_r como $B_r=B_t/B_p$. En la Fig. 2 se presenta esquemáticamente cada uno de los métodos descritos.

Otro método propuesto originalmente por Miura y Yamanouchi, y luego utilizado por Hyodo et al. [Ref. 10] considera la evaluación del grado de rotura de partículas mediante la cuantificación del área superficial de las partículas. Este método consiste en la medición del área superficial que está definida como área por unidad de volumen a partir de la siguiente relación:

$$S = S_w * \gamma_d. \tag{3}$$







Donde, S representa el área superficial, S_W corresponde a la superficie específica y γ_d es la densidad seca.

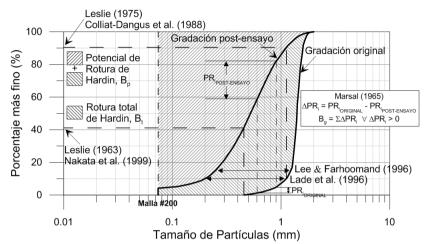


Fig. 2 – Representación gráfica de métodos para la evaluación de rotura de partículas.

4 Rotura de Partículas Bajo Confinamiento Isótropo

Al comparar las curvas granulométricas de la arena de relave obtenidas luego de la consolidación isótropa hasta una presión de confinamiento de 50 kg/cm² de muestras preparadas inicialmente a densidades relativas de 0%, 40%, 52%, 70% y 95% (Fig. 3) se observa un paulatino incremento en la fracción más fina de la muestra, que depende de la densidad relativa de confección. En el caso de la arena de Ottawa, al realizar el mismo análisis se advierte que las muestras no registraron cambios en su distribución granulométrica original, indicando que el nivel tensional aplicado es insuficiente para generar la rotura de los granos. Esto se ajusta a lo reportado por Lee and Farhoomand [Ref. 6], Hagerty et al. [Ref. 11], Lade et al. [Ref. 8], entre otros, en cuanto a que bajo similar estado tensional, las partículas redondeadas sufren menor rotura que las angulosas.

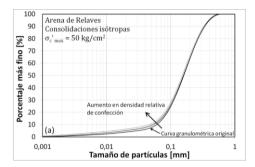
Es interesante notar que aun cuando se observa rotura de partículas en la arena de relaves sometida a consolidación isótropa, las curvas de deformación volumétrica presentadas en la Fig. 4, no indican singularidades que permitan identificar el comienzo de un quiebre importante de granos dentro del esqueleto granular. Este hecho indicaría que la rotura de partículas en esta arena, bajo el nivel tensional aplicado, corresponde a un fenómeno gradual a lo largo de la aplicación de compresión isótropa, asociado a la fractura y/o pulido de los cantos angulosos, tal como se aprecia en las fotografías de la Fig. 5, obtenidas en el estudio de Verdugo [Ref. 12] en arenas de relaves. Es esperable que dicho mecanismo de rotura genere partículas de menor tamaño que en el caso de una rotura total del grano, lo cual tiene un menor efecto en términos de cambio de volumen y por tanto explicaría el comportamiento de compresión volumétrica exhibido. Lo anterior se condice con la degradación observada de la curva granulométrica, que consiste principalmente en un aumento en el porcentaje de material fino (< malla #200).

Con el objetivo de cuantificar la cantidad de rotura producida en la arena de relaves, se han evaluado, en cada muestra, diferentes parámetros propuestos en la literatura técnica. Específicamente, en las gráficas de la Fig. 6 se evalúa la rotura mediante los parámetros B_r [Ref. 9], B_g [Ref. 5], D_{15i}/D_{15f} [Ref. 6], B_{10} [Ref. 8] y Área Superficial [Ref. 10], utilizando para estos efectos





Ec. (1), Ec. (2) y Ec. (3). Como se observa, a pesar que la tendencia exhibida por todos los parámetros utilizados indica que la cantidad de rotura aumenta con la densidad relativa de preparación de las muestras, la variación del área superficial presenta una mejor descripción y continuidad de los datos. Este hecho se asocia a las metodologías utilizadas en la obtención de cada parámetro.



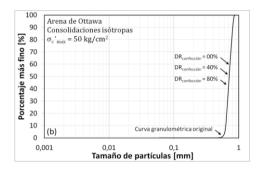


Fig. 3 – Distribución granulométrica inicial y post-consolidaciones isótropas: (a) arena de relaves y (b) arena de Ottawa.

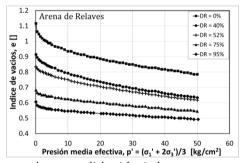


Fig. 4 – Curvas de consolidación isótropa arena de relaves.

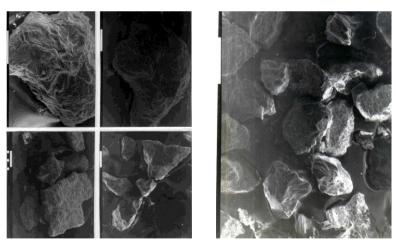


Fig. 5 – Fotografía microscópica de particulas de arena de relaves previo (izq.) y post-ensayo (der) [Ref. 12].

En efecto, mientras que para el cálculo de la variación del Área Superficial se considera toda la distribución de tamaños de partículas de las muestras, los parámetros B_g , D_{15i} / D_{15f} y B_{10} coinciden en comparar un solo valor de tamaño de partícula, analizando de forma discreta las curvas





granulométricas, lo cual evidentemente es insuficiente para describir la real magnitud de rotura. Asimismo, a pesar que en la determinación del parámetro B_r se comparan de forma continua las curvas granulométricas inicial y post-ensayo, los datos presentan una alta dispersión. Esto se debería a que el parámetro mencionado solo considera la parte de la curva granulométrica de tamaño mayor que la malla #200, lo cual no permite representar adecuadamente casos donde la rotura de partículas este asociada principalmente a la generación de material fino proveniente de rotura superficial de los cantos angulares .

Consecuentemente, es posible indicar que la variación de área superficial es el parámetro más adecuado para cuantificar el fenómeno de rotura de partículas cuando dicho fenómeno este asociado principalmente a la generación de material fino. No obstante, es importante mencionar que para la determinación de la superficie específica S_w, y por ende, el área superficial, se asume que las partículas son esferas perfectamente lisas, lo cual induce cierto error en las mediciones de muestras con partículas angulares.

Al contrario de lo reportado en la literatura técnica [Ref. 9, 11, 13], el efecto de la rotura de partículas en la arena de relaves es más importante a medida que la densidad relativa de confección aumenta. Solans [Ref. 1] utilizando la misma arena de relave en ensayos de consolidación isótropa observó el mismo comportamiento. Este resultado podría deberse a que, por las características angulosas de las partículas de arena de relave y por el contenido de finos, las muestras más sueltas poseen estructuras con grandes vacíos, lo que permite una mayor capacidad de reordenamiento o de reorganización de las partículas antes de que la rotura comience.

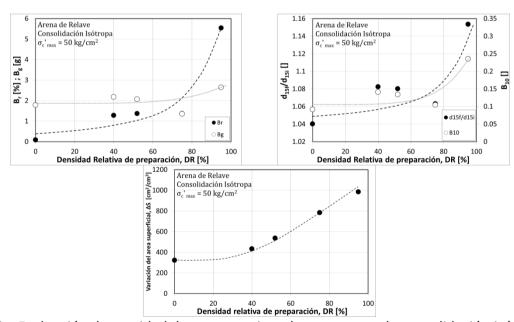


Fig. 6 – Evaluación de cantidad de rotura registrada en ensayos de consolidación isótropa.

5 Rotura de Partículas Bajo Carga Axial

En la Fig. 7 se presentan las trayectorias de tensiones efectivas de ensayos CIU, bajo una presión de confinamiento de 20 kg/cm², obtenidos en muestras de arena de relaves preparadas a densidades relativas de 20%, 40%, 52%, 65%, 75% y 90%. El comportamiento tensión-deformación



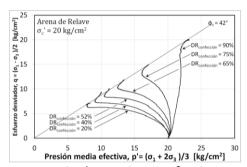




y de generación de presiones de poros se encuentra contenido en el trabajo de Maureira [Ref. 14]. En dicha figura, además, se presentan las curvas granulométricas post ensayo. Se observa que la cantidad de rotura es mayor a medida que la densidad relativa de confección aumenta, lo que se puede relacionar con la magnitud del esfuerzo de corte aplicado.

De igual forma que en el caso de consolidación isótropa, para cuantificar la cantidad de rotura se han evaluado los parámetros B_r , B_g , D_{15i} / D_{15f} , B_{10} y Área Superficial, cuyos resultados se presentan en las gráficas de la Fig. 8. Se advierte que la tendencia exhibida por todos los parámetros indica que la magnitud de rotura es una función creciente con la densidad relativa de preparación de las muestras. Resultados similares han sido obtenidos por Lee and Farhoomand [Ref. 6], Lo and Roy [Ref. 15], Colliat-Dangus et al. [Ref. 7], entre otros.

Por otra parte, se observa nuevamente que el parámetro que presenta la menor dispersión de los datos corresponde a la variación del área superficial, lo que se condice con que el fenómeno de rotura de partículas consiste principalmente en la generación de material fino.



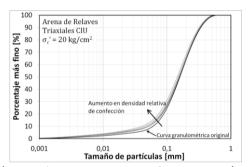


Fig. 7 – Trayectoria de tensiones efectivas y granulometrias post ensayos CIU, arena de relaves.

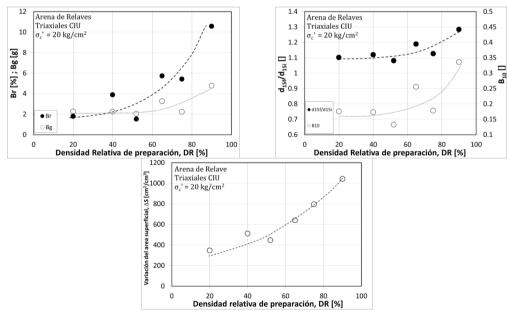


Fig. 8 – Evaluación de cantidad de rotura registrada en ensayos triaxiales CIU.

Con el objetivo de comparar el efecto de la aplicación de esfuerzos de corte sobre arenas naturales, se presentan en la Fig. 9, las curvas granulométricas post-ensayos CID en muestras de arena de Ottawa. Estos resultados indican que se necesita solicitaciones mayores para producir el

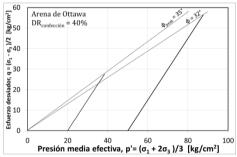




fracturamiento de las partículas. Adicionalmente, al observar las curvas granulométricas de la arena de Ottawa posterior a ensayos de consolidación isótropa (Fig. 3b), se verifica que la rotura registrada en el ensayo triaxial a la presión de confinamiento máxima es solo producto de la aplicación de corte.

A diferencia de la arena de relaves, en la arena de Ottawa se registra una considerable menor cantidad de rotura, lo que se estima es debido a los diferentes mecanismos de fracturamiento de las partículas. En la arena de relaves se observa la generación de material fino debido, en mayor medida, a la rotura y pulido de los cantos angulosos incluso desde presiones bajas, mientras que en la arena de Ottawa se produce la desintegración total de la partícula solo cuando es solicitada por esfuerzos de corte bajo el confinamiento máximo utilizado. Consecuentemente, la cantidad de rotura, en términos de variación del área superficial, es significativamente mayor en la arena de relaves.

En la Fig. 10 se presentan fotografías microscópicas de las muestras de arena de relaves y Ottawa sujetas a ensayos de compresión triaxial. Al comparar dichas fotografías con las presentadas en la Fig. 1, se corrobora visualmente, en la arena de relaves, una degradación de la angulosidad de los granos y la existencia de mayor cantidad de partículas finas. En cambio, en la arena de Ottawa, se observa que el fenómeno de rotura está asociado a la desintegración total de las partículas.



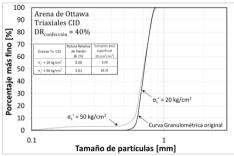


Fig. 9 – Distribución granulométrica inicial y post-ensayos triaxiales CID en arena de Ottawa.

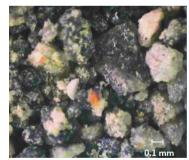




Fig. 10 – Fotografías microscópicas de muestras representativas de arena de relaves y de Ottawa post-ensayos triaxiales.

6 Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos de la ejecución del programa de ensayos experimentales considerados en este trabajo, es posible concluir lo siguiente:

 El rango de esfuerzos desviadores y presiones de confinamiento utilizados en este estudio sobre muestras de arena de relave genera rotura de partículas que depende





principalmente de la densidad relativa de preparación y del nivel tensional aplicado. Se verifica una relación creciente entre la variación del área superficial y la densidad relativa de ensayo tanto en ensayos de consolidación isótropa como en ensayos triaxiales no drenados en compresión.

- Al comparar las características de la rotura de partículas generada por la aplicación de altas presiones sobre las dos arenas utilizadas en este estudio, se verifica la existencia de diferentes mecanismos de fracturamiento. En la arena de relaves se observa la generación de material fino debido, en mayor medida, a la rotura y pulido de los cantos angulosos incluso desde presiones bajas, mientras que en la arena de Ottawa se produce la desintegración total de la partícula solo cuando es solicitada por esfuerzos de corte bajo el confinamiento máximo utilizado.
- Con respecto a la determinación de la cantidad de rotura registrada por la arena de relaves, se advierte que la variación del área superficial proporciona una mejor interpretación de los datos en comparación con otros parámetros propuestos en la literatura técnica. Esto debido a que la determinación de la superficie especifica toma en cuenta incluso a la fracción más fina de la muestra, mientras que los restantes parámetros coinciden en analizar de forma discreta las curvas granulométricas, considerando sólo partículas mayores a 0.074 mm (malla #200), lo cual evidentemente es insuficiente para describir la real magnitud rotura, aún más cuando el fenómeno está asociado principalmente a la generación de material fino.

Referencias

- [1] Solans D. Equipo Triaxial Monótono y Cíclico de Altas Presiones y su Aplicación en Arenas de Relaves. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería mención Ingeniería Geotécnica y Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile; 2010.
- [2] Leslie D D. Large Scale Triaxial Test on Gravelly Soils. Proc. 2nd Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brazil, Vol. 1; 1963. p. 181-202.
- [3] Nakata Y, Hyde A F L, Hyodo M, Murata H. *A Probabilistic Approach to Sand Particle Crushing in the Triaxial Test*. Geotechnique, Vol. 49 (5); 1999, p. 567-583.
- [4] Leslie D D. *Shear Strength of Rockfill.* Physical Properties Engineering Study No. 526, South Pacific Division, Corps of Engineers Laboratory, Sausalito, California; 1975, p. 124.
- [5] Marsal R J. *Discussion of Shear Strength*. Proc. 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Vol. 3; 1965, p. 310-316.
- [6] Lee K L, Farhoomand I. *Compressibility and Crushing of Granular Soil in Anisotropic Triaxial Compression*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 4 (1); 1967, p. 68-86.
- [7] Colliat-Dangus J L, Desrues J, Foray P. *Triaxial Testing of Granular Soil Under Elevated Cell Pressure*. Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM, STP 977; 1988, p. 290-310.
- [8] Lade P V, Yamamuro J A, Bopp P A. Significance of particle crushing in granular materials. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 122 (4); 1996, p. 309-316.







- [9] Hardin B O. *Crushing of Soil Particles*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111 (10); 1985, p. 1177-1192.
- [10] Hyodo M, Hyde A F L, Aramaki N, Nakata Y. *Undrained Monotonic and Cyclic Shear Behaviour of Sand Under Low and High Confining Stresses*. Soils and Foundations, Vol. 42 (3); 2002, p. 63-76.
- [11] Hagerty M M, Hite D R, Ullrich C R, Hagerty D J. *One-Dimensional High-Pressure Compression of Granular Media*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 119 (1); 1993, p. 1-18.
- [12] Verdugo R. *Influencia del Porcentaje de Finos en la Resistencia Cíclica de Arenas de Relaves.*Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [13] Bopp P A, Lade P V. *Membrane Penetration in Granular Materials at High Pressures*. Geotechnical Testing Journal, Vol. 20 (3); 1997, p. 272-278.
- [14] Maureira S. Respuesta Cíclica de Arena de Relaves en un Amplio Rango de Presiones. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería mención Ingeniería Geotécnica y Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile; 2012.
- [15] Lo K Y, Roy M. *Response of Particulate Materials at High Pressures*. Soils and Foundations, Vol. 13 (1); 1973, p. 61-76.