

Comportamiento de Arenas de Tronadura de Bajo Coeficiente de Uniformidad en un Amplio Rango de Presiones

Felipe Urbina Espinosa

Universidad de Chile, Santiago, Chile, felurbina@ing.uchile.cl

Leonardo Dorador Ortiz

The University of British Columbia, Vancouver, Canadá, ldorador@eos.ubc.ca

RESUMO: Una gran cantidad de materiales granulares (arenas, gravas, enrocados) son generados en la industria minera tanto en la etapa de construcción como en la operación. Desde un punto de vista de la caracterización geotécnica, estudios previos recientes han destacado que estos materiales de minería difieren notoriamente de materiales granulares transportados (gravas fluviales, etc.) al ser ensayados en pruebas de resistencia al corte. Así, con el objetivo de avanzar en el conocimiento de las propiedades geotécnicas de materiales granulares provenientes de actividad minera, esta investigación se basa en el estudio del comportamiento mecánico de arenas provenientes de tronaduras sometidas a un amplio rango de presiones, en la cual parámetros tales como el ángulo de fricción interna, módulo de deformación y rotura de partículas son analizados. Estas arenas estudiadas provienen de un pórfido Sericítico del proyecto minero Chuquicamata Subterráneo (CODELCO - PMCHS). Para realizar esta investigación se llevó a cabo un plan de ensayos consistente en pruebas triaxiales de resistencia al corte, en muestras de suelo consolidadas isotrópicamente drenadas, con un amplio rango presiones de confinamiento de 100, 300, 600, 1000 y 2000 [kPa]. Las probetas utilizadas son remoldeadas de 5 [cm] de diámetro y altura de 10 [cm] las cuales han sido confeccionadas con densidad relativa inicial 0%. La granulometría de las muestras es uniforme (coeficiente de uniformidad menor a 2) la cual ha sido definida mediante homotecia respecto a la granulometría in situ, mientras que la relación entre el tamaño máximo de partícula y el diámetro de la probeta es 1/10. Los resultados obtenidos en las pruebas triaxiales muestran un comportamiento marcadamente contractivo junto con un decaimiento significativo del ángulo de fricción interna incluso para bajos niveles de presión de confinamiento. Los resultados de módulo de deformación son destacablemente bajos y crecientes con la presión de confinamiento. En cuanto a los resultados de rotura de partícula, estos son cuantificados usando el parámetro de rotura relativa de Hardin Br, con el cual es posible evidenciar una notable cantidad de rotura la cual aumenta junto con la presión de confinamiento. Dentro de este trabajo es también discutido el efecto de la forma, dureza, rotura de partículas y coeficiente de uniformidad en el comportamiento mecánico que presentan las arenas utilizadas. Finalmente los resultados son comparados con datos disponibles en la literatura técnica.

PALAVRAS-CHAVE: Comportamiento de arenas, Rotura de partículas, Arenas de tronadura.

1 INTRODUCCIÓN

Una gran cantidad de materiales granulares (arenas, gravas, enrocados) son generados día a día en proyectos mineros de rajo abierto como de tipo subterráneos durante la construcción y operación. Estos materiales están asociados a

grandes botaderos de desmonte, stockpiles dentro del circuito de procesamiento de minerales y presas de arenas y enrocados para contener relaves, principalmente. Desde un punto de vista de la caracterización geotécnica, estudios previos recientes (Despessailles 2014, Urrutia & Dorador 2016) han destacado que

estos materiales de minería difieren notoriamente de materiales granulares transportados (e.g. gravas fluviales) al ser ensayados en pruebas de resistencia al corte.

Así, con el objetivo de contribuir en un mayor conocimiento de las propiedades geotécnicas de materiales granulares provenientes de actividad minera, esta investigación se basa en el estudio del comportamiento mecánico de arenas provenientes de tronaduras estudiadas en un amplio rango de presiones, en la cual parámetros tales como el ángulo de fricción, módulo de deformación y rotura de partículas son evaluados. Estas arenas estudiadas provienen de un pórfido sericítico del nuevo proyecto minero Chuquicamata Subterráneo (CODELCO - PMCHS).

2 ESTUDIOS PREVIOS

Existen distintos factores que afectan el comportamiento mecánico de una arena, algunos de los cuales se discuten a continuación.

La granulometría es uno de los factores más importantes en el comportamiento de un suelo (Santamarina y Cho, 2004). Estudios muestran que la resistencia mecánica disminuye junto con el descenso del coeficiente de uniformidad, mientras la compresibilidad aumenta (Lee y Farhoomand, 1967). Otro factor de importancia es la forma de la partícula, la que a su vez comprende forma, esfericidad y rugosidad (Dodds, 2003). Partículas con mayor angulosidad y rugosidad presentarán una mayor resistencia mecánica, como también partículas con un radio de aspecto (relación entre largo y ancho de partícula) mayor promoverán la dilatancia.

Además de la granulometría y la forma de partículas, las cuales corresponden a características intrínsecas del material, destacan variables de estado tal como la presión de confinamiento a la que está sometido un suelo. Diversos estudios muestran una caída de la resistencia al corte en arenas al aumentar el nivel de tensiones (Lee y Seed, 1967) asociado frecuentemente al fenómeno de rotura de partículas.

Respecto al fenómeno de rotura de partículas, un interesante estudio fue llevado a cabo por Lee y Farhoomand (1967) en suelos de distintas características. Ellos concluyen que la rotura de partículas es afectada por el tamaño de partículas, angulosidad de partículas, el tiempo, uniformidad de granulometría y anisotropía de esfuerzos.

3 MATERIAL

Para esta investigación se han utilizado arenas provenientes de tronaduras del frente de excavación del Proyecto Minero Chuquicamata Subterráneo (PMCHS), donde la unidad litológica extraída fue Pórfido Este Sericítico (PES). La muestra original proviene de la tronadura de un túnel y contiene un gran rango de tamaño de partículas; desde finos a bloques de diámetro superior a un metro. El material fue directamente transportado desde el punto de extracción al acopio del laboratorio IDIEM de la Universidad de Chile, desde donde a través de tamizado se ha obtenido la fracción a utilizar en el set de ensayos. Esto último es un punto significativo ya que las partículas no han sufrido un proceso de desgaste y rotura, tal como ocurre en materiales de lastres de botaderos mineros.

Desde el material in situ tronado fue extraído material de tamaño de arenas, y se reprodujo la granulometría de la Figura 1 en la cual el tamaño máximo de partículas es de 4,75 [mm], mientras que las propiedades índice del material también se presentan en la misma figura. La Figura 2 muestra una fotografía representativa del material retenido en la malla #10.

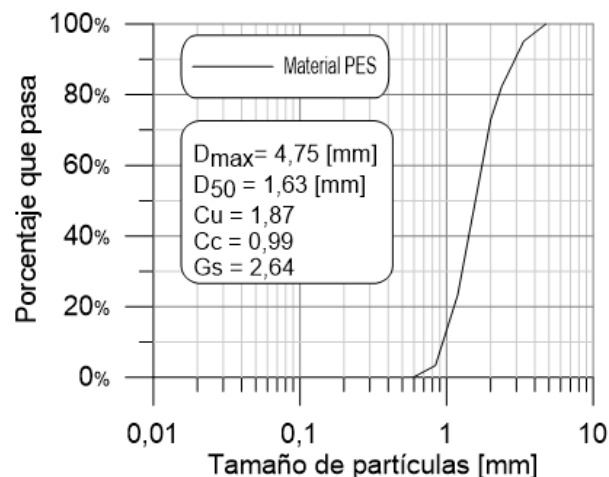


Figura 1. Granulometría empleada en ensayos.



Figura 2. Material retenido en malla #10.

4 METODOLOGÍA

Para realizar esta investigación se llevó a cabo un plan de ensayos ejecutado en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile consistente en pruebas triaxiales de resistencia al corte realizadas en muestras de suelo consolidadas isotrópicamente drenadas, con presiones de confinamiento de 100, 300, 600, 1000 y 2000 [kPa]. Los primeros 3 ensayos fueron ejecutados en equipos triaxiales convencionales, mientras que los 2 últimos fueron ejecutados en el aparato triaxial de altas presiones diseñado y construido por Solans (2010). Las probetas utilizadas son remoldeadas de 5 [cm] de diámetro y altura de 10 [cm] las cuales han sido confeccionadas con densidad relativa inicial 0% correspondiente a una densidad de 1,35 [gr/cm³]. Además, se mantuvo una relación entre el tamaño máximo de partículas y el diámetro de la probeta de 1/10. En todos los casos el ensayo ha finalizado al alcanzar una deformación axial cercana al 20 [%]. La Tabla 1 muestra un resumen de los ensayos realizados

Tabla 1. Ensayos realizados.

Nº Ensayo	Presión de confinamiento [MPa]	DR de confección [%]	DR tras consolidación [%]
1	0,1	0	10
2	0,3	0	18
3	0,6	0	22
4	1,0	0	29
5	2,0	0	59

5 RESULTADOS

Los resultados del plan de ensayos realizado muestran un comportamiento levemente dilatante para la probeta sometida a una presión de confinamiento de 100 [kPa], la cual también presenta un peak de resistencia seguido de una leve disminución de la misma. Para los siguientes ensayos, con presión de confinamiento de 300 [kPa] y superior, el comportamiento es marcadamente contractivo y la máxima resistencia es alcanzada junto con la máxima deformación desarrollada. Las curvas de tensión – deformación son presentadas en la Figura 3.

La Figura 4 presenta la envolvente de falla obtenida en el espacio esfuerzo de corte v/s esfuerzo normal, donde es apreciable la degradación de la resistencia con el aumento de la tensión normal. Este resultado muestra que el criterio de envolvente de falla lineal Mohr-Coulomb no resulta apropiado para caracterizar este tipo de materiales.

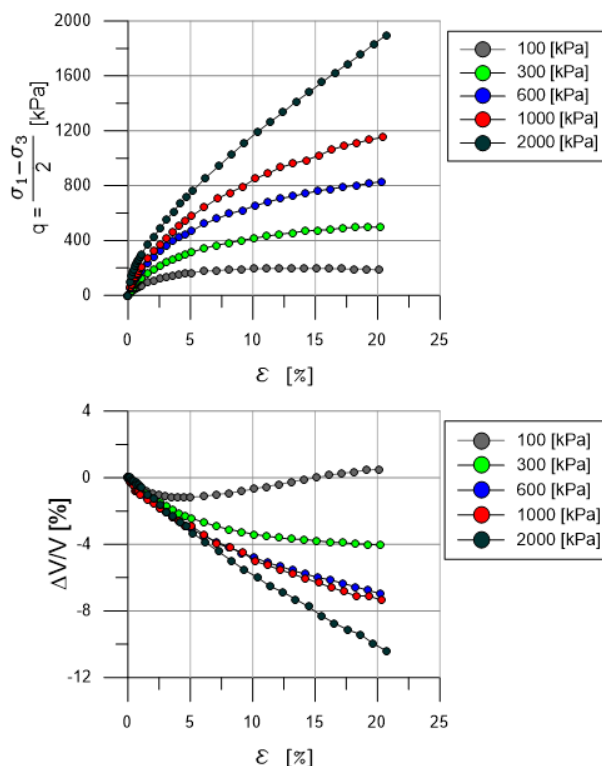


Figura 3. Curvas de tensión – deformación.

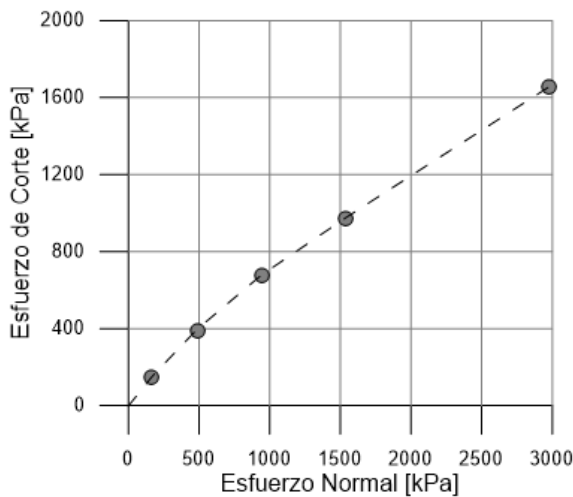


Figura 4. Envolvente de falla en espacio τ v/s σ_n .

A fin de caracterizar la resistencia de cada probeta se ha utilizado el ángulo de fricción máximo desarrollado, el cual es calculado con la tangente al círculo de Mohr, asumiendo una cohesión nula. Esto se expresa matemáticamente en la Fórmula 1.

$$\phi = \text{seno}^{-1} \left(\frac{(\sigma_{1\text{máx}} - \sigma_3)/2}{(\sigma_{1\text{máx}} + \sigma_3)/2} \right) \quad (1)$$

Este parámetro es graficado en función de la presión de confinamiento en la Figura 5, en la que se observa una caída de cerca de 12° en el ángulo de fricción para el rango de presiones de confinamiento utilizados.

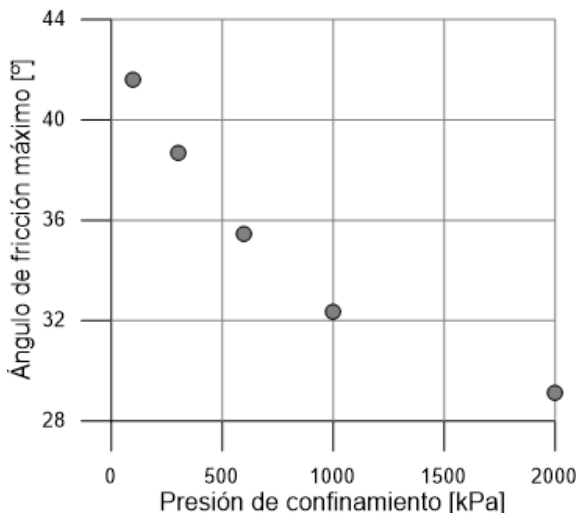


Figura 5. Ángulo de fricción máximo v/s Presión de confinamiento

Por otro lado, en la Figura 6 se presentan los resultados de compresibilidad obtenidos, los

cuales destacan por sus bajos valores, y que varían entre los 10 y 30 [MPa]. Este comportamiento de deformación está asociado a la baja densidad de confección utilizada y al bajo coeficiente de uniformidad. También se destaca la tendencia creciente del parámetro E_{50} con la presión de confinamiento y el ajuste logarítmico de este crecimiento.

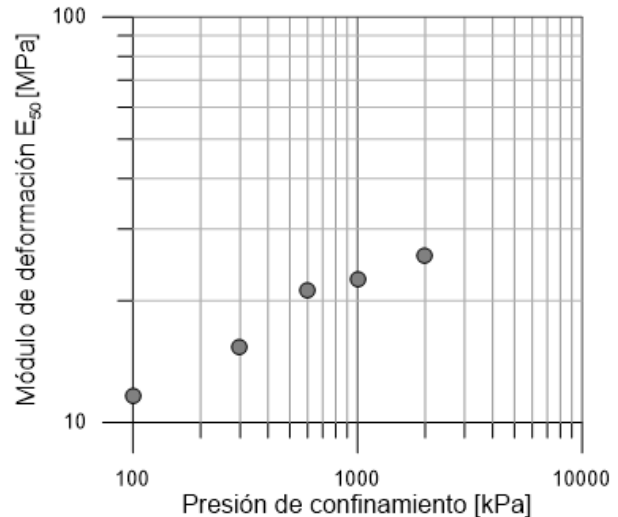


Figura 6. Módulo de deformación E_{50} v/s Presión de confinamiento

Respecto a la rotura de partículas, se ha verificado la granulometría resultante tras el ensayo triaxial, comparándola con la granulometría original. En la Figura 7 se presentan la distribución de tamaños obtenida, siendo evidente que ante una mayor presión de confinamiento existe un aumento de rotura de partículas lo cual se expresa en el desplazamiento de la curva granulométrica a la izquierda del gráfico.

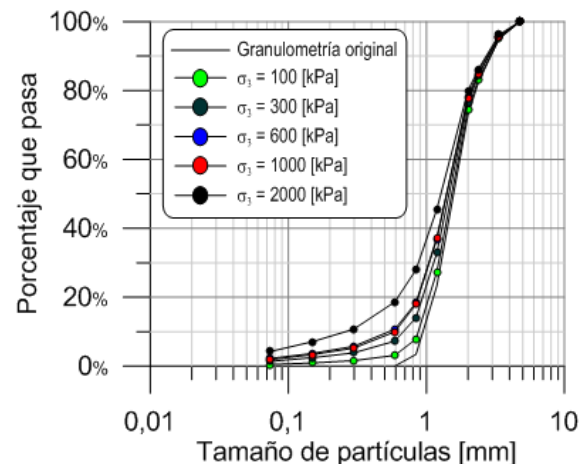


Figura 7. Granulometría original y granulometrías post-ensayo.

Para cuantificar la rotura de partículas se ha utilizado el parámetro *Br* de rotura relativa de Hardin (1989), que es uno de los parámetros de rotura de partículas más utilizados en la literatura técnica. La Figura 8 grafica los resultados al usar este parámetro, donde se confirma la tendencia de aumento de rotura con la presión de confinamiento. Sólo en los ensayos sometidos a presiones de confinamiento de 600 [kPa] y 1000 [kPa] se observa que la rotura relativa presenta una variación muy pequeña, siendo interesante notar que en este par de ensayos las curvas de deformación volumétrica tienen un comportamiento casi idéntico (Figura 3). El ensayo realizado a presión de confinamiento 2000 [kPa] presenta un gran aumento de rotura relativa respecto a los ensayos realizados a presiones menores.

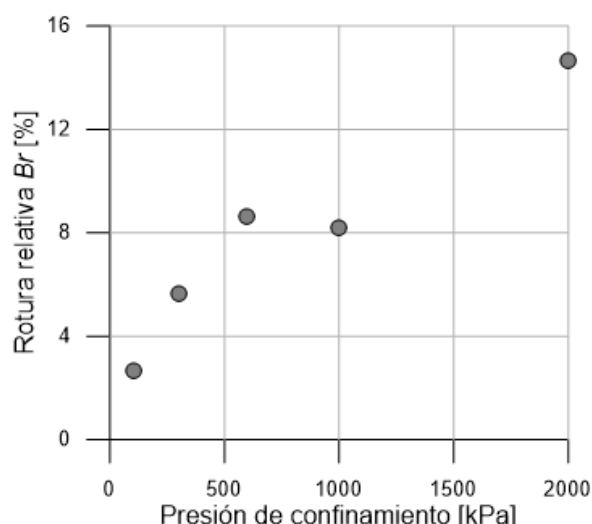


Figura 8. Parámetro de rotura relativa *Br* v/s presión de confinamiento.

6 COMPARACIÓN CON OTROS RESULTADOS

En esta sección, los resultados obtenidos en este trabajo son comparados con otras investigaciones realizadas en muestras de arenas provenientes de minería. Las principales características de los materiales referenciados se presentan en la Tabla 2.

Ensayos triaxiales en muestras de ripios lixiviado fueron realizados por Dorador (2010) utilizando presiones de confinamiento entre 100 y 600 [kPa]. Por otro lado, Besio (2012) investigó materiales provenientes de una cantera de mármol negro realizando ensayos de hasta

2000 [kPa]. Ambos estudiaron la fracción de arena de sus materiales originales. También Stoeber (2012) estudió roca de desecho minero (MWR) en muestras de tamaño máximo de partículas de 11.2 [mm] bajo densidad relativa suelta, media densa y densa, con un contenido de finos de 7,8%. Sus ensayos correspondieron a ensayos triaxiales CID bajo presiones de confinamiento de 100, 200 y 400 [kPa].

Estos resultados, junto con los de la presente investigación, se muestran en la Figura 9 en la que se observa que el material PES es el que presenta una mayor caída de su resistencia al corte aunque no es el material con menores ángulos de fricción en presiones de confinamiento menores a 600 [kPa]. Este comportamiento se asocia a que la significativa rotura del material degrada su resistencia al corte al aumentar su compresibilidad.

Además de los estudios de Dorador (2010) y Besio (2012), D'espessailles (2014) también estudió arenas de material PES provenientes del PMCHS mediante ensayos de corte simple utilizando tensiones normales de 100 a 700 [kPa] en muestras de densidad suelta (0% D_R , "PES CS-Suelto") y densa (100% D_R , "PES CS-Denso").

Tabla 2. Propiedades de materiales de minería citados.

Material	Forma de partícula	Dmax [mm]	Cu	Cc	USCS
M.N.*	Angular	4,75	39,7	3,9	SP
R.L.*	Angular a subangular	4,75	10,85	1,09	SW
R.L.*	Angular a subangular	2,4	5,48	1,57	SP
MWR/W*	Angular	11,2	21,7	2,2	SW-SC
PES C.S.*	Angular	4,75	1,63	0,91	SP

(*):M.N.: Mármol Negro (Besio 2012)

R.L.: Ripio Lixiviado (Dorador 2010)

MWR/W: Roca de desecho minero meteorizada (Stoeber 2012)

PES C.S.: Pórfido Este Sericítico, ensayada en Corte simple (D'Espessailles 2014)

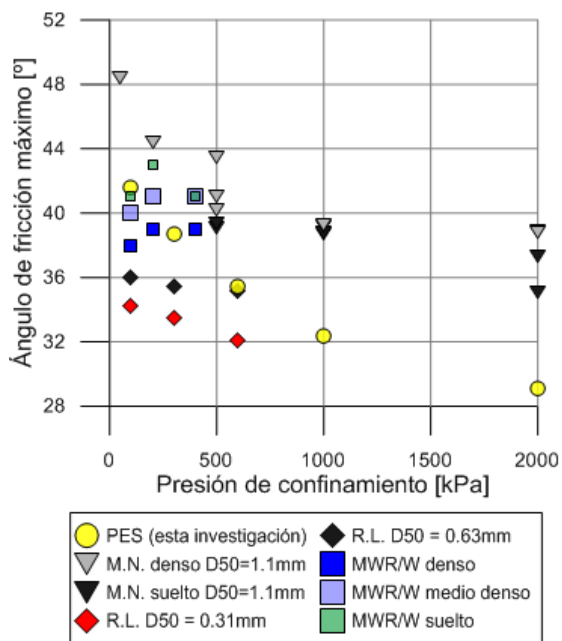


Figura 9. Comparación de ángulo de fricción máximo con otras arenas provenientes de minería.

Estos resultados proveen una interesante comparación de la cantidad de rotura producida en el ensayo triaxial y en el ensayo de corte simple, la cual es presentada en la Figura 10. En esta es posible observar que la rotura de partículas del material PES CS-Suelto produjo roturas muy similares a las obtenidas en esta investigación, excepto por el ensayo a 100 [kPa] que produjo mucha rotura. Por otro lado, el material PES CS-Denso obtuvo en general una rotura de partículas mayor al material PES CS-Suelto y al material ensayado en esta investigación. En la Figura 10 también se han incluido resultados de rotura relativa obtenidos por Stoeber (2012) quien estudió roca de desecho minero (MWR). La rotura de partículas obtenida en el material MWR meteorizado (MWR/W) es significativamente mayor a la obtenida en el material PES. Esto puede asociarse al mayor tamaño de partícula, a la meteorización del material y también a las mayores densidades post-consolidación.

Así, los resultados de esta investigación, junto con la revisión de literatura técnica presentada corroboran la fuerte influencia del nivel de esfuerzos en el ángulo de fricción interna y rotura de partícula experimentada por estos materiales provenientes de actividad minera.

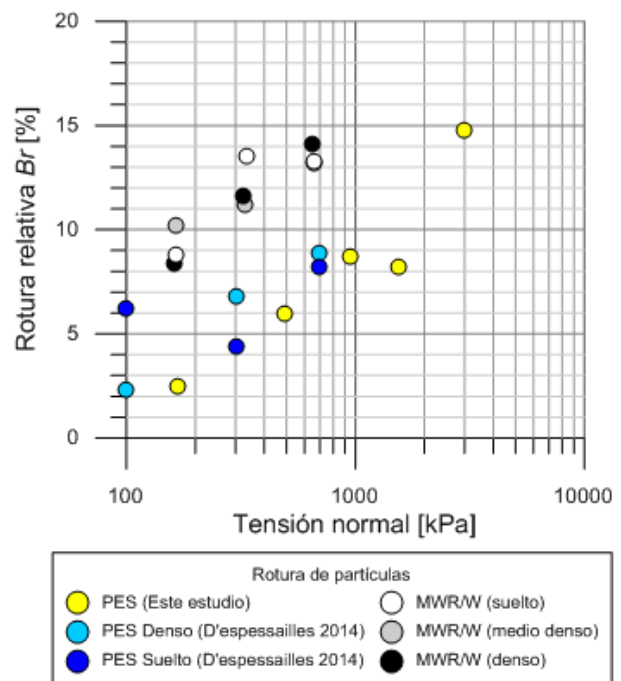


Figura 10. Comparación de rotura relativa (Br) para distintos materiales provenientes de minería.

7 CONCLUSIONES

Este trabajo de investigación resalta el rol del nivel de esfuerzos en el comportamiento y rotura de partículas en materiales granulares provenientes de actividad minera.

Los resultados de los ensayos triaxiales consolidados isotrópicamente drenados en arenas de tronadura de esta investigación muestran un comportamiento marcadamente contractivo junto con un decaimiento significativo del ángulo de fricción interna en todo el rango de niveles de presión de confinamiento; esta caída de resistencia destaca entre otros materiales de minería presentados. Además, los resultados de módulo de deformación son destacablemente bajos y crecientes con la presión de confinamiento. En cuanto a los resultados de rotura de partícula, estos son cuantificados usando el parámetro de rotura relativa de Hardin (1985), con el cual es posible evidenciar una notable cantidad de rotura la cual aumenta junto con la presión de confinamiento. También se concluye que en el ensayo de corte simple se observa una mayor rotura de partículas que en el ensayo triaxial para muestras de material PES.

Finalmente, este trabajo también permitiría corroborar el hecho de que materiales

granulares (en este caso arenas) provenientes de actividad minera y/o que no han sufrido procesos de erosión, desgaste, etc., poseen distintos comportamientos y características geotécnicas que arenas de tipo *transportadas* (arenas de río, dunas, etc.), que comúnmente son utilizadas como referencia en la caracterización geotécnica de suelos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Codelco- División Chuquicamata subterráneo), en especial a Augusto Aguayo y Daniela Villegas por el gran apoyo a esta investigación y por permitir publicar estos resultados. También se agradece al Laboratorio de Sólidos, Medios Particulados y Estructuras de la Universidad de Chile por la utilización de sus dependencias, y a Omar Gonzalez y Mario Carrillo por su gran apoyo en la ejecución del programa de ensayos.

REFERENCIAS

- Besio, G. (2012). *Uso del método de curvas homotéticas en la representación de ensayos monotónicos y cíclicos en suelos gruesos*. Tesis de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- D'Espessailles, N. (2014). *Estudio del comportamiento y rotura de arena de corte simple y monótono*. Tesis de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Dodds, J. (2003). *Particle shape and stiffness - Effects on soil behavior*. Degree of Master of Science. Georgia Institute of Technology
- Dorador, L. (2010). *Análisis experimental de las metodologías de curvas homotéticas y corte en la evaluación geotécnica de suelos gruesos*. Tesis de Ingeniero Civil y Magister. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Hardin, B. O. (1985) Crushing of soil particles. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 111, no 10, p. 1177-1192.
- Lee, K. L. y Farhoomand, I. (1967) Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 4, no 1, p. 68-86.
- Lee, K. L., and Seed, H. B. (1967). "Drained strength characteristics of sands." *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*
- Santamarina, J.C. y Cho, G.C. (2004). Soil behaviour: The role of particle shape. *Advances in Geotechnical Engineering*. Proceedings of the Skempton Conference, Vol. 1, p. 604-617.
- Solans D. (2010). *Equipo triaxial monótono y cíclico de altas presiones y su aplicación en arenas de relaves*. Tesis de Ingeniero Civil y Magister. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Stoeber, J. (2012). *Effects of maximum particle size and sample scaling on the mechanical behavior of mine waste rock; a critical state approach*. Thesis for the Degree of Master of Science. Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University.
- Urrutia J. y Dorador L. (2016). *Análisis Experimental de Mezclas de Materiales Granulares de Distinta Resistencia Aplicado a Minería de Block Caving*. COBRAMSEG 2016 – Cong. Brasileiro Mec. dos Solos e Eng. Geotécnica – 19-22 Outubro, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil © ABMS, 2016.