

Análisis Experimental de Mezclas de Materiales Granulares de Distinta Resistencia Aplicado a Minería de Block Caving

Josefina Urrutia

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

Leonardo Dorador

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

RESUMEN: En minería de hundimiento masivo (por ejemplo block caving) es de suma importancia el comportamiento mecánico de los bloques y las partículas generadas durante la excavación, también conocido como material quebrado, los cuales son apilados en columnas de extracción. Específicamente la resistencia, compresibilidad y rotura mecánica del material quebrado son aspectos muy importantes a considerar en la optimización del plan minero. Estos materiales pueden alcanzar tamaños de bloque mayores a 2 m^3 y por lo tanto cualquier caracterización geotécnica de estos materiales es muy costosa, consume mucho tiempo y a veces es impráctica. En la práctica, estos materiales son escalados a tamaños menores que permiten que el material sea testeado en ensayos estandarizados de mecánica de suelos. En este estudio, se seleccionó la fracción de arena de un material de tronadura y se dimensionó a $d_{50} = 3 \text{ [mm]}$. Este material fue caracterizado en función de su densidad máxima y mínima, gravedad específica, y resistencia individual de sus partículas. Se reconocieron cuatro mineralogías principales en el material las cuales fueron separados en dos grupos: fuertes (cuarzo y masa fundamental) y débil (sericita y arcilla de alteración). Luego se prepararon mezclas de los materiales fuerte y débil en proporciones de 100% -0%, 75% -25%, 50% -50%, 25% -75% and 0% -100% que fueron ensayadas bajo compresión triaxial isotrópica drenada a presiones de confinamiento de 1, 6 and $20 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$.

KEYWORDS: Block caving, material quebrado, ángulo de fricción interna, rotura de partículas

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad el método de hundimiento masivo de *block caving* está siendo cada vez más utilizado en la gran minería a lo largo del mundo. El método de *block caving* consiste en la socavación de un macizo rocoso por medio de perforación y tronadura primero, para luego dejar que el macizo experimente un proceso de hundimiento debido a la gravedad y redistribución de esfuerzos en la roca. Los bloques desprendidos del macizo (conocidos como materiales quebrados) se acumulan en columnas para luego ser recolectados en puntos de extracción por medio de equipos mecanizados. Los materiales quebrados

producidos con este método se asocian comúnmente a bloques de tamaño máximo mayor a 2 m^3 , además de un tamaño medio de partículas entre 0.5 m a 1 m de diámetro, incluyendo una fracción de tamaños de gravas y arenas.

El conocimiento acabado de estos materiales (en especial de una correcta caracterización geotécnica), es fundamental para la optimización del plan de extracción en minería subterránea de *block caving*. Particularmente, es común encontrar diferentes litologías dentro de una misma columna de extracción, por lo que es de suma importancia comprender como afectan las mezclas de bloques de diferente resistencia en el comportamiento geomecánico de los

materiales, en cuanto a resistencia, compresibilidad y fragmentación secundaria, esta última asociada al fenómeno de rotura de partículas en materiales granulares.

Por otro lado, dentro de la mecánica de suelos se han realizados numerosos estudios con respecto al comportamiento de materiales granulares de origen tanto transportados como no transportados. Dentro de la literatura técnica es muy aceptado que para parámetros tales que la forma de partículas angulosas y densidad relativa alta, el ángulo de fricción interna máximo aumenta (e.g. Lee y Farhoomand, 1967). Sin embargo la mezcla de materiales granulares de distinta resistencia y su comportamiento geotécnico han sido estudiadas sólo en contadas ocasiones, pudiéndose mencionar los trabajos de Leleu y Valdes (2007), Valdes y Leleu (2008), Dorador (2010) y D'espessailles (2014).

En este trabajo se utiliza una fracción de tamaños menores de una roca tronada y se somete a ensayos triaxiales consolidados isotrópicamente drenados (CID) para estudiar cómo la mezcla de materiales granulares de diferentes litologías afecta su resistencia al corte, compresibilidad y rotura de partículas con énfasis en la influencia de la mineralogía, origen de material (transportado y no transportado) y nivel confinamiento. Así, este trabajo permite contribuir a un mejor entendimiento de la caracterización geotécnica y rotura de partículas de materiales quebrados (fragmentación secundaria) en minería de block caving.

2 COMPORTAMIENTO DE MEZCLA DE MATERIALES DE DISTINTA RESISTENCIA DE PARTÍCULAS

A continuación se presenta una resumida revisión de literatura relacionada a la resistencia, compresibilidad y rotura de partículas en mezclas de materiales de distinta resistencia individual de partículas.

2.1 Resistencia y compresibilidad

Leleu y Valdes (2007) utilizaron un aparato de

deformación uniaxial confinada (edómetro) para ensayar mezclas de material débil (arena calcárea) y fuerte (arena de cuarzo). Cuando el material fuerte es predominante ($F_q = 1, 0.9, 0.7$), siendo F_q la razón de cuarzo respecto al total de la muestra, la compresibilidad se ve muy afectada por la presencia de material débil (Figura 1). Así, cuanto mayor es la proporción de partículas débiles, menor es el esfuerzo de fluencia de la mezcla. Por el contrario, cuando el material está compuesto mayoritariamente por partículas débiles ($F_q = 0.3, 0.1, 0$), la proporción de material fuerte tiene muy poca influencia en el comportamiento global de la mezcla (Figura 2). En 2008, Valdes y Leleu presentaron un estudio similar al de 2007 pero en un aparato de corte simple. Se concluyó que a bajos esfuerzos la respuesta tensión - deformación está dada por la forma de las partículas, mientras que a altos esfuerzos el comportamiento depende de la rotura de las partículas débiles.

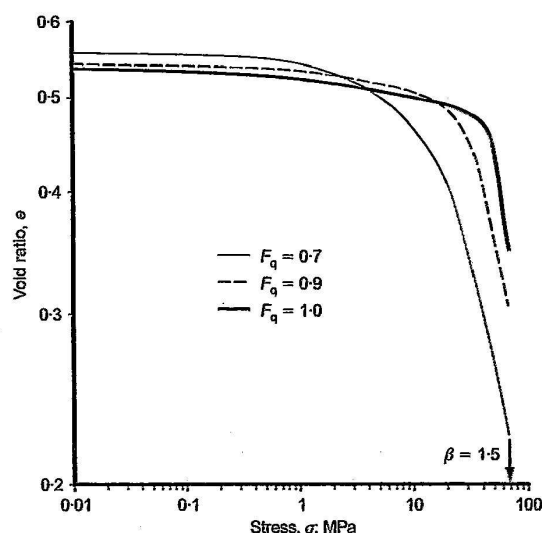


Figura 1: Variación esfuerzo de fluencia para mezclas con partículas mayoritariamente fuertes (Leleu y Valdes, 2007)

2.2 Rotura de partículas

La rotura de partículas depende de varios factores, como son la trayectoria de esfuerzos, el tamaño y forma de las partículas, el índice de vacíos, la distribución granulométrica, el estado de humedad de la muestra y la naturaleza y

mineralogía de las partículas. Estos últimos dos factores han sido poco estudiados y son el enfoque de este trabajo.

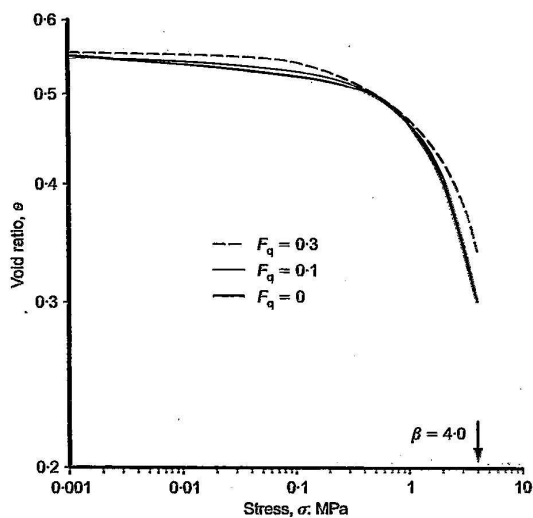


Figura 2: Variación esfuerzo de fluencia para mezclas con partículas mayoritariamente débiles (Leleu y Valdes, 2007)

En el estudio mencionado anteriormente (Leleu y Valdes, 2007), los autores realizaron granulometrías post ensayo para estudiar la rotura de partículas. Cuando la muestra está compuesta mayoritariamente por partículas fuertes, la rotura global aumenta tanto por la proporción de material débil como por la carga, y el material débil es el que sufre la mayor cantidad de rotura. Sin embargo, al aumentar los esfuerzos, la influencia de la mineralogía es sobrepasada y ambos materiales sufren una notoria cantidad de rotura de partículas.

Por otra parte, cuando el material débil es predominante en la mezcla, la rotura disminuye considerablemente al aumentar la proporción de partículas fuertes. Al igual que en el caso anterior, las partículas débiles sufren la mayor cantidad de rotura dentro de la mezcla.

Para cuantificar la rotura de partículas, varios cuantificadores se han definido en la literatura técnica tales como el B_g de Marsal et al. (1965) o el área superficial A_s (Hyodo et al. 2002). Sin embargo, en esta ocasión se ha elegido para esta investigación el índice de rotura relativa (B_r) de Hardin (1985).

3 METODOLOGÍA

El material granular utilizado en esta investigación proviene del Proyecto Minero Chuquicamata Subterránea (PMCHS, Codelco-Chile). Específicamente, el material utilizado en esta investigación pertenece a una unidad geotécnica llamada PES (Pórfido Este Sericítico), y es extraído mediante perforación y tronadura. Este material posee una densidad mínima y máxima de 1.42 y 1.81 [gr/cm³] respectivamente, y una gravedad específica de 2.66. Mediante inspección visual se identificaron cuatro mineralogías principales dentro del material: cuarzo (de origen secundario, 40%), sericita (20%), arcilla como material de alteración (15%) y masa fundamental (25%), esta última presente en dos variedades (denominadas MF1 y MF2); también se observaron pequeñas cantidades de feldespatos, plagioclasas, calcopirita y bornita (menor al 5%).

Si bien las partículas no están compuestas únicamente por un mineral o unidad litológica, si existe una predominancia en cada una de ellas lo cual permite diferenciarlas visualmente. En función de esto se realizaron 30 ensayos de compresión simple para cada unidad identificada, según las recomendaciones de McDowell, 2001). Se obtuvo que ambas masas fundamentales junto con el cuarzo presentan una resistencia individual de alrededor de 12.6 [Mpa], mientras que la arcilla de alteración y la sericita tienen una resistencia individual de 7 [MPa] en promedio. En función de esto se definió un grupo de partículas fuertes (masa fundamental 1 y 2, y cuarzo) y otro de partículas débiles (arcilla de alteración y sericita) y se definió un set de ensayos de 15 probetas para proporciones de 100-0, 75-25, 50-50, 25-75 y 0-100 de material fuerte y débil respectivamente

Las partículas se separaron una a una y se definió una granulometría con tamaño mínimo de 2 [mm] y tamaño medio 3 [mm], se utilizaron la mallas N°4, N°6, N°8 y N°10 (Figura 3) y se confeccionaron probetas de 5x10 [cm] con una densidad relativa cercana al 0%.

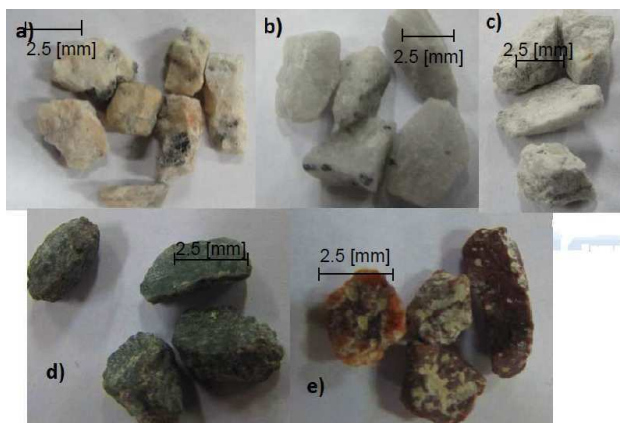


Figura 3: Muestra mineralógica de partículas, a) arcilla de alteración, b) cuarzo, c) sericita, d) masa fundamental 1 (azul), e) masa fundamental 2 (roja)

Diez de los ensayos se realizaron en un aparato triaxial convencional a presiones de confinamiento de 1 y 6 [kg/cm²]. Estas probetas se confeccionaron de la manera tradicional, siguiendo la norma ASTM D7181 – 11 pero se utilizó una máquina de vacíos para hacer más fácil la confección. Las otras cinco probetas se ensayaron en un aparato triaxial de altas presiones a 20 [kg/cm²] de confinamiento. La confección de las mismas fue similar al caso del aparato convencional pero para evitar el punzonamiento sobre la primera membrana de látex, se colocó un envoltorio de nylon en forma de falda para así evitar agregar rigidez a la probeta. Sobre este se colocó una segunda membrana, luego un segundo envoltorio similar al anterior pero esta vez de papel, y finalmente una última membrana. Si bien a altas presiones la primera membrana se rompió en varios puntos para todos los ensayos, la segunda y tercera resistieron, evitando la filtración de agua de la cámara triaxial hacia la probeta

Curva Granulométrica

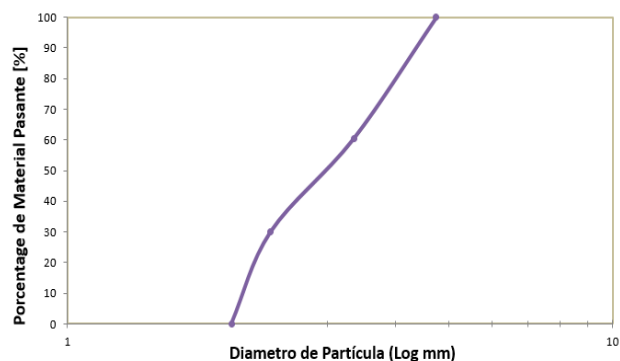


Figura 4: Curva granulométrica para probetas triaxiales en mezclas de partículas fuertes y débiles

4 RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados de los ensayos triaxiales CID ejecutados. Específicamente se presenta el comportamiento tensión-deformación y también la variación de la deformación volumétrica durante la aplicación de la carga para las cinco probetas. También se incluye el ángulo de fricción máximo de cada ensayo y la rotura de partículas medida mediante el índice de rotura relativa Br de Hardin (1985).

4.1 Curva tensión-deformación y variación volumétrica.

En la Figura 5 se aprecia el aumento de la resistencia junto con el aumento del confinamiento para las cinco mezclas; además se observa una marcada relación no-lineal, típicamente observada en enrocados y suelos granulares gruesos. No hay una tendencia que relacione la proporción de material fuerte o débil con la resistencia para una misma presión de confinamiento.

De la Figura 6 se concluye que todas las mezclas manifestaron una compresibilidad similar a los 6 y 20 [kg/cm²] de confinamiento, siendo la probeta 100%F – 0%D la de mayor variación. Así, se obtiene que la compresibilidad de la muestra no varía significativamente hacia altas presiones.

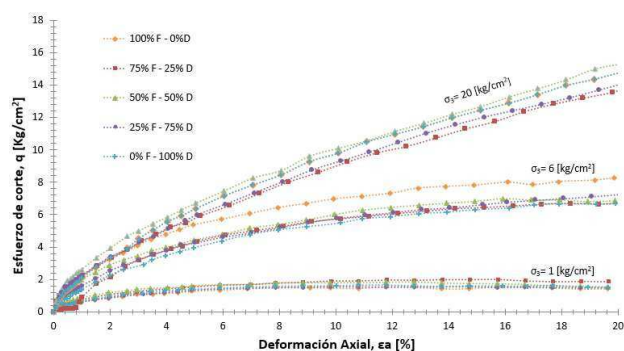


Figura 5: Esfuerzo de corte versus deformación axial para las 5 mezclas para los 3 confinamientos ensayados

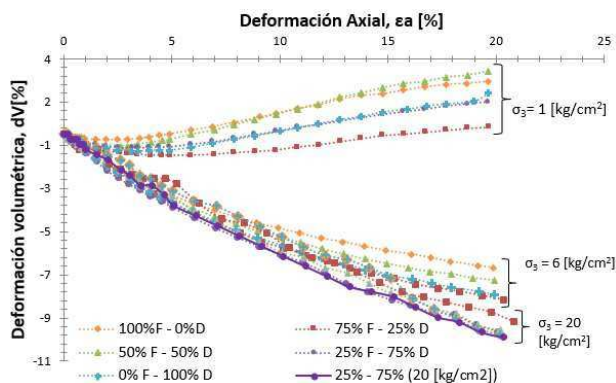


Figura 6: Deformación volumétrica versus deformación axial para las 5 mezclas para los 3 confinamientos ensayados

4.2 Ángulo de fricción máximo

Para la obtención de este valor se utilizó la siguiente fórmula deducida del círculo de falla de Mohr-Coulomb, asumiendo cohesión cero y σ'_1 y σ'_3 las tensiones principales:

$$\sin(\phi) = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{(\sigma'_1 + \sigma'_3)} \quad (1)$$

Debe aclararse que este parámetro es sólo válido para un estado de esfuerzos particular. En la siguiente tabla se presenta el ángulo de fricción máximo calculado para las 15 probetas, junto con el confinamiento y la presión máxima obtenida.

De esta tabla, es destacable la gran y drástica disminución del ángulo de fricción interna recalando que ϕ [°] llega a alcanzar los 40° lo cual es explicado por la forma angulosa de sus partículas lo que incrementa el ángulo de fricción. Considerando los ensayos a bajas presiones (1 y 6 [kg/cm²]), la caída del ángulo alcanza los 10° aproximadamente. Si se consideran los ensayos a altas presiones la diferencia alcanza un máximo de 17°. Esta diferencia en general se hace menos drástica al aumentar la cantidad de material débil en la probeta.

Este interesante resultado se puede explicar por la diferencia en la resistencia individual de las partículas. A bajas presiones la alta resistencia individual de las partículas fuertes contribuye a la resistencia global del material. Sin embargo, al aumentar el rango de presiones

tanto las partículas débiles como las fuertes sometidas a importante concentración de esfuerzos sufren rotura, disminuyendo el ángulo de fricción. Por esto a mayores presiones de confinamiento el ángulo de fricción para las diferentes mezclas comienza tender a un mismo valor.

Tabla 1: esfuerzo de confinamiento, esfuerzo principal vertical máximo, esfuerzo normal y ángulo de fricción máximo para mezclas fuerte – débil

%F-%D	σ_3 [kg/cm ²]	$\sigma_{1 \text{ max}}$ [kg/cm ²]	σ_n [kg/cm ²]	Φ' [°]
100-0	1	4,13	3,18	37,6
75-25	1	5,01	4,49	41,9
50-50	1	4,69	3,99	40,4
25-75	1	4,11	3,15	37,5
0-100	1	4,35	3,49	38,8
100-0	6	22,56	16,06	35,4
75-25	6	19,36	12,00	31,8
50-50	6	19,97	12,74	32,5
25-75	6	20,54	13,45	33,2
0-100	6	19,37	12,01	31,8
100-0	20	49,67	23,38	25,2
75-25	20	48,27	21,96	24,5
50-50	20	50,65	24,39	25,7
25-75	20	48,33	22,02	24,5
0-100	20	49,67	23,38	25,2

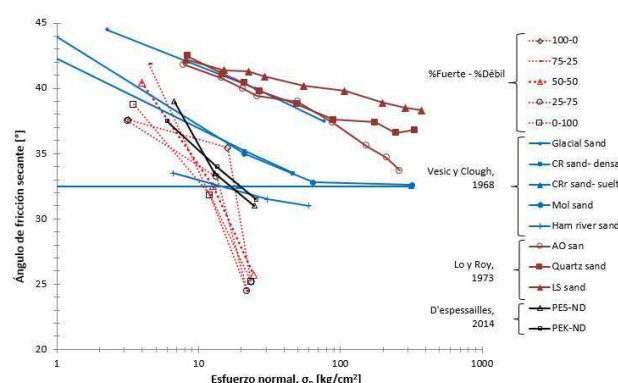


Figura 7: Ángulo de fricción máximo para varias arenas

En la figura 7 se comparan los resultados obtenidos en este trabajo con los de otras arenas reportadas en la literatura técnica. Se incluye las arenas: Glacial, Chatahooche river (CR) en estado denso y suelto, Mol y Ham river (Vesic y Clough, 1968). También se incluyen óxido de

aluminio (OA) que es un mineral artificial, la arena de cuarzo y la arena de caliza (LS) (Lo y Roy, 1973), todas no transportadas. Todas las arenas mencionadas anteriores fueron ensayadas bajo compresión triaxial CID. También se incluyen los resultados de D'espessailles (2014), sobre un material PES (relativamente similar al utilizando en esta investigación) y PEK (pórfido este potásico), ambos obtenidos del proyecto minero PMCHS (Codelco-Chile) y sometidos a ensayos de corte simple. Es importante destacar que tanto las arenas de esta investigación como las de Lo y Roy (1973) y D'espessailles (2014) son del tipo no transportados, a diferencia de las arenas de Vesic y Clough (1968), todas ellas de tipo transportadas. Si se tiene en cuenta el origen de los materiales, las mezclas estudiadas y las de D'espessailles presentan un ángulo de fricción bastante menor en comparación a las arenas de Lo y Roy, de hecho poseen ángulos de fricción mucho más similares a las arenas de Vesic y Clough. Estas últimas al ser transportadas se conforman por partículas mayormente redondeadas, lo que explica su bajo ángulo de fricción. De esto se obtiene que si bien los materiales procedentes de PMCHS son de naturaleza no transportada y con partículas de tipo angular (y por tanto deberían presentar un ángulo de fricción alto), existe otro factor que provoca un bajo ángulo de fricción. A bajas presiones solo las partículas fuertes tienen la resistencia necesaria para soportar los esfuerzos aplicados mientras que las partículas débiles se quiebran, por lo que solo se obtiene un ángulo de fricción moderado. Sin embargo, otras propiedades tales como la forma de las partículas o la densidad post-consolidación de la muestra también serían factores importantes para bajas presiones, lo cual explica el sesgo en los resultados de esta investigación a bajas presiones. A altas presiones las partículas tanto fuertes como débiles se rompen bajo los grandes esfuerzos por lo que el ángulo de fricción máxima decae fuertemente. Así, el efecto de las mezclas es sobrepasado por la influencia del nivel de confinamiento y por la resistencia global de las partículas de la muestra. Al aplicar este resultado a materiales quebrados de

minería de block caving; para bajas columnas de extracción (e.g. material quebrado sometido a bajos esfuerzos de sobrecarga de columna) las mezclas podrían ser un factor a considerar en las propiedades de resistencia aunque otras propiedades tales como la forma de los bloques y la densidad total tendrían que ser también considerados; mientras que para columnas altas, la resistencia al corte estaría mayormente influenciada por el nivel de confinamiento en el material y por la resistencia individual promedio del material quebrado.

4.3 Rotura de partículas

Para la estimación de este parámetro se realizaron granulometrías post ensayo y se compararon con la curva granulométrica original. Luego, mediante el método de Hardin, se obtuvo el índice de rotura relativo que permite cuantificar la rotura de partículas que se produjo en cada probeta (Tabla 2).

Tabla 2: Confinamiento, Esfuerzo principal vertical máximo y parámetro de rotura B_r para las mezclas fuerte-débil

%F-%D	σ_3 [kg/cm ²]	σ_1 max [kg/cm ²]	B_r [%]
100-0	1	4,1	2,80
75-25	1	5,0	2,90
50-50	1	4,7	3,50
25-75	1	4,1	3,62
0-100	1	4,3	4,22
100-0	6	22,6	7,66
75-25	6	19,4	7,96
50-50	6	20,0	9,32
25-75	6	20,5	10,15
0-100	6	19,4	11,12
100-0	20	49,7	15,32
75-25	20	48,3	12,80
50-50	20	50,7	16,95
25-75	20	48,3	17,69
0-100	20	49,7	21,76

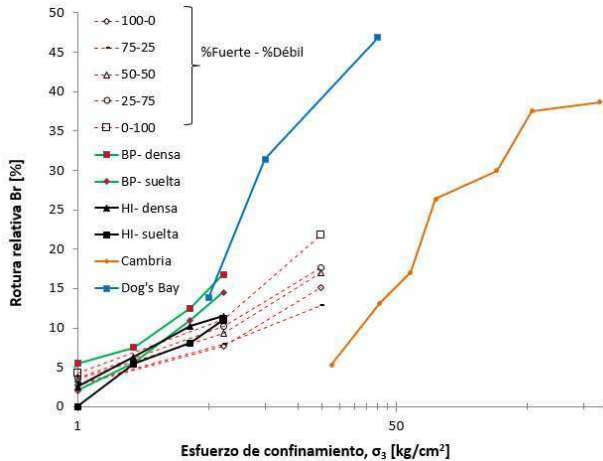


Figura 8: Rotura relativa (Br) para diversas arenas

Es claro que la rotura aumenta considerablemente con el esfuerzo confinante. También se observa que a pequeños confinamientos la rotura es prácticamente igual para todas las mezclas, pero a medida que aumenta la presión la diferencia entre una mezcla y otra aumenta. Excluyendo el ensayo para material 100% fuerte a 20 [kg/cm²], hay una clara tendencia en el aumento de la rotura a medida que se agrega material débil a la probeta.

En la Figura 8 se compara la rotura de las mezclas fuerte-débil con otras obtenidas de la literatura, todas sometidas a compresión triaxial CID. Las arenas adicionales incluidas corresponden a Busheher Port BP y Hormuz Island HI (Shahnazari y Rezvani, 2013), Cambria (Lade et al., 1996) y Dog's Bay (Bandini y Coop, 2011). Las arenas de esta investigación junto con BP, HI son no transportadas, mientras que las demás son transportadas. HI, BP y dog's bay corresponden a arenas asociadas a materiales calcáreos (por lo tanto materiales relativamente débiles), mientras que la arena de cambria es una arena subredondeada y con partículas mucho más resistentes

A bajas presiones ($\sigma_3 = 1$ [kg/cm²]) no hay variación significativa de rotura para las diferentes mezclas analizadas. Además, la rotura para todas las mezclas es relativamente similar a todas las demás arenas (exceptuando la arena de cambria). No obstante la rotura de las mezclas aumenta considerablemente en un

pequeño espacio de presiones (en especial bajo $\sigma_3 = 20$ kg/cm²); las partículas fuertes comienzan a quebrarse en este punto lo cual explica la radical caída del ángulo de fricción máximo discutido en la sección anterior. A altas presiones las mezclas estudiadas presentan una mayor diferencia en rotura de partículas aunque siguen presentando una rotura promedio, entre las arenas Cambria y Dog's Bay. De esto se concluye y confirma que la resistencia individual de las partículas juega un rol muy importante en la resistencia general de los materiales. Así, se concluye que la rotura de partículas en mezclas de materiales granulares de distinta resistencia provenientes de actividad minera no serían un factor significativo para bajos confinamientos, pero su influencia tomaría importancia para mayores presiones. Este último resultado sería de gran utilidad en el fenómeno de fragmentación secundaria, el cual corresponde a rotura del material quebrado debido a esfuerzos de compresión y corte dentro e columnas de extracción.

5 CONCLUSIONES

De los ensayos realizados se concluye que la presión de confinamiento para rangos entre 1 a 20 kg/cm² es uno de los factores más importantes en definir la resistencia de mezclas de arenas de tronadura de distinta resistencia. Para todas las mezclas, la resistencia y la compresibilidad de la muestra aumentaron con la presión de confinamiento. Además, al comparar las mezclas a un mismo confinamiento no se encuentra ninguna tendencia que relacione la resistencia y/o la compresibilidad con la proporción de material débil y fuerte. Esto confirma la superioridad del confinamiento por sobre la naturaleza de las partículas de arena de tronadura dentro de los rangos de parámetros analizados.

En cuanto al ángulo de fricción máximo se confirmó su gran disminución en comparación al nivel de confinamiento. A bajas presiones (1 [kg/cm²]) las mezclas alcanzan un ángulo de fricción bastante alto (hasta 40°) debido a sus partículas angulosas pero al aumentar los

esfuerzos el ángulo decae significativamente. A altas presiones existe una variación del ángulo de fricción de hasta 17° para una misma mezcla, lo cual escapa de cualquier estimación y supera los datos conocidos para arenas sometidas a compresión triaxial drenada. Otro factor de gran importancia resultó ser la resistencia individual de las partículas, la cual define la resistencia global del material y por tanto el ángulo de fricción máximo. Así, se confirmó que este factor condiciona el ángulo de fricción interna.

Respecto a la compresibilidad de las mezclas, tampoco se pudo encontrar una relación entre el porcentaje de partículas fuertes y débiles con el grado de compresibilidad. Sin embargo, lo más destacado es que la compresibilidad experimentó muy poco aumento desde un nivel de confinamiento de 6 [kg/cm²] a 20 [kg/cm²].

Por otro lado, la rotura de partículas demostró ser la causa de la drástica caída en el ángulo de fricción máxima para los ensayos ejecutados en esta investigación. En un pequeño rango de presiones, las partículas se ven fuertemente influenciadas por el aumento de esfuerzos, quebrándose rápidamente y provocando la variación del ángulo de fricción. Las mezclas se compararon con arenas de diversos orígenes y uniformidad, comprobándose que, luego del esfuerzo de confinamiento, la resistencia individual promedio de las partículas es nuevamente un factor clave en cuando a la resistencia global del material. De hecho, las mezclas reportadas aquí, se encuentran dentro del rango de arenas duras (cambria) y arenas débiles (calcáreas).

Aplicando estos resultados a materiales quebrados de block caving, el nivel de confinamiento (el cual estaría asociado a la altura de las columnas de material quebrado) sería significativo en las estimaciones de ángulo de fricción interna, mientras que la rotura de partículas (asociada al fenómeno de fragmentación secundaria) aumentaría notoriamente con el nivel de confinamiento. Sin embargo, las mezclas de bloques de diferente resistencia individual no sería un factor tan

significativo en la estimación de ϕ' y de fragmentación secundaria.

REFERENCIAS

- Bandini, V., & Coop, M. R. (2011). *The influence of particle breakage on the location of the critical state line of sands*. Soils and foundations 51: 591-600
- D'espessailles, N. (2014). *Estudio del comportamiento y rotura de arena de tronadura de túnel minero sometida a esfuerzo de corte simple monótono*. Tesis de Ingeniero Civil. FCFM, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Dorador, L. (2010). *Análisis experimental de las metodologías de curvas homotéticas y corte en la*
- Hardin, B. O. (1985). *Crushing of soil particles*. Journal of Geotechnical Engineering 111: 1177-1192
- Hyodo, M., Hyde, A.F.L., Aramaki, N. & Nakata, Y. (2002). *Undrained monotonic and cyclic shear behavior of sand under low and high confining stresses*. Soils and Foundations, Vol. 42: 63-76.
- Lade, P. V., Yamamuro, J. A., & Bopp, P. A. (1996). *Significance of particle crushing in granular materials*. Journal of Geotech. Eng. 122: 309-316
- Lee K., Farhoomand I (1967). *Compressibility and Crushing Of Granular Soil In Anisotropic Triaxial Compression*. Can. Geot. Journal 4: 68-86.
- Leleu, S. L., & Valdes, J. R. (2007). *Experimental study of the influence of mineral composition on sand crushing*. Géotechnique 57: 313-317
- Lo, KY & Roy, M. (1973). *Response of Particulate Materials at High Pressure*. Soils and Found.13: 1-14
- Marsal R. J, Moreno E., Nunez, A, Cuellar R. and Moreno R. (1965). *Research on the Behavior of the Granular Material and Rockfill Samples*. Comisión federal electricidad (CFE), México.
- Mcdowell, G. R. (2001). *Statistics of Soil Particle*. Géotechnique 51: 897-900
- Valdes, J. R., & Leleu S. L. (2008). *Influence of mineral composition on the simple shear response of sands: Experimental study*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering 134:1820-1824
- Vesic, A. S., & Clough, G. W. (1968). *Behavior of granular materials under high stresses*. Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, Vol. 94: 661-688
- Shahnazari, H., & Rezvani, R. (2013). *Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study*. Engineering Geology, 159: 98-105