



# Escalamiento geométrico de la curva granulométrica de materiales granulares provenientes de actividades mineras

Geometric scaling of the granulometric curve of granular materials from mining activities

Fecha de entrega: 18 de enero 2022

Fecha de aceptación: 12 de abril 2022

**Juan Sanabria y Alberto Jaime**

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd Universitaria, México DF, México,  
juan.sanabria@comunidad.unam.mx, ajaimep@iingen.unam.mx

*La extracción de minerales en operaciones mineras comprende la remoción de material estéril, así como, el traslado y disposición de estas en depósitos destinados para su almacenamiento de forma temporal o permanente. Estos depósitos conocidos como botaderos de desmonte, vertederos o tepetateras de roca estéril, comprenden materiales que por su tamaño y forma de disposición no pueden ser analizados en laboratorio y en campo, para obtener parámetros de resistencia al corte, compresibilidad y permeabilidad, con el objetivo de realizar diseños o evaluaciones de estabilidad física. El desarrollo y construcción de equipos a gran escala permite analizar especímenes de mayor tamaño, pero su disponibilidad es escasa. Actualmente, se cuenta con diversas metodologías que permiten reducir los tamaños de partículas para que sean ensayados en equipos de menor escala o convencionales. Entre los métodos desarrollados se tiene el de escalamiento geométrico de la curva granulométrica, y su empleo se dio inicialmente en la construcción de presas de enrocamiento. En la presente investigación se realiza un análisis de este método, con aplicación en materiales provenientes de la actividad minera.*

*Palabras clave: roca estéril de mina, operaciones mineras, botaderos de desmonte, escalamiento geométrico, curva granulométrica, esfuerzos de contacto, rotura de granos*

*The extraction of minerals in mining operations includes the removal of sterile material, as well as the transfer and disposal of these in deposits intended for temporary or permanent storage. These deposits known as waste rock dumps, landfills, or “tepetateras”, comprise materials that due to their size and disposition form cannot be analyzed in the laboratory and in the field, to obtain parameters of shear resistance, compressibility, and permeability, with the objective to perform designs or physical stability evaluations. The development and construction of large-scale equipment allows the analysis of larger specimens, but their availability is scarce. Currently, there are various methodologies that allow particle sizes to be reduced so that they can be tested on a smaller scale or conventional equipment. Among the methods developed is that of geometric scaling of the granulometric curve, and its use was initially given in the construction of rock dams. In this research, an analysis of this method is carried out, with application on dumped rockfills.*

*Keywords: waste rock, mining operations, waste rock dumps, geometric scaling, granulometric curve, contact stresses, grain breakage*

## Introducción

### Antecedentes

El depósito de suelo o roca que cubre los cuerpos minerales se denomina sobrecarga. Sus características, así como, su volumen, son específicas del lugar y dependen principalmente de la geología del depósito y del método de extracción empleado. El material de la sobrecarga se genera durante las etapas de desarrollo y explotación de las minas

superficiales y subterráneas. Se extraen para tener acceso al mineral y consisten en materiales no mineralizados o que contienen bajo grado de mineralización para su explotación económicamente atractiva. En general está compuesta de partículas gruesas, angulares (fragmentos de roca y grava) y una fracción fina (arenas y limos).

En minería subterránea, el tamaño del residuo, en general, es menor de 50 cm (Figuras 1a y 1b). Por otra parte, el

residuo proveniente de la explotación a cielo abierto es de mayor tamaño, llegando a alcanzar dimensiones de 1 a 2 m de diámetro. Los volúmenes llevados a la superficie en el primer caso son comparativamente menores que los de la explotación a cielo abierto.

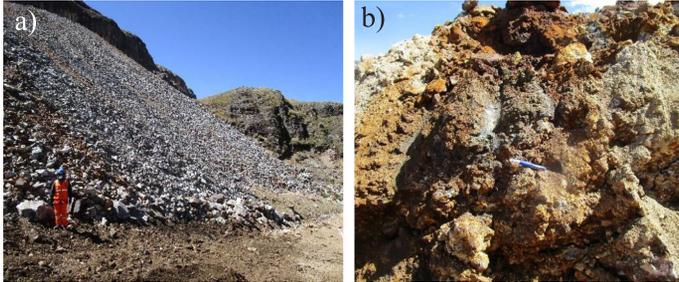


Figura 1: a) Depósito de desmonte de mina y b) material de desmonte de mina

El comportamiento mecánico de las partículas de rocas estériles o desmonte de mina es diferente a los suelos naturales. En la Figura 2a, se aprecia que estos son esencialmente materiales rocosos fragmentados y triturados cuyas partículas angulares recién formadas pueden ser susceptibles de romperse aún más. Las rocas estériles de mina generalmente presentan una clasificación más amplia (mal gradados) y son heterogéneos. En la Figura 2b se observan cambios en un depósito de desmonte, tanto en superficie como en profundidad, lo que demuestra que estos depósitos no son uniformes, ni por la granulometría y forma de las partículas, ni por la mineralogía.

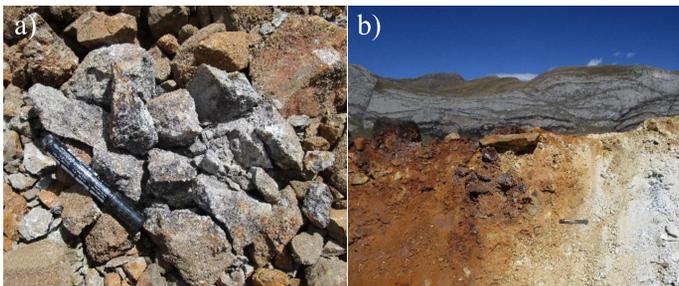


Figura 2: Desmonte de mina: a) partículas angulares y b) materiales no uniformes

Durante su almacenamiento, el aumento de los esfuerzos confinantes provocados por la colocación de las capas superiores genera la degradación de las partículas, lo cual modifica su granulometría (Marsal, 1969). Además, de la degradación producto del transporte y disposición en el depósito. Estos materiales secos en una condición suelta pueden comportarse como un enrocamiento o un medio

granular y presentan un comportamiento contractivo. En materiales saturados y con presencia de partículas más finas, la falla por corte es acompañada de una tendencia a la deformación de la estructura del material que puede generar incrementos de presión de poro.

Por último, los parámetros geotécnicos como la resistencia al corte y compresibilidad de la roca estéril de mina son necesarios para evaluar la estabilidad física de los depósitos donde se almacenan. La investigación de estas propiedades se complica por el gran tamaño de partículas de la roca, comparada con los suelos y los esfuerzos de confinamiento a los que son sometidos.

## Objetivo

El objetivo de la presente investigación es estudiar y analizar el método de curvas granulométricas paralelas para la preparación de especímenes en laboratorio que simulen la granulometría de los materiales de desmonte de mina y con ello incrementar el conocimiento del comportamiento de estos.

## Alcances

Se discuten algunas de las investigaciones más importantes realizadas en materiales de enrocamiento empleados tanto en las presas de almacenamiento de agua como en los materiales presentes en los botaderos de desmonte de mina. En estas investigaciones se señalan los factores que influyen en el comportamiento mecánico de estos materiales en pruebas de laboratorio, con diferentes granulometrías escaladas geométricamente.

## Método de escalamiento geométrico de la curva granulométrica

Se han desarrollado equipos para realizar ensayos a gran escala, pero estos no cubren gran parte de los tamaños empleados en los enrocamientos. Debido a esto se desarrolló el método de escalamiento geométrico de la curva granulométrica. Como antecedente, Zeller y Wulliman (1957) redujeron los tamaños máximos de partículas, para que los materiales escalados resultantes pudieran ser ensayados en equipos de laboratorio con tamaños manejables para facilitar la elaboración de probetas y que estos, aunque mayores a los convencionales fueran de bajo costo. Leslie (1963) y Lowe (1964) parecen ser los primeros que desarrollaron esta metodología para obtener



curvas granulométricas paralelas a la curva granulométrica de campo con menores tamaños máximos de partículas.

El método de escalamiento geométrico implica una reconstrucción de toda la muestra, reduciendo los tamaños de partículas pretendiendo conservar el número de contactos entre estas. Se mantiene la secuencia de tamaños de partículas de la muestra original, se reducen los tamaños máximos de partículas, generando muestras con curvas granulométricas paralelas escaladas geométricamente (Lowe, 1964; Marachi, 1969; Lee, 1992; Verdugo *et al.*, 2003).

El tamaño de la muestra por sí solo no tiene efecto sobre las propiedades de resistencia y deformación del material ensayado, siempre que se cumplan ciertos requisitos relacionados con la relación entre el tamaño de la muestra y el tamaño máximo de partículas. El efecto del tamaño de partícula, por otro lado, se refiere a las posibles diferencias en las características de resistencia y deformación de suelos que son similares en todos los aspectos, excepto en el tamaño de partícula. Para un modelado adecuado de materiales, la forma promedio de las partículas del material de enrocamiento y el resultante modelado deberían ser similares (Marachi, 1969).

Leslie (1963) y Lowe (1964), realizaron ensayos con diferentes materiales de granulometrías variables y en diferentes condiciones de operación. Posteriormente, Marachi (1969) (ver Figura 3), Pigeon (1969), Tombs (1969), Charles (1973), Thiers y Donovan (1981), Indraratna *et al.* (1993), Varadarajan *et al.* (2003), Verdugo

y de la Hoz (2006), Bard *et al.* (2007), Hu *et al.* (2011), ente otros, continuaron estas investigaciones. El empleo de este método en materiales provenientes de operaciones mineras fue realizado por Bard *et al.* (2007), Linero *et al.* (2007) y Palma *et al.* (2009).

Donaghe y Torrey (1985) observaron que muestras de granulometrías escaladas geométricamente podrían incluir contenidos de finos superiores a 15 o 20%, lo cual modifica la resistencia del material granular. Algunas investigaciones mostraron que si la cantidad de finos (% bajo malla #200) no superan el 10 o 12%, ocurre una afectación poco importante en la resistencia del material granular. Por esta razón, investigadores como Verdugo y de la Hoz (2006), sugieren modificar la curva granulométrica en su parte final para que el contenido de finos de la muestra escalada sea menor de 12%. Sin embargo, no hay un criterio establecido para hacer esa modificación. Algunos de estos aspectos también fueron señalados por Marsal (1972) y Lee (1992).

## Esfuerzos de contacto

Las pruebas índice y la inspección visual de los fragmentos de roca proporcionan ideas de la importancia que puede tener la rotura de partículas en cada caso. Sin embargo, no es factible con tal información evaluar su magnitud e influencia en otras características como las de compresibilidad y resistencia. Marsal (1967) menciona que, el reconocer la naturaleza discreta de los enrocamientos y su efecto en la distribución de los esfuerzos intergranulares, pueden ser de utilidad para explicar dichas diferencias, al igual que el proceso de rotura de partículas.

Marsal (1963) determinó el orden de magnitud de los esfuerzos de contacto en diferentes materiales. Mediante la obtención del número de contactos por partícula y el número de partículas que cortan un plano. Esta prueba consiste en aplicar a tres granos de aproximadamente igual tamaño,  $d_m$ , fuerzas transmitidas mediante una placa de acero; se miden el número de contactos,  $N_c$ , y la carga  $P$ , que produce la rotura del primer grano. El valor  $P_a$  denominado carga de rotura de la roca, para la dimensión  $d_m$  se expresa como:

$$P_a = P/N_c \quad (1)$$

Marsal (1969) menciona que las cargas  $P_a$  presentan variación, debido a que la prueba de rotura no solo involucra

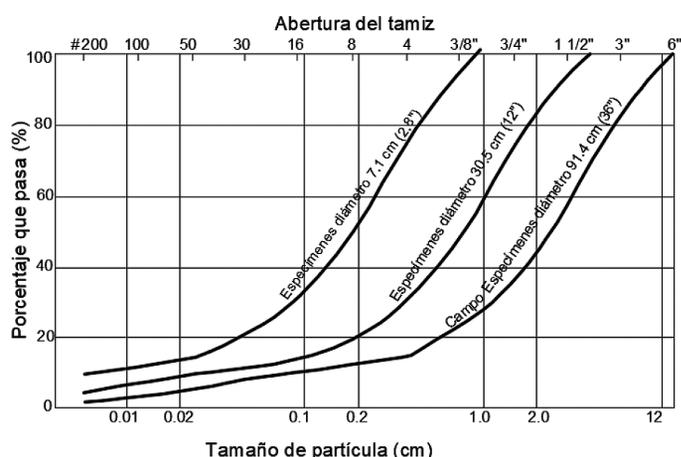


Figura 3: Granulometrías paralelas para el enrocamiento de la presa Oroville (Marachi, 1969)



condiciones de apoyo muy diversas en las partículas, sino también la presencia de defectos naturales en la roca (fisuras, poros, relleno de grietas, alteración, entre otros). Por ello, Marsal para cada dimensión  $d_m$ , realizó 10 pruebas para dos estados de humedad, secados al aire y sumergidos en agua. En las Figuras 4a y 4b se presentan en escala logarítmica, los valores medios de  $\bar{P}_a$  en función del diámetro promedio para cada partícula ensayada.

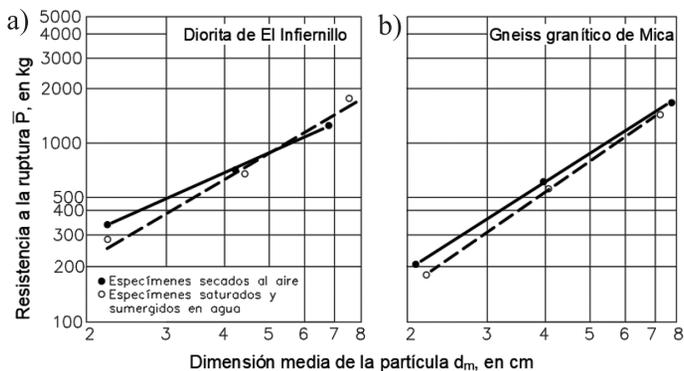


Figura 4: Variación de la resistencia a la rotura de partículas respecto al diámetro de partículas en condiciones secas y saturadas: a) Diorita de El Infiernillo y b) Gneiss granítico de Mica (Marsal, 1972)

Los resultados definen la relación empírica:  $\bar{P}_a = \eta d_m^\lambda$ . Donde  $\eta$  y  $\lambda$ , son constantes para cada material ensayado, siendo válidas para dimensiones entre 2 y 10 cm. La expresión  $\bar{P}_a$  en términos de  $d_m$  puede justificarse mediante los estudios realizados por Joisel (1962) y la teoría de Griffith (1921) sobre la propagación de grietas en una masa afectada por vacíos. Marsal (1969) al combinar las proposiciones de estos investigadores concluye que la ruptura  $\bar{P}_a$  es proporcional a la dimensión del grano elevado a la potencia 3/2. El exponente  $\lambda$  varía entre 1.2 y 2.2, además, los resultados obtenidos en condición saturada evidenciaron la influencia del agua en el incremento de la rotura de granos en las rocas ensayadas.

De la teoría elástica se puede demostrar que la fuerza tangencial provoca esfuerzos de tensión considerablemente más altos que en la componente normal. Este método implica que, si se conociera la fuerza normal al plano, se podría establecer la fuerza por contacto. Esto supone que los contactos reaccionan de forma normal al plano, poco probable que sea cierto. Si todos los contactos no reaccionan de forma normal al plano, la carga media de los contactos aumenta (Tombs, 1969).

## Rotura de partículas

Las grandes alturas que alcanzan los depósitos de roca estéril generan altas presiones de confinamiento, induciendo la rotura de partículas en estos materiales (Bard *et al.*, 2007; Valenzuela *et al.*, 2008). Para los diferentes materiales y distribuciones granulométricas analizados en laboratorio, se observó que la rotura de partículas fue más significativa en los granos más gruesos, dado que estos presentan menos puntos de contacto entre sí, lo que genera mayores esfuerzos en estos puntos. Se evidencia aún más, cuando se tienen partículas angulares a subangulares. Las partículas de mayor tamaño presentan más defectos (fisuras y microfisuras), además, se tiene mayor rotura cuando se someten a altas presiones. En resumen, los factores que afectan la rotura de granos, además, del nivel de esfuerzos aplicado son (Marsal, 1969):

- Heterogeneidad (composición mineralógica, tamaño y forma de partículas)
- Defectos naturales e inducidos (fisuras o vacíos)
- Resistencia a la tracción
- Concentración de esfuerzos en los contactos

Además, Lee y Farhoomand (1967) mencionan que la compresibilidad y la rotura de granos se aceleran cuando se adiciona agua y aumentan con: a) el tamaño de la partícula (Figura 5a), b) la uniformidad de la muestra, c) la angularidad de las partículas, d) baja resistencia de las partículas, e) la presión confinante (Figura 5b), y f) el nivel de esfuerzo cortante. A estos factores se adiciona la influencia de la mineralogía de las partículas y la compacidad de la muestra.

Los ensayos de compresión triaxial, deformación plana y compresión unidimensional demostraron que los granos de un enrocamiento experimentan rotura, aun cuando se ensayen a niveles de esfuerzo relativamente bajos (Marsal, 1972). Esto se evidenció en los materiales de roca estéril de mina analizados por Naderian y Williams (1996), Bard *et al.* (2007), Palma *et al.* (2009) y Linero *et al.* (2007), en cámaras triaxiales y equipos de compresión unidimensional a gran escala. La rotura de partículas produce cambios en la gradación original. Por tanto, afectan las propiedades mecánicas e hidráulicas del material y, particularmente, la compresibilidad (Marsal, 1969).

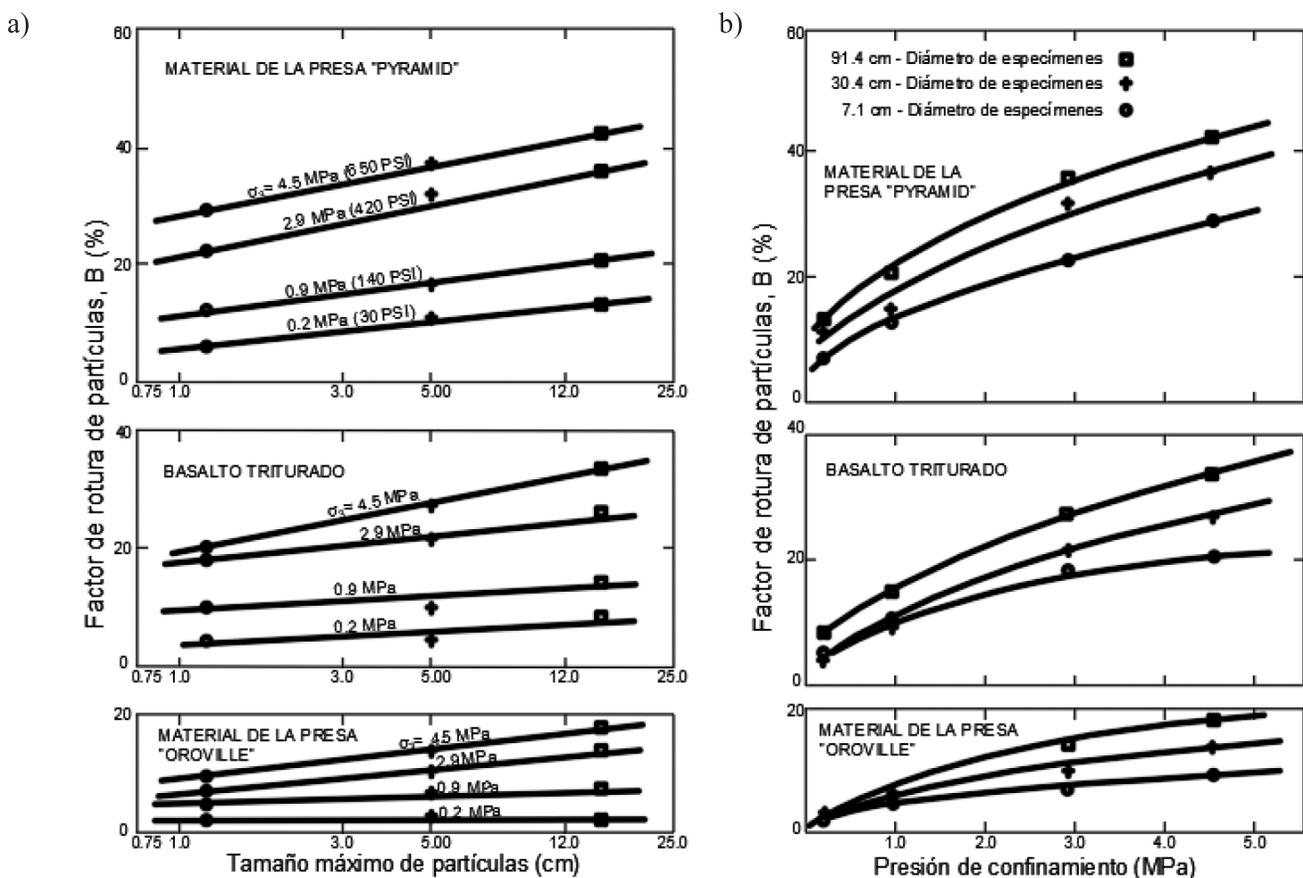


Figura 5: a) Rotura de partículas versus tamaño máximo de partículas y b) rotura de partículas versus presión de confinamiento (Marachi, 1969)

Se han propuesto diferentes métodos para medir la rotura de partículas. Estos son de naturaleza empírica y se basan fundamentalmente en los cambios en el tamaño de las partículas. Unos se basan en cambios en la granulometría y otros añaden el cambio en un solo tamaño de partícula. La medición de rotura de granos más utilizadas son las desarrolladas por Marsal (1967), Lee y Farhoomand (1967), Hardin (1985) y Lade *et al.* (1996).

Marsal (1972), Naderian y Williams (1996), Bard *et al.* (2007), Palma *et al.* (2009) y Linero *et al.* (2007), emplearon equipos de compresión unidimensional para estudiar la rotura de partículas y compresibilidad de enrocamientos. Estos permiten hacer ensayos de compresión en muestras escaladas para determinar la rotura de partículas y los módulos de deformación unidimensional de manera económica y expedita. Además, estos equipos no presentan la complejidad de los equipos triaxiales a gran escala.

## El escalamiento geométrico en la resistencia al corte y compresibilidad

Se han realizado diversas investigaciones con el método de escalamiento geométrico con el objetivo de estudiar la resistencia y compresibilidad en materiales de enrocamiento. A continuación, se presentan investigaciones realizadas en ensayos triaxiales y en equipos de compresión unidimensional, que fueron diseñados para ensayar especímenes de laboratorio con tamaños máximos de partículas entre 10 y 25 cm.

Leslie (1963, 1969) reportó una serie de ensayos triaxiales para determinar el efecto del tamaño máximo de partículas en la resistencia al corte, en suelos aluviales subredondeados y subangulares. En la Figura 6a, se observan las granulometrías escaladas. Se encontró que existe reducción del ángulo de fricción cuando la rotura de partículas se incrementa (ver Figura 6b).

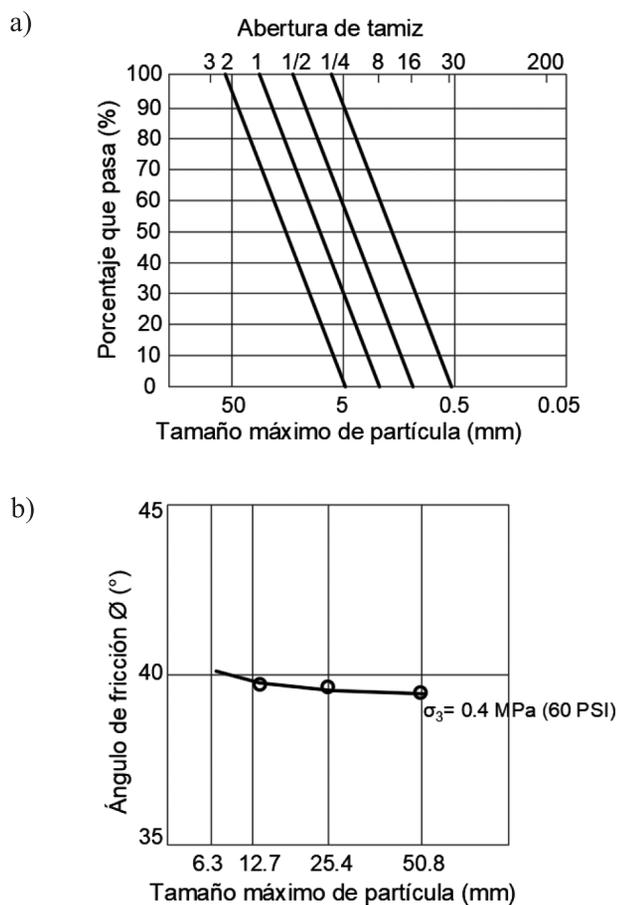


Figura 6: Grava aluvial: a) granulometrías paralelas ensayadas y b) variación del ángulo de fricción respecto al tamaño de partículas (Leslie, 1969)

Para el diseño de una presa en Taiwán, Lowe (1964) llevó a cabo una serie de ensayos a gran escala. El relleno permeable era de grava y canto rodado de tamaño máximo de 30.4 cm (12"). Se realizaron ensayos triaxiales en muestras de 15.2 cm (6") de diámetro y con un tamaño máximo de partícula de 3.8 cm (1 1/2"). Los ángulos de fricción interna para ambas muestras resultaron de 41 y 43°, respectivamente (Tombs, 1969).

Marachi (1969) desarrolló cámaras triaxiales para ensayar especímenes de 7.1 cm (2.8"), 30.4 cm (12") y 91.4 cm (36") de diámetro. Las deformaciones volumétricas en la falla para las muestras de tamaño intermedio y grande fueron generalmente las mismas y más compresivas que las de menor tamaño (Marachi *et al.*, 1972). Además, similar a Leslie (1969), se encontró que el ángulo de fricción interna se reduce cuando aumenta la rotura de partículas.

Pigeon (1969) realizó ensayos de consolidación en muestras

bien graduadas de lutitas y gneis granítico. Los resultados evidenciaron que la deformación a un nivel de esfuerzo dado dependía en gran medida de la porosidad, y descubrió que cuando se realizaban comparaciones sobre la base de la porosidad relativa de cada material, la compresión de las granulometrías paralelas con diferente tamaño máximo de partícula era similar. Además, se comparó los resultados obtenidos con mediciones realizadas en campo (a corto plazo), siendo similares en el intervalo estudiado.

Charles (1973), en pruebas triaxiales, analizó muestras de areniscas en especímenes de 40, 100 y 300 mm de diámetro y encontró que la resistencia al corte de las granulometrías escaladas no se vio afectada por el tamaño máximo de partículas.

Para analizar el comportamiento de grauwaca en el enrocamiento de una presa, Indraratna *et al.* (1993) realizaron ensayos triaxiales en muestras de 30.4 cm (12") de diámetro. Utilizaron granulometrías con tamaños máximos de partículas de 3.8 cm (1 1/2") y 2.5 cm (1"). Los resultados obtenidos evidenciaron la variación del ángulo de fricción respecto al esfuerzo de confinamiento. Al aumentar estos esfuerzos para ambas granulometrías, observaron una disminución en los ángulos de fricción interna. Indraratna *et al.* (1993), relacionó esta reducción de la resistencia al corte con el aumento significativo en la rotura de partículas angulares cuando se someten a mayores presiones de confinamiento.

Verdugo y de la Hoz (2006) analizaron gravas en ensayos triaxiales. Los especímenes fueron de 5, 10 y 15 cm de diámetro. Las granulometrías fueron trasladadas geoméricamente, pero limitando el contenido de finos a 10%, como máximo. Obtuvieron que la resistencia máxima al corte y el comportamiento esfuerzo-deformación, resultaron similares en la mayoría de las muestras ensayadas, a excepción de la muestra que no era perfectamente paralela a la muestra original (presentó mayor reducción en el contenido de finos).

Bard *et al.* (2007) y Linero *et al.* (2007) estudiaron el comportamiento de roca estéril proveniente de algunas minas de Chile, con muestras de 1 m de diámetro, empleando la cámara triaxial a gran escala desarrollada en el IDIEM (Verdugo *et al.*, 2007; de la Hoz, 2007). Las rocas porfíricas y granodioritas, eran angulares. La



granulometría de campo presentaba tamaños máximos entre 60.9 cm (24”) y 106.7 cm (42”), y fue reducida a tamaños máximos de partículas de 20.3 cm (8”). Las muestras presentaron contenidos de finos menores de 10%. Obtuvieron que la reducción en la resistencia y el aumento de la compresibilidad del material está relacionada con la rotura de partículas.

De las investigaciones mencionadas, la rotura de partículas se incrementa a medida que aumenta el tamaño máximo de estas. Esto fue más evidente para ensayos sometidos a altas presiones de confinamiento. Se observó que con un contenido de finos mayor al 10% la rotura de partículas empieza a disminuir. La plasticidad de los finos también influye en la rotura de estos.

Además, gran parte de estas investigaciones fueron enfocadas al comportamiento de enrocamientos para la construcción de presas u otras estructuras. Se identificó la influencia de factores como granulometría, mineralogía, densidad relativa, forma de las partículas, contenido de agua, esfuerzos de confinamiento, tamaño del espécimen. En materiales de mina como la sobrecarga que contienen rocas estériles, se deben adicionar factores como el método de extracción (explosivos, martillos neumáticos), el manejo y la forma en que se depositan en el lugar de almacenamiento.

## Comentarios finales

El método de escalamiento geométrico de la curva granulométrica se ha presentado como una adecuada propuesta para estimar los parámetros de resistencia al corte y compresibilidad de enrocamientos. Cuando los materiales ensayados tienen un contenido de finos superior al 10% como consecuencia del escalamiento geométrico, se aprecian diferencias en la resistencia al corte y compresibilidad. Por esta razón, algunos autores han sugerido modificar la granulometría en su parte de menores tamaños para que el contenido de finos sea menor al 10% en la muestra escalada (Verdugo y de la Hoz, 2006). Sin embargo, no hay un criterio definido para realizar esta modificación.

Los estudios de los esfuerzos de contacto toman en cuenta que, entre partícula y partícula, no se puede determinar el área en los puntos de contacto. Por tanto, es imposible determinar el esfuerzo en tales contactos. Por ello, Marsal

(1972) propuso como un parámetro índice a la fuerza necesaria para iniciar la primera rotura de partículas.

En los depósitos de desmonte, a diferentes alturas se tendrán diferentes granulometrías del material según la zona donde se encuentre, debido a la presión confinante ejercida por los materiales sobrepuestos. Esto debido a la rotura de partículas producida por la presión confinante y por el método de disposición, compactación, segregación y distribución no uniforme del material rezagado. Es decir, estos depósitos son esencialmente heterogéneos. Por ello, determinar sus propiedades mecánicas continúa siendo un reto. La influencia de factores como la mineralogía, compacidad relativa, forma de partícula, contenido de agua, esfuerzo de confinamiento, tamaño del espécimen, entre otros, han sido investigados por diversos autores, en laboratorio y en campo. En materiales de mina como la roca estéril, se deben adicionar factores como el método de extracción, manejo y la disposición en los depósitos donde serán almacenados. Los ensayos de compresión unidimensional para estudiar la rotura de partículas y la compresibilidad de enrocamientos y el efecto del agua en su comportamiento, han sido empleados por diferentes autores, tanto por la simplicidad del equipo como por el ahorro en tiempo de ejecución de estos ensayos.

## Referencias

- Bard, E., Campaña, J., Anabalón, M.E. and Apablaza, R. (2007). Waste rock behavior at high pressures. *XIII Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Isla Margarita, Venezuela, vol. 1, 348-353
- Charles, J.A. (1973). *Correlation between laboratory behaviour of rockfill and field performance, with particular reference to Scammonden Dam*. PhD thesis, Imperial College, London, UK
- de la Hoz, K. (2007). *Estimación de los parámetros de resistencia al corte en suelos granulares gruesos*. Tesis de Magister, Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Donaghe, R.T. and Torrey, V.H. (1985). Strength and deformation properties of earth-rock mixtures. Technical Report GL-85-9, Geotechnical Laboratory, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA
- Griffith, A.A. (1921). The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A* 221, 163-198



- Hardin, B.O. (1985). Crushing of soil particles. *Journal of Geotechnical Engineering* **111**(10), 1177-1192
- Hu, W., Dano, C., Hicher, P.Y., Le Touzo, J. Y., Derkx, F. and Merliot, E. (2011). Effect of sample size on the behavior of granular materials. *Geotechnical Testing Journal* **34**(3), 186-197
- Indraratna, B., Wijewardena, L.S.S., and Balasubramaniam, A.S. (1993). Large-scale triaxial testing of grey wacke rockfill. *Géotechnique* **43**(1), 37-51
- Joisel, A. (1962). La rupture des corps fragiles au cours de leur fragmentation. Publication technique 127. Centre d'études et de Recherches de l'Industrie des liants Hydrauliques. Paris, France
- Lade, P.V., Yamamuro, J.A. and Bopp, P.A. (1996). Significance of particle crushing in granular materials. *Journal of Geotechnical Engineering* **122**(4), 309-316
- Lee, D.M. (1992). *The angles of friction of granular fills*. PhD thesis, University of Cambridge, UK
- Lee, K. and Farhoomand, I. (1967). Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression. *Canadian Geotechnical Journal* **4**(1), 68-86
- Leslie, D.D. (1963). Large-scale triaxial tests on gravelly soils. *2<sup>nd</sup> Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Brazil, vol. 1, 181-202
- Leslie, D.D. (1969). Relationship between shear strength, gradation, and index properties of rockfill materials. *7<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Mexico City, Specialty session No. 13. Chapter 3, 201-2010
- Linero, S., Palma, C. and Apablaza, R. (2007). Geotechnical characterisation of waste material in very high dumps with large scale triaxial testing. *International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, Y. Potvin (ed.), Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia, 59-75
- Lowe, J. (1964). Shear strength of coarse embankment dam materials. *8<sup>th</sup> International Congress on Large Dams, ICOLD*, Edinburgh, UK, vol. 3, 745-761
- Marachi, N. (1969). *Strength and deformation characteristics of rockfill materials*. PhD thesis, University of California, Berkeley, USA
- Marachi, N.D., Chan, C.K. and Seed, H.B. (1972). Evaluation of properties of rockfill materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* **98**(1), 95-114
- Marsal, R.J. (1963). Contact forces in soils and rockfill materials. *2<sup>nd</sup> Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Sao Paulo, Brazil, vol. 2, 67-98
- Marsal, R.J. (1967). Large scale testing of rockfill materials. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division* **93**(2), 27-43
- Marsal, R.J. (1969). Particle breakage in coarse granular. Contributions and discussions on Mechanical Properties of Rockfill and gravel material. *7<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Mexico City, Specialty session No. 13. Chapter 3, 155-165
- Marsal, R.J. (1972). Resistencia y compresibilidad de enrocamientos y gravas. Series del Instituto de Ingeniería UNAM. México. SID306
- Naderian, A.R. and Williams, D.J. (1997). Bearing capacity of open-cut coal-mine backfill materials. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section A - Mining Industry* **106**, 30-33
- Palma, C., Linero, S. y Apablaza, R. (2009). Caracterización geotécnica de materiales de lastre en botaderos de gran altura mediante ensayos triaxiales y odométricos de gran tamaño. *III Conferencia Sudamericana de Ingenieros Geotécnicos Jóvenes*, Córdoba, Argentina, 201-204
- Pigeon, Y. (1969). *The compressibility of rockfill*. PhD thesis, Imperial College, London, UK
- Thiers, G.R. and Donovan, T.D. (1981). Field density, gradation, and triaxial testing of large-size rockfill for Little Blue Run Dam. *Laboratory Shear Strength of Soil Symposium*, R.N. Yong and F.C. Townsend (eds.), SPT 740, ASTM International, Chicago, USA, 315-325
- Tombs, S.G. (1969). *Strength and deformation characteristics of rockfill*. PhD thesis, Imperial College, London, UK
- Valenzuela, L., Bard, E., Campaña, J. and Anabalón, M.E. (2008). High waste rock dumps—Challenges and developments. *First International Seminar on the Management of Rock Dumps*, Perth, Australia, 65-78
- Varadajaran, A, Sharma, K.G., Venkatachalam, K. and Gupta, A.K. (2003). Testing and modeling two rockfill materials. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **129**(3), 206-218



Verdugo, R., Peters, G. y Bejarano, I. (2007). Evaluación de parámetros geomecánicos de suelos gruesos. *VI Congreso Chileno de Geotecnia*, PUCV y SOCHIGE, Valparaíso, Chile, artículo grupo A(10)

Verdugo, R., Gesche, R. y de la Hoz, K. (2003). Metodología de evaluación de parámetros de resistencia al corte de suelos granulares gruesos. *12<sup>th</sup> Pan American Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering*, Massachusetts, USA, vol. 1, 691-696

Verdugo, R. and de la Hoz, K. (2006). Strength and stiffness of coarse granular soils. *Geotechnical Symposium Soil Stress-Strain Behaviour: Measurement, Modelling and Analysis*. Rome, Italy, H.I. Ling, L. Callisto, D. Leshchinsky and J. Koseki (eds.), Springer, Dordrecht, The Netherlands, 243–252

Zeller, J. and Wulliman, R. (1957). The shear strength of the shell materials for the Göschenenalp Dam, Switzerland. *4<sup>th</sup> Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, UK, vol. 2, 399-404