

Uso de granulometrías y densidades escaladas para la caracterización geotécnica de enrocados

Claudio ROMAN^{a,1} y Leonardo DORADOR^b

^a*Ausenco Chile*

^b*Wood Chile*

Resumen. La caracterización geotécnica de materiales granulares gruesos posee dificultades no sólo por los altos costos y tiempos de ejecución de ensayos in-situ y de laboratorio a gran escala, sino además debido a la necesidad de utilizar técnicas de escalamiento de tamaños de partículas, tal como el método de granulometría paralela o el método de corte. Desafortunadamente, estas técnicas presentan limitaciones en su uso y aún siguen siendo temas de investigación en la Ingeniería Geotécnica. Así, este trabajo presenta los resultados de ensayos de laboratorio realizados sobre muestras de material grueso de lastre minero. En esta caracterización se destacan ensayos de granulometría, macrogranulometría, densidades mínimas y máximas, y pruebas triaxiales de gran dimensión ejecutadas en el laboratorio IDIEM de la Universidad de Chile, las cuales alcanzaron diámetros máximos de 1.0 m y alturas máximas de 1.8 m. En particular, se presentan y analizan los resultados obtenidos de dos probetas triaxiales, realizados en tamaños de celda 100x180 cm y 15x30 cm, cuyo comportamiento fue casi idéntico.

Palabras Clave. Enrocados, ensayo triaxial, granulometría paralela, granulometría escalada.

1. Introducción

Los Materiales Granulares Gruesos (MGG) se caracterizan por poseer tamaños de partícula mayor que 75 mm (3") y coeficientes de uniformidad ($C_u=D_{60}/D_{10}$) que incluso pueden superar el valor 100, están siendo cada vez más demandados en proyectos de Ingeniería Civil y de Minería, como por ejemplo, en la construcción de presas de embalses de agua y de relaves.

La caracterización geotécnica de los MGG a menudo presenta dificultades debido a la presencia de partículas grandes, las cuales no permiten el uso directo de pruebas de laboratorio convencionales, sino que requieren previamente el empleo de métodos de escalamiento acordes al tamaño de sus partículas. Es por esto que su estudio sigue siendo de interés técnico debido a la representatividad (o no representatividad) de los resultados que se obtienen de ensayos geotécnicos de laboratorio, particularmente en lo que refiere a sus grados de compactación, densidades, resistencia y deformación.

¹ Corresponding author, Santiago, Chile; E-mail: claudio.roman@ausenco.com

En este trabajo se entrega una mirada diferente a los métodos de escalamiento normalmente utilizados para la confección de las granulometrías y de la elección de la densidad de confección de las probetas a ensayar.

2. Caracterización de Materiales Granulares Gruesos

Una de las principales dificultades de la caracterización geotécnica de los MGG consiste en que la presencia de partículas grandes no permite el uso directo de pruebas de laboratorio convencionales, sin antes incluir métodos de escalamiento acordes al tamaño de sus partículas.

Entre los ensayos geotécnicos que usualmente se utilizan para caracterizar MGG disponibles en un laboratorio tradicional, se encuentran ensayos triaxiales, de corte directo, permeabilidad, densidad máxima y mínima, los cuales típicamente limitan el tamaño máximo (TM) de las partículas a 38 mm (1½"). Otros ensayos tales como granulometrías o densidades in situ, si bien no presentan esta limitación en el TM, requieren de una logística bastante más compleja en terreno, como lo es el uso de marcos de acero, grandes balanzas y el apoyo de maquinaria, además de su alto costo y tiempo.

La Tabla 1 presenta a modo ilustrativo un listado con los ensayos geotécnicos más comunes utilizados para la caracterización de MGG, junto con los respectivos TM recomendados en cada caso.

Tabla 1. Ensayos geotécnicos in-situ y de laboratorio que comúnmente se realizan sobre MGG, junto con los tamaños máximos de partícula admitidos de acuerdo con las normas técnicas de referencia indicadas.

Ensayo	Norma ASTM	Tamaño Máximo	
		mallá ASTM	mm
Granulometría	ASTM D422 [1]	< 3"	75,00
Macrogranulometría	ASTM D5519 [2]	> 3"	-
Peso Específico bajo N°4	ASTM D854 [3]	< #4	4,76
Peso Específico sobre N°4	ASTM C127 [4]	> #4	-
Densidad in Situ (cono de arena)	ASTM D1556 [5]	< 1 1/2"	38,00
Densidad in Situ (reemplazo de agua)	ASTM D5030 [6]	> 1 1/2"	-
Densidad Máxima / Densidad Mínima	ASTM D4253 [7] /D4254 [8]	< 3"	75,00
Proctor Modificado / Proctor Estándar	ASTM D1557 [9] /D698 [10]	< 3/4"	19,00
Corrección Peso Unitario y Humedad por Sobretamaño	ASTM D4718 [11]	< 30% > 3/4"	-
Corte Directo 30x30 cm	ASTM D3080 [12]	< 1 1/2"	38,00
Triaxial CD/CU probeta 15x30 cm	base ASTM D7181 [13] /D4767 [14]	< 1 1/2"	38,00
Consolidación Edométrica ϕ 20 cm	base ASTM D2435 [15]	< 1 1/2"	38,00
Permeabilidad pared rígida 15x30 cm	base ASTM D2434 [16]	< 1 1/2"	38,00
Desgaste de Los Ángeles para pequeñas partículas / grandes partículas	ASTM C131 [17] /C535 [18]	< 1 1/2" > 1 1/2"	38,00 -

Debido a la gran diferencia entre el tamaño real de los MGG y los tamaños máximos permitidos en los ensayos antes indicados, es que surgen varias técnicas de escalamiento tanto en términos de granulometría como de densidades y grado de compactación. Una

hipótesis fundamental para la realización de este tipo de ensayos consiste en la replicación o representatividad de las características intrínsecas de los materiales, tales como su constitución mineralógica o su origen geológico. Más complejo resulta si se incorporan las propiedades físicas de las partículas como forma, rugosidad, peso específico y resistencia a la compresión uniaxial (UCS).

En el caso particular de los materiales de lastre minero o enrocados, estos poseen tamaños variables de partículas, desde arcilla y limo a partículas tan grandes como 2 m o 3 m de diámetro [19], en general competentes, aunque pueden contener partículas muy débiles, lo que implica una considerable heterogeneidad de la resistencia. Las alturas de los botaderos alcanzan comúnmente más de 200 m y están afectados por segregación durante el transporte y la disposición, ubicándose las partículas de mayor tamaño al pie del talud, y el material más fino en la parte superior de cada una de las capas. Comúnmente los materiales de lastre se ven influidos por la reducción de la resistencia de las partículas de mayor tamaño, ya que heredan la red de fracturas discretas de la roca parental [20].

3. Escalamiento de Granulometrías para la Confección de Probetas de MGG

Debido a la gran diferencia entre los tamaños de los MGG colocados in-situ y de las probetas ensayadas en laboratorio, surge la necesidad de utilizar técnicas de escalamiento del tamaño de partículas, tal como los son el método de granulometría paralela (MGP) o el método de corte.

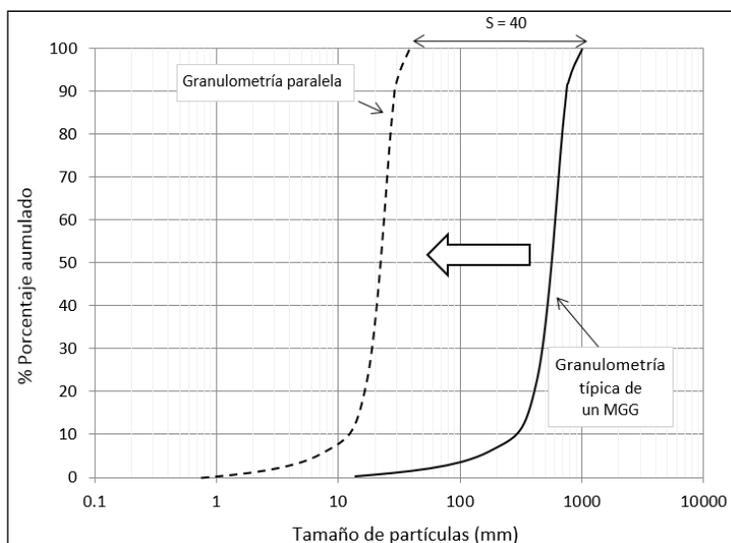


Figura 1. Método de granulometría paralela (MGP) o de curvas homotéticas, considerando para este ejemplo un radio de similitud $s=40$ [21].

El MGP o curvas homotéticas es una herramienta clave en la caracterización geotécnica de MGG, en especial en la evaluación de propiedades geomecánicas. Aunque el método de corte (conocido en inglés como “scalping method”) parece ser el método más común en la práctica de laboratorios de geotecnia [21], el MGP es el método más

utilizado en estudios de investigación y en proyectos de gran envergadura de Ingeniería Civil y Minería.

El MGP ha sido empleado desde hace más de 50 años y tiene como objetivo escalar la granulometría del material granular grueso original por medio de un factor de reducción geométrico constante (radio de similitud “s”) en cada fracción de tamaño [22]. Además, el MGP supone mantener las mismas características físicas de las partículas originales y escaladas (por ejemplo, la forma y la gravedad específica), así como la resistencia a la compresión uniaxial. Junto con esto, también limita el contenido máximo de finos en las muestras de granulometría escalada a 10% [23].

Para efectos prácticos, se considera que el MGP es efectivo en la representación de un MGG si el material escalado no posee una diferencia mayor que 3 grados en el ángulo de fricción interna. En términos de la representatividad del escalamiento en MGG hacia tamaños menores, el MGP debiera ser utilizado para bajos valores de radios de similitud “s” con tal de cumplir los límites máximos indicados en la Tabla 2 [21]. El uso de aparatos de compresión triaxial gigante o corte directo de grandes dimensiones es de extrema ayuda para así mantener bajos radios de similitud, por ejemplo, $s < 10$.

Tabla 2. Radios de similitud “s” máximos recomendados para diferentes tipos de MGG.

Balasto Chancado	4,5
Suelos Aluviales o Fluviales	25,0
Enrocados de Rocas Sedimentarias	13,0

Así, cumpliendo estos radios de similitud, las propiedades geomecánicas de la muestra escalada y ensayada permitirá representar las propiedades del MGG original.

4. Escalamiento de Densidades para la Confección de Probetas de MGG

La elección, o más bien, la definición de la densidad de confección de las probetas en muestras escaladas es relevante. No obstante, la medición de densidades máximas y mínimas (d_{\max} y d_{\min}), densidades in situ (γ_n y γ_d) y grados de compactación (DR%) no es frecuentemente realizada en los MGG [24].

Sumado a lo anterior, la literatura existente relacionada con la estimación de densidades máximas y mínimas, al depender de las normas ASTM D4253 y ASTM D4254, está limitada a un tamaño máximo de partículas de 3”, según se indica en la Tabla 1, por lo que cualquier evaluación de densidades aplicada a los MGG no es posible realizarla de manera directa. A modo de referencia, las fórmulas generales que relacionan la densidad del material con el índice de vacíos y el grado de compactación se presentan en las ecuaciones (1) y (2) siguientes:

$$e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \quad (1)$$

$$DR(\%) = \frac{(e_{\max} - e)}{(e_{\max} - e_{\min})} \times 100 \quad (2)$$

Una de las dificultades al usar el parámetro de Densidad Relativa (DR%) en la confección de las probetas para ensayo, consiste en que la Densidad Mínima (o e_{\max}),

calculada según la norma ASTM 4254 [8], tiende a aumentar para mayores valores de D_{50} [20][25][26][27]. En otras palabras, el uso del parámetro de comparación de la DR% implicaría que la densidad de confección de la muestra escalada tenga un valor menor. Este fenómeno se puede explicar por la segregación que se produce durante el ensayo mismo, por la influencia de la rugosidad de las partículas a tamaños menores (efecto escala) y por el efecto de la sobrecarga del suelo durante el ensayo. En efecto, según lo que se observa en la práctica, durante el vertido de material existe un efecto de mayor reacomodo y compresión local de las partículas ubicadas inmediatamente sobre las vertidas [24]. Debido a anterior, se recomienda utilizar cuidadosamente el parámetro DR%, especialmente en los ensayos de laboratorio de resistencia al corte en MGG.

5. ¿Y el Análisis a la Inversa?

Con el objeto de caracterizar geotécnicamente material de lastre o enrocado minero para la construcción de una presa, varias series de ensayos de laboratorio fueron ejecutadas en el laboratorio IDIEM de la Universidad de Chile. Entre los ensayos realizados destacan granulometrías, macrogranulometrías, densidades mínimas y máximas, y pruebas triaxiales de gran dimensión, con tamaños de probeta de diámetro 1.0 m y altura 1.8 m, así como también otras de diámetro 15 cm y altura 30 cm.

Entre todos los ensayos triaxiales realizados, particular interés presentaron los resultados de un par de probetas ensayadas en tamaños de celda diferentes, densidades de montaje diferentes y curvas granulométricas también distintas, pero cuyo comportamiento fue muy similar. Al revés del común de este tipo de investigaciones, que buscan entregar un fundamento empírico-teórico de cuanto se puede asemejar el comportamiento en probetas escaladas mediante diferentes metodologías, este trabajo busca a partir de resultados “iguales” de ensayos realizados a distinta escala sobre un mismo MGG, encontrar las posibles causas que puedan explicar el comportamiento y como podrían relacionarse los resultados en términos de densidad o de granulometría.

La Figura 2 presenta los resultados de estas dos probetas triaxiales preparadas sobre muestras remoldeadas. La probeta mayor fue montada a una densidad seca de $2,05 \text{ t/m}^3$ (curva roja segmentada de la Figura 2), en tanto la probeta menor fue montada a una densidad seca de $1,68 \text{ t/m}^3$ (curva azul continua). En términos de DR%, la probeta 15x30 estaría teóricamente mucho más suelta (0,24) que la probeta 100x180 (0,81).

A partir de los datos de los ensayos se han confeccionado los gráficos de la Figura 3, donde se muestra la evolución de la densidad seca de cada probeta y del ángulo de fricción interna movilizado, en función de la deformación unitaria.

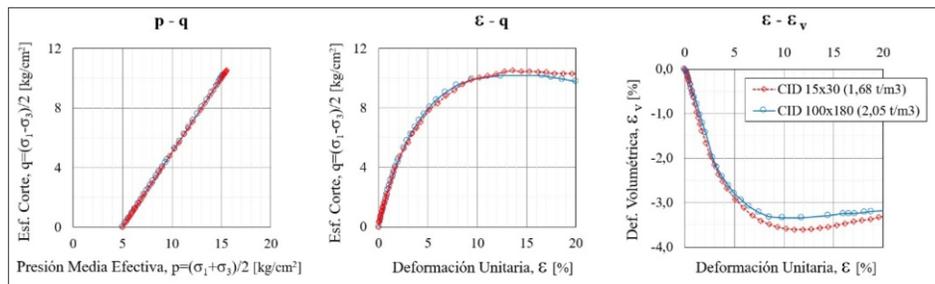


Figura 2. Resultados de ensayos triaxiales sobre muestras provenientes de MGG.

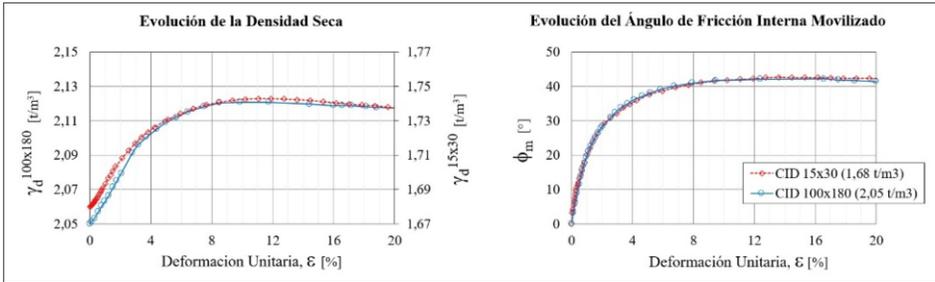


Figura 3. Interpretación de ensayos triaxiales sobre muestras provenientes de MGG.

A partir de los gráficos de las Figuras 2 y 3, es posible observar que ambas probetas presentan un comportamiento muy similar casi idéntico. Este comportamiento pudo ser replicado en otras probetas montadas a similar densidad y cuyos resultados no han sido incluidos en este trabajo con el objeto de no desviar la atención. No obstante, al incrementar aproximadamente un 3% la densidad de confección de las probetas 15x30, o bien, al disminuir aproximadamente un 3% la densidad de confección de las probetas 100x180 se observó respectivamente una mayor o menor rigidización de los materiales que hizo que las curvas ya se fueran diferenciando de las expuestas. Este 3% corresponde coincidentemente a la densidad final de los ensayos aquí presentados. A su vez, dentro del programa se ensayaron diferentes curvas granulométricas, cuyos resultados no fueron tan determinantes en los parámetros finalmente obtenidos.

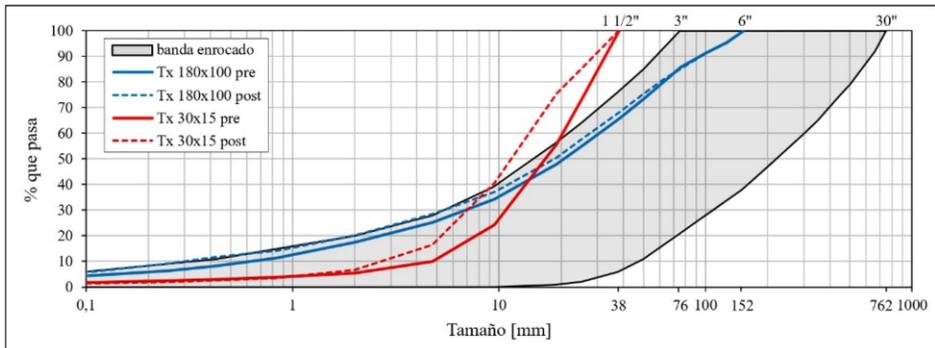


Figura 4. Granulometrías de las muestras de MGG ensayadas.

Las granulometrías y macrogranulometrías de los materiales ensayados presentados en las Figuras anteriores, se muestran en la Figura 4. Estas curvas granulométricas, si bien no obedecen ninguna de las metodologías clásicas de escalamiento como la mostrada en la Figura 1, presentan algunas particularidades entre las que destacan:

- Los materiales ensayados corresponden a tamaño grava, con porcentajes de grava sobre 50% en ambos casos. A su vez, el contenido de arena no superó 25% y el contenido de finos estuvo limitado a fracciones menores que 10%.
- Los tamaños D50 de ambas curvas son muy similares. La curva más gruesa (triaxial 100x180) tiene un D50=20,84 mm y la curva más fina (triaxial 15x30) un D50=17,28 mm.
- La condición final de ambos ensayos indicaría que una densidad seca de 1,74 t/m³ para la granulometría y tamaños menores (15x30), se corresponde con una

densidad seca de $2,12 \text{ t/m}^3$ para la granulometría y tamaños mayores (100x180), para este caso en particular.

- La granulometría del material más pequeño si bien no corresponde ni a una granulometría paralela (homotética) ni a una granulometría cortada del material mayor (MGG), pareciera ser una combinación de ambas. En efecto, al observar la banda granulométrica definida de este material de lastre (Figura 4), la curva más gruesa (100x180) es muy similar al límite inferior de la banda, en tanto, la curva más fina (15x30) es muy similar bajo 10 mm al valor promedio de la banda granulométrica superiormente cortada en $1\frac{1}{2}''$.
- La rotura de partículas que se genera durante los ensayos a causa de la presión de confinamiento de 5 kg/cm^2 y al ensayo propiamente tal, no provoca que las granulometrías se vayan asemejando entre ambos ensayos como podría esperarse intuitivamente, sino más bien se conserva la forma original de cada una de las granulometrías. La probeta 15x30 presentó mayor rotura de partículas que la probeta 100x180.

La Tabla 3 presenta una síntesis con los parámetros geométricos más representativos de los ensayos, junto con los valores de densidad máxima y mínima que permiten tener una mejor idea del grado de compactación de los materiales ensayados.

Tabla 3. Parámetros granulométricos y de densidad de las muestras ensayadas.

Parámetro	Norma	Ensayo			
		Triaxial CID 100x180		Triaxial CID 15x30	
		pre	post	pre	post
D50 [mm]	ASTM D2487	20,84	18,58	17,28	12,05
Cu (Coeficiente de Uniformidad)	ASTM D2487	47,64	89,78	4,36	5,04
Cc (Coeficiente de Curvatura)	ASTM D2487	2,56	3,53	1,31	1,27
Densidad Mínima [t/m^3]	ASTM D4254	-	-	1,58	-
Densidad Máxima Mét. Seco [t/m^3]	ASTM D4253	-	-	1,67	-
Densidad Máxima Mét. Húmedo [t/m^3]	ASTM D4253	-	-	1,81	-
DMCS Proctor Modificado [t/m^3]	ASTM D1557	-	-	2,00	-
Gs Peso Especifico bajo #4	ASTM D854	-	-	2,98	-

6. Conclusiones

La caracterización geotécnica de materiales granulares gruesos MGG posee dificultades no sólo por los altos costos y tiempos de ejecutar ensayos in-situ y de laboratorio a gran escala, sino también debido a la necesidad de utilizar técnicas de escalamiento de tamaños de partículas y de densidades. Desafortunadamente, estas técnicas presentan limitaciones en su uso y aún siguen siendo temas de investigación en la Ingeniería Geotécnica.

Con base en los resultados presentados en este trabajo, es posible indicar que las técnicas de escalamiento dependen de múltiples variables integradas y dependientes entre sí, y no corresponden a fenómenos aislados limitados solamente a comparar la granulometría original vs. granulometría escalada, o bien, la densidad original vs. la densidad escalada. Debido a esto, es recomendable para el caso de los MGG realizar ensayos bajo diferentes condiciones o combinaciones de granulometrías y densidades, evitando representar su comportamiento con sólo unos pocos ensayos escalados. A su

vez se recomienda que estas series de ensayos sean implementadas en el tiempo a lo largo de la construcción y la operación de las obras.

Finalmente, dentro de los ensayos in situ que actualmente se realizan sobre MGG queda como tarea pendiente la confección e implementación de ensayos que permitan medir el grado de compactación o la densidad relativa a gran escala de rellenos que tengan que cumplir requerimientos estructurales o de soporte. Entre las líneas de estudio que se recomiendan, está el análisis de macrodensidades asociadas a diferentes condiciones de disposición, peso específico, composición, tamaño y forma de las partículas de MGG, en función de diferentes niveles de energía de compactación aplicadas por ejemplo en canchas de prueba correctamente instrumentadas. A su vez, otra línea de estudio está relacionada con ampliar las alternativas de escalamiento de tamaño de partículas en MGG, considerando las limitaciones en el uso del MGP, cuyo método está restringido para valores de radios de similitud máximos.

Referencias

- [1] ASTM D422-63(2007)e2 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.
- [2] ASTM D5519-15 Standard Test Methods for Particle Size Analysis of Natural and Man-Made Riprap Materials.
- [3] ASTM D854-14 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.
- [4] ASTM C127-15 Standard Test Method for Relativity Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate.
- [5] ASTM D1556/D1556M Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cone Method.
- [6] ASTM D5030/D5030M Standard Test Methods for Density of Soil and Rock in Place by the Water Replacement Method in a Test Pit.
- [7] ASTM D4253-16 Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table.
- [8] ASTM D4254-16 Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density.
- [9] ASTM D1557-07 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)).
- [10] ASTM D698-12e2 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)).
- [11] ASTM D4718 / D4718M Standard Practice for Correction of Unit Weight and Water Content for Soils Containing Oversize Particles.
- [12] ASTM D3080/D3080M-11 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.
- [13] ASTM D7181-11 Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils.
- [14] ASTM D4767-11 Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils.
- [15] ASTM D2435/D2435M-11 Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.
- [16] ASTM D2434-68(2000) Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head).
- [17] ASTM C131/C131M-14 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
- [18] ASTM C535-16 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
- [19] Dorador L, 2016. Experimental investigation of the effect of broken ore properties on secondary fragmentation during block caving. PhD thesis. The University of British Columbia.
- [20] Dorador L; De la Hoz K; Salazar F; Urbina F, 2018. Consideraciones en la caracterización geotécnica de materiales granulares gruesos.
- [21] Dorador L, 2018. Una revisión de la metodología de granulometría paralela o escalamiento de curvas homotéticas aplicado a la caracterización geotécnica de materiales granulares gruesos. X Congreso Chileno de Geotecnia.

- [22] Ovalle C, Bard E, Dorador L, De La Hoz K, Dano C, Campaña J, Palma C, Hicher P-Y, Acuña G, 2014. Una revisión de ensayos triaxiales en suelos gruesos y enrocados. VIII Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica. Santiago, Chile.
- [23] Verdugo R, De la Hoz K, 2006. Strength and Stiffness of Coarse Granular Soils. Geotechnical Symposium "Soil StressStrain Behaviour: Measurement, Modelling and Analysis, Rome, March 16–17, H. I. Ling, L. Callisto, D. Leshchinsky, and J. Koseki, Eds., Springer, Dordrecht, The Netherlands, p. 243–252.
- [24] Dorador L; Poblete M; Foretic I, 2018. Densidades mínima y máxima en materiales granulares gruesos – resultados preliminares de un programa de ensayos en ejecución.
- [25] Abbas A M, 2012. Uncompacted void content versus maximum particle size for rockfill materials. International Journal of Eng. Sci. and Technology (IJEST) ISSN: 0975-5462, vol. 4 No.01.
- [26] Dorador L, 2010. Análisis experimental de las metodologías de curvas homotéticas y corte en la evaluación de propiedades geotécnicas de suelos gruesos. M.Sc. thesis, Department of Civil Engineering, University of Chile, Santiago, Chile.
- [27] Riquelme J; Dorador L, 2017. Methodology to Determine Maximum and Minimum void index in Coarse Granular Soils from Small-Scale Tests Correlations. 70th Canadian Geotechnical Conference, Ottawa, ON, Canada.