

Coarse granular materials, a comprehensive approach for the geotechnical characterization of colluvial materials in mining projects

Materiales granulares gruesos, un enfoque integral para la caracterización geotécnica de coluvios en proyectos mineros

Adriana Ojeda & Tomás Opazo & Jonathan Cabrera

Departamento de Geotecnia, EGSciences, Chile, Ojedaadriana8@gmail.com

The characterization of colluvial soils represents one of the main challenges in geotechnical engineering due to their unique behavior, heterogeneous composition, deformation patterns, and sliding distinct from other soil types. These colluviums, which move slowly and accumulate at the foot of slopes, often contain millions of cubic meters of mass, defining the soil's geological profile. The diversity of elements, such as large boulders or coarse granular materials with dimensions greater than 3 inches, as well as heterogeneous mixtures of clays, silts, sands, and gravels complicates their characterization.

As a result, in recent years, various authors have focused their research on coarse granular soils and colluviums, leading to new fields of study and the need to develop a comprehensive characterization criterion. This work presents the analysis of a unified criterion for the geotechnical characterization of colluviums, considering factors such as the relationship of their support structures, percentages of soil matrix and oversize particles larger than 3 inches, up to 10 ft boulders, taking into consideration the characteristics of the soil matrix based on its particle size distribution, Atterberg limits, strength parameters, deformational properties, and permeability, as well as the use of geophysical explorations to assess the material's strength, considering the interaction and contribution of all soil support structures.

This criterion aims to define geotechnical geological units by applying the concepts of coarse granular materials mechanics to colluvial materials. Through a more accurate and adjusted characterization of these materials, it enables the optimization of designs and resources in medium and large-scale geotechnical projects.

KEYWORDS: Suelos coluviales, bimrock, clastos, materiales granulares gruesos, velocidad de onda de corte.

1 INTRODUCCIÓN

Los proyectos mineros, generalmente se desarrollan en contextos geológicos especiales, planteando diversos desafíos tanto geológicos y geotécnicos, propios de cada proyecto.

Uno de estos desafíos es caracterizar geotécnicamente materiales coluviales cuyos granos tienen un tamaño mayor a 3 pulgadas, en los cuales la mecánica de suelos tradicional no aborda en detalle la caracterización de las partículas de sobretamaño. En la mayoría de los casos, esto se traduce en una estimación visual por parte del profesional, lo que puede resultar en una sobreestimación conservadora de propiedades intrínsecas, como la resistencia al corte.

Para abordar este tema, es necesario recurrir a los fundamentos de los Materiales Granulares Gruesos (MGG), una disciplina esencial dentro de la ingeniería geotécnica, los cuales se destacan por sus notables propiedades, como la resistencia y versatilidad, haciéndolos indispensables en diversas aplicaciones tanto como en la construcción civil y minera. Estudios tales como, Besio Hernandez et al 2013, Contreras Bustos 2011, Indraratna 1993, Leps 1970, Marachi 1969, Marsal et al 1965, han resaltado consistentemente la importancia y el comportamiento distintivo de estos materiales en el ámbito geotécnico.

A partir del concepto de los Materiales Granulares Gruesos, es posible clasificar el material según su origen en dos tipos principales: Tipo 1, que incluye materiales de cantera, botaderos de lastres mineros, entre otros; y Tipo 2, que abarca materiales generados mediante procesos geológicos naturales, como los materiales coluviales y aluviales.

Es importante destacar que los materiales coluviales se encuentran en una etapa de transición entre la mecánica de suelos y la mecánica de materiales granulares gruesos (Dorador & Villalobos 2020).

Hasta la fecha, existen estudios que proponen caracterizar el material coluvial utilizando enfoques como Bimrock (Bloque en Matriz), Bimsoil o Bimrock no consolidado. Autores como Kalender et al 2014 Medley & Goodman 1994, han propuesto modelos que permiten aumentar la resistencia al corte según el porcentaje de bloques presentes en la matriz del suelo.

Otros autores han relacionado los materiales Bimrock no consolidados con la mecánica de MGG Tipo 2, ajustando modelos de Bimrock en base a resultados de ensayos triaxiales gigantes de materiales compuestos en su totalidad por bloques, con un amplio rango de resistencia a la compresión no confinada (materiales fluviales y aluviales) (Torres 2021).

En el presente artículo, se aborda la caracterización geotécnica mediante el enfoque Bimrock, calibrado para MGG Tipo 2, utilizando información de prospecciones, ensayos de laboratorio, y geofísica MASW. Estos métodos fueron aplicados en un estudio geotécnico de un proyecto minero ubicado en un ambiente geológico coluvial.

1.1 Geología

La estratigrafía regional está compuesta por unidades metamórficas, sedimentarias, volcánicas e intrusivas, con edades desde el Cretácico hasta el Cuaternario. En la base se presenta una extensa secuencia de rocas metamórficas del

Complejo Arquía de edad Cretácica; seguido de rocas ígneas y sedimentarias de la Formación Quebrada Grande del Cretácico Inferior, secuencia litológica que conforma el basamento de la Cuenca Amagá-Cauca. Por encima de todo, se presentan las secuencias sedimentarias de la Formación Amagá y las volcánicas de la Formación Combia, desde el Oligoceno hasta el Mioceno. Estas secuencias han sido cortadas por cuerpos intrusivos que conforman el Támesis Stock del Mioceno Tardío. En ambos flancos del río Cauca existen extensos depósitos coluviales y aluviales que cubren parcialmente las unidades litológicas descritas.

Las principales características estructurales de carácter regional están constituidas por los sistemas de fallas Romeral y Mistrato, de dirección predominantemente NNO-SSE y extensión kilométrica, estas se proyectan hacia el Este y Oeste del área de estudio que comprenden los bordes de la Cuenca de Amagá. La Falla de Arma, con dirección NO-SE, se extiende paralela al cauce del río Cauca y comprende el control estructural del río Cauca en este sector.

1.2 Geomorfología

El lugar de estudio presenta tres grandes rasgos morfológicos, la primera de ella es una extensa meseta con elevaciones que oscilan entre los 1900 ms.n.m y 2300 ms.n.m, formado por cerros y lomas, surcados por barrancos fluviales, con flancos de pendientes suaves a moderadas, compuestas principalmente por suelos residuales, depósitos coluviales y afloramientos rocosos aislados, con presencia de vegetación antrópica y ganadera producto de la actividad agrícola y ganadera. Mientras que al Noreste de la zona de estudio se extiende una extensa pendiente suave a moderada (10° a 13°) que culmina en el río Cauca.

Esta morfología se configura en depósitos coluviales-aluviales con presencia de vegetación antrópica. Entre la meseta y la ladera existe una fuerte pendiente de hasta 1000 metros de altura entre la base y la cresta de la pendiente, generando una inclinación de hasta 45° diseccionadas por pequeños arroyos.

Por otro lado, la morfología se configura en afloramientos de rocas vulcano-clásticas, con depósitos coluviales en el pie de la pendiente. En general presenta vegetación arbustiva natural. Al sur existe una zona de relieve ondulado formada por cerros y lomas, compuestas por sedimentos de la formación amagá con estrato coluvial-aluvial de espesor variable.

2 METODOLOGÍA

El presente artículo propone la aplicabilidad del cálculo del ángulo de fricción interna de materiales granulares gruesos y el enfoque Bimrock (Torres 2021), corroborando una primera aproximación de los valores de resistencia al corte del material.

2.1 Parte I

Se recopiló una base de datos durante cinco campañas geotécnicas realizadas en la zona de estudio entre los años 2018 y 2022. Estos datos permitieron caracterizar el material coluvial mediante ecuaciones empíricas basadas en el porcentaje de clastos presentes

en la matriz, así como parametrizar la resistencia de la matriz del suelo mediante un análisis estadístico completo. Se consideraron diversos factores como el contenido volumétrico de canto, fragmento de roca, grado de alteración in situ, muestras de sondajes, densidad, consistencia de la matriz, grado de cementación, tamaño, forma, superficie y naturaleza de la matriz.

Además, se compararon los resultados obtenidos mediante ensayos de resistencia al corte en la matriz del suelo con métodos geofísicos MASW (Multi-Channel Analysis of Surface Waves), con la finalidad de analizar el comportamiento tenso-deformacional de los suelos coluviales hasta profundidades de 30 metros, utilizando la velocidad de ondas de corte (Vs) y considerando las variaciones por el porcentaje de clastos presentes en la matriz.

A diferencia de los sondajes limitados por su diámetro en profundidad, así como las calicatas y trincheras que solo permiten evaluaciones discretas en superficie, los ensayos geofísicos MASW permiten determinar de manera continua la rigidez de la masa del suelo a lo largo del perfil. Este procedimiento implica la disposición de una matriz de geófonos o acelerómetros en la superficie del suelo, los cuales registran las ondas de superficie generadas por una fuente de vibración controlada. Estas ondas interactúan con las diferentes capas del subsuelo, produciendo un conjunto de ondas superficiales con diversas velocidades de fase.

Para garantizar la fiabilidad de la comparación, dada la variabilidad de los suelos coluviales, se estableció un criterio de inclusión que consiste en comparar exclusivamente los parámetros de resistencia de los sondeos realizados a una distancia inferior a los 30 metros del perfil geofísico obtenido mediante la técnica MASW. Para tener un modelo de los datos se utiliza una regresión múltiple entre las variables de profundidad en los sondajes, porcentaje de clastos (bloques) y velocidad de onda de corte con un ajuste mediante un paraboloides.

2.2 Parte II

En primera instancia, se parte desde el enfoque Bimrock (Kalender et al. 2014, Medley & Goodman 1994), el cual evalúa las propiedades de la muestra en: proporción de bloques, resistencia de la matriz, forma de los clastos y grado de consolidación. Luego se determina el ángulo de fricción interna y la cohesión, la cual depende de la geología del lugar de estudio (Shin H. & Santamarina J. C. 2013, Pellegrino 1965). y en segunda instancia mediante el enfoque de MGG, partiendo desde la base de que ambos son tipos de materiales distintos. Esto permite establecer características intrínsecas del material. En segunda instancia, se emplea el enfoque de MGG, partiendo de la premisa de que ambos son tipos de materiales distintos

Se propone la calibración del ángulo de fricción interna del material del modelo Bimrock del modelo de (Torres Méndez, 2021) con una sólida base de datos, y con información de investigaciones realizadas anteriormente Dorador & Villalobos 2020, Kalender et al. 2014, Sonmez et al. 2004 2006, Medley 1997, Siddiqi 1984, Raymond & Terranova 1984, Marsal 1973 1980, Marsal et al. 1965, Pellegrino 1965. Estos datos permiten determinar los parámetros de resistencia y caracterizar el material en función del

porcentaje de clastos presente en la matriz, definiendo límites como:

- Coluvial matriz - clastos soportados
- Coluvial matriz - clasto soportado
- Coluvial clasto - clastos soportados

Es fundamental considerar que el enfoque Bimrock parte de la premisa de que el ángulo de fricción interna de la matriz para un 0% de clastos aumenta con un ligero incremento de la Proporción Volumétrica de Bloques (PVB) del 25%. El aumento más significativo se observa entre el 25% y el 75% de PVB, mientras que apenas hay variaciones si la proporción de bloques supera el 75% (Torres Méndez, 2021). Esto resulta en un comportamiento característico denominado Bimrock.

La metodología de Torres se basa en los principios de la ecuación Kalender et al. 2014, como resultado de un exhaustivo análisis de datos del ángulo de fricción interna. Torres propone modificar el postulado de Kalender et al. 2014, adicionando un 10 a la proporción de volumen de bloque, para el caso del ángulo de fricción interna del Bimrock quedando la siguiente ecuación:

$$\phi_{bimrock} = \phi_{matriz} \left[1 + 1000 \left[\left(\frac{\alpha}{\phi_{matriz}} \right) - 1 \right] \left(\frac{VBP}{VBP + 1} \right) + (\ln(1.8) * VBP + 15) \right]$$

$$C_{bimrock} = \frac{UCS_{bimrock} * (1 - \sin(\phi_{bimrock}))}{2 \cos(\phi_{bimrock})} * 1000$$

Donde;

- ϕ_{matriz} : Ángulo de fricción interno de la matriz fina
- VBP : Proporción volumétrica de bloque
- α : Ángulo de reposo de bloques, Figura 1
- $UCS_{bimrock}$: Resistencia de la muestra, Tabla 1

↑ Ángulo de reposo (α) de clastos aumenta	angular (α > 45°)	Rugosidad de la superficie aumenta
	subangular (35° < α < 45°)	Rugosidad de la superficie aumenta
↕ Redondez de clastos aumenta	subredondeada (25° < α < 35°)	Muy rugoso
		Rugoso
		Ligeramente rugoso
		Suave
↓ Ángulo de reposo (α) de clastos disminuye	redondeada (α < 25°)	Liso
		Muy rugoso
		Rugoso
		Ligeramente rugoso
		Suave
		Liso

Figura 1. Valores de ángulo de reposo de bloques (Kalender et al 2014)

Tabla 1 Guía para determinar el valor del parámetro A en función de la condición del contacto clasto/matriz. Modificado de Sonmez et al. 2006.

Descripción	Valor de A
Casi no existe cohesión entre clastos.	0
Clastos redondeados	
Cohesión débil entre clastos y matriz.	10
Clastos subredondeados	
Cohesión moderada entre clastos y matriz.	50
Clastos subangulosos	
Cohesión fuerte (pero menor que cohesión de la matriz) entre clastos y matriz. Clastos angulosos	500

3 ANÁLISIS DE DATOS

3.1 Parte I

Se realizó un análisis estadístico de los parámetros de resistencia de la matriz a partir de la base de datos del caso de estudio sobre material coluvial. Se llevaron a cabo ensayos triaxiales CIU y ensayos de corte directo en muestras tanto de la unidad geotécnica 1 (U1), donde el porcentaje de clastos no excede el 25%, como de la matriz de la unidad geotécnica 2 (U2), donde dicho porcentaje varía entre el 25% y el 60%. En la unidad geotécnica 3 (U3), donde el porcentaje de clastos excede el 60%, debido a su naturaleza clasto-soprotada, la realización de ensayos convencionales en la matriz del suelo resulta inviable.

Según lo anterior para realizar un análisis estadístico de los parámetros resistente se requiere un tamaño de muestra (n) igual o superior a 30 ($n \geq 30$), para asumir una tendencia de distribución normal en los análisis de datos (Devore 2008).

Como se observa en la Tabla 2, se obtuvieron un total de 43 muestras durante las campañas geotécnicas llevadas a cabo en el sector para la Unidad 1, y 20 muestras para la Unidad 2. Considerando esta distribución, y siguiendo las pautas establecidas por Devore 2008, se optó por utilizar los parámetros de resistencia asociados a la Unidad 1 como base para el cálculo mediante la metodología Bimrock. Esta elección se fundamenta en la premisa de que las tres unidades comparten la misma matriz de suelo, y que su clasificación se basó en los distintos porcentajes de clastos presentes, en lugar de en diferencias significativas en las características de la matriz.

Tabla 2. Resumen de análisis estadístico de las propiedades de resistencia al corte de las unidades 1 y 2.

Unidad Geotécnica	Descripción	ϕ' (°)	c' (kPa)
U1	Tamaño de muestra	69	43
	Mínimo	8	2

Unidad Geotécnica	Descripción	ϕ' (°)	c' (kPa)
U2	Máximo	50	53
	Desviación estándar (°)	8.25	13.79
	Promedio	26.22	24.07
	Tamaño de muestra	28	20
	Mínimo	9	1
	Máximo	34	59
	Desviación estándar (°)	6.03	19.77
Promedio	26.24	22.45	

Los resultados y el análisis de las propiedades de resistencia al corte de la unidad geotécnica 1 se presentan en Figura 2 y Figura 3.

Es importante destacar que los ensayos realizados en la unidad geotécnica 2 se llevan a cabo exclusivamente en la matriz del suelo, lo que impide captar con precisión la resistencia real del suelo en presencia de un porcentaje elevado de clastos. Estos ensayos pueden registrar un ligero aumento en la resistencia de la matriz cuando hay partículas de más de 3 pulgadas de tamaño. Sin embargo, este aumento no reflejaría con exactitud la realidad, ya que no caracteriza adecuadamente la resistencia individual de la matriz, ni tampoco los clastos, ni la resistencia integral en función de la influencia combinada de ambos elementos y su proporción, como lo hacen las metodologías bimrock.

Además, los ensayos estadísticos correspondientes a la unidad geotécnica U2 no alcanzan un universo muestral mayor a 30. Por lo tanto, solo se considerarán en la aplicación de la metodología los parámetros de resistencia obtenidos de la matriz de la U1.

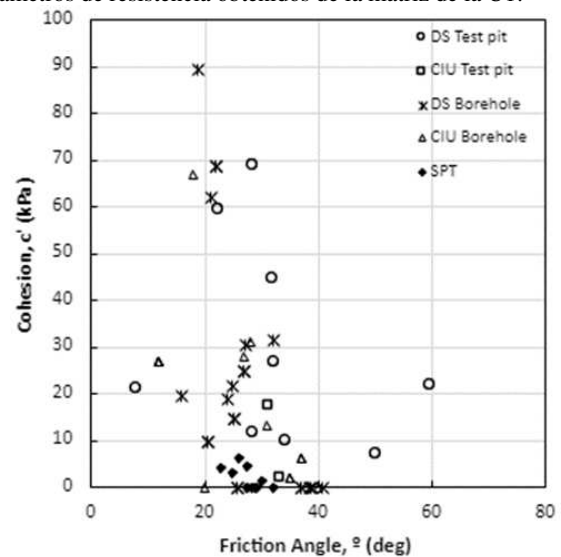


Figura 2. Resultados de parámetros de resistencia al corte efectivos de la U1.

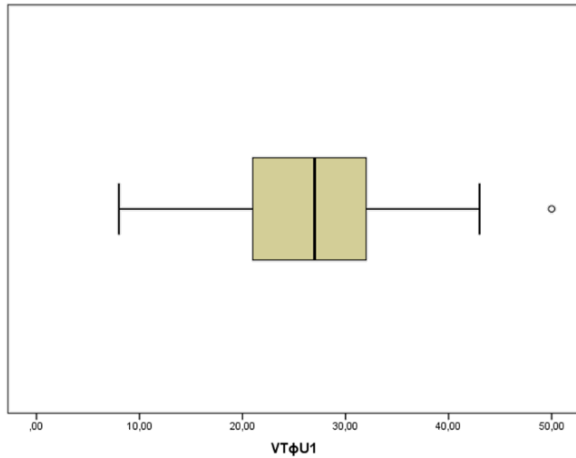


Figura 3 Prueba de varianza del ángulo de fricción en términos de e sfuerzo efectivo de la matriz fina de la U1.

3.1.1 Ensayos de compresión no confinada.

A continuación, se describen los ensayos realizados en las diferentes unidades geotécnicas, las propiedades de resistencia a la compresión no confinada se detallan en:

- En la Unidad Geotécnica 1 (U1), se llevaron a cabo ensayos triaxiales consolidados no drenados (9), ensayos de compresión no confinada (7) y ensayos de presiómetro (16).
- Para la Unidad Geotécnica 2 (U2), se realizaron ensayos triaxiales consolidados no drenados (11), ensayos de compresión no confinada (21) y ensayos de presiómetro (8).
- En la Unidad Geotécnica 3 (U3), donde el porcentaje de clastos excede el 60%, debido a su naturaleza clasto-soportada, la realización de ensayos en suelo convencionales resulta inviable.
- Respecto a la Unidad Geotécnica 4 (U4), se efectuaron ensayos de compresión no confinada (62) y pruebas de carga puntual (39).

Tabla 3. Resistencia a la compresión no confinada de las unidades geotécnicas.

Unidad Geotécnica	Unidad	Valor
U1	Su (kPa)	89
U2	Su (kPa)	112
U4	UCS(MPa)	46

El estudio abarca una extensión de 6 km² de suelo coluvial. Se llevaron a cabo un total de 140 sondajes, 155 pozos de prueba y 1 2 zanjas, distribuidos en diferentes campañas geotécnicas a lo largo de un período de 5 años.

Dada la variabilidad de los datos encontrados, surge como factor clave para caracterizar el material coluvial a lo largo y ancho

del terreno de manera continua el uso de la geofísica, especialmente para comprender el comportamiento en profundidad de la rigidez del suelo con las ondas de corte.

En base a esta premisa, se procede a recopilar la información de clasificación sísmica de cada perfil geofísico de MASW y relacionarla con el porcentaje de clastos encontrados en profundidad para los sondajes cercanos, con un máximo de 30 metros desde el perfil geofísico.

Con esta información, se procede a realizar una regresión multivariable ajustando un paraboloides elíptico tal como se presenta en Figura 4.

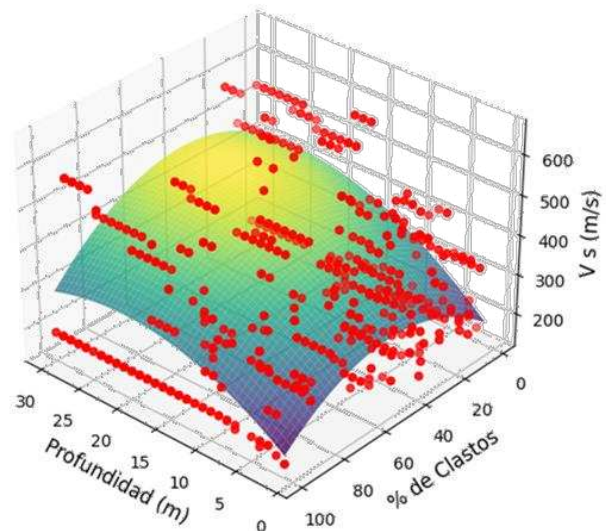


Figura 4. Regresión multi variable con $R^2=0.26$.

Como se puede observar en la Figura 4 existe un aumento de la velocidad de onda de corte para un rango de entre 20 y 60% de clastos, además de un aumento en la velocidad de onda en profundidad independiente del % de clastos.

Ya que el modelo no explica la generalidad del terreno considerado, se lleva a cabo una comparación entre el porcentaje de clastos y la velocidad de onda de corte en profundidad para un sondaje específico (S-1). Esto se hace con el fin de visualizar los efectos locales que puedan influir.

En Figura 5 y Figura 6 se compara el perfil geofísico con la distribución de clastos en profundidad a partir del S-1. Se observa que la distribución de clastos es aleatoria y que la geofísica para el perfil no responde en la totalidad a los cambios de estratos con distinto porcentaje de bloques en profundidad pese a que, a ciertas profundidades, por ejemplo, 10, 20 y 25 m de profundidad si hay aumentos significativos, que involucran estratos con un % de bloques por sobre el 20%.

Las pequeñas variaciones en altura pueden asociarse a diferencias de cotas y a las abruptas pendientes en la extensión del sitio en estudio.

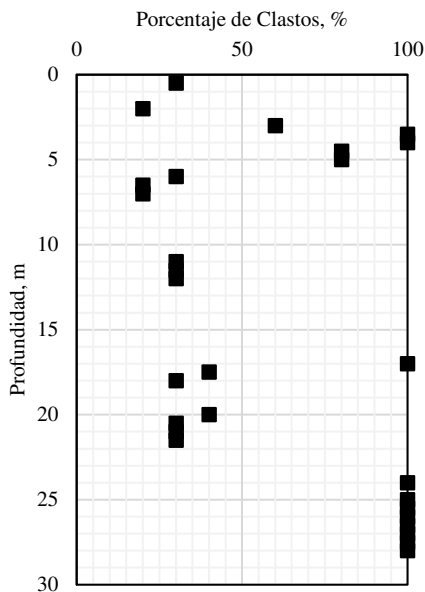


Figura 5. Distribución del porcentaje de clastos en profundidad para el sondeo S-1.

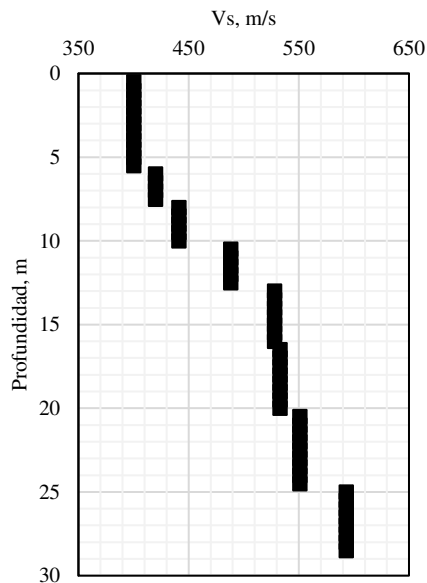


Figura 6. Perfil de velocidades de onda de corte en profundidad cercano (a menos de 5 metros) del S-1.

3.2 PARTE II

A partir de la base de datos y del análisis estadístico se obtienen los parámetros de entrada al método propuesto por Torres Méndez 2021. Estos se observan en la .

Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de entrada al modelo Bimrock.

VBP %	ϕ_{matriz}	α	A	UCS_{matriz} (MPa)
30	26.22	25	10	0.057

Los resultados obtenidos al aplicar la metodología se presentan en la Tabla 5:

Tabla 5. Resultados a partir del modelo Bimrock.

$\phi_{bimrock}$	$UCS_{bimrock}$ (kPa)	$C_{bimrock}$ (kPa)
57	38	11

Según los resultados obtenidos, la proporción de bloques fluctúa aproximadamente alrededor del 30%, obtenidos a partir de la media de los sondeos cercanos a 5 metros de la línea geofísica. Esto, de acuerdo con lo establecido por Kalender et al. 2014 y Medley & Goodman 1994, podría ser considerado como una muestra de Bimrock.

El ángulo de fricción interna del Bimrock se observa que aumenta en comparación a la matriz y la cohesión disminuye al igual que el $UCS_{bimrock}$, lo cual es de esperar según lo mencionado por Lindquist & Goodman 1994 y Sonmez et al. 2006.

4 CONCLUSIONES

En este estudio, se comparan resultados de geofísica con la distribución de clastos en profundidad. Se desarrolla un modelo de regresión múltiple mediante ajuste de curvas. Finalmente se aplica la metodología Bimrock de Torres 2021, la cual busca motivar la estimación menos conservadora en unidades geotécnicas con porcentaje de clastos considerables.

Del modelo de regresión múltiple, se puede concluir que en toda la extensión del terreno se observa un aumento en la velocidad de onda de corte para estratos con porcentajes de clastos entre el 20% y el 60%. Sin embargo, a pesar de esto, se reconoce que el modelo ajustado no es completamente representativo frente a la dispersión de los datos.

Si bien la metodología bimrock tiene un sustento en ensayos de laboratorio a gran escala, para caracterizaciones de terreno tan extensas y en materiales coluviales específicamente, no resulta una metodología representativa de toda la zona. Si no, más bien un modelo que puede ser aplicado localmente.

Cabe destacar que el modelo de regresión múltiple realizado en este estudio deja en evidencia que hay casos donde pese a existir estratos con alto contenido de clastos (sobre 80%) no existe una tendencia que indique que su capacidad para transmitir ondas de corte aumente.

Al realizar los cálculos a partir de los datos de la matriz de suelo de la unidad geotécnica, según el porcentaje de clastos del sondeo

en estudio, queda en evidencia el considerable aumento en las propiedades de resistencia al corte del material por el efecto de los bloques sobre su capacidad para transmitir esfuerzos de corte alcanzando ángulos de fricción interna de 57° .

Desde el punto de vista Bimrock, el estrato del sondaje seleccionado muestra tendencias hacia un comportamiento Bimrock, especialmente en lo que respecta al contenido volumétrico de bloques. Esto lo convierte en un candidato óptimo para la evaluación de la geofísica en el campo. Sin embargo, es importante destacar que la variable de proporción volumétrica de bloques es altamente sensible, por lo que realizar una buena aproximación de este parámetro resulta fundamental.

5 RECOMENDACIONES

Las recomendaciones de este estudio se enfocan en consideraciones al momento de realizar estudios geotécnicos sobre grandes extensiones de terreno con materiales coluviales, tales como:

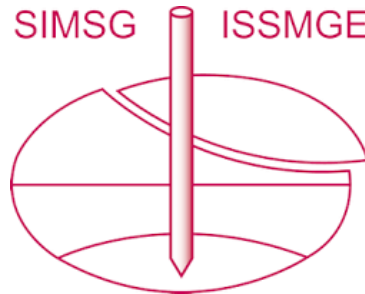
- En trabajos futuros, se deben considerar las características de las rocas del sector y sus procesos de meteorización.
- Se recomienda llevar a cabo los ensayos convencionales, como calicatas, trincheras y sondajes, de manera planificada y diseñada en conjunto con las investigaciones geofísicas. Esto permitirá reducir el margen de error asociado a la heterogeneidad de los suelos coluviales y las pendientes abruptas del terreno.
- Dado que la variable más importante en la resistencia al corte en MGG, al emplear el enfoque Bimrock, es la proporción volumétrica de bloques, se hace fundamental realizar una óptima aproximación de porcentaje de clastos en terreno, ya que el valor del ángulo de fricción en la ecuación propuesta en este trabajo depende directamente de PVB.

Por otro lado, y en relación con el enfoque Bimrock para determinar los parámetros de resistencia al corte, es crucial destacar la importancia de caracterizar de manera conservadora la matriz de suelo en toda la extensión del terreno. En aquellos casos en los que se identifique un aumento significativo de clastos, la metodología Bimrock sugiere evaluar meticulosamente los límites y profundidades de la unidad caracterizada, especialmente para proyectos que involucren excavaciones y cortes de taludes.

6 REFERENCIAS

- Affipour, M., & Moarefvand, P. (2014). Mechanical behavior of bimrocks having high rock block proportion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 65, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.11.008>
- Barton, N., & Kjærnsli, B. (1981). Shear Strength of Rockfill. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(7), 873-891. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001167>
- Besio Hernandez, G. A., Sullivan, M. G., Robert, E. S., & Alvarado, R. V. (2013). *USO DEL MÉTODO DE CURVAS HOMOTÉTICAS EN LA REPRESENTACIÓN DE ENSAYOS MONOTÓNICOS Y CÍCLICOS EN SUELOS GRUESOS*. 138.
- Campos-Muñoz, D. (2018). Evaluation of bearing capacity in Bimsoil under a shallow foundation using FEM. *Revista De La Facultad De Universidad Del Zulia*.
- Contreras Bustos, L. R. (2011). *COMPORTAMIENTO FRICCIÓNANTE DE MATERIALES GRANULARES GRUESOS*. 227.
- De la Hoz, K. (2007). *ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE EN SUELOS GRANULARES GRUESOS*. Universidad de Chile.
- Devore, J. L. (2008). *Probabilidad y*
- Donaghe, R. T., & Ill, V. H. T. (s. f.). *STRENGTH AND DEFORMATION PROPERTIES OF EARTH-ROCK MIXTURES*.
- Dorador, L. (2010). *Análisis Experimental de las Metodologías de Curvas Homotéticas y Corte en la Evaluación de Propiedades Geotécnicas de Suelos Gruesos*. Universidad de Chile.
- Dorador, L. (2018). *Consideraciones en la Caracterización Geotécnica de Materiales Granulares Gruesos*.
- Dorador, L., Méndez, C. T., & Villalobos, F. A. (2021). *Aplicación de enfoque bimrock para la evaluación de propiedades geomecánicas de materiales granulares gruesos*.
- Dorador, L., & Villalobos, F. A. (2020). Analysis of the geomechanical characterization of coarse granular materials using the parallel gradation method. *Obras y Proyectos*, 27, 50-63. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132020000100050>
- Indraratna, L. (1993). *Large-scale triaxial testing of greywacke rockfill*. 15.
- Irfan, T. Y. (1993). *Effect of the coarse fractions on the shear strength of colluvium*.
- Kalender, A., Sonmez, H., Medley, E., Tunusluoglu, C., & Kasapoglu, K. E. (2014). An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoils. *Engineering Geology*, 183, 65-79. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.007>
- Lee, K. L., Farhoomand, I., & University of California, L. A. (1966). *Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression*. [University of California] [Los Angeles, Calif.]; WorldCat.
- Leps, T. M. (1970). Review of Shearing Strength of Rockfill. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(4), 1159-1170. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001433>
- Lindquist, E. S., & Goodman, R. E. (1994). *Strength and Deformation Properties of a Physical Model Melange*. ARMA-1994-0843.
- Marachi, N. (1969). *STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF ROCKFILL MATERIALS*.
- Marsal, R. (1973). *Mechanical properties on rockfills*.
- Marsal, R. (1980). *Rockfill—Parte 2.pdf*.
- Marsal, R., Moreno Gómez, E., Núñez, A., & Moreno, R. (1965). *INVESTIGACIÓN SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE SUELOS GRANULARES Y MUESTRAS DE ENROCAMIENTO*.
- Medley, E. (1997). Uncertainty in estimates of block volumetric proportions in melange bimrocks. *Engineering geology and the environment. Proc. symposium, Athens, 1997, vol.1*, 267-272.
- Medley, E., & Goodman, R. (1994). *Estimating the block volumetric proportion of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks)*.
- Pellegrino, A. (1965). *Geotechnical Properties of Coarse-Grained Soils*.
- Raymond, L. A., & Terranova, T. (1984). Prologue The melange problem—A review. En L. A. Raymond (Ed.), *Melanges: Their Nature, Origin, and Significance* (Vol. 198, p. 0). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/SPE198-p1>
- Shin H. & Santamarina J. C. (2013). Role of Particle Angularity on the Mechanical Behavior of Granular Mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(2), 353-355. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000768](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000768)
- Siddiqi, F. H. (1984). *Strength Evaluation of Cohesionless Soils with Oversize Particles*. U. of Calif., Davis. <https://books.google.cl/books?id=uOpomgEACAAJ>
- Sonmez, H., Gokceoglu, C., Medley, E. W., Tuncay, E., & Nefeslioglu, H. A. (2006). Estimating the uniaxial compressive strength of a volcanic bimrock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(4), 554-561. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.09.014>
- Sonmez, H., Tuncay, E., & Gokceoglu, C. (2004). Models to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity for Ankara Agglomerate. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(5), 717-729. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.01.011>
- Torres Méndez, C. S. (2021). *FACTIBILIDAD DE APLICACIÓN DE ENFOQUE BIMROCK PARA LA EVALUACIÓN DE PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE MATERIALES GRANULARES GRUESOS*.
- Varadajan, A., Sharma, K., Abbas, M., & Dhawan, A. (2006). *The role of nature of particles on the material behaviour of rockfill materials*. Japanese Geotechnical Society.
- Zhou, Z., Yang, H., Wang, X., & Liu, B. (2016). Model Development and Experimental Verification for Permeability Coefficient of Soil-Rock Mixture. *International Journal of Geomechanics*, 17, 04016106. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000768](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000768)

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.