

Criterios de diseño de estabilidad de taludes en coluviales de bloques (Bimrock o block in matrix)

Design criteria for stability of slope in block coluvials (Bimrock or block in matrix).

Joao Andrés Pasato Jarro.¹, Gregory Guillermo Cuesta Andrade.², Santiago Nathanael Toapanta Santacruz.³ & Jenny Priscila Granja Carrera.⁴

Recibido: 15-04-2019 / Revisado: 25-05-2019 / Aceptado: 29-06-2019 / Publicado: 15-07-2019

Abstract.

DOI: <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i3.1.682>

This research tries to enable the calculation method for the stability of slopes in colluvial materials (Bimrocks or blocks in matrix) that have been studied by several authors in the last years, applied to heterogeneous terrains in tropical and mountainous areas, such as those located in the state of Jambu and Kashmir in India.

Through the use of different graphs, which are the result of several investigations, the methodology is developed that allow to obtain mechanical properties of a slope such as: cohesion (c), friction (ϕ) and resistance to simple compression (UCS) from of the resistant parameters of the matrix. The graphs show the relation between the volumetric blocks proportion (VBP) and the different increments of (c), (ϕ) and (UCS), improving the mechanical properties of the slope.

To validate the methodology of the calculation method, a slope analysis was performed by the finite element method (M.E.F), observing the best results to fit the current situation of the slope (stable). The relevant models for this investigation are: the Lindquist model (1994) and the Sonmez model (2009); where the Safety Factors greater than 1 were obtained in dry and critical conditions.

¹ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales. Macas, Ecuador. joao.pasato@esPOCH.edu.ec

² Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales. Macas, Ecuador. gregory.cuesta@esPOCH.edu.ec

³ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales. Macas, Ecuador. Santiago.toapanta@esPOCH.edu.ec

⁴ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales. Macas, Ecuador. Jenny.granja@esPOCH.edu.ec

Keywords: Bimrock, blocks in matrix, slope, cohesion, friction, uniaxial compression resistance, finite element method (M.E.F).

Resumen.

El presente trabajo intenta habilitar el método de cálculo para la estabilidad de taludes en materiales coluviales (Bimrocks o blocks in matrix) que han sido estudiados por varios autores en estos últimos años, aplicados a terrenos heterogéneos en zonas tropicales y montañosas, como los que se encuentran ubicados en el estado de Jambu y Kashmir en la India.

Mediante la utilización de diferentes gráficos, que son el resultado de varias investigaciones, se desarrolla la metodología que permite obtener propiedades mecánicas de un talud como son: cohesión (c), fricción (ϕ) y resistencia a la compresión simple (UCS) a partir de los parámetros resistentes de la matriz. Los gráficos muestran la relación entre la proporción volumétrica de bloques (VBP) y los diferentes incrementos de (c), (ϕ) y (UCS), mejorando de esta manera las propiedades mecánicas del talud.

Para validar la metodología de cálculo, se realizó el análisis de un talud por el método de elementos finitos (M.E.F), observando de esta manera los resultados que mejor se ajustan a la situación actual del talud (estable). Los modelos que resultaron relevantes para esta investigación fueron: el modelo de Lindquist (1994) y el modelo de Sonmez (2009); donde se obtuvieron factores de seguridad mayores que 1 en condiciones secas y críticas.

Palabras claves: Bimrock, bloques en matriz, talud, cohesión, fricción, resistencia a la compresión uniaxial, método de elementos finitos (M.E.F).

Introducción.

Los materiales coluviales que se encuentran ubicados en los terrenos montañosos del estado de Jammu y Kashmir, pertenecen al grupo de los bimrocks. Están compuestos por mezclas de roca dura y matriz de arcilla blanda, generalmente fallados ya que se encuentran en las estribaciones de la cordillera Himalaya a una altura de 1200 msnm aproximadamente, debido a la amplia distribución de estos materiales en la naturaleza es inevitable el diseño y construcción de obras de ingeniería sobre estos materiales por lo tanto es importante conocer el proceso de rotura y mecanismos relacionado con estos materiales, para el análisis de problemas como es la estabilidad de taludes.

Existen procesos geológicos complejos donde se observan geo materiales (roca o suelo). Estas mezclas de materiales se conoce comúnmente como bimrocks, bloques de rocas incrustados en una matriz más débil Medley (1994), o Stiff rock – soil mixture, mezcla de roca rígida y suelo (Afifipour and Moarefvand, 2012).

Son mezclas de rocas, compuestas de bloques geotécnicamente significativos, dentro de una matriz de textura más fina (Medley & Sanz, 2003). Significa que los bloques deben ser más fuertes que la matriz.

Figura 1. Bimrocks típicos. (Afifipour and Moarefvand, 2012).



Lindquist (1994) y Sonmez et al. (2006) estudiaron los efectos de los factores importantes en el comportamiento mecánico de bimrocks a través de pruebas de laboratorio sobre muestras artificiales con diferentes proporciones volumétricas de bloques, obteniendo un patrón de rotura dominante que pasa generalmente alrededor de los bloques, formando una superficie de rotura tortuosa. Barbero et al. (2008) Realizaron simulaciones en 3D con elementos finitos de ensayos a compresión sobre bimrocks con el objeto de comprender el comportamiento mecánico de estos materiales, realizando modelos con diferentes proporciones volumétricas de bloques, demostrando que la proporción granulométrica, la orientación y la forma de los bloques, son los factores principales para la estimación de sus propiedades mecánicas.

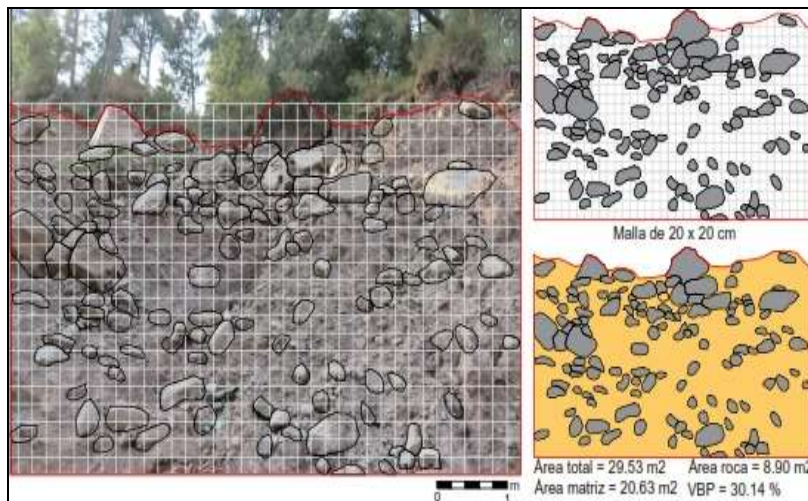
Metodología.

El análisis de la estabilidad del talud se realizó utilizando el software de elementos finitos Phase2 v8.014. Que permite considerar criterios de rotura entre la roca y suelo en combinación con propiedades elásticas e hidráulicas de los diferentes materiales del modelo. El análisis de estabilidad del talud se realizó con los parámetros resistentes mejorados para el coluvial, obtenidos de la metodología bimrock. Y se calculó bajo condiciones secas y en condiciones críticas (saturado y sismo). Donde se pretende obtener factores de seguridad de 1.3 en condiciones secas y ≥ 1 en condiciones críticas.

Obtención del porcentaje volumetrico de bloques (VBP).

La proporción volumétrica de los bloques (VBP), se obtiene mediante el mapeo en 2D del frente del talud (Figura 2). La imagen de la izquierda es la fotografía del afloramiento con un mallado de 20 x 20 cm y las imágenes de la derecha son el resultado del análisis de la fotografía. Obteniendo un área total del afloramiento 29.53 m², área de los bloques de 8.90 m² y área de la matriz de 20.63m² y así una VBP = 30.14 %.

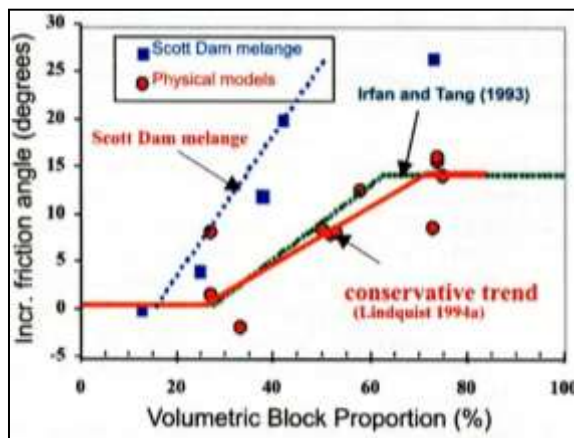
Figura 2. Obtención de la proporción volumétrica de los bloques (VBP).



Incremento del ángulo de fricción según Lindquist, 1994.

La Figura (3), muestra el incremento del ángulo fricción del bimrock (coluvial) con respecto a la proporción volumétrica de bloques. De acuerdo con los resultados de la tesis mencionada por Lindquist (1994), sobre la base de ensayos triaxiales de mezclas reconstruidas.

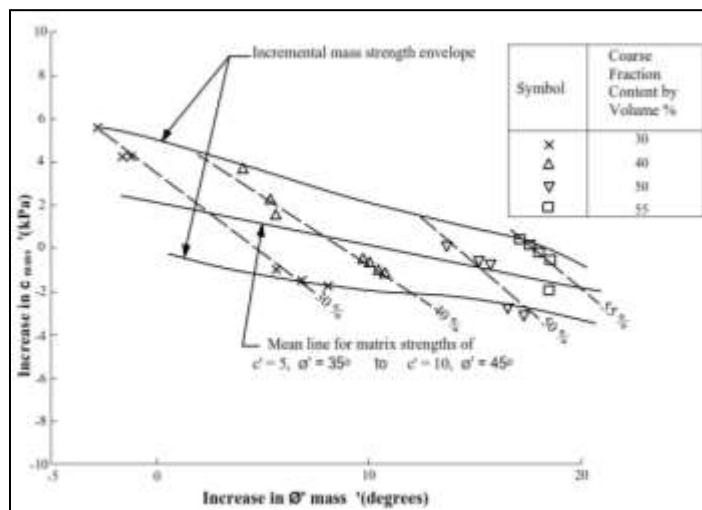
Figura 3. Incr. Fricción vs (VBP) (After Irfan & Tang, 1993); (Lindquist, 1994) y (Medley, 2001)



Incremento de la cohesión After Irfan & Tang 1993

La figura (4), muestra el incremento de cohesión del bimrock con respecto al incremento de fricción propuesto por Irfan y Tang 1993, sobre la base de sus ensayos.

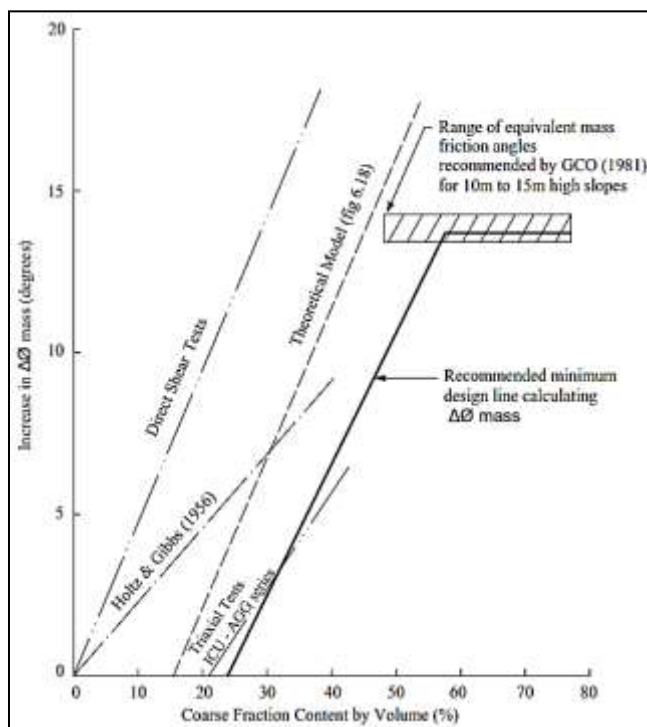
Figura 4. Relación entre el Incr. De Fricción vs Incr. Cohesión. (After Irfan & Tang, 1993).



Incremento de la fricción según After Irfan & Tang 1993.

En referencia a las publicaciones de After Irfan & Tang (1993), para estimar los parámetros de bimrocks. Muestra los incrementos de fricción con respecto al contenido volumétrico de la fracción gruesa, de acuerdo a los resultados obtenidos de ensayos de laboratorio de diferentes autores.

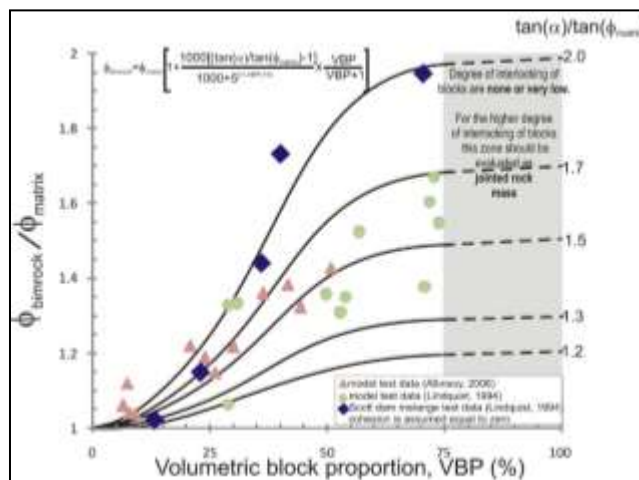
Figura 5. Incr. De fricción para el análisis de taludes en coluviales. (After Irfan & Tang, 1993).



Incremento del ángulo de fricción interno según Sonmez 2009.

La publicación por Sonmez et al. (2009), en relación al Euro rock 2009 y basado en la compilación de resultados Lindquist (1994), propuso una ley de incremento de fricción tal como se establece a continuación

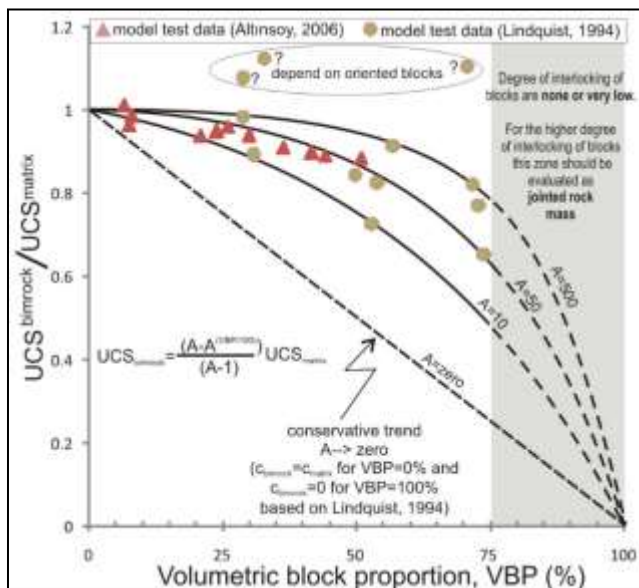
Figura 6. Incr. De fricción según el contenido de bloques. (Sonmez et al, 2009).



Incremento de la resistencia a la compresión simple (UCS) según Sonmez 2009

La resistencia a la compresión simple del bimrock (UCS bimrock) se obtiene mediante la fórmula que se muestra a continuación, donde depende principalmente del Factor A, Proporción volumétrica de bloques y la UCS matriz

Figura 7. Resistencia a la compresión según el contenido de bloque. (Sonmez et al, 2009).



Dónde:

α : Ángulo de reposo de los bloques (35° - 40°).

A: elemento constante que compara el porcentaje de bloque con la resistencia a la compresión.

Tabla 1. Valores de **A** de acuerdo a las propiedades del límite entre los bloques y matriz. (Sonmez et al, 2009).

Descripción	A
Casi ninguna adherencia (cohesión) entre el bloque en la matriz con los bloques redondeados.	0
Adhesión débil (cohesión) entre el bloque y la matriz con los bloques semi-redondeado.	10
Adhesión moderada (cohesión) entre el bloque y la matriz con los bloques semi-angulares.	50
Fuerte adhesión (pero menos que la cohesión de la matriz) entre el bloque y la matriz con bloques angulares.	500

Utilizando las siguientes fórmulas empíricas propuestas por (Sonmez et al, 2009).

$$\phi_{\text{bimrock}} = \phi_{\text{matrix}} \left[1 + \frac{1000 \left(\frac{\text{tg } \alpha}{\text{tg } \phi_{\text{matrix}}} - 1 \right)}{1000 + 5 \frac{1-\text{VBP}}{15}} \times \frac{\text{VBP}}{\text{VBP} + 1} \right]$$

$$\text{UCS}_{\text{bimrock}} = \frac{\left(A - A \frac{\text{VMP}}{100} \right)}{A - 1} \text{UCS}_{\text{matrix}} \quad 0 \geq A \leq 500$$

$$c_{\text{bimrock}} = \text{UCS}_{\text{bimrock}} \times \frac{1 - \sin(\phi_{\text{bimrock}})}{2 \cos(\phi_{\text{bimrock}})}$$

Significa que los parámetros c y ϕ que pueden usarse en un Bimrock, pueden ser obtenidos a partir de correlaciones o ensayos de laboratorio de acuerdo con los siguientes parámetros:

UCS matriz (Ensayos de laboratorio o correlaciones).

VBP (porcentaje volumétrico de bloques)

ϕ Matriz (Ensayos de laboratorio o correlaciones)

c Matriz (Ensayos de laboratorio o correlaciones).

Para aplicar la metodología bimrock se considero los parámetros resistentes de la matriz arcillosa del talud: cohesión de 1.32 t/m² (13 kPa), ángulo de rozamiento interno (ϕ) igual a 28° y resistencia a la compresión simple (UCS) de 25 - 50 KPa o (0.025 - 0.05 MPa).

Parámetros geotécnicos obtenidos de la metodología bimrock.

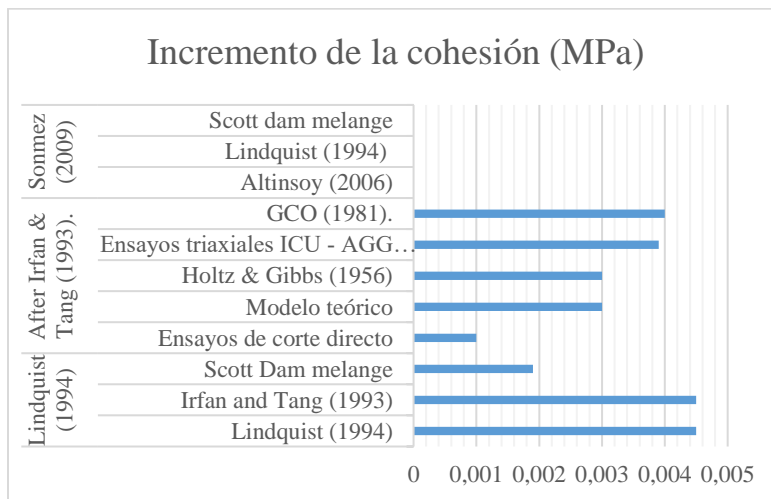
Los parámetros geotécnicos del coluvial se resumen a continuación (tabla 2), donde muestra los valores mejorados de cohesión, fricción y la resistencia a la compresión simple para el talud, obtenidos mediante la metodología bimrock.

Tabla 2. Parámetros geotécnicos mejorados para bimrocks.

Modelo	Autores, Ensayo o Formulación	VBP (%)	Parámetros Geotécnicos Para Bimrocks							
			Matriz (Arcilla)			Parámetros Resistentes del coluvial (Bimrock).				
			C (MPa)	(ϕ)°	UCS (MPa)	Δ de ϕ	(ϕ)°	Δ de C (MPa) Irfan y Tang 1993	C (MPa)	UCS (MPa)
Lindquist (1994)	Lindquist (1994)					2,5	31	0,0045	0,0175	-
	Irfan and Tang (1993)	30	0,013	28	-	2,5	31	0,0045	0,0175	-
	Scott Dam melange					12	40	0,0019	0,0149	-
	Ensayos de corte directo					14	42	0,001	0,014	-
After Irfan & Tang (1993).	Modelo teórico					7	35	0,003	0,016	-
	Holtz & Gibbs (1956)	30	0,013	28	-	7	35	0,003	0,016	-
	Ensayos triaxiales ICU - AGG series					4	32	0,0039	0,0169	-
	GCO (1981).					3	31	0,004	0,017	-
Sonmez (2009)	Altinsoy (2006) Lindquist (1994) Scott dam melange	30	-	28	0,043	13	41	-0,0042	0,0088	0,038

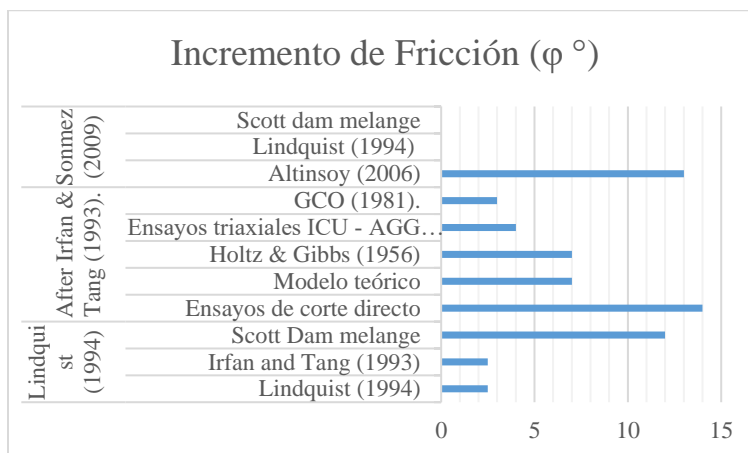
En las siguientes figuras (8-9) se puede observar de manera mas clara los diferentes incrementos de cohesión y fricción obtenidos de acuerdo a los autores propuestos en la metodología bimrock.

Figura 8. Incrementos de Cohesión de la metodología Bimrock.



De los tres modelos propuestos (Zonmez 2009, After Irfan & Tang 1993 y Lindquist 1994), solo ciertos autores generan incrementos de cohesión notables como por ejemplo: Lindquist 1994 - Irfan & Tang 1993 que muestran un incremento de 0.0045 MPa (4.5 KPa).

Figura 9. Incrementos de Fricción de acuerdo a la Metodología Bimrock.



Por otro lado se observa tambien que se puede obtener incrementos de fricción bastante considerables de hasta 14° según los resultados obtenidos de los ensayos de corte directo de After Irfan & tang (1993).

A continuación se presenta los parámetros geotécnicos del talud utilizados para el cálculo de estabilidad (Tabla 3). Donde los distintos valores mejorados de cohesión y fricción se tomaran de la metodología bimrock aplicada anteriormente.

Tabla 3. Parámetros geotécnicos para el análisis de estabilidad del talud.

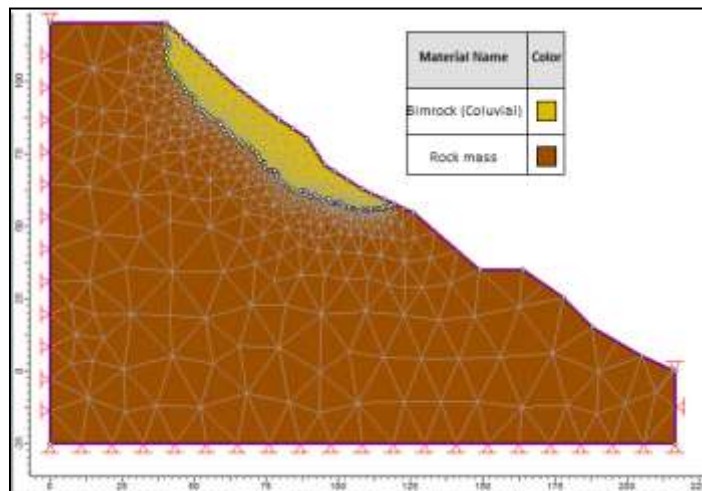
Parámetros geotécnicos utilizados para el cálculo de estabilidad								
Material	Grupo geotécnico	Peso específico (MN/m3)	cohesión (MPa)	Fricción (φ)	UCS (MPa)	E (MPa)	ν	Dilatancia Ψ (°)
1	Bimrock (Coluvial)	0,019	-	-	0.038	30	0,3	φ/2
2	Rock mass	0,026	0,229	49		910	0,3	15

Resultados

Condiciones secas.

se presenta el mallado del modelo de elementos finitos utilizado para los cálculos de estabilidad, bajo condiciones secas. Donde se introdujo el plano de falla con una forma tortuosa, que coincide con el contacto entre las dos unidades geológicas (Coluvial y macizo rocoso.)

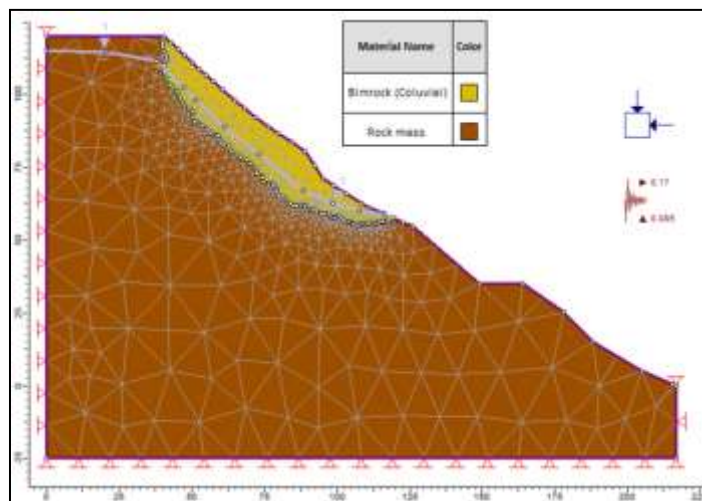
Figura 10. Modelo de elementos finitos en condiciones secas.



Condiciones críticas (saturación y sismo).

De la misma manera se muestra el mallado del modelo de elementos finitos utilizado para los cálculos de estabilidad bajo condiciones críticas (saturadas y sísmicas). Cabe señalar que la forma de la capa freática se estima siguiendo las condiciones de permeabilidad de los materiales, simulado perfectamente en el modelo (Figura 11). Los factores sísmicos fueron tomados de un estudio sísmico realizado en la zona.

Figura 11. Modelo de elementos finitos en condiciones saturadas y sísmicas.



Las siguientes figuras (12-13), muestran los factores de seguridad obtenidos al aplicar la metodología bimrock en condiciones secas y en condiciones críticas (con saturación y sismo). Las bandas rojas muestran los FS estables de acuerdo a cada condición, y las bandas celestes muestran los FS que no cumplen con la situación actual del Talud. Obteniendo de esta manera los diferentes modelos de acuerdo a sus autores que son aplicables a la zona de estudio.

Figura 12. Factores de Seguridad en condiciones secas, obtenidos del análisis por elementos finitos.

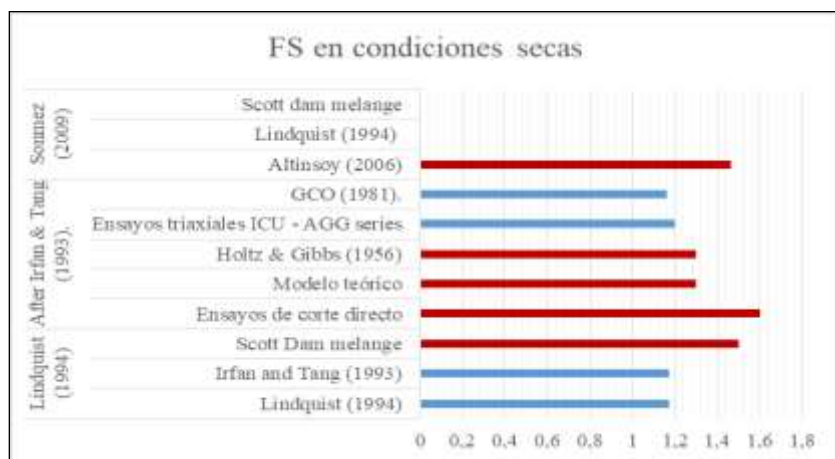
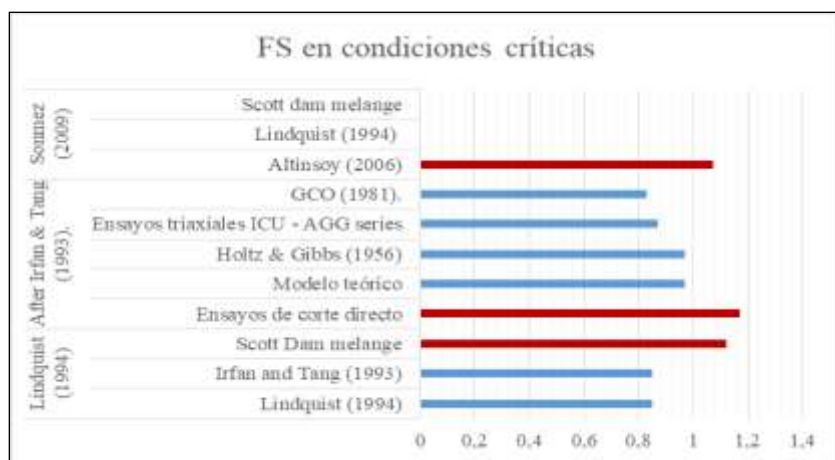


Figura 13. Factores de Seguridad en condiciones críticas, obtenidos del análisis por elementos finitos.



Discusión

De acuerdo a los modelos aplicados en la metodología bimrock, los autores que mejor se ajustan a la situación actual del talud y siendo válida su aplicación a terrenos Bimrock (de avalancha y coluviales) de Jammu y Kashmir son los siguientes autores:

- Del modelo de Lindquist (1994), la tendencia de Scott Dam melange con un $\Delta \phi = 12^\circ$ y un $\Delta c = 1.9$ kPa. Presentan F. S. estables en condiciones secas = 1.5 y en condiciones críticas = 1.12.

- Del modelo de After Irfan & Tang (1993), los resultados de ensayos de corte presentan un $\Delta \phi = 14$ y un $\Delta c = 1$ kPa. Obteniéndose un F. S. en condiciones secas = 1.6 y en condiciones críticas = 1.17; Sus modelos teóricos, y la tendencia de Holtz & Gibbs (1956) presentan un incremento $\Delta \phi = 7$ y un $\Delta c = 3$ kPa, obteniendo un F. S. en condiciones secas de 1.3 y en condiciones críticas 0.97.
- De acuerdo al modelo de Sonmez (2009), se obtuvo un $\Delta \phi = 13$ y una disminución de la cohesión $c = -4.2$ kPa. Obteniéndose un F. S. en condiciones secas = 1.46 y en condiciones críticas = 1.07

Los modelos que no se ajustan al talud actual y siendo no válidos para su aplicación a terrenos bimrock de Jammu y Kashmir ya que son muy conservadores son los siguientes:

- Del modelo de Lindquist (1994), las tendencia conservadora de Lindquist (1994), Irfan y Tang (1993), muestran un $\Delta \phi = 2.5$ y $\Delta c = 4.5$ kPa. Obteniendo un F.S. en condiciones secas = 1.17 y en condiciones críticas = 0.85.
- Del modelo de After Irfan & Tang (1993), la tendencia obtenida de los ensayos triaxiales ICU - AGG series, muestra un $\Delta \phi = 4$ y $\Delta c = 3.9$ kPa. Obteniendo un F.S. en condiciones secas de 1.12 y en condiciones críticas = 0.87 y de acuerdo a la tendencia obtenida de GCO (1981), muestra un $\Delta \phi = 3$ y $\Delta c = 4$ kPa. Obteniendo un FS en condiciones secas de 1.16 y en condiciones críticas = 0.83

Observándose que los Factores de Seguridad en condiciones secas son ≤ 1.3 y en condiciones críticas se encuentran por debajo de la unidad.

Conclusiones.

- La metodología bimrock que se propone, utiliza los resultados de las investigaciones de: Irfan y Tang 1993; Lindquist 1994; Medley 2001 y Sonmez 2009. Donde dichos autores analizaron los mecanismos de falla y los patrones de rotura de modelos artificiales de bimrocks, por lo que se observa que:
- Los modelos en condiciones secas y críticas experimentan una superficie de rotura tortuosa entre los bloques y la matriz, la tortuosidad de rotura incrementa con el incremento de bloques.
- Se observa que los aumentos de la proporción volumétrica de bloques conducen a una disminución de la cohesión y al aumento de la fricción del bimrock.
- El aumento del ángulo de fricción puede ser tanto de 10 a 15 grados por encima de la resistencia de fricción de la matriz, debido a la tortuosidad de la superficie de falla.
- Con estas observaciones la metodología bimrock mejora los parámetros resistentes iniciales de la matriz arcillosa en base a los gráficos utilizados.
- La metodología descrita en esta investigación es utilizable en terrenos heterogéneos de zonas tropicales y montañosas, por lo que podría ser replicable en ciertas zonas de Ecuador, ya que presenta características similares a los terrenos de la India.

Referencias bibliográficas.

- Afifipour y Moarefvand. (2012): *Failure patterns of geomaterials with block-in-matrix texture: Experimental and numerical evaluation*. Journal of Geosciences, 1-13.
- After Irfan y Tang. (1993): *Effect Of The Coarse Fractionson The Shear Strength Of Colluvium*. Hong Kong.
- Ayala Carcedo, F. J., y Andreu Posse, F. J. (2006): *Manual de ingenieria de taludes*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Geotechnical Control Office. (1982): *Mid-Levels Study: Report on Geology, Hidrology and Soild Properties*. Public Works Department Hong Kong , Hong Kong .
- Lindquist. (1994): *The Strength and Deformation Properties of Melange*. California: Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley.
- Lindquist y Goodman. (1994): *Rock Mechanics Models and Measurements Challenges from Industry*. Bureau of Economic Geology The University of Texas at Austin , Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin. Texas: PRISCILLA P. NELSON.
- Medley y Sanz. (2003): *Characterization of Bimrock (Rock/Soild Mixtures) Whit Application to Slope Stability Problems*. Eurock, 8.
- Medley y Wakabayashi. (2001): *Melanges: Processes of Formation and Societal Significance*. California: Department of Earth and Environmental Sciences.
- Medley. (1994): *Using Stereological methods to estimate the volumetric proportions of blocks in melaanges and similar block-in-matrix rocks (bimrock)*. Proceedings Seventh International Congress International Association of Engineering Geology, 1-11.
- Medley, E. W. (2001): *Orderly Characterization of Chaotic Francisscan Melanges*. Engineering Geology, 1-14.
- Medley y Lindquist . (1995): *The engineering signficnce of the scale-inedpendence of some Franciscan*. Rock Mechanics Proceedings of the 35th U.S. Symposium, 10.
- Medley, E. W. (2002): *Estimating Block Size Distributions of Melanges and Similar Block-in-Matrix Rocks (Bimrocks)*. Proceedings of 5 th Norh American Rock Mechaines Symposium (NARMS).
- Pan, Y. W., Hsieh, M. H., Liao, J. J. (2008): *Mechanical Properties of Virtual Block-in-matrix Colluvium*. American Rock Mechanics Association.
- Sonmez, H., Kasapoglu, K., Coskun, A., Tunusluoglu, C., Medley, E., & Zimmerman, R. (2009): *A Conceptual empirical approach for the overall strength of unwelded bimrocks*. ISRM Regional Sympo. Rock Eng. in Difficult Ground Conditions, Sofl Rock and Karst.

Sonmez, H., Altinsoy, H., Gokceoglu, C., Medley, E.W. (2006): *Considerations in Developing an Empirical Strength Criterion for Bimrocks*. Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS 2006).

PARA CITAR EL ARTÍCULO INDEXADO.

Pasato Jarro, J., Cuesta Andrade, G., Toapanta Santacruz, S., & Granja Carrera, J. (2019). Criterios de diseño de estabilidad de taludes en coluviales de bloques (Bimrock o block in matrix). *Ciencia Digital*, 3(3.1), 143-157. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i3.1.682>



El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Ciencia Digital**.

El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Ciencia Digital**.

