



INFLUENCIA DE LA ANISOTROPÍA DEL MACIZO ROCOSO EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL TAJO

Esteban Maldonado
Cigeomin Consulting
Luiz Castro

Golder Associates Ltd., Mississauga, Ontario, Canada.

RESUMEN

Actualmente la anisotropía del macizo rocoso es un fenómeno bien conocido en mecánica de rocas, sin embargo, muchas veces su impacto en el diseño de taludes de tajos abiertos es ignorado o subestimado. Este trabajo investiga el efecto de las características estructurales del macizo rocoso en la estimación del factor de seguridad de los taludes finales del tajo.

La evaluación de estabilidad de taludes fue realizado usando el método de equilibrio límite y el criterio GLE/Morgenstern-Price. Para el propósito de este análisis, la resistencia del macizo rocoso ha sido expresado a través del criterio falla Mohr-Coulomb que considera los parámetros de resistencia equivalente, obtenidos a partir del resultado de la envolvente de falla de Hoek-Brown generalizado, y se utilizó la opción de "Anisotropía Generalizado" disponible en el programa bidimensional Slide©. Como parte de la investigación, el análisis de estabilidad de una pared de 300 m de altura compuesto por roca sedimentaria fue desarrollado, considerando la isotropía y luego la anisotropía del macizo rocoso con y sin presencia de puentes de roca entre discontinuidades, tanto para condición seca y con presencia de agua subterránea en la pared, asimismo, en todos los escenarios se ha considerado el efecto del factor de daño por voladura, los resultados de factor de seguridad fueron comparados y discutidos.

Los resultados de los factores de seguridad del talud analizado demuestran el efecto de anisotropía del macizo rocoso, la necesidad de despresurización para mantener el talud previsto y la necesidad de voladura controlada.

1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo muestra la influencia de la anisotropía en la estabilidad de un talud

global de un tajo. Varios tipos de rocas metamórficas y rocas sedimentarias presentan anisotropía estructural, dado que sus propiedades varían con la dirección. La estructura de una roca es caracterizado por un número de factores que pueden tener particular orientación: estratificación, esquistosidad, exfoliación, diaclasas que son característicos de rocas metamórficas, tales como esquisto, gneis, pizarra, filita, debido a la existencia de foliación. Además, las rocas sedimentarias, como la lutita, arenisca y caliza pueden ser anisotrópicas producto de la estratificación. La presencia de estas estratificaciones y planos de debilidad influyen significativamente en la estabilidad de estructuras geotécnicas como taludes, túneles y excavaciones (Goodman et al, 1968, Bandis et al., 1983).

El análisis de estabilidad del talud del tajo depende principalmente de la geología, estructura, macizo rocoso e hidrología. Desde que el macizo rocoso no es continuo, su comportamiento es dominado por las discontinuidades, tales como juntas, planos de estratificación y fallas. El buzamiento y orientación de discontinuidades, así como presencia o ausencia de puentes de roca entre discontinuidades tienen una influencia significativa en la estabilidad del talud. En consecuencia, la superficie de ruptura del talud puede desarrollarse a través de la combinación de los planos de falla de discontinuidades y por la roca intacta.

En el presente trabajo se presenta un análisis de estabilidad de un talud del tajo de 300 m de altura y un ángulo global de 40°. Esta pared está compuesta por roca sedimentaria con presencia de juntas y estratificación. La resistencia del macizo rocoso ha sido expresada a través del criterio de Mohr-Coulomb que considera los parámetros de resistencia equivalente obtenidos a partir de la envolvente de falla de Hoek & Brown generalizado (2002). Para el análisis de estabilidad fue usado el método de equilibrio límite y el criterio GLE/Morgenstern-Price y el programa computacional Slide© (Rocscience, 2015) y se utilizó la opción de "Anisotropía Generalizado".

El objetivo de esta investigación es evaluar la influencia de la anisotropía en los problemas de estabilidad de taludes del tajo. En ese

sentido, el talud fue analizado primero para condición isotrópica y luego para condición anisotrópica del macizo rocoso, con o sin presencia de puente de roca, fueron evaluados para pared seco y con presencia de agua subterránea y en todos los casos se ha considerado el efecto de daño de voladura (D), dichos resultados de factor de seguridad son comparados y discutidos en este trabajo.

2 CONSIDERACIONES DE ANISOTROPIA DE ROCAS

2.1 Resistencia Direccional del macizo rocoso

Como lo indicado por Read & Stacey (2009), si no hay familia de discontinuidades (fallas y/o juntas) paralelos al talud, la resistencia del macizo rocoso puede ser asumido como isotrópico y se puede usar el criterio de falla de Hoek-Brown generalizado (Hoek et al., 2002) para la resistencia al corte del macizo, o puede ser definido por valores equivalentes de cohesión y ángulo de fricción de la roca. En este caso, esta resistencia básica es la misma en todas las direcciones y en un gráfico polar puede ser definido por un círculo, como se ilustra en la Figura 1(a).

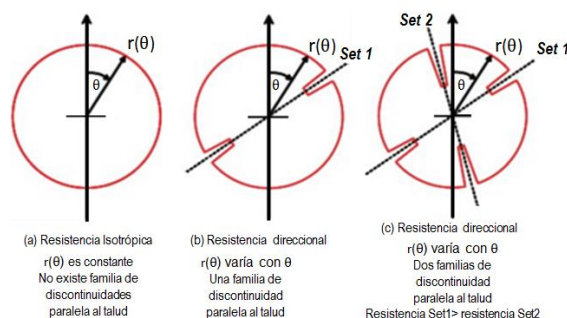


Figura 1. Diagrama polar ilustrando el efecto de la familia de discontinuidades paralelo al talud en la resistencia al corte del macizo rocoso (Read & Stacey, 2009).

Si hay uno o más familias de discontinuidades paralelo al talud, la resistencia al corte del macizo rocoso no puede ser asumida como isotrópica, porque la masa de roca es más débil en la dirección de las discontinuidades. Por consiguiente, la resistencia del macizo rocoso es mucho menor en la dirección de estas discontinuidades, es decir, presenta una condición anisotrópica y define una curva en

forma de mariposa en una parcela polar, como se muestra en la Figura 1(b y c). En la dirección normal de las discontinuidades, la resistencia al corte será igual a la definida por la resistencia del macizo rocoso básico y en la dirección paralela a la discontinuidad este será igual a la resistencia al corte de las discontinuidades, según su persistencia.

La consideración de la anisotropía en la resistencia del macizo rocoso puede ser considerada en los análisis de estabilidad de taludes utilizando, por ejemplo:

- Equilibrio Límite, considerando la resistencia de las discontinuidades en el rango del buzamiento y orientación de la familia o familias de discontinuidades y la resistencia del macizo rocoso alrededor de estos rangos. La contribución de los puentes de roca puede ser considerada para incrementar los parámetros de resistencia al corte de las discontinuidades. Un ejemplo de este procedimiento es presentado en el presente trabajo.
- Equilibrio Límite, cuando no existen datos de persistencia de las discontinuidades (e.g., afloramientos o bancos excavados), se puede estimar los puentes de roca a través del desarrollo del modelo de redes de fracturas discretas "discrete fracture network, DFN" en base a datos de orientación y espaciamento de las familias de discontinuidades, si simulan posibles caminos "stepped" de falla y el porcentaje de puentes de roca es estimado para cada superficie. (Valerio et al., 2017).
- Modelamiento numérico representando las familias de discontinuidades como superficies discretas (e.g., Carvalho et al. 2010; Fietze et al., 2013).

Cabe observar que si el macizo rocoso se presenta muy fracturado (a triturado) con tres o más familias de discontinuidades, entonces es preferible tratar al macizo rocoso como isotrópico con una resistencia más baja y no continuar con la simulación indicada en los ítems a) a c).

2.2 Puentes de Roca entre discontinuidades

Si las discontinuidades no son persistentes y sus continuidades son interrumpidas por puentes de roca, su resistencia al corte incrementará considerablemente, como se muestra en la Figura 2 y 3. Discusiones detalladas se pueden verificar en reportes de Jennings (1970, 1972), Einstein et al. (1983) y Wittke (1990). En un talud de roca con discontinuidades no persistentes una superficie de falla con paso de trayectoria ocurrirá a través de la combinación de discontinuidades, ver Figura 3. Una discontinuidad equivalente puede ser asignada para este paso de trayectoria de falla y tomar parámetros de resistencia equivalente.

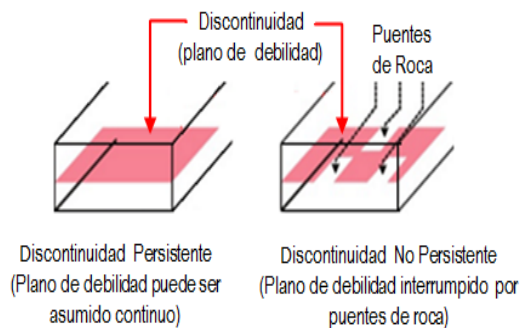


Figura 2. Representación simplificado del efecto de puentes de roca (CSIRO, 2009)

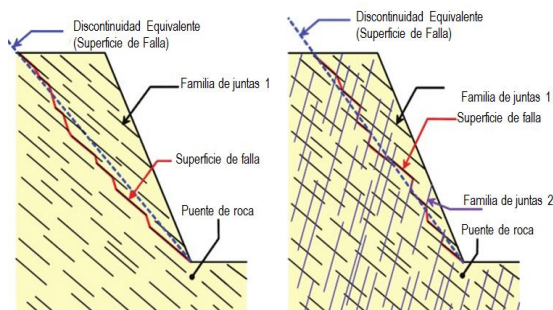


Figura 3. Trayectoria de superficie de falla y discontinuidad equivalente para taludes de roca conteniendo una familia y dos familias de discontinuidades no persistentes paralelos al talud. (Modificado de Karzulovic, 2006)

La definición de estos parámetros de resistencia al corte equivalente puede ser

realizada usando formas cerradas de soluciones (e.g. Jennings 1972). El caso simple es una rotura planar a través de juntas coplanarias y puentes de roca, como mostrado en la Figura 4.

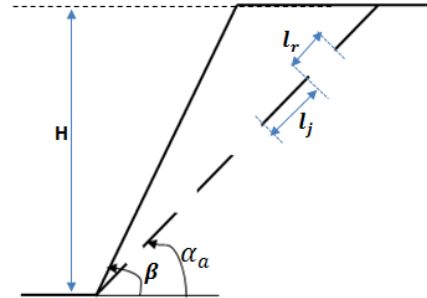


Figura 4. Rotura planar a través de juntas coplanarias y puentes de roca en un talud de roca. El puente de roca tiene una longitud l_r y las discontinuidades tienen una longitud l_j y un buzamiento aparente α_a en la sección del talud.

En este caso los parámetros de resistencia equivalente pueden ser estimados (Jennings 1972) por:

$$C_{\text{Ponderado}} = (\%k) \times C_{mr} + (1 - \%k) \times C_j \quad (1)$$

$$\phi_{\text{Ponderado}} = \tan^{-1}[(\%k) \times \tan(\phi_{mr}) + (1 - \%k) \times \tan(\phi_j)] \quad (2)$$

Donde:

C_{mr} = cohesión de masa de roca

C_j = cohesión de junta

ϕ_{mr} = ángulo de fricción interna de masa de roca

ϕ_j = ángulo de fricción interna de junta

El factor k es el coeficiente de continuidad (expresado en porcentaje) a lo largo del plano de ruptura dado por:

$$\%k = \frac{\sum l_r}{\sum l_j + \sum l_r} \times 100\%$$

Donde l_j y l_r son las longitudes de las discontinuidades y puentes de roca. Como discutido por Jennings (1972), estas ecuaciones contienen un número de asunciones implícitos importantes y se vuelven mucho más complejos en el caso de discontinuidades no coplanares y/o un macizo

rocoso con dos familias de discontinuidades paralelos a la orientación del talud, ver Figura 3.

envolvente de falla de Hoek-Brown y fue usado el programa computacional Slide® (Rocscience, 2015).

3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUD GLOBAL

3.1 Impacto de la voladura al talud

El factor D típicamente varía desde un nivel de daño mínimo ($D=0$) hasta un daño máximo ($D=1$), donde los taludes del tajo sufren una disturbancia significativa debido a la voladura de producción no controlada y también debido a la relajación de los esfuerzos en la roca.

Para el presente análisis se utilizó un factor de disturbancia de $D=0.7$ para la franja de 40 m de ancho medido desde la cara del talud, y $D=0$ para el resto del macizo, basado en la sugerencia de Hoek y Karzulovic (2000), así como se muestra en la Figura 5. Mayor investigación es necesaria para mejorar la consideración del daño de voladura en los análisis de estabilidad de taludes, teniendo en cuenta el grado de fracturamiento, resistencia de la roca intacta que compone el macizo rocoso y el tipo de voladura.

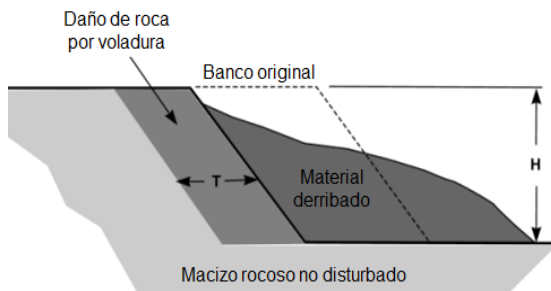


Figura 5. Representación de zona dañada por voladura (Hoek, 2000).

3.2 Análisis Isotrópico

Para efecto de comparación, se realizó inicialmente el análisis isotrópico. En este análisis, el criterio de resistencia del macizo rocoso es dependiente únicamente de la unidad del macizo rocoso y es independiente de la orientación o dirección del corte. Para el análisis isotrópico fue aplicado el criterio de Mohr Coulomb con parámetros de resistencia equivalentes obtenidos a partir de la

3.3 Análisis Anisotrópico

Existe resistencia anisotrópica en una masa de roca que tiene una baja resistencia al corte a lo largo de una orientación preferida (o múltiples orientaciones), tal como puede ser el caso en una masa de roca con una o dos familias de discontinuidades de ocurrencia natural tales como juntas, fallas u otra fábrica estructural geológica.

El corte en la dirección paralela a estas discontinuidades, incluso si son discontinuos, se espera se movilice una resistencia al corte global más baja que el corte en una dirección normal a ellas. La orientación de anisotropía puede ser estimada usando datos estructurales obtenidos desde mapeo de paredes y logeos de testigos de sondajes.

3.4 Análisis Metodológico

La opción de falla no circular en Slide fue incorporado para determinar la superficie de ruptura crítica, facilita la incorporación de estructuras específicas o la tendencia estructural a lo largo de la trayectoria de la ruptura para simular la anisotropía. Los rangos de orientación sobre las cuales se aplicó la resistencia anisotrópica fueron determinados analizando el buzamiento aparente de la estructura en el plano de cada sección geotécnica. Las estructuras fueron representadas en rosetas de buzamientos aparentes.

Las orientaciones de juntas y estratificaciones usadas para definir la opción de anisotropía generalizada en la unidad sedimentaria en el análisis de la pared global son resumidas en la Tabla 1.

Tabla 1: Rango de buzamiento usado para definir la Resistencia Anisotrópica

Estructuras	Rango de buzamiento (°)
Estratificación	58 a 77
Juntas 1	15 a 30
Juntas 2	20 a 46

Análisis de estabilidad de talud global de macizo rocoso fue completado usando el método de equilibrio límite para evaluar la



estabilidad del talud con respecto a la falla a través de la masa de roca. Estos análisis envuelven el uso de Slide© para calcular el Factor de Seguridad (FoS) usando el método de *GLE/Morgenstern-Price*. Además, para la generación de superficies de falla se utilizó la investigación automática de búsqueda de la superficie de falla “Auto refine search” disponible en el programa.

3.5 Parámetros de Resistencia del Macizo Rocoso

Para el propósito del análisis de estabilidad del talud global, el diseño de resistencia al corte del macizo rocoso ha sido expresado en términos de criterio de falla de Mohr Coulomb con parámetros equivalentes obtenido a partir de la envolvente de falla de Hoek-Brown Generalizado. Los parámetros de resistencia del macizo rocoso que han sido utilizados en el análisis de estabilidad son resumidos en la Tabla 2. Para el análisis anisotrópico, el criterio Mohr-Coulomb fue aplicado para juntas y estratificaciones con parámetros de resistencia presentados en la Tabla 2 y 3.

Asimismo, un coeficiente sísmico horizontal de $K_h = 0,18g$ se consideró para el análisis pseudo-estático.

Tabla 2: Resumen de Parámetros de Resistencia en Macizo Rocoso no disturbado ($D=0$)

Unidad Sedimentaria		C (kPa)	ϕ (°)
Macizo rocoso no disturbado		2770	50
Juntas	Resistencia de corte directo basado en ensayos	0	40
	12% de puentes de roca, Superficie de corte Ponderado	332	41
Estratificación	Resistencia de corte directo basado en ensayos	50	37
	6% de puentes de roca, Superficie de corte Ponderado	213	38

Nota: C, cohesión equivalente del macizo rocoso; ϕ , ángulo de fricción equivalente de macizo rocoso.

Tabla 3: Resumen de Parámetros de Resistencia en Macizo Rocoso no disturbado ($D=0.7$)

Unidad Sedimentaria		C (kPa)	ϕ (°)
Macizo rocoso no disturbado		1939	43
Juntas	Resistencia de corte directo basado en ensayos	0	40
	12% de puentes de roca, Superficie de corte Ponderado	233	40
Estratificación	Resistencia de corte directo basado en ensayos	50	37
	6% de puentes de roca, Superficie de corte Ponderado	163	37

4 RESULTADOS

En el primer caso, se consideró un talud de macizo rocoso seco en condición isotrópica, obteniéndose un factor de seguridad (FoS) de 3.2 como se muestra en la Figura 6, éste valor no es representativo para las características del macizo rocoso de la pared.

En el segundo caso, el mismo modelo fue analizado considerando la condición anisotrópica y sin contribución de puentes de roca, obteniéndose un FoS de 1.01, así como se muestra en la Figura 7. Posteriormente, para propósito de comparación, el mismo modelo fue ejecutado con contribución de puentes de roca, incrementándose el FoS a 1.34, como se muestra en la Figura 8.

En seguida, se realizó una evaluación adicional con presencia de aguas subterráneas en la pared y en condición anisotrópica con contribución de puentes de roca, resultando un FoS de 0.96 como se muestra en la Figura 9, este valor no cumple con los criterios mínimos de aceptación de FoS que debería ser mayor o igual a 1.05 para condición pseudoestático. En consecuencia, se realizó un análisis adicional para este caso, la superficie del nivel freático fue estimado a partir del análisis con elementos finitos, existente dentro del programa *Slide*, bajo esta condición de

filtración de agua y superficie freática, se observa que el factor de seguridad incrementó a 1.09, así como se muestra en la Figura 10. Este resultado sería considerado aceptable, sin embargo, indica la importancia del sistema de desagüe o despresurización de la pared para asegurar la estabilidad de la pared del tajío.

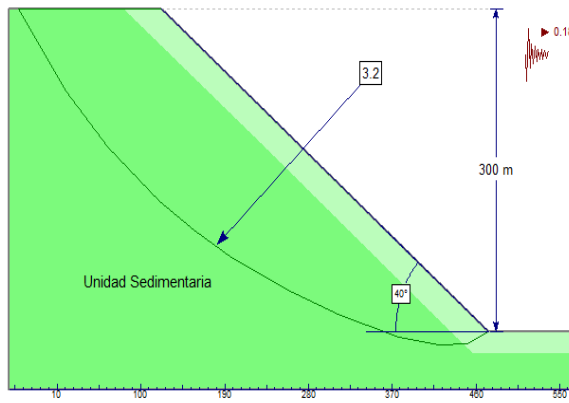


Figura 6. Resultado de análisis de estabilidad considerando condición Isotrópica y pared seca.

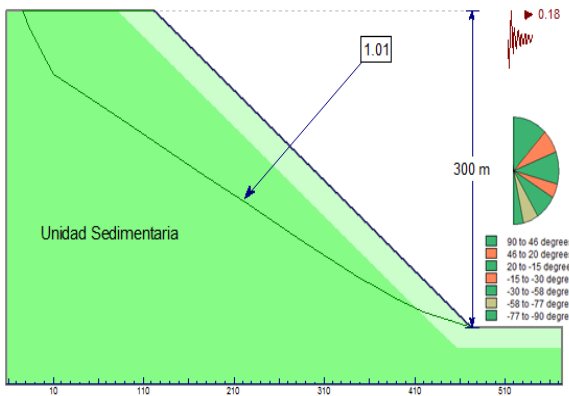


Figura 7. Resultado de análisis de estabilidad considerando condición anisotrópica sin considerar puentes de roca y pared seca

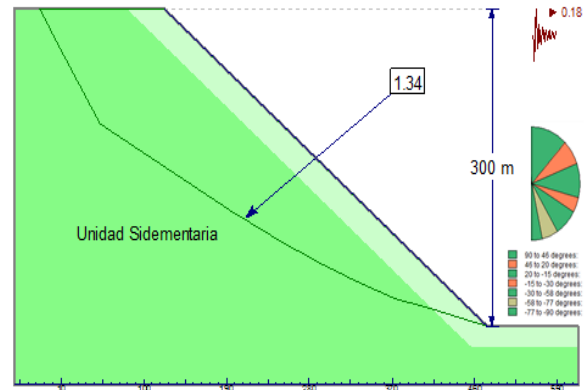


Figura 8. Resultado de análisis de estabilidad considerando condición anisotrópica considerando puentes de roca y pared seca

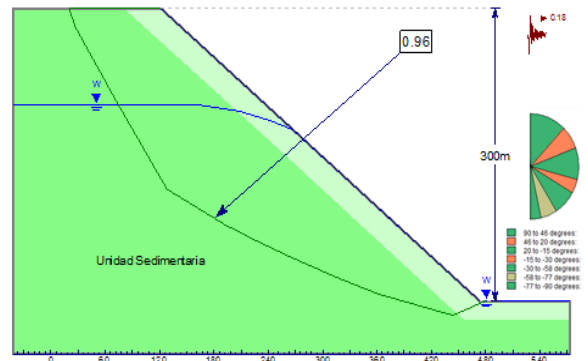


Figura 9. Resultado de análisis de estabilidad considerando condición anisotrópica con presencia de agua subterránea.

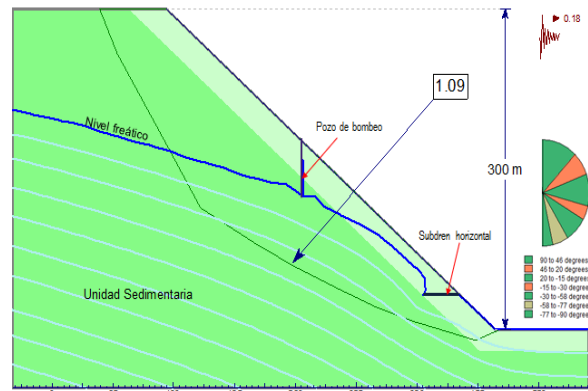


Figura 10. Contorno del nivel freático y resultado de análisis de estabilidad considerando sistema de despresurización-Condición Anisotrópica.



5 CONCLUSIONES

La evaluación del análisis de estabilidad global de la pared del tajo fue realizado por el método de equilibrio límite con ayuda del programa Slide (Rocscience) usando el método GLE/ Morgenstern-Price Spencer.

A partir del análisis de estabilidad del talud global, se confirma que resultado de factor de seguridad considerando la condición isotrópico no es representativo para esta pared conformada por roca sedimentaria. Además, el resultado muestra una falsa impresión de que el macizo es estable.

Los resultados de análisis indican si se considera la anisotropía del macizo rocoso y presencia de agua subterránea en la pared, el talud de 40° no reúne el factor de seguridad mínimo requerido.

El resultado de FoS del talud global para condición anisotrópica con presencia de nivel freático muestra una reducción de FoS de 3.2 a 0.96 comparado con el valor del FoS obtenido para condición isotrópica, esto demuestra que es de vital importancia tomar en consideración la estratificación, la dirección de las juntas y la contribución de resistencia de puentes de roca. De acuerdo a los resultados, para este caso, la modificación del talud no sería necesaria, una adecuada estabilidad del talud global puede ser alcanzada a través de una despresurización del talud.

Finalmente, es importante señalar que un registro de datos estructurales más robusto y confiable para rocas anisotrópicas ayudará a definir mejor los parámetros de resistencia direccional del macizo rocoso del tajo. Esto requiere la colección de datos estructurales por medio de perforaciones con testigos orientados utilizando *televiwer* y con el mapeo estructural de los bancos con el soporte de fotogrametría cuando no existe acceso a los bancos o es zona peligrosa.

La identificación de anisotropía y su consideración en los análisis de taludes ayudará a reducir el incertidumbre y desarrollar talud de diseño más confiable y seguro.

REFERENCIAS

- Carvalho, J.L., Castro, L.A.M., Elmo, D. (2010) Geomechanical Numerical Modelling Workflow for Large Open Pits Applied to Retro-Analysis of the East Wall of Toquepala Mine, Proceedings of the 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, Salt Lake City, UT June 27-30, 2010.
- Duncan C Wyllie & Christopher W Mah (2004). "Rock Slope Engineering", 4th Edition: 218-234.
- E.Hoek(2012). "Blast Damage Factor D". Technical note for Rocscience. Canada.
- E.Hoek, C. Carranza-Torres and B.Corkum(2002). "Hoek-Brown Failure Criterion-2002 Edition", Toronto, Vol 1: 267-273.
- E.Hoek, K.H Rippere and Peter Stacey (2000). "Large Scale Slope Designs- A Review of the State of the Art". Slope Stability in Surface Mining", Edited by William A. Hustrulid, Michael K. McCarter, Dirk J.A. Van Zyl.
- Einstein HH, Veneziano D, Baecher GB & O'REILLY KJ (1983). The effect of discontinuity persistence on rock slope stability. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts 20(5), pp 227-236.
- Fietze, C., Creighton, A., Castro, L., Hammah, R. (2013). Pit Slope Design in Phyllites for the Simandou Large Open Pit Project. International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Slope Stability 2013, Brisbane, Australia. Paper 86.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002). Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition. Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 2002, 1, 267-273.
- Jennings, J.E. (1972). An approach to the stability of rock slopes based on the theory of limiting equilibrium with a material exhibiting anisotropic shear strength, Stability of Rock Slopes, Proc. of the ASCE 13th US Symposium on Rock Mechanics (ed. EJ Cording), University of Illinois, Urbana, pp. 269–302.
- Read, J. and Stacey, P. (2009). Guidelines for Open Pit Slope Design. CSIRO publishing.
- Karzulovic A (2006). Fundamentals of Geomechanics (in Spanish), lecture notes. Universidad de los Andes.
- Rocscience (2015). Slide v. 6.0 [software]. Rocscience. Toronto, ON, Canada.



**INSTITUTO
DE INGENIEROS
DE MINAS
DEL PERÚ**

Organiza:



- Valerio, M., D'Ambra, S., Castro, L., Woodward, R. (2017). Evaluation of Rock Bridging through DFN Models to Improve Pit Slope Design in the Absence of Joint Persistence Data. Proc. North American Rock Mechanics Symposium (NARMS) 2017.
- Wittke W (1990). Rock Mechanics. Theory and Applications with Case Histories. Springer-Verlag, Berlin.