

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES USANDO MÉTODOS NUMÉRICOS Y EQUILIBRIO LÍMITE

Esteban Maldonado Quispe
Cigeomin Consulting

RESUMEN

El diseño del talud final del tajo abierto constituye uno de los factores críticos en el diseño de la mina y está asociado directamente con la economía y seguridad. El objetivo de este trabajo fue evaluar la estabilidad de taludes de la pared final del tajo, utilizando Métodos de Equilibrio Límite (MEL), Métodos de Elementos Finitos (MEF) y Métodos de Diferencias Finitas (MDF). El MEL para análisis de estabilidad de taludes es utilizado ampliamente en diseño de taludes de tajos abiertos, en este caso, el análisis ha sido realizado usando el programa bidimensional Slide V.6 y los métodos GLE/Morgenstern-Price y Spencer, la resistencia del macizo rocoso han sido expresados a través del criterio de falla Hoek-Brown generalizado. Los MEF y MDF también son extensamente usados en el análisis de estabilidad de taludes en medios continuos, en este análisis, tanto el programa Phase2 (Rocscience) como el programa FLAC 2D (Itasca) han sido usados para la evaluación del factor de seguridad. Para los métodos numéricos se ha utilizado la técnica de reducción de resistencia al corte y los valores de resistencia equivalentes de Mohr-coulomb que fueron calculados a partir de los ajustes de la envolvente de falla del criterio de Hoek-Brown. Los resultados de FoS obtenidos con los diferentes métodos son comparados y discutidos, asimismo se presentan las ventajas y limitaciones de cada método.

1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo discute el análisis de estabilidad de un talud global de un tajo abierto, usando MEL, MEF y MDF. El objetivo fundamental del proceso de diseño del talud es lograr un diseño seguro y económico para la pared final del tajo.

Entre las principales causas que originan fallas de taludes son deslizamientos de

masas, erosiones, subsidencias, incremento del talud global, etc. Entre las fallas de taludes de tajos abiertos recientes podemos mencionar la falla masiva del talud del tajo Bingham Canyon (EEUU, 2013) y la falla del talud del Tajo Ruby Hill (EEUU, 2013), ambos son mostrados en las Figuras 1 y 2. Estas experiencias serán muy importantes en la definición de diseños de taludes de tajos abiertos por los ingenieros.

Figura 1. Falla del Talud del Tajo Bing Canyon (2013)



Figura 2. Falla del talud del Tajo Ruby Hill (2013)



El MEL se basa en el equilibrio de fuerzas y momentos, mientras, el MEF y MDF se basan en la técnica de reducción de resistencia para el cálculo de FoS y son actualmente los métodos más populares entre los ingenieros. La técnica de reducción de resistencia por métodos numéricos fue usado para análisis de estabilidad en 1975 por Zienkiewicz *et al.* Más tarde, el método de reducción fue aplicado por Naylor(1982), Donald y Giam(1988), Matsui y San(1992), Ugai y Leshchinsky(1995), Song (1997), Dawson *et al.*(1999), Griffiths y Lane(1999), Zheng *et al.*(2005) y entre otros.

Los métodos equilibrio límite (GLE/ Morgenstern Price, Spencer, Bishop, etc) son aún recomendados y son ampliamente usados para análisis de estabilidad de taludes de tajos debido a su simplicidad, por consiguiente, la comparación con diferentes métodos y determinación de su campo de aplicación son de considerable importancia para la práctica de diseño.

La pared analizada del tajo final presenta 640m de altura y un ángulo global de 45°. Esta pared está compuesto por carbonatos; pórfido de composición cuarzo-diorita, monzonita, cuarzo-mozonita y granodiorita; y por exoskarn formado por la intrusión de los fluidos hidrotermales en las rocas calcáreas.

La resistencia del macizo rocoso ha sido expresada a través del criterio de falla Hoek-Brown generalizado (2002) para el cálculo de Factor de Seguridad (FoS) del talud global por MEL. Para el cálculo de FoS con métodos numéricos (MEF y MDF) se ha considerado la técnica de reducción de resistencia al corte y los parámetros de resistencia equivalentes de Mohr-Coulomb.

Los resultados de análisis de estabilidad del talud global controlados por la resistencia del macizo rocoso son comparados y discutidos en este trabajo.

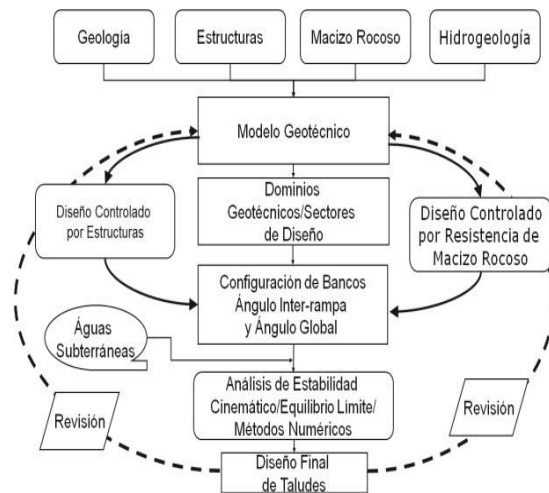
2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE TALUDES Y PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO

2.1 Evaluación de Taludes de Tajos

El proceso general de diseño de taludes de tajos sigue el flujograma presentado en la Figura 3, de acuerdo con la guía de tajos abiertos presentado por CSIRO (2009).

Conforme se puede observar en el flujograma, el estudio requiere el conocimiento de la geología (alteraciones, litologías), estructuras geológicas mayores (fallas) y menores, evaluación de propiedades del material intacto y de la clasificación del macizo rocoso y de las condiciones de las aguas subterráneas (hidrogeología).

Figura 3. Etapas para la evaluación de los taludes del
tajo (CSIRO, 2009)



2.2 Propiedades del Macizo Rcoso

La caracterización geotécnica del macizo rocoso ha sido realizada usando la valoración del macizo rocoso (RMR) de Bieniawski de 1976. Las valoraciones de RMR han sido registradas de testigos de perforaciones geotécnicas y mapeos superficiales, y a partir de éstos valores se estimaron los valores de índice de Resistencia Geológica (GSI) para cada unidad litológica de la pared del tajo final.

A partir de muestras representativas de testigos de perforaciones se realizaron ensayos de laboratorio para caracterizar la masa de roca. Los principales ensayos de laboratorio para caracterizar la roca intacta han sido la resistencia a compresión uniaxial (UCS), ensayos triaxiales y ensayos de tracción para determinar el parámetro m_i , necesario para la estimación de los parámetros de Hoek-Brown (Hoek et al, 2002).

El programa Roclab desarrollado por Rocscience fue usado para la estimación de los parámetros m_b , s y a ; donde m_b es un valor reducido de la constante m_i ; s y a son constantes del macizo rocoso.

Los parámetros estimados consideran un factor de perturbación $D=0.85$ tomando en cuenta la voladura controlada y basado en la sugerencia de Hoek (2002). El factor D típicamente varía desde 0 para macizo rocoso no perturbado hasta 1 para macizo rocoso

con alta perturbación debido a los efectos de las voladuras o por la relajación de esfuerzos.

Una vez determinada los parámetros de Hoek-Brown de macizo rocoso, se puede calcular los parámetros equivalentes de Mohr-Coulomb con ayuda del programa RocLab. En la Figura 4 se muestra los datos necesarios y la secuencia para la estimación de los parámetros equivalentes de Mohr-Coulomb. Los resultados de los valores de resistencia (c y ϕ) para cada material son resumidos en la Tabla 1.

Figura 4. Información necesario para la estimación de propiedades del Macizo Rocosó

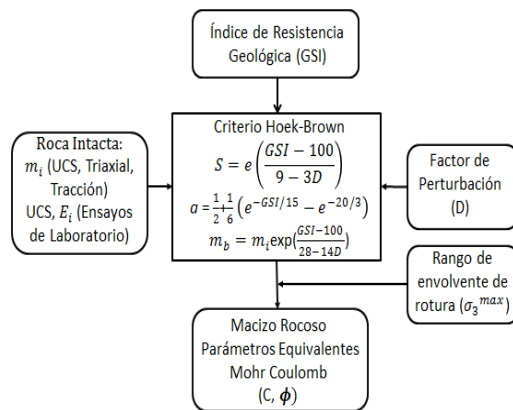


Tabla 1. Propiedades de Resistencia del Macizo Rocosó

Unidad	Densidad (kN/m ³)	UCS MPa	GSI	m _i	E GPa	v	C MPa	φ (°)
Carbonato	27	79	67	12	13	0.29	2.5	35
Exoskarn	29	75	65	18	11	0.32	2.8	37
Pórfido	26	72	60	20	9	0.25	2.3	36

Nota: UCS, Resistencia a compresión uniaxial de roca intacta; GSI, Índice de resistencia geológica; m_i, constante de material para roca intacta; E, módulo de Young; v, coeficiente de Poisson; C, cohesión equivalente del macizo rocoso; φ, ángulo de fricción equivalente de macizo rocoso.

2.3 Criterios de Aceptación de diseño

El uso de valor de FoS es típico para determinar si un diseño de talud es aceptable. Read & Stacey (2009) sugirió una serie de valores como criterio de aceptación para varias escalas de taludes, basado en las consecuencias de fallas.

Los factores de seguridad aplicados para el diseño de taludes comúnmente dependen de la confiabilidad de la información usada para el análisis, la sensibilidad de FoS calculados

para la asunción de diseños, y las consecuencias de fallas de taludes. Los FoS típicamente usados como criterio de aceptación en el diseño de taludes del tajo son resumidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Factor de Seguridad Típica y Probabilidad de Falla- Criterio de Aceptación (Read and Stacey, 2009)

Criterios de Aceptabilidad				
Escala de Talud	Consecuencias de la Falla	FoS (min) Estático	FoS (min) (Pseudo Estático)	PoF (max) P[FoS ≤ 1]
Banco	Baja-alta	1.1	N/A	25%-50%
Inter-rampa	Baja	1.15-1.2	1	25%
	Moderada	1.2	1	20%
	Alta	1.2-1.3	1.1	10%
Global	Baja	1.2-1.3	1	15-20%
	Moderada	1.3	1.05	5-10%
	Alta	1.3-1.5	1.1	<5%

3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD GLOBAL DEL TAJO

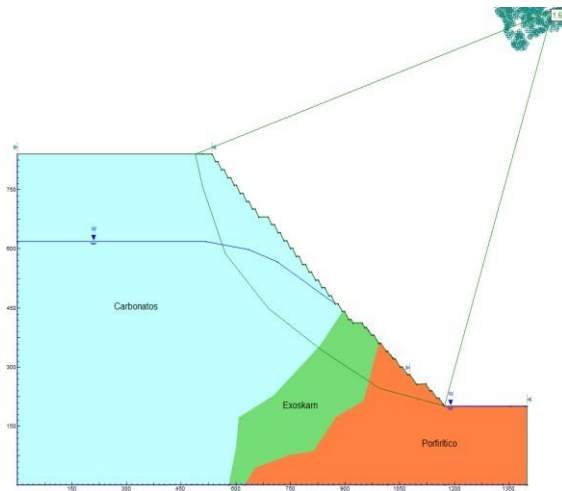
3.1 Método de Equilibrio Límite

El análisis de estabilidad del talud global de una sección del tajo fue realizado usando métodos de equilibrio límite (MEL) para evaluar la falla a través del macizo rocoso. El programa Slide (Rocscience, 2006) se usó para calcular el FoS aplicando el método GLE/Morgenstern-Price y Spencer.

La pared del tajo de 640m de altura y de 45° de ángulo global está compuesta por carbonatos, pórfidos y granodiorita. La resistencia al corte del macizo rocoso ha sido expresado en términos del criterio de falla generalizado Hoek-Brown, los parámetros (m_b , s , a) para cada material han sido calculados en base a los valores GSI y m_i de la Tabla 1 y considerando un factor de daño $D = 0.85$. El nivel freático de agua subterránea para el modelo de análisis fue estimado de acuerdo al modelo hidrogeológico del tajo.

La Figura 5 muestra el FoS de 1.62 obtenido con el método GLE/Mogenster-Price y La Figura 6 muestra FoS de 1.64 obtenido con el método Spencer, ambos resultados y superficies de falla no circulares son muy similares como esperado.

Figura 5. Resultado de Análisis Equilibrio Límite. FoS de 1.62 y Superficie de Falla con GLE/Morgenstern-Price.



Los valores de reducción de los parámetros de resistencia C_{trial} y ϕ_{trial} son definidos como:

$$C_{trial} = \frac{C}{SRF} \quad (1)$$

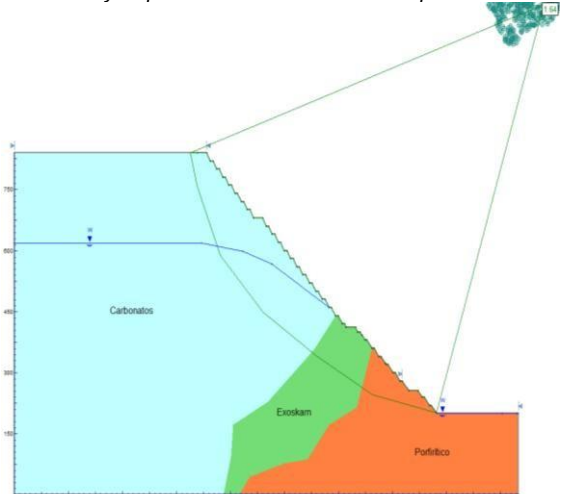
$$\phi_{trial} = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi}{SRF} \right) \quad (2)$$

Donde: C= cohesión

ϕ = ángulo de fricción.

SRF es un parámetro adoptado que reduce los valores de c y $\tan \phi$ en sucesivas análisis no lineales por el MEF o MDF, hasta alcanzar la falla del talud, lográndose en ese instante $SRF = FoS$ (factor de seguridad).

Figura 6. Resultado de Análisis Equilibrio Límite. FoS de 1.64 y Superficie de Falla crítica con Spencer.



Esta técnica tiene una serie de ventajas sobre los habituales métodos de cálculo de equilibrio límite en los que se basan la mayoría de los programas existentes. Entre éstas, la más importante es que la superficie crítica de deslizamiento se genera automáticamente durante el proceso de reducción de resistencia, y su forma (recta, poligonal, circular, espiral logarítmica, etc.) se produce espontáneamente sin que sea necesario predeterminarla al iniciar el proceso de cálculo.

3.2.2. Análisis Numérica Usando Phase2

El análisis de estabilidad del talud global con MEF fue realizado con el programa Phase2 y usando la técnica de reducción de resistencia al corte. Las propiedades de los materiales del talud están presentadas en la Tabla 1 y están expresadas en términos de resistencia de Mohr-Coulomb.

La Figura 7 muestra la configuración del talud importado desde Slide, con la misma geometría y materiales usadas para el análisis por MEL y el modelo se compone de 6880 elementos triangulares para el análisis.

En la Figura 8 se muestran los resultados de análisis de estabilidad con phase2, ilustra un FoS de 1.76, el mecanismo de falla por reducción de resistencia y la superficie de falla crítica no circular.

3.2 Análisis Numérico

3.2.1. Evaluación de Factor de Seguridad usando la Técnica de Reducción de Resistencia al Corte

El Factor de Seguridad de un talud puede ser calculado con Método de Elementos Finitos (MEF) o Método de Diferencias Finitas (MDF), reduciendo progresivamente la resistencia al corte de la roca en etapas hasta alcanzar la falla del talud. La técnica es denominada reducción de resistencia al corte y es discutido en detalle por Dawson y Roth (1999).

Figura 7. Malla de Elementos Finitos para la Sección de la pared global del Tajo

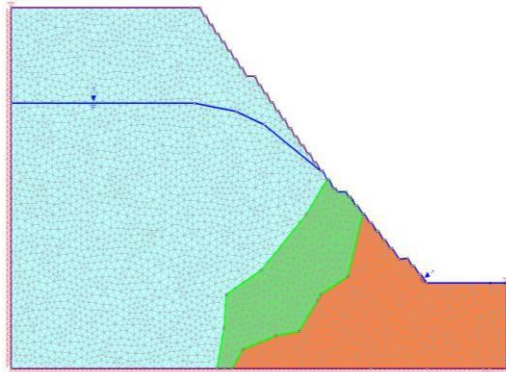
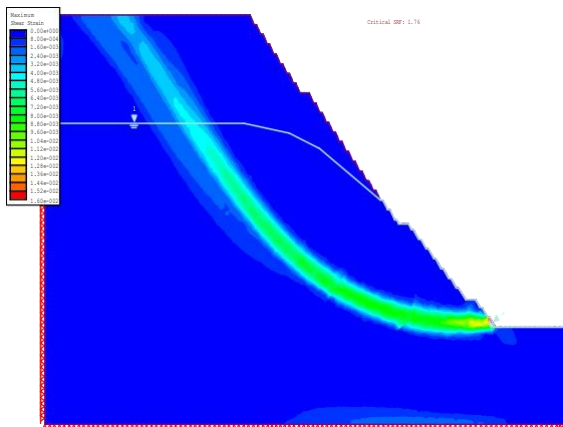


Figura 8. Análisis Numérico con PHASE2. Superficie de Falla Crítica y FoS de 1.76.



3.3.3. Análisis Numérica Usando FLAC 2D

FLAC v.7 (Itasca) es un programa para análisis 2D (Estados planos de deformación, de tensión axisimétrica) basado en el método de diferencias finitas, utiliza un algoritmo explícito en el tiempo para alcanzar la solución de problemas que envuelve suelos, rocas y otros materiales que presentan flujo plástico cuando las tensiones de fluencia son alcanzados.

Los materiales del talud fueron representados con un modelo constitutivo elasto-perfectamente plástico de Mohr-Coulomb. La Tabla 1 muestra las correspondientes propiedades de los materiales y el FoS fue obtenido usando la técnica de reducción de resistencia al Corte.

La misma configuración geométrica, materiales y superficie de nivel freático considerado en el MEL han sido usados en el modelo de análisis por MDF. La malla de

diferencias finitas fue 11256 elementos o zonas. Como condiciones de contorno se ha considerado una restricción de los desplazamientos horizontales en los contornos laterales, mientras los desplazamientos verticales y horizontales han sido fijados a lo largo del contorno de la base.

En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos con el programa FLAC, se ilustran el contorno de deformaciones máximas de corte generadas en la pared y la superficie potencial de falla. El FoS de 1.78 obtenido con FLAC, sugiere que el talud global es estable. La Figura 10 muestra los vectores de velocidad y la posibilidad de falla rotacional.

Figura 9. Análisis Numérico con FLAC 2D. Superficie de Falla Crítica y FoS de 1.78.

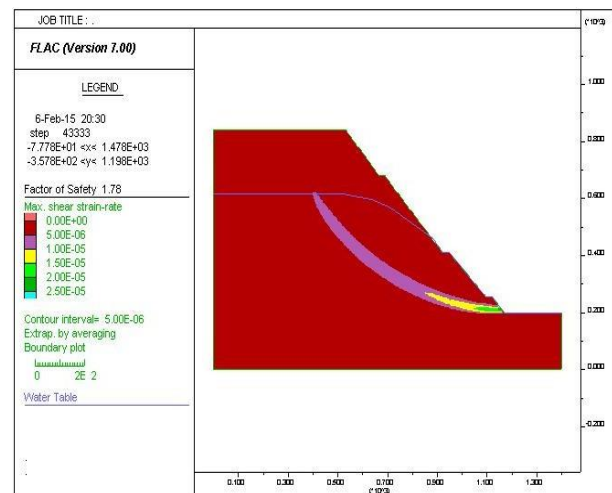
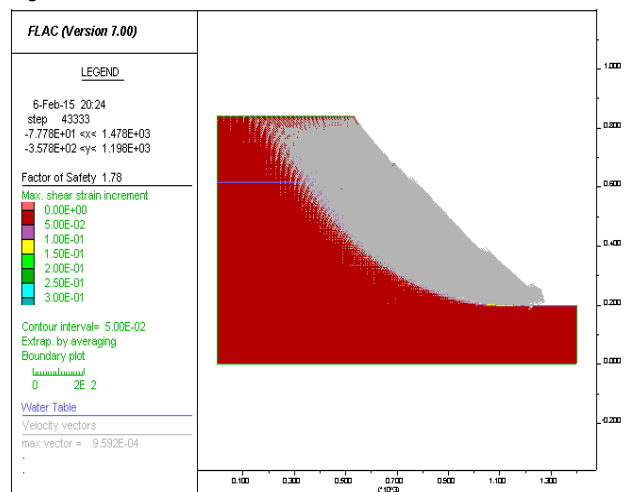


Figura 10. Resultados de vectores de velocidades - FLAC



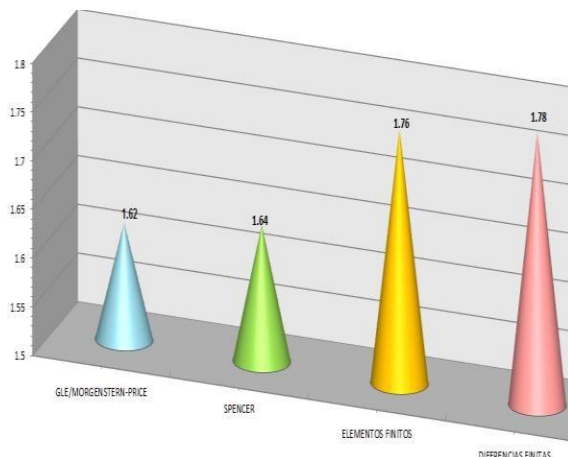
3.3 Comparación de resultados de Análisis de Estabilidad

Los factores de seguridad obtenidos por métodos de equilibrio límite, MEF y MDF son presentados juntos en la Figura 11.

Los FoS obtenidos por GLE/Morgenstern-Price y Spencer son muy similares, obteniéndose 1.62 y 1.64, respectivamente. Comparando entre los métodos numéricos, el FoS obtenido por MEF es 1.76 y por MDF es 1.78, resultando muy similares, sin embargo, estos valores son casi 8% más que el FoS obtenido por MEL. Mayor valor de FoS por MEF comparado con MEL coincide con los resultados obtenidos por Y.M.Cheng and C.K.Lau (2008).

Las superficies de falla entre los métodos de equilibrio límite son prácticamente la misma como esperada. Asimismo, la superficie de falla mostrado por MEF y por MDF son similares, pero existe cierta diferencia comparado con MEL, notándose que para el caso de métodos numéricos las superficies de fallas del talud son más profundas.

Figura 11. Comparación de los resultados de los Métodos de Análisis de Estabilidad



4 CONCLUSIONES

Los resultados del análisis de estabilidad global de la pared del tajo por el método de equilibrio límite con ayuda del programa Slide (Rocscience), indican un FoS de 1.62 aplicando el método GLE/ Morgenstern-Price Spencer y un FoS de 1.64 aplicando el Método Spencer, ambos resultados sugieren que el talud global analizado es estable.

El FoS obtenido por MEF usando el programa Phase2 y la técnica de reducción de resistencia es 1.76. El FoS obtenido por MDF usando el programa FLAC Vs 7 es 1.78. Ambos resultados sugieren que el talud global analizado es también estable.

Los resultados de FoS del talud global obtenidos por MEF y MDF resultaron muy similares, sin embargo, estos valores son casi 8% más que el MEL. Mayor valor de FoS coincide con los resultados obtenidos por Y.M.Cheng and C.K.Lau (2008).

Los MEF y MDF usando la técnica de reducción de resistencia al corte tiene mayores ventajas sobre análisis de estabilidad por Métodos de Equilibrio Límite, entre éstas, lo más importante es que la superficie de falla crítica de deslizamiento se genera automáticamente durante el proceso de reducción de resistencia y su forma se produce espontáneamente sin que sea necesario pre determinarla al iniciar el proceso de cálculo.

Los contornos de deformaciones máximas mostradas en el talud final por MEF y MEDF indican superficies de falla no circulares cercanamente idénticas.

Finalmente, los MEL son simples y han sido bien adaptados a la mayoría de los problemas de estabilidad de taludes, sin embargo, estos no pueden representar las deformaciones y/o desplazamientos de fallas de macizos rocosos.

REFERENCIAS

- Duncan C Wyllie & Christopher W Mah (2004). "Rock Slope Engineering", 3th Edition: 218-234.
- 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.



INSTITUTO
DE INGENIEROS
DE MINAS
DEL PERÚ

Organiza :



- John Read and Peter Stacey (2009).
Guidelines for Open Pit Slope Design.
CSIRO publishing.
- ITASCA CONSULTING GROUP (2005). “
Fast Lagrangian Analysis of Continua”,
Minneapolis, USA.
- L.Lorig (1999). “Lessons Learned from Slope
Stability Studies”. Flac and Numerical
Modeling in Geomechanics, Deteoumay &
Hart(eds): 17-21.
- Phase 2 v8 (Rocscience). Finite Element
Analysis for Excavations and Slopes.
- Y.M.Cheng and C.K.Lau(2008). “Slope
Stability Analysis and Stabilization”, 138-
153.