

Análisis de estabilidad de taludes mediante elementos finitos estocásticos en yacimiento Fénix

Slope stability analysis at Fenix open pit mine using stochastic finite elements

Alejandro Kerguelen Argumedo; Iñaki García Mendive; Alejo O. Sfriso

SRK Consulting (Argentina)

akerguelen@srk.com.ar

Resumen

Los suelos residuales y saprolitos son frecuentes en yacimientos lateríticos de níquel, se caracterizan por la heterogeneidad de su configuración y la variabilidad de las propiedades mecánicas, mayormente debido al proceso de formación de la roca madre y a las etapas muy erráticas de meteorización. Este trabajo propone una metodología que permite el ingreso de la cohesión como una variable aleatoria en zonas con estratigrafía similar. Se desarrolló un código de automatización de la herramienta Plaxis para el ingreso de los datos, ejecución repetitiva de la rutina de cálculo y la gestión de los datos de salida para detectar la superficie de falla más probable. Se presenta un caso de aplicación al yacimiento Fenix que la Compañía Guatemalteca de Níquel explota en Izabal, Guatemala. Los resultados se integraron en un análisis de riesgo de la operación minera que permitió la toma de decisiones y la optimización de las operaciones.

Abstract

Residual soils and saprolites are common in lateritic nickel deposits and notorious for their heterogeneity in configuration and mechanical properties, mostly due to bedrock genesis and highly variable weathering stages. This work proposes a methodology that allows handling the cohesion as a random variable in sites with similar stratigraphy. An automation script was developed to run Plaxis software, which included data input, repetitive calculation of the model and management of the output data in order to detect the most likely sliding surface. A practical example is presented for the Fenix deposit that Compañía Guatemalteca de Níquel mines in Izabal, Guatemala. The obtained results were integrated into a risk analysis that aided decision-making and optimization of operations.

1 INTRODUCCIÓN

Los materiales denominados como “Regolitos”, Taylor y Eggleton (2001), son materiales detectados usualmente en yacimientos niquelíferos aflorando como cobertura de la roca madre. Tiene diferentes grados de alteración que determinan una alta variabilidad de su resistencia al corte entre los materiales mas blandos, clasificados como Saprolitos, y los más competentes, denominados usualmente Saprock.

Para este tipo de rocas se requieren estudios geomecánicos que contemplen esta variabilidad

del comportamiento resistente de manera explícita, mediante métodos de análisis que incorporen parámetros de naturaleza aleatoria.

Usualmente, los métodos de cálculo de estabilidad de taludes que incorporan esta variabilidad imponen la geometría de la superficie de potencial deslizamiento – por ejemplo círculos – y sólo analizan mecanismos de falla – por ejemplo corte no drenado – que limitan la capacidad de detectar riesgos inminentes de falla porque ignoran el efecto de todas las variables que no han sido explícitamente consideradas – por ejemplo propagación de fisuras.

En contraste, en las técnicas numéricas como el método de los elementos finitos, la posición y forma de la superficie de falla no depende de imposiciones del usuario o del procedimiento de cálculo, hasta el punto que el caso simple de falla rotacional con superficie circular es sólo uno más de los resultados posibles del análisis.

La probabilidad de falla ha ganado aceptación como criterio de aceptabilidad en el contexto de operaciones mineras a cielo abierto. Representa una herramienta complementaria al tradicional factor de seguridad determinístico y sirve a la toma de decisiones, pues permite cuantificar la confiabilidad de un diseño y realizar un análisis de riesgo, Read y Stacey (2009).

En este estudio se presentan resultados de un análisis de estabilidad de taludes para una mina localizada en Centroamérica, ejecutada de manera combinada por el método de los elementos finitos y métodos de equilibrio límite: la probabilidad de falla asociada a cada resultado numérico se calculó mediante simulaciones de Monte Carlo realizadas por equilibrio límite. Las variables aleatorias se incorporaron en los modelos numéricos mediante una automatización externa a la herramienta de cálculo, lo que permitió el ingreso de datos, la ejecución de corridas y la gestión automática de los resultados.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

2.1 La mina

Compañía Guatemalteca de Níquel (CGN) explota el yacimiento Fenix, ubicado 6 km al oeste de El Estor, Departamento de Izabal, Guatemala, 170 km al este de la Ciudad de Guatemala (Figura 1 y Figura 2). Comprende reservas probadas y prospectivas de 36.2 millones de toneladas de níquel, y recursos medidos, indicados e inferidos de más de 70 millones de toneladas, Solway (2016).



Figura 1. Ubicación geográfica, Google Earth (2016).



Figura 2. Licencia de explotación, Google Earth (2016).

El plan minero prevé la excavación de una serie de rajos de poca profundidad dentro de los 250km² de licencia de explotación. Actualmente el rajo que está en operación comprende 0.4km² y una profundidad máxima de 150m. Los ángulos globales de taludes varían entre 30° y 40° para suelos residuales y saprolitos, y 43° y 49° para *sap-rock* y roca madre, (Golder 2010) (Figura 3).



Figura 3. Zona de explotación con vista hacia el Lago de Izabal (enero de 2016).

2.2 Geología

El depósito níquelífero constituye un perfil típico de meteorización laterítica tropical húmeda, desarrollado sobre peridotitas serpentinizadas del Cretácico Tardío. Las rocas ultramáficas de la región del Lago de Izabal son contiguas a la falla Polochic, que junto con la falla paralela de Motagua constituyen una zona de falla que se extiende desde Guatemala hasta la península meridional de La Española Golder (2010) (Figura 4).

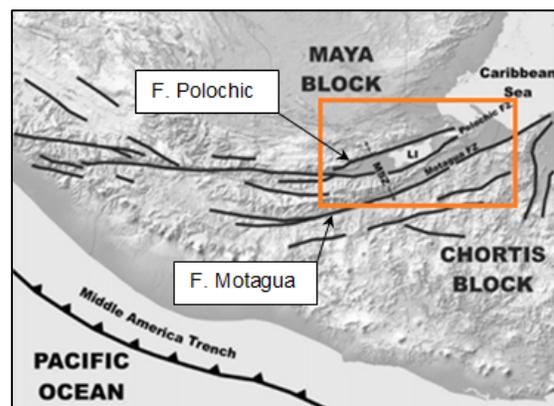


Figura 4. Mapa morfo-estructural CGN, Lodolo et al. (2009).

Las peridotitas comprenden dos variedades de harzburgita (80% olivino y 20% ortopiroxeno) y dunita. Las rocas ultramáficas están fuertemente diaclasadas y muestran 60%|100% de alteración por serpentización. El níquel deriva en última instancia de olivino ígneo (0.3% Ni) y la serpentinita que lo reemplazó por meteorización, el Ni es lixiviado de las zonas superiores de limonita y saprolito y enriquecido en peridotita alterada en la zona de saprock subyacente, Hatch (2006). El perfil típico consiste en 4.3m de cobertura vegetal, 7.3m de suelo residual y 6.0m de saprolitos sobre la roca madre. El saprolito constituye la mena principal con Ni 1.5-2.2% y Fe 40-50%, respectivamente, Golder (2010).

2.3 Geotecnia

El talud bajo estudio pertenece al rajo Fénix. Tiene una altura de 150m y una extensión horizontal de 350m, con ángulo global de 23° y ángulo interrampa máximo de 47°.

2.3.1 Exploración

La zona fue investigada por *Golder Associates* en campañas geotécnicas reportadas en Golder (1976), Golder (2010) y Golder (2014). Se ejecutaron ocho perforaciones a rotación con ensayos de penetración estándar (SPT) en el sector de estudio y otras diecisiete en zonas alejadas de la licencia Fenix. Las campañas contaron con muestreo Shelby y ensayos de veleta (vane tests). El criterio de terminación de los sondeos consistió en perforar 3m en roca madre. En la Tabla 1 se reportan los estratos detectados y sus espesores:

Tabla 1. Estratigrafía del rajo Fenix.

Material	Prof. (m)	Descripción
Cobertura	0-2	Limo de plasticidad media
Limonita	2-15	Suelo residual limo-arcilloso
Saprolita	15-17	Roca altamente meteorizada
Saprock	17-26	Roca moderadamente meteorizada
Peridotita	>26	Roca madre

En la Tabla 2 se resumen los rangos de valores de los parámetros geotécnicos de diseño del rajo. Para saprock, los valores informados fueron determinados por calibración del criterio de Hoek-Brown.

Tabla 2. Parámetros geotécnicos de diseño del rajo Fenix.

Material	RMR	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
Limonita	—	10 15	15(10 22)	28
Saprolita	≤20	15 17	34(12 34)	28
Saprock	31-39	17 26	80	23
Peridotita	40-60	26	—	—

2.4 Parámetros adoptados

El objeto del ejercicio que se presenta es la validación de un procedimiento estocástico que permite la detección de zonas con potencial deslizamiento por vía numérica y calcula la correspondiente probabilidad de falla por vía analítica. Por esa razón, se eligieron parámetros mecánicos pesimistas y conservadores, que se sabe de antemano que están asociados a una probabilidad alta de falla. Se eligió la cohesión como variable estocástica para los horizontes de limonita, saprolita y saprock, pues es el parámetro que tiene la mayor influencia sobre el factor de seguridad. Los módulos de Young fueron estimados a partir de Omraci (2003) y Abrahams et al. (2015).

En la Tabla 3 se presentan los parámetros adoptados en este ejercicio, que son menores que los de la Tabla 2; el criterio de falla es Mohr-Coulomb para todos los materiales salvo para la roca madre (elástico lineal).

Tabla 3. Parámetros pesimistas adoptados en este ejercicio.

Material	γ (kN/m ³)	c (kPa)	μ_c	σ_c	D	ϕ (°)	E (MPa)
Limonita	15	22	22	3	N	28	25
Saprolita	14	34	34	3	N	28	30
Saprock	18	80	80	3	N	23	35
Peridotita	26	—	—	—	—	—	100

μ_c : Media; σ_c : Desviación estándar; N: Distr. Normal

3 IMPLEMENTACIÓN

3.1 Metodología

Se desarrolló un análisis de elementos finitos estocásticos considerando la cohesión como una variable aleatoria Fenton y Griffiths (2004). Se ejecutaron 1000 simulaciones de Monte Carlo del programa Plaxis2D-2016. Autores como Schneckendiek (2006) y Rippi (2015) han implementado rutinas probabilísticas en Plaxis mediante el uso de aplicaciones externas (p.e., Probox, OpenTURNS). En este artículo se presenta una implementación Python equivalente.

3.1.1 Conexión remota

Incorporar el método de Monte Carlo al programa Plaxis demandó la implementación de una serie de funciones de intercomunicación entre distintas aplicaciones conocida como API, siglas en inglés de “*Application Programing Interface*”, que se utiliza con el objetivo de emular la interfaz humano-software y crear rutinas personalizadas de herramientas computacionales.

Plaxis permite este tipo de interacción remota mediante algoritmos de comunicación escritos en Python, lo que permite la incorporación de técnicas probabilísticas al método de los elementos finitos a partir de la automatización completa de las simulaciones Van Rossum (2014). Para establecer el enlace externo se debe configurar un puerto desde Plaxis (Figura 5). El código de enlace desde Python se muestra en la Figura 6, Brinkgreve (2016).



Figura 5. Configuración del servidor remoto en Plaxis.

```
5 found_module=imp.find_module('plxscripting',
6 [r'C:\Program Files (x86)\Plaxis\PLAXIS 2D'])
7 plxscripting=imp.load_module('plxscripting',
8                               *found_module)
9 from plxscripting.easy import *
10 s,g = new_server ('localhost',10000)
```

Figura 6. Código de enlace en lenguaje Python.

La herramienta permite desactivar la interfaz gráfica tradicional al momento de ingresar los datos, de tal manera que son cargados directamente a la línea de comandos mediante códigos de enlace desde Python, aumentando la velocidad en el cálculo de los modelos y la gestión automatizada de los datos de salida.

3.1.2 Números aleatorios

Las variables aleatorias se incorporaron mediante el comando “np.random.normal”, importado de la librería “numpy” disponible en Python y que proporciona una muestra aleatoria de una distribución de tipo normal. Con el objetivo de generar distintos parámetros de cohesión para cada simulación, el comando genera un dato en lugar de la distribución completa. En la Figura 7 se describe un ejemplo en el cual se comparan dos distribuciones generadas por el mismo comando en contextos distintos. La distribución corresponde a la siguiente muestra: i) cantidad de datos: 1000; ii) media, μ : 20; iii) desviación standard, σ : 2.0.

En la Figura 8 se muestran los resultados de las estimaciones. Una distribución se generó con el comando en su aplicación tradicional, mientras que la otra distribución se generó por medio de un bucle (línea 8 en Figura 7). Nótese la ligera diferencia entre las distribuciones que confirma y valida la naturaleza aleatoria de la variable y su consistencia respecto a media y desvío standard.

```
1 """
2 @author: akerguelen@srk.com.ar
3 """
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 import numpy as np
6
7 X1=np.array([])
8 for i in range(0,1000):
9
10     X1=np.append(X1,np.random.normal(20,2,1))
11
12 plt.hist(X1,facecolor='black', alpha=0.5)
13 plt.xlabel("Datos de ejemplo")
14 plt.ylabel("Frecuencia relativa")
15 plt.title(r'Distribución normal para 1000 datos')
16
17 X2=[]
18 X2=np.random.normal(20,2,1000)
19 plt.hist(X2,facecolor='orange', alpha=0.5)
```

Figura 7. Ejemplo de generación de variables aleatorias.

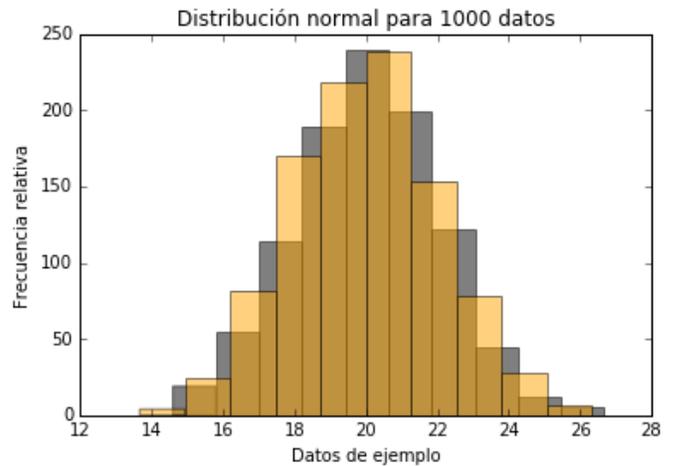


Figura 8. Visualización del comando “np.random.normal”.

3.1.3 Generación de parámetros aleatorios

En la Figura 9 se muestra el código de generación de las variables aleatorias que ordena a Plaxis que cambie la cohesión en tres estratos al tiempo de forma aleatoria.

```
57 for i in range(0,1000):
58     c_Limonita= float(np.random.normal(20,3,1))
59     c_Saprolita= float(np.random.normal(34,3,1))
60     c_Saprock= float(np.random.normal(80,3,1))
61     g.gotosoil()
62     g.Limonita.setproperties("cref",c_Limonita)
63     g.Saprolita.setproperties("cref",c_Saprolita)
64     g.Saprock.setproperties("cref",c_Saprock)
65     g.gotostages()
66     g.calculate(True)
```

Figura 9. Generador de parámetros aleatorios para Plaxis.

3.1.4 Gestión de datos de salida

El entorno gráfico del producto Plaxis que permite accesos directos con combinaciones de teclas especiales (p.ej., CTRL + número), permitió

gestionar la información de salida. Desde Python se emuló todo el proceso de ingreso de las combinaciones de teclas, con lo que se pudo exportar imágenes y datos con los formatos usuales de las salidas de Plaxis. Esto permitió también exportar imágenes de cada superficie de falla y definir variables internas para guardar y procesar los datos de salida.

3.2 MODELOS

3.2.1 Modelo numérico

El modelo numérico se construyó con cuatro estratos, 44856 nodos y 5520 elementos triangulares de 15 nodos (Figura 10). Este modelo se empleó para detectar las geometrías de potencial deslizamiento con mayor frecuencia de ocurrencia, en función de los valores aleatorios de la cohesión.

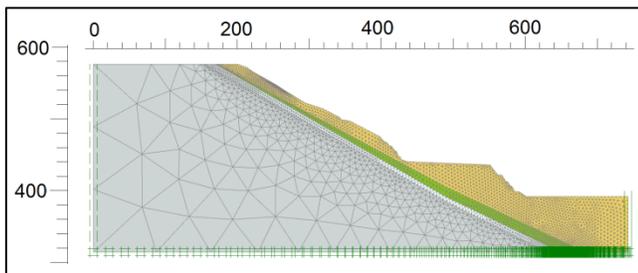


Figura 10. Geometría y malla del modelo numérico.

3.2.2 Modelo analítico

Se ejecutaron simulaciones de Monte Carlo para calcular la probabilidad de falla en la zona con mayor susceptibilidad al deslizamiento, detectada en la fase previa mediante elementos finitos.

Este proceso analítico se implementó en un modelo de equilibrio límite utilizando el programa Slide v6.0 de Rocscience. En Slide se ingresó el rango de coordenadas de entrada y salida del tipo de superficie de falla con mayor probabilidad de ocurrencia. En la Figura 11 se describe la metodología desarrollada.

4 RESULTADOS

4.1 Factor de seguridad

El factor de seguridad se define como el mínimo factor de minoración de los parámetros de resistencia al corte que produce la pérdida de convergencia del modelo numérico. Esta técnica se implementó en el análisis de elementos finitos a partir de Zienkiewicz et al (1975). Su relación con otros conceptos usuales de factor de seguridad ha sido presentada en Sfriso (2008). En la Figura 12 se presenta el histograma de factores de seguridad para las mil corridas.

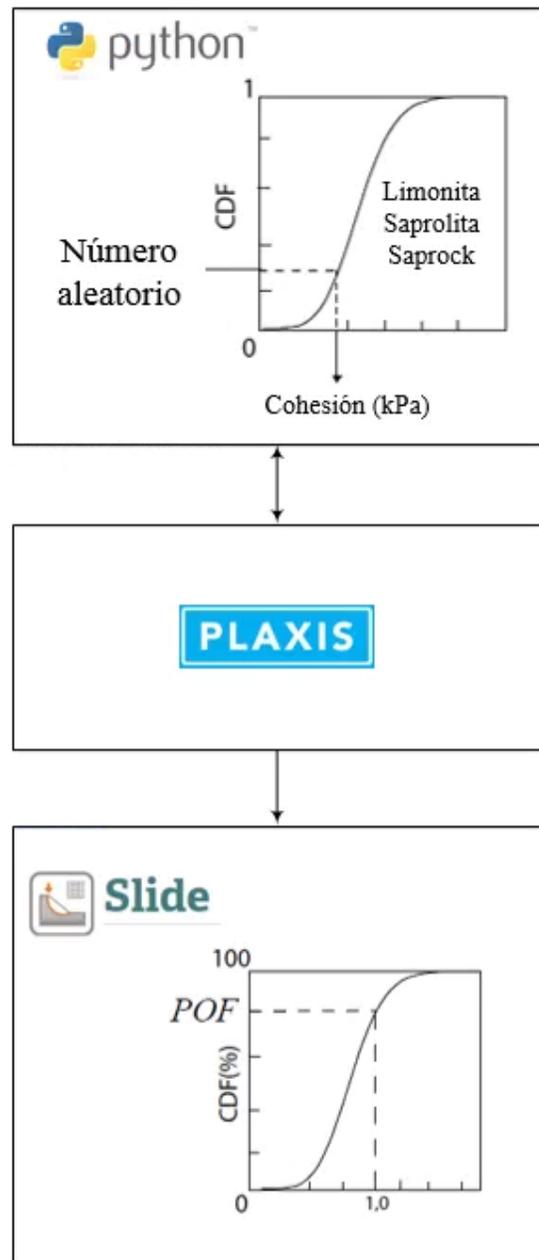


Figura 11. Metodología de comunicación.

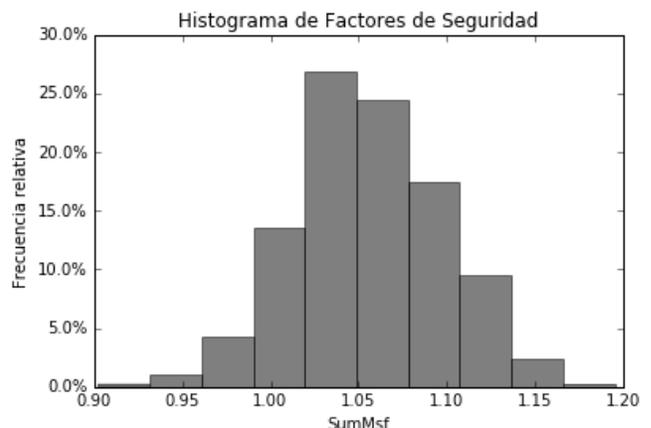


Figura 12. Histograma de factores de seguridad.

En la Figura 13 se presenta el histograma acumulado. Puede apreciarse que, con los valores elegidos para el ejercicio, el factor de seguridad resulta sensiblemente igual a 1.0.

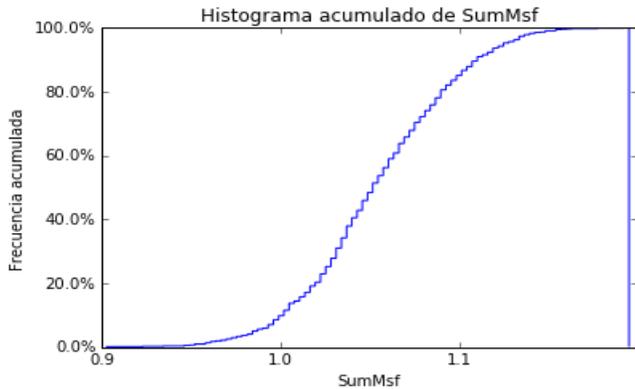


Figura 13. Histograma acumulado de factor de seguridad.

4.2 Superficies de falla

Se detectaron tres tipos de superficies de falla. Para cada grupo se calculó la probabilidad de ocurrencia mediante el proceso de coordenadas.

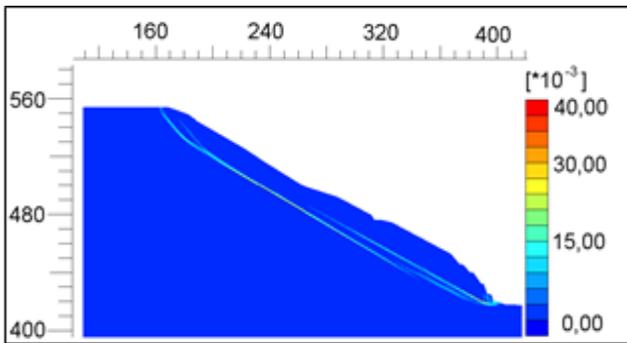


Figura 14. Deformación deviatorica incremental. Superficie de falla con 2.5% de probabilidad de ocurrencia.

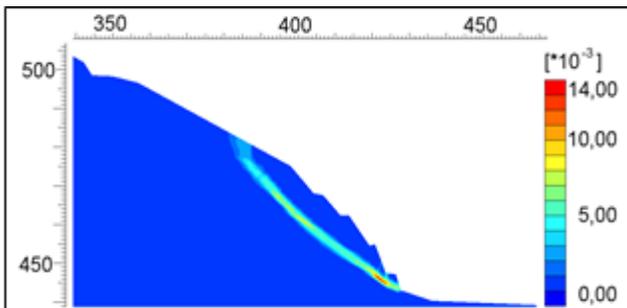


Figura 15. Deformación deviatorica incremental. Superficie de falla con 96.3% de probabilidad de ocurrencia.

4.3 Probabilidad de falla

El análisis numérico se complementó con una verificación analítica y un cálculo de probabilidad de falla. Se empleó el programa Slide v6.0 de Rocscience para realizar 1000 simulaciones de Monte Carlo considerando 30.000 superficies y 4000 iteraciones de optimización.

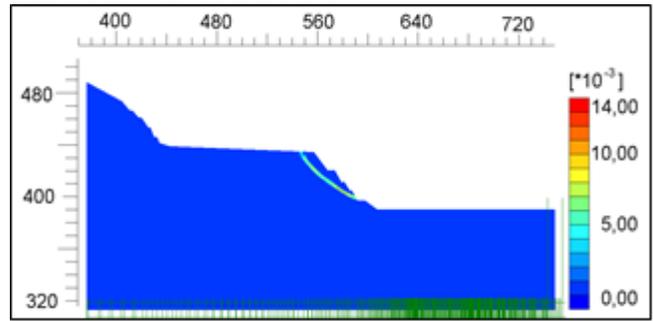


Figura 16. Deformación deviatorica incremental. Superficie de falla con 1.2% de probabilidad de ocurrencia.

El método de equilibrio límite seleccionado fue el de Morgenstern-Price y superficies poligonales con algoritmo de búsqueda “Path Search”. Este método de búsqueda requiere el ingreso del rango de entrada y salida de la superficie de falla. Los datos ingresados en estos rangos corresponden a las coordenadas de la superficie de falla con mayor probabilidad de ocurrencia según el análisis hecho en Plaxis. Con la combinación de parámetros adoptada, la probabilidad de falla resultó POF=51%.

En la Figura 17 se muestra la superficie de falla más desfavorable detectada por Slide, coincidente con la superficie de falla de mayor probabilidad de ocurrencia calculada en Plaxis y presentada en la Figura 15.

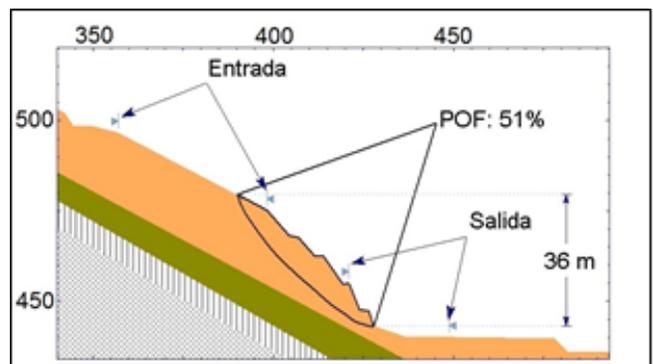


Figura 17. Superficie de falla más desfavorable obtenida con Slide (POF:51%).

4.4 Análisis de los resultados

La coincidencia de resultados entre los modelos analíticos y numéricos permite validar ambas técnicas para el análisis de estabilidad de taludes mineros utilizando técnicas estocásticas. Debe notarse que la probabilidad de falla calculada excede ampliamente el umbral aceptable para taludes mineros (<5%), en los cuales la eventual falla puede comprometer la seguridad de la operación, Kirsten (1983).

Sin embargo, este resultado no es el real del rajo sino la simple consecuencia de la selección de

parámetros pesimistas de resistencia (Tabla 3), orientada a obtener estados de estabilidad marginal que permitieran validar la tecnología de análisis presentada en este artículo.

5 CONCLUSIONES

Se presentó una técnica estocástica para el análisis de estabilidad de taludes mineros por métodos analíticos y numéricos. La técnica permite la incorporación de la incertidumbre de los parámetros resistentes en el proceso de análisis de estabilidad de taludes mediante el cálculo de elementos finitos.

La metodología propuesta se validó mediante la ejecución de mil corridas analíticas en Slide y mil corridas numéricas en Plaxis.

El pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento de todas las corridas se efectuó de manera automática mediante una rutina desarrollada en lenguaje Python.

Las superficies de falla detectadas mediante el cálculo aleatorio de elementos finitos permitieron el cálculo de la probabilidad de falla asociada al sector con mayor susceptibilidad al deslizamiento.

Los resultados obtenidos con técnicas de este tipo se pueden integrar en un análisis de riesgo de la operación minera que permite la toma de decisiones y la optimización de procesos. El tratamiento automatizado de los análisis estocásticos, entonces, convierte a la técnica en una herramienta práctica para su uso industrial.

6 AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su reconocimiento a la Compañía Guatemalteca de Níquel y a su director, Alexey Morin, por el apoyo brindado en el desarrollo del presente trabajo.

7 REFERENCIAS

Abrahams, G., Raynor, M., Mandsodza, K., (2015). "Stability analysis of lateritic waste deposits". Slope Stability. South African Inst Mining Metallurgy.

Baecher, G. B., Christian, J.T., (2003). "Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering". Wiley.

Brinkgreve, R.B.J. et al, (2016). "Plaxis2D Reference Manual". Delft Univ & PLAXIS bv.

El-Ramly, H., Morgenstern, N. R., & Cruden, D. M. (2002). "Probabilistic slope stability analysis for practice". Can Geot Journal 39:665683.

Golder Associates, (1976). "Appraisal of slope stability, La Gloria Mine, El Estor. Guatemala".

Golder Associates, (2010). "Fenix Project, 2010 Pit Slope Design.". Report no. 1411345.

Golder Associates, (2014). "Solway Bankable Feasibility Study". Report no. 09-1117-6022.

Griffiths, D. V., Fenton G. A., (2004). "Probabilistic slope stability analysis by finite elements". Journal Geotech Geoenviron Eng 130:507–518.

Hatch, (2006). "Fenix Feasibility Study. Document No. PR319112.0128, Rev. 0".

Kirsten, HAD., (1983). "Significance of the probability of failure in slope engineering". The Civil Engineering in South Africa 25 (1).

Lodolo, E. et al, (2009). "Deep structural setting of the North American-Caribbean plate boundary in eastern Guatemala". Geofísica Internacional 48(3): 263-277.

Nadim, F., Lacasse, S., (1999). "Probabilistic slope stability evaluation". 18th Annual Seminar on Geotech Risk Mgmt 1989:177186.

NRC (1995). "Probabilistic methods in geotechnical engineering". National Research Council.

Omraci, K., Merrien-Soukatchoff, V., Tisot, J. P., Pigué, J.P., Nickel, L., (2003). "Stability analysis of lateritic waste deposits". Eng Geol 68, 189-199.

Phoon, K. K., (2008). "Reliability-based design in geotechnical engineering". Taylor and Francis.

Read, J., Stacey, P., (2009). "Guidelines for Open Pit Slope Design". CSIRO.

Rippi, A., (2015). "Coupling Reliability methods with Finite Elements". Delft Univ.

Sfriso, A., (2008). "El coeficiente de seguridad en la geomecánica computacional". XV CAMSIG.

Schweckendiek, T., (2006). "Structural Reliability Applied to Deep Excavations –Coupling Reliability Methods With Finite Elements", Delft Univ.

Solway Investment Group GmbH, <http://www.solwaygroup.com/index.php/our-business/fenix-project-guatemala>, julio de 2016.

Taylor, G. & Eggleton, R. A. (2001). "Regolith Geology and Geomorphology", John Wiley & Sons Ltd.

Van Rossum, G., (2014). "Python 3.4.3". Python Software Foundation, 2014.

Wang, J., Wenhui, T., Shiwei, F., Rudi, Z., (1999). "Reliability analysis of an open pit coal mine slope". Int Journal Rock Mech Mining Sc 37:715–721.

Young, D. S., (1985). "A generalized analysis probabilistic approach for slopes". Int Journal Mining Eng 3:215–228.