

DISEÑO Y DESEMPEÑO DE TALUDES EN ROCA A ESCALA BANCO-BERMA

¹Esteban Hormazabal Ing. Minas, MsC, ²Mauricio Prudencio Ing. Civil, PhD & ³Mauricio Cofre Ing. Civil

¹SRK Consulting, Chile. Av. Vitacura 2939, Piso 5. Las Condes, Santiago – Chile.
+56 (2) 2489 08000
ehormazabal@srk.cl
www.srk.cl

²Universidad Católica Boliviana “San Pablo”. Av. 14 de Septiembre N° 4807, esq. calle 2, Obrajés.
+ 591 (2) 2782222.
mprudencio@ucb.edu.bo
www.ucb.edu.bo

³SRK Consulting, Chile. Av. Vitacura 2939, Piso 5. Las Condes, Santiago – Chile.
+56 (2) 2489 08000
mcofre@srk.cl

RESUMEN

El análisis y diseño de la configuración banco berma en rocas (ya sea en carreteras o rajos abiertos) no cuenta con un procedimiento estandarizado, estructurado y con una base metodológica definida. El registro de la información geotécnica-estructural levantada en terreno y el estado de los taludes a escala de bancos deben ser usados para calibrar parámetros tales como el espaciamiento y persistencia de las estructuras; de esta manera se puede evaluar el tipo, volumen y la frecuencia de los bloques críticos que afectan la estabilidad a nivel de banco en los taludes de un rajo abierto o en un corte de una ladera de un camino.

El presente trabajo muestra una propuesta de metodología para diseñar taludes a escala de banco mediante la aplicación de un análisis probabilístico que permite considerar múltiples bloques que pueden generarse debido al arreglo estructural presente. Esta propuesta integra la teoría de bloques y el análisis probabilístico; y lo fundamental, presenta recomendaciones para la calibración y verificación en terreno del desempeño de los taludes en minas operativas.

ABSTRACT

The analysis and design of the bench-berm configuration on rock mechanics (either on roads or open pit mines) does not have a standardized and structured procedure with a defined methodological base. The record of geotechnical and structural information of the ground and the slope conditions must be used to calibrate parameters such as the structure spacing and persistence; thus, the type, volume and frequency of the blocks that control slope stability can be assessed.

The present work shows a methodology proposed to design slopes at the bench scale through the application of a probabilistic analysis that allows to consider multiple blocks that can be generated due to the structural arrangement. This methodology integrates the block theory and the probabilistic analysis; and fundamentally, provides recommendations for calibration and verification on site of the bench berm performance in operative mines.

1. INTRODUCCIÓN

La experiencia muestra que a medida que se desarrollan cortes en macizos rocosos (carreteras o faenas mineras a cielo abierto), regularmente afloran estructuras en sus paredes que producen bloques que pueden ser potencialmente inestables de acuerdo al arreglo estructural presente y el diseño de la configuración banco berma. La caída de bloques inestables puede ser contenida por las bermas parcial o totalmente en los bancos inferiores, y además, esto produce un descreste o pérdida de berma en banco superiores.

A diferencia del clásico o tradicional análisis de deslizamientos planos y de cuñas mediante equilibrio límite que considera la formación de un volumen máximo según una persistencia de una estructura (deslizamientos plano) o dos estructuras (deslizamientos de cuñas) que corta la altura completa del banco y un valor único de espaciamiento de estructuras, la metodología de diseño banco berma propuesta incorpora seis (6) familias estructurales al mismo tiempo;

además de la variabilidad del manto y dirección de manto, la persistencia y el espaciado en forma probabilística. De esta manera, y con base en la teoría de bloques, se generan en forma estadística bloques que se ubican aleatoriamente en un banco típico de 200 m de longitud, en donde se determina el descreste o *backbreak* y el derrame de estos. La Figura 1 muestra bancos que se ubican en el mismo dominio estructural, pero en diferentes orientaciones de talud. La Figura 1a) muestra una serie de inestabilidades con grandes volúmenes de derrame y descrestes importantes. La Figura 1b) muestra pocas inestabilidades, con menores derrames y menores descrestes.

La base conceptual de esta metodología es la teoría de bloques propuesta por Goodman and Shi (1985), mediante la cual se pueden evaluar diferentes sistemas estructurales al mismo tiempo que forman bloques inestables y/o críticos. La incorporación de análisis probabilísticos a esta teoría es llevada a cabo por el programa SBLOCK (Estherhuizen, 2004) el cual permite determinar la estabilidad y dimensiones de los potenciales bloques críticos, el “descreste” (o *backbreak*), así como anchos de bermas efectivas y requeridas. Es importante mencionar que el desarrollo de este trabajo contiene la experiencia adquirida por SRK Consulting Chile, en la aplicación de esta metodología a diferentes faenas mineras en el Chile, Perú, México y Rusia en los últimos 10 años (ver Hormazabal 2013).

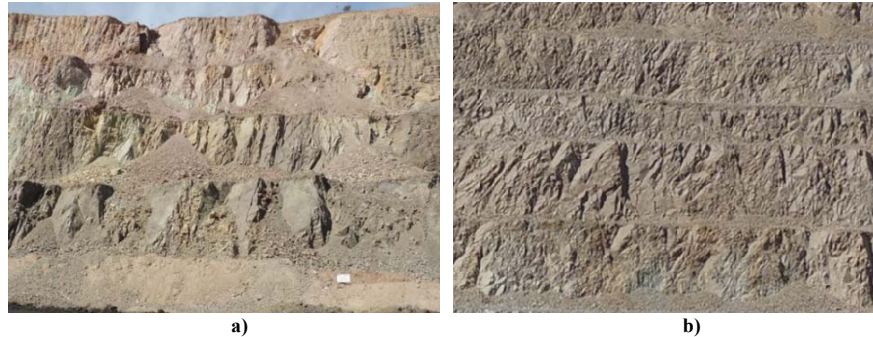


Figura 1. Taludes con diferentes orientaciones bajo un mismo dominio estructural (tomada de Hormazabal et al. 2015a).

2. METODOLOGÍA

La Figura 2 muestra un diagrama de flujo que comprende las etapas de evaluación del banco-berma. Nótese que la teoría de bloques es considerada en el programa SBLOCK, el cuál es usado como herramienta de análisis.

La estabilidad de un talud en roca a nivel bancos normalmente está controlada por las estructuras por lo que es importante contar con la información proveniente del análisis estructural de acuerdo al mapeo de superficie e información de sondajes. Paralelamente se debe contar con la información obtenida del comportamiento de los taludes expuestos que pueden ser utilizados para calibrar parámetros mediante análisis retrospectivos y conciliaciones del desempeño de los taludes. A continuación, se describen los criterios mencionados.

2.1 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

La información estructural constituye una parte esencial en el análisis ya que la calidad de resultados estará directamente relacionada a la confiabilidad de los datos levantados en terreno. En este entendido, es importante realizar una adecuada caracterización y definición de dominios estructurales incorporando las características de las estructuras presentes (fallas de primer orden, segundo orden, diaclasas, et). Esta información regularmente puede estar

basada en campañas de mapeo de superficie, información de pozos ATV (*Acoustic Televiewer*), registro de sondajes, sistemas de escaneos de superficie, entre otros. La interpretación de la información debe contar con el detalle suficiente que permita identificar las orientaciones de estructuras y porcentaje de ocurrencia de todos los sistemas identificados. El mapeo de superficie puede ser realizado mediante la toma directa de datos (Dip y DipDir), persistencia y espaciamiento mediante el uso de información de escaneos de superficie o topografía a detalle. El levantamiento debe ser lo más detallado posible de poder realizar la correspondiente representación estereográfica y así poder definir los dominios estructurales. Durante el mapeo de superficie es importante conocer el estado de los bancos existentes (o que actualmente están en desarrollo) e identificar aquellos sistemas estructurales que controlan la formación de bloques identificando, en términos generales, las características principales que pueden condicionar la geometría final del banco y su estabilidad. En el caso de que existan bancos se debe obtener también información sobre el estado de las bermas (definir si están colmatadas o no), daño por tronadura, etc. Cabe complementar que las labores de conformación de bancos nuevos en una faena minera o en tramos carreteros, debe ir acompañada de un levantamiento de estructuras que valide la información obtenida superficialmente o en su defecto permita actualizar la información estructural con el consecuente posible rediseño de talud.

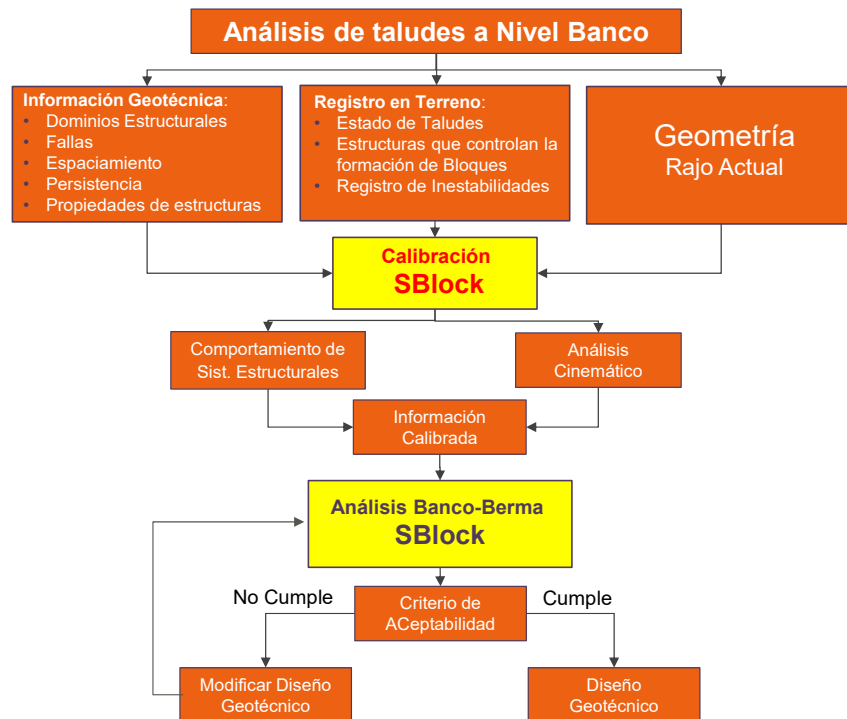


Figura 2. Metodología propuesta para la evaluación banco – berma (tomada de Hormazabal et al 2015b).

2.2 ANÁLISIS RETROSPECTIVOS PARA CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES

Como parte del levantamiento y registro de información geotécnica en terreno, es recomendable trabajar con las inestabilidades existentes con el objetivo de estimar parámetros de resistencia al corte de las estructuras. En lo posible, se debe caracterizar e identificar la naturaleza de las estructuras que forman las cuñas (Joints, Fallas, u otro). En Figura 3 se presenta un ejemplo de inestabilidad identificada en terreno en la que se incluye información

como orientación de estructuras, tipo de cuña y la geometría tridimensional como salida de resultado del programa SBLOCK. En la Figura también se observan los rangos de variación de los parámetros de resistencia al corte que controlan las cuñas inestables analizadas a nivel de banco (análisis retrospectivo realizado con el SBLOCK).

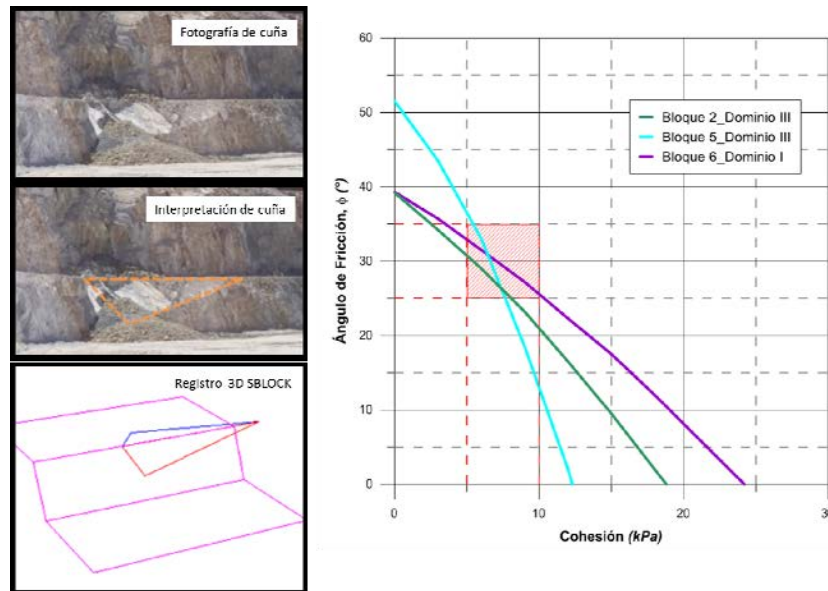


Figura 3. Resultados del Análisis Retrospectivo de Inestabilidades para calibrar parámetros resistentes. Cuñas deslizadas con control de un plano deslizante ($256^{\circ}/40^{\circ}$) y con un plano de liberación lateral.

2.3 ANÁLISIS RETROSPECTIVOS PARA CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS.

Para el análisis retrospectivo se ingresan los valores medios de manteos (Dip) y dirección de manto (DipDir) de los sistemas estructurales incluyendo sus rangos de variación, distribución de espaciamento, persistencia y propiedades de resistencia al corte para cada sistema. Se realiza un análisis probabilístico mediante una simulación tipo Montecarlo, para ir ajustando los valores de espaciamento y persistencia de manera de replicar lo observado en terreno (moldes de bloques deslizados o fallados). Como salida de resultados, el programa entrega la “actividad de cada sistema estructural” (*Joint Activity*), resultado que permite visualizar aquellos sistemas estructurales que controlan la generación de bloques y de su naturaleza (cuñas, deslizamientos planos o una combinación de éstas). La Figura 4 muestra los resultados del *Joint Activity* para un determinado dominio estructural y para 2 orientaciones de talud como producto de la calibración de espaciamento y persistencia de los diferentes sistemas estructurales. Se observa que se logró reproducir los “moldes” de las inestabilidades observadas en terreno e identificar los sistemas estructurales más relevantes en la generación de inestabilidades

Finalmente, si se dispone de topografías de detalles o levantamientos con *scanner*, es posible medir directamente el descreste o *backbreak* en los distintos bancos; y graficar la distribución acumulada de anchos de bermas observadas en terreno y compararlas con los resultados del programa (ver Figura 5).

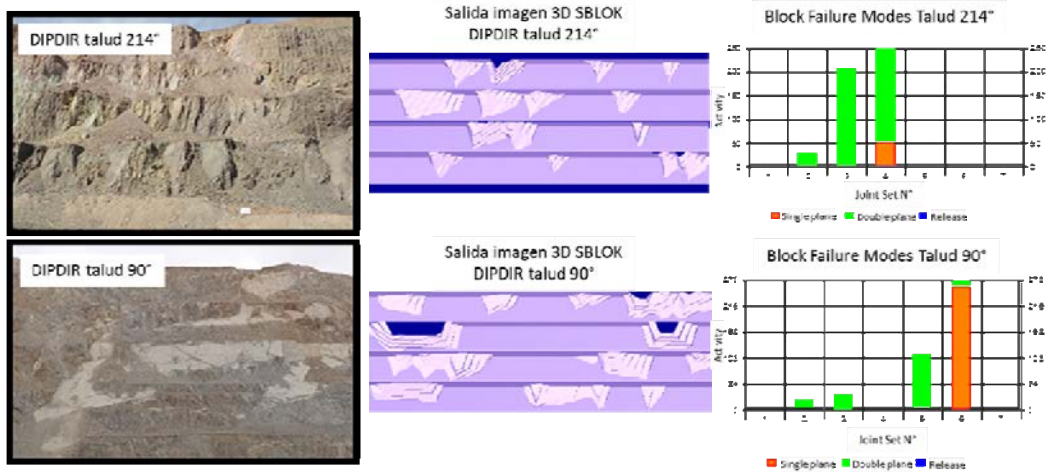


Figura 4. Resultados de la calibración de espaciamiento y persistencia de los diferentes sistemas estructurales y *Joint Activity* para un determinado Dominio Estructural considerando 2 orientaciones de talud.

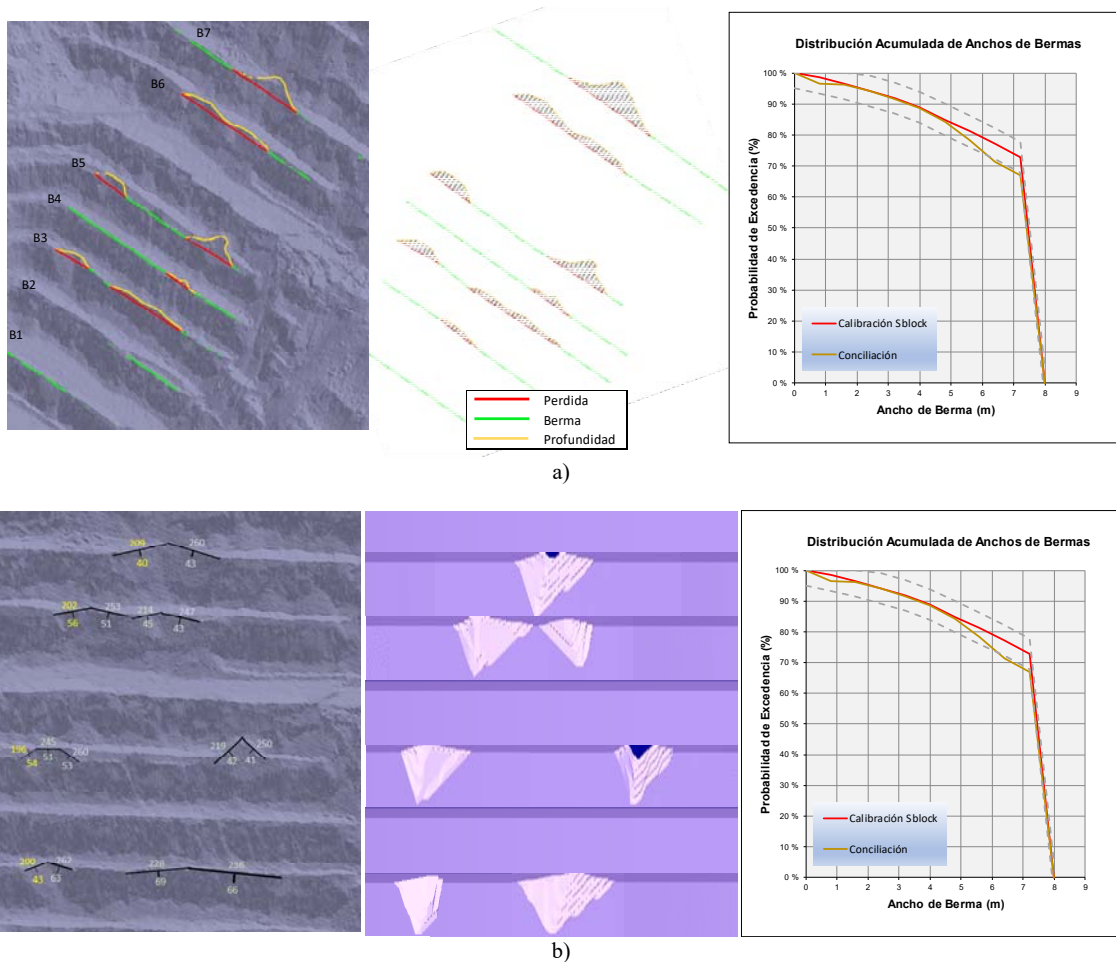


Figura 5. Resultados de la calibración y conciliación geotécnica. a) Comparación de los anchos de bermas obtenidos en terreno y el resultado de la calibración. b) Comparación de los “moldes” de las inestabilidades registradas en terreno y el resultado de la calibración con el programa Sblock.

3. ANÁLISIS BANCO-BERMA USANDO SBLOCK

Para la evaluación de la estabilidad de bancos la metodología hace uso del programa SBLOCK, el cual permite estimar la pérdida de berma o descreste que genera la caída de bloques (también conocido como *back break*) y cuál es el impacto que esta caída genera en términos del volumen de material deslizado (también conocido como *derrame*) que puede generar en la berma inferior. De esta manera se puede estimar cual será el ancho de berma libre de derrame que quedará considerando la caída de cuñas bajo control estructural. Hormazabal (2013), Hormazabal et al. (2015b) presenta una descripción detallada del programa y casos históricos donde se ha utilizado el programa SBLOCK. Algunas de las principales características a destacar son:

- Se evalúa la estabilidad de bloques que pueden estar formados por más de una discontinuidad al mismo tiempo (hasta 6 sets estructurales) considerando la geometría, persistencia, espaciamiento y las propiedades de resistencia al corte de las estructuras consideradas.
- Evalúa la estabilidad a través del factor de seguridad y la probabilidad de falla (PF).
- Permite realizar el proceso de calibración y conciliación geotécnica, verificando el comportamiento de la actual información estructural con el desarrollo o *performance* de un diseño.

En Figura 6 se presenta un esquema con algunos de los parámetros que se obtienen a través del programa SBLOCK y además principios generales para su determinación. Las bermas efectivas y requeridas corresponden a valores promedios obtenidos a partir de la simulación de un talud de 200 m de largo que se generan mediante la teoría de bloques y se definen en forma aleatoria de acuerdo al arreglo estructural presente por dominio. De este modo, el programa genera secciones cada 2 m y de cada una de ellas recoge la información de bermas considerando sus pérdidas o descreste y el derrame del material. Adicionalmente, en el programa SBLOCK es posible obtener esquemas que representan el comportamiento de la probabilidad de falla (PF) en función de la pérdida de cresta o berma y la distribución acumulativa de anchos de bermas considerando las pérdidas obtenidas en cada simulación. En la Figura 7, se muestra un ejemplo de distribución acumulada de anchos de bermas efectivos, donde cada curva representa una orientación de talud evaluada. Además, se presenta el ancho de berma máximo requerido para contener los derrames producto de las inestabilidades.

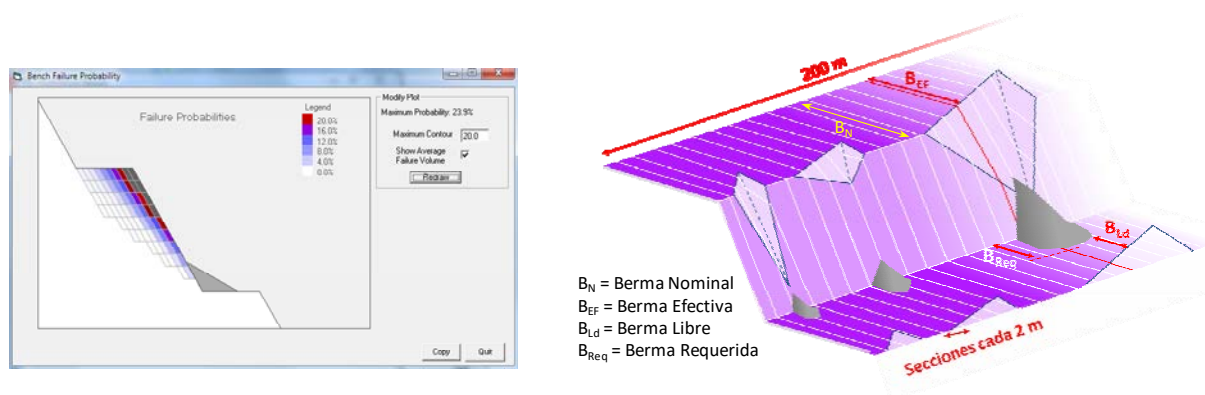


Figura 6: Parámetros de salida del programa SBLOCK. a) Probabilidad de Falla. b) Esquema de los parámetros de diseño y de cómo se obtienen los valores promedios de las bermas efectivas, requeridas y libre de derrame.

En la Figura 8, se muestra un ejemplo de una roseta de probabilidad de falla considerando un criterio de aceptabilidad y los sectores donde se realizó la calibración.

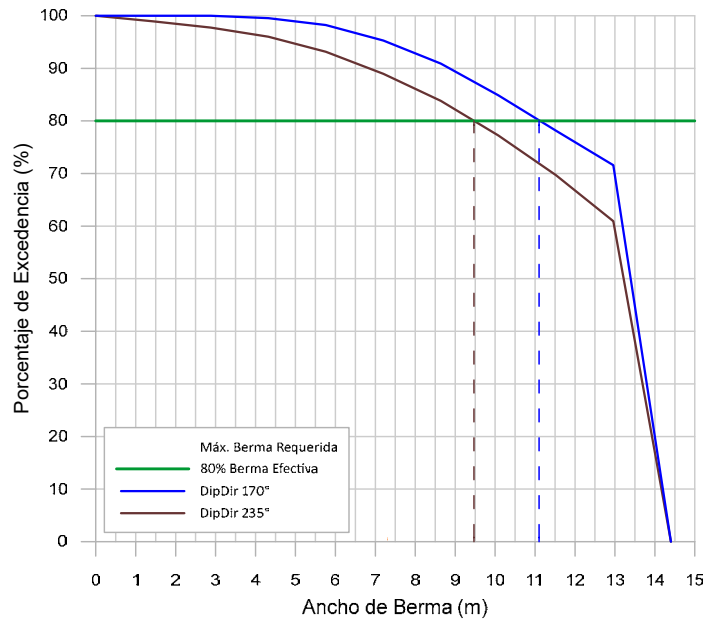


Figura 7: Ejemplo de la distribución acumulada de anchos de berma efectivos para dos orientaciones principales en un talud y que incluye la máxima berma requerida debido a los posibles derrames de las inestabilidades simuladas.

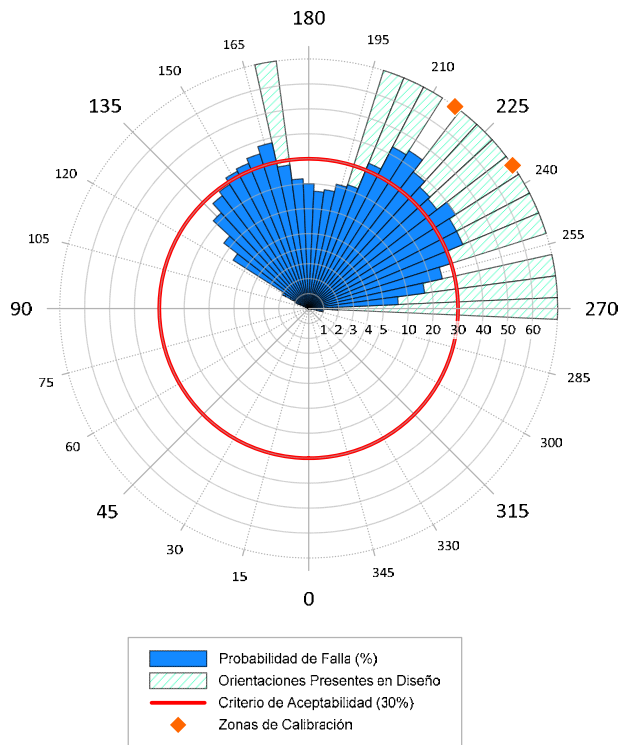


Figura 8: Ejemplo de una Roseta de Probabilidad de Falla considerando un criterio de aceptabilidad de 30% y los sectores de calibración.

4. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES.

El presente artículo presenta una metodología de análisis del diseño banco-berma con base en una calibración in situ de parámetros geométricos y geotécnicos, en donde es necesario que exista buena correlación entre la información estructural disponible y los resultados obtenidos por el programa SBLOCK. Esta metodología ha sido aplicada exitosamente los últimos 10 años en distintas faenas operativas alrededor del mundo. El tipo y frecuencia de los bloques, así como la pérdida de bermas presentes en los taludes observados en terreno pueden ser replicadas por el análisis. Las estimaciones logran representar la formación de bloques inestables observadas en terreno (tipo y ocurrencia) y se pueden identificar los bloques críticos y los sistemas que controlan la generación de estos.

Con esta metodología, es posible estimar los parámetros de bermas efectivas y requeridas, la probabilidad de falla y el porcentaje de berma efectiva para el diseño de banco establecido. Además, se puede estimar el desempeño (*performance*) y confiabilidad del diseño a escala de banco considerando el descreste o *backbreak* y los anchos de derrame producto del potencial material de derrame. Para evaluar lo anterior, es clave definir los criterios de aceptabilidad en cada obra (ya sea rajo abierto u obra en carretera), además de las condiciones particulares tal como es el caso de infraestructura al interior de un rajo, cercanía a rampas de acceso, etc. Finalmente, se recomienda que la caracterización estructural en el mapeo de bancos considere el registro de persistencia y espaciamiento considerando sus valores mínimos, máximos y promedios. En actualidad, existen varias herramientas para obtener información topográfica de detalle que permiten obtener información clave para evaluar el desempeño de los taludes.

5. REFERENCIAS

- Goodman, R. and Shi, G.H. (1985) Block theory and its application to rock engineering, Prentice Hall, USA.
- Estherhuizen (2004). SBLOCK. 3D Surface Wedge and Planar Analysis for Slopes.
- Hormazabal, E. (2013). Bench berm design using probabilistic keyblock analysis. International symposium on Slope Stability in Open pit Mining and Civil Engineering Brisbane, Australia, 25-27 September.
- Hormazabal, E., Huamán, A. & González, F., 2015a. Metodología para la evaluación del diseño banco-berma utilizando un análisis probabilístico basado en teoría de bloques. Parte I. In: R. J. Rocca, R. M. Flores & A. O. Sfriso, eds. Integration Innovations of Rock Mechanics: Proceedings of the 8th South American Congress on Rock Mechanics. 15–18 November 2015. Buenos Aires, Argentina. Amsterdam: IOS Press BV, pp. 341-348.
- Hormazabal, E., Huamán, A. & González, F., 2015b. Metodología para la evaluación del diseño banco-berma utilizando un análisis probabilístico basado en teoría de bloques. Parte II. In: R. J. Rocca, R. M. Flores & A. O. Sfriso, eds. Integration Innovations of Rock Mechanics: Proceedings of the 8th South American Congress on Rock Mechanics. 15–18 November 2015. Buenos Aires, Argentina. Amsterdam: IOS Press BV, pp. 389-398.