

Tema V. DISEÑO DE TALUDES

Roberto Watson Quesada.

Ingeniero Geólogo, Profesor del Instituto Minero metalúrgico de MOA, Cuba

Introducción

Para el diseño de cualquier explotación a cielo abierto es necesario contar con la modelización geológica del yacimiento, la cual se obtiene a partir de los trabajos previos de investigación. Este diseño contempla el establecimiento de los contornos finales, intermedios y perspectivas en las diferentes etapas en el desarrollo de la explotación, así como la definición del método de explotación y la selección de la maquinaria a utilizar.

Un aspecto de extrema importancia para el armónico desarrollo de los trabajos mineros es el que está relacionado con la estabilidad de sus contornos, ya que garantizan la seguridad durante la explotación, en el período de cierre y, en el uso posterior de los espacios creados por la explotación.

Los elementos del contorno de la cantera son: Los bordos, su profundidad o altura de explotación, los bancos, compuestos por las plazoletas, altura de banco, ángulo de talud del banco, las bermas de transporte y de seguridad, ángulo de los bordos activo e inactivo de la explotación y el ángulo de culminación.

I Información previa para el diseño de los taludes en la mina

Para acometer el diseño de una cantera, así como de sus elementos, es necesario contar con un volumen de información, que caracterice al macizo rocoso y su comportamiento en el tiempo, para poder tomar las decisiones de diseño que garanticen la seguridad y economía de la cantera. Esta información la podemos agrupar de la siguiente forma:

- Modelo geológico del yacimiento
- Propiedades del macizo rocoso
- Características hidrogeológicas de macizo
- Efectos de la alteración de las rocas
- Esfuerzos in situ
- Efectos de las voladuras en las rocas
- Tratamiento para preservar la estabilidad de los taludes. Aquí es importante tener un criterio de cómo quedara el espacio creado y que posible uso tendrá.

A continuación tratamos de forma resumida los principales elementos que deben estar incluidos en cada una de las carpetas de información necesaria.

MODELO GEOLÓGICO

Recolección de Información Geológica tanto en soporte electrónico o papel: La disponibilidad de un modelo geológico es fundamental. Estos Modelos Geológicos son más efectivos cuando se confeccionan en tres dimensiones con el empleo de programas profesionales como VULCAN, GEMCOM, etc. Los modelos permiten visualizar en tres dimensiones la geología, geología estructural, distribución de leyes, distribución de agua subterránea y toda la información geomecánica existente y disponible (RQD, RMR, Q, etc.). Con la automatización del diseño se facilita utilizar la interface de Modelos Geológicos con Modelos de Análisis de Estabilidad.

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO

Es el aspecto que constituye el mayor problema, en el análisis de estabilidad de taludes y, la toma de decisiones para el diseño de la estrategia de explotación de la cantera. Se tendrá en cuenta el problema que surge con la selección del tipo de modelo que caracteriza al macizo, modelos continuos (Homogéneos) o discontinuos (discretos). Es conveniente usar el criterio de falla de Hoek y Brown teniendo en cuenta los supuestos considerandos en su evaluación y utilizar los cálculos retroactivos para verificar si los parámetros asumidos en el criterio de falla son correctos. Se recomienda el empleo de métodos probabilísticos.

PRESENCIA DE AGUA SUBTERRÁNEA

La presencia de agua subterránea en los taludes reduce las tensiones efectivas y, consecuentemente, reduce la resistencia al corte de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso. La medición y el control de los niveles freáticos es importante durante toda la vida de la cantera. El modelo geológico debe incluir la información del nivel freático, sus fuentes de alimentación, así como la hidráulica del macizo rocoso.

EFECTO DE LA ALTERACIÓN

La mineralización en muchos casos está asociada a zonas de alteración que tienen impacto sobre la resistencia del macizo rocoso y, por lo tanto, su estabilidad.

Durante el mapeo geológico se deben identificar zonas de alteración mostrando sus grados y tipo de alteración. El mapeo geológico debe precisar el efecto de la alteración en la resistencia y calidad de los macizos rocosos. Para definir la alteración se debe utilizar la observación de campo, complementada por investigaciones geofísica y ensayos de laboratorio.

ESFUERZOS IN-SITU

Los taludes de forma convexa (salientes) son menos estables que los taludes cóncavos debido a la falta de confinamiento en los primeros. El efecto del desconfinamiento es usualmente ignorado. Éste termina generalmente en pérdida de resistencia del macizo rocoso.

La concentración de tensiones en los pies de los taludes de bancos de gran altura produce fallas en la zona, que causan inestabilidad en los mismos. En contadas ocasiones se realizan mediciones de esfuerzos in situ para diseño de taludes, siendo una practica poco común en canteras, solamente se emplea en investigaciones en canteras muy profundas.

DAÑO POR EFECTO DE LA VOLADURA

El daño causado por una voladura masiva se extiende varios metros detrás del talud. El daño de la voladura se produce debido a los esfuerzos dinámicos inducidos que resultan en el proceso de la fracturación de la roca, con lo cual se produce la abertura de las discontinuidades.

Es importante hacer una detallada observación de los testigos de perforación para tener una apreciación real del macizo rocoso.

El efecto de la rotura o fragmentación producida por la voladura debe ser tomado en cuenta durante el mapeo geotécnico, para valorar en que medida es afectada la calidad del macizo rocoso.

II - Criterios para el diseño de los taludes

La estabilidad de los taludes en una explotación a cielo abierto tiene una gran importancia para la seguridad y efectividad económica de la misma por lo que debe ser considerada desde el inicio del proceso de diseño.

Los aspectos más importantes que afectan la seguridad en los frentes y operaciones son los siguientes:

- Caída o deslizamiento de rocas sueltas
- Colapso parcial de un banco
- Colapso general de un bordo de la cantera.

Las recomendaciones para el control y eliminación de los riesgos son la adopción de las siguientes medidas:

- Diseño adecuado de bancos y plataformas para retener los desprendimientos de materiales.
- Determinación y mantenimiento adecuado de taludes generales seguros.
- Control en las proximidades del talud, para reducir los daños en el macizo.
- Aplicación de sistemas de drenaje en los macizos para reducir las tensiones originadas por el agua.
- Saneamiento sistemático y efectivo de materiales sueltos, potencialmente peligrosos por la posibilidad de caída.

Los estudios previos necesarios para realizar el diseño geotécnico de un talud estable implican una caracterización del macizo rocoso a partir de los siguientes factores:

- Sistemas de juntas y discontinuidades
- Relación de estos con las superficies de los frentes, taludes y los posibles planos de rotura.
- Parámetros resistentes de las juntas, las características y propiedades de sus superficies, así como los materiales que los rellenan.
- Propiedades geotécnicas de la matriz rocosa.
- Características hidrogeológicas y las presiones de agua en las juntas y fracturas.
- Efecto de las vibraciones sobre los macizos.

Es necesario señalar las formas de rotura que se producen a partir de los datos registrados por la práctica internacional.

En el caso de taludes rocosos, las superficies de rotura pueden producirse a partir de las discontinuidades preexistentes en el macizo. Se puede aplicar un método gráfico para identificar las situaciones en las que, cinemáticamente, son posibles ciertos tipos de rotura. La utilización de los métodos gráficos permite detectar los sectores de la explotación que son susceptibles a la producción de roturas y así, dirigir las acciones de reconocimiento hacia las zonas más críticas.

En el caso de macizos poco cohesionados del tipo suelo, la experiencia ha demostrado que las roturas son del tipo circular. En los macizos rocosos muy fracturados y, donde esta se manifiesta de forma aleatoria o, donde el talud general varía con respecto a la estructura, las superficies de rotura son más complejas; pudiendo ser compuestas y formadas parcialmente por discontinuidades próximas a la superficie de deslizamiento y, por otro lado, por factores nuevos en la roca intacta.

En el caso de una fracturación intensa el grado de imbricación de bloques y sus posibilidades de movimiento juegan un papel importante, pudiendo adoptarse la hipótesis de rotura circular.

Los cálculos de estabilidad de equilibrio límite (basados en la mecánica de los sólidos no deformables) se pueden aplicar para los diferentes tipos de roturas indicadas.

En geotécnica, el riesgo de colapso de un talud se mide en términos del llamado coeficiente de seguridad FS, que es la relación entre el conjunto de los esfuerzos resistentes o estabilizadores y los desestabilizadores que provocan la rotura del talud. La relación de un factor FS mayor implica una disminución del riesgo, pero supone en general taludes más acostados o tendidos.

El valor FS=1 señala la frontera en la cual un talud es o deja de ser estable. La necesidad de utilizar valores de FS > 1 surge como consecuencia de los siguientes factores:

- Posible existencia de características geológicas y estructurales del talud, que no han sido detectadas en el estudio geotécnico.
- Los posibles errores en los ensayos para caracterizar al macizo.
- La heterogeneidad y anisotropía presente en el macizo.
- La determinación y variabilidad de las presiones de agua en el talud.
- Los errores derivados de las supuestas superficies de rotura utilizadas.
- Los errores en los cálculos.

Los valores que se adoptan en la práctica varían en función de las consecuencias que resultaran de su colapso, y del nivel de confianza en los datos utilizados. La experiencia internacional, que se obtiene teniendo en cuenta las considerables implicaciones económicas, en la selección de un coeficiente de seguridad FS próximo a 1,3 puede ser adecuado para taludes cuya estabilidad no se considere a largo plazo, como es el caso de los taludes de los frentes de trabajo que en ocasiones se trabajan con FS= 1. Por el contrario si las condiciones son críticas o estamos ante los contornos finales FS puede tomar valores de 1,5 a 1,6, aunque dependiendo del tipo de roca, de sus propiedades reológicas y del grado de alteración con el tiempo, se deberán tomar medidas adicionales aún con un factor de seguridad elevado.

El coeficiente de seguridad, para un talud con rotura plana, se determina con la siguiente expresión:

$$F = \frac{CA [W (\cos \rho_p - \alpha \operatorname{Sen} \rho_p) - U - V \operatorname{Sen} \rho_p] \operatorname{Tan} \phi}{W (\operatorname{Sen} \rho_p + \alpha \operatorname{Cos} \rho_p) + V \operatorname{Cos} \rho_p}$$

Donde

$$Z = H \left(1 - \sqrt{\operatorname{Cot} \rho_p + \operatorname{Tan} \rho_p} \right)$$

$$A = (H - Z) \operatorname{Cosec} \rho_p$$

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\left(1 - \left(\frac{Z}{h} \right)^2 \right) \operatorname{Cot} \rho_p - \operatorname{Cot} f_r \right]$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w Z_w A$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w Z_w^2$$

Siendo

H – Altura del talud.

– Angulo del talud del banco

β – Angulo del plano de rotura (Rotura plana)

γ - Densidad de la roca

γ_w – Densidad del agua

α - Aceleración sísmica

Z – Altura de la grieta de tracción

Z_w – Altura del agua en grietas de tracción

- Angulo de rozamiento

W – Peso del bloque deslizante

En las explotaciones a cielo abierto el coeficiente de seguridad se recomienda obtenerlo para diferentes pendientes del bordo final. Según sea la estructura geológica de los macizos, las variaciones de FS con el talud pueden ser lineales o no. En la práctica se presentan dos casos distintos: En el primero, se trata de un macizo homogéneo, donde el tipo de rotura no está determinado por las discontinuidades, los valores de FS dependen de la altura del talud y su ángulo; En el segundo caso, la estabilidad está controlada por discontinuidades del macizo (caso de las roturas planas y del tipo cuña), pudiendo ser los valores de FS altos, a pesar de lo cual puede ocurrir que, por debajo de valores límites de ángulo de talud, exista la posibilidad cinemática de deslizamiento. Esto se explica por que el valor de FS puede disminuir drásticamente debido a la pérdida de cohesión del macizo.

Por otro lado, en la mayoría de los métodos de cálculo se supone que, el talud es en planta rectilíneo, sin tener en cuenta la curvatura del hueco. En la práctica, se ha comprobado que los taludes con superficies convexas son más inestables que los cóncavos. En estos últimos, es posible aplicar la segunda regla empírica; si el ángulo de curvatura de un talud cóncavo (medido en el pie del mismo) es inferior a su altura, la pendiente resultante del cálculo bidimensional puede aumentarse 10 grados mientras que, si el talud es convexo, habrá que disminuirlo en esa misma magnitud.

Una vez definidas las pendientes estables de los bordos finales (taludes generales finales) se pasa a estudiar la geometría de los bancos. En dependencia de la configuración de los taludes y su orientación relativa respecto a la estratificación o familias de discontinuidades dominantes, es posible clasificar las diferentes situaciones de los bancos para su diseño

- o Zonas en las que la estratificación está inclinada hacia la superficie del talud con un ángulo inferior a 25 grados, no deben ocurrir inestabilidades ni deslizamientos importantes.
- o En el caso de taludes sin bermas ni plazoletas de trabajo, donde la pendiente coincida con un ángulo no superior a los 50 grados, no deben producirse deslizamientos.
- o Los bancos con ángulo de talud de 50 a 90 grados coincidentes con los planos de estratificación deben manifestar deslizamientos o roturas por pandeo de estratos.
- o En el caso que los bancos corten los estratos o discontinuidades con buzamiento opuesto a la dirección de su desarrollo, en el talud o frente es posible que ocurran desprendimientos de rocas por vuelco de estratos.
- o En los lugares donde la estratificación sea opuesta a la dirección del hueco de la cantera y los bancos cortan las discontinuidades con buzamiento opuesto, el talud estará sometido a roturas escalonadas.

- o En los bancos que cortan las discontinuidades con orientación oblicuas al talud, aparecerán roturas por cuñas

El ángulo del bordo se puede determinar a partir de la dependencia entre los parámetros geométricos del talud.

Para macizos homogéneos.

$$H = \frac{2 K_{\max} \operatorname{Sen} \alpha \operatorname{Cos} \varphi}{\operatorname{Sen}^2 \frac{\alpha - \varphi}{2}}$$

Donde:

H - altura del talud (Profundidad de las canteras o altura del frente)

α - ángulo del talud

El paso de estabilidad m toma valores de 1,5 a 3,0

Siendo:

$$K = \frac{K_{\max}}{m} = \frac{C}{m \gamma}$$

$$\varphi = \operatorname{artg} \frac{f}{m} \quad ; \quad f = \operatorname{tg} \varphi$$

Dependencia entre los parámetros geométricos del bordo de la cantera.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{B} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n (b_i + h_i \cot \beta_i) + h_n \cot \beta_n}$$

Donde:

h_i . Altura del banco, m

β - ángulo del talud del banco

b_i - Ancho de la berma, m

n - Numero de bancos

Para el caso en que la altura de los bancos, el ángulo de los taludes de los bancos y el ancho de las plazoletas o bermas sea constante, entonces .

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{n h}{n h \cot \alpha + (n - 1) b}$$

Los resultados obtenidos a través del análisis geométrico son comparados con los obtenidos para asegurar un factor de seguridad que garantice la estabilidad de los frentes de trabajo y de los bordos de la cantera.

Es importante tener definición de la posible falla de talud, para establecer el sistema de monitoreo mediante la medición de las deformaciones, presiones y niveles de agua. Tomar las

medidas de estabilización mediante el cambio de la geometría (reducción de ángulo de talud, reducción de la altura de banco).

En los taludes finales o en los bordes laterales según la dirección de desarrollo de la cantera y su estado y tipo de rotura se empleara refuerzo del talud (cables, espaldón, anclaje y mallado, gunitado, etc.). También se puede emplear el drenaje (horizontal, superficial y/o galerías).