

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.

Aplicación de barreras dinámicas sobre un talud minero

Melissa MIUZZI^{a,1} y Oscar ESCAMILLA CAYETANO^b

^a *Coordinador Técnico, Maccaferri de México SA de CV*

^b *Especialista en Geotécnica, Maccaferri de México SA de CV*

Resumen. La caída de bloques de roca de gran tamaño y de alta energía es un problema que los diseñadores geotécnicos deben enfrentar y considerar. En el caso específico de minas con explotación mediante sistema de tajo a cielo abierto, el riesgo de caída de bloques puede estar referido generalmente a las características geomecánicas del macizo recoso y pueden ser acentuados por el mal manejo o diseño inadecuado de los rebajes. El estudio de la mecánica de rocas es fundamental y muchos son los parámetros que pueden afectar la estabilidad de los taludes: calidad de la superficie rocosa, geometría, ausencia de mantenimiento, y especialmente el manejo del agua es un parámetro extremadamente importante que puede afectar y modificar las características resistivas y consecuentemente modificar la estabilidad, provocando caídas de roca. El caso examinado en este artículo se refiere al talud de una mina a tajo abierto, caracterizada por una geometría compleja y material rocoso de naturaleza inestable. Las rampas de acceso al tajo y acarreo del minado se veían afectadas por caídas de rocas que podían poner en peligro al personal y a las operaciones de la mina, creando pérdidas económicas y riesgos sociales. Las barreras dinámicas emplean alta resistencia a múltiples impactos, facilidad de mantenimiento y corto tiempo de instalación y se están volviendo una medida de protección muy utilizada en minería y en obra civil.

Palabras Clave. mecánica de rocas, barreras dinámicas, caída de rocas, sistemas de revestimiento, control de caídos.

1. Introducción

Los progresos más significativos en el desarrollo de las barreras dinámicas tuvieron lugar a principios de los años 80, cuando se introdujo la primera simulación de análisis probabilístico y se realizaron las primeras pruebas con barreras a escala real en Francia, Suiza e Italia. Actualmente, el concepto de barrera dinámica y deformable está en la base del diseño de las barreras contra caída de roca, que pueden absorber energías hasta 8.500 kJ (6.2E06 ft-lbf = 55900 libras a 55.6 millas / h), [1].

Las barreras dinámicas son sistemas pasivos, que no influyen en el movimiento dinámico de las rocas, y se instalan lejos del área de desprendimiento de las rocas, con el objetivo de interceptar el mayor número de caídos. Por esta razón y debido a sus características, las barreras dinámicas pueden ser la solución perfecta para taludes altos y empinados, empleando alta resistencia, facilidad de mantenimiento e instalación. La posición de la barrera se define de acuerdo con las evaluaciones del diseñador y del

¹Melissa MiuZZi, Maccaferri de Mexico Sa de Cv, Av. San Pedrito 119, Santa Rosa Jauregui, Parque Industrial Queretaro, 76220 Queretaro; Mexico, E-mail: m.miuZZi@maccaferri.com.

productor, como consecuencia de investigaciones, directamente en sitio y cálculos estadísticos.

El artículo explica los pasos de diseño para la propuesta de una barrera dinámica contra caída de rocas, en el caso de una mina a tajo abierto, a lado de la rampa de acceso a tajo; considerando: una geometría compleja, las solicitudes de la Mina, las condiciones meteorológicas y las características del suelo rocoso. La propuesta es el resultado de una estrecha colaboración entre el fabricante de la barrera y el diseñador. El diseño se realizó siguiendo la norma europea ETAG 027 [2] y un interesante procedimiento contenido en la norma italiana UNI 11211: 4 - 2012. [3].

Como reporta la norma europea ETAG 027 [2]: “Las barreras de rocas son conocidas en todo el mundo como "Kit"; ósea una forma especial de un "producto de construcción" que consiste en varios "componentes" que se colocan en el mercado junto con un marcado CE común y tienen un montaje directo en situ. “

Los “kit contra caídas de rocas”, mejor conocidos como barreras dinámicas se componen de (Figura 1):

- Una estructura de intercepción que tiene la función de soportar el impacto directo de la masa, deformarse elásticamente y/o plásticamente, y transmitir las tensiones a los componentes de conexión, a la estructura de soporte y a las cimentaciones;
- Una estructura de soporte, que tiene la función de mantener la estructura de intercepción sin que se doble, que por naturaleza no es rígida. Puede conectarse directamente a la estructura de intercepción o a través de una estructura de conexión.
- Componentes de conexión, que tienen la función de transmitir las tensiones a la cimentación. Con el fin de permitir la deformación, se pueden instalar dispositivos sobre la estructura, lo que permite un alargamiento controlado.

Así como lo reporta la norma europea ETAG 027 [2].

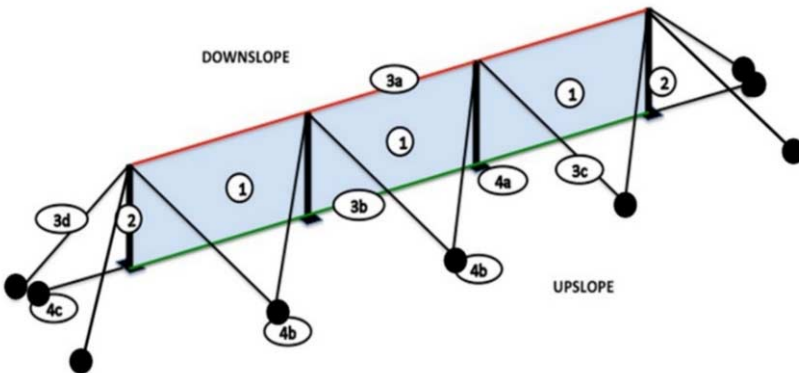


Figura 1. (1) modulo funcional; (2) poste; (3a) cable longitudinal superior; (3b) cable longitudinal inferior; (3c) tensor superior; (3d) tensor lateral; (4a) cimentación del poste; (4b) tensor superior de la cimentación; (4c) tensor lateral de la cimentación (Brunet, Giacchetti, Grimod 2013).

La cimentación no se considera parte del kit. El diseño de la cimentación está a cargo del diseñador, teniendo en cuenta las normas nacionales. Las barreras dinámicas se caracterizan por los siguientes parámetros: energía, altura nominal y residual y deformación de la estructura de intercepción. La altura nominal indicada en la Norma

Europea se mide ortogonalmente a la pendiente de referencia y es la distancia mínima entre el tensor superior/cable de soporte y la línea de conexión entre las placas de bases de los postes, antes del impacto. Por otro lado, la altura residual es la distancia mínima entre el cable inferior y el superior, medida ortogonalmente a la pendiente de referencia después del ensayo sin retirar el bloque, entonces la altura de la barrera después de un impacto, como muestra la Figura 2.

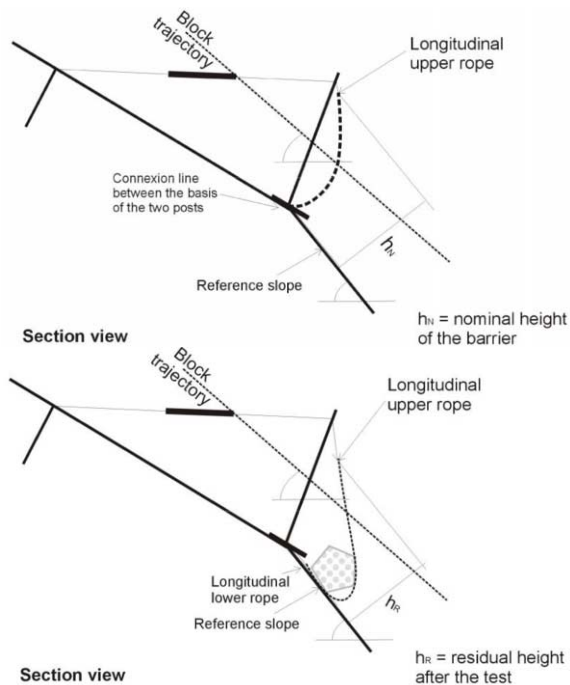


Figura 2. Esquema altura nominal y altura residual (ETAG 027).

1.1. Niveles de energía y procedimiento de ensayo

El nivel de energía se define según la ETAG 027 como sigue:

La energía cinética de un bloque regular que impacta la estructura de retención. Se expresa en SEL (Nivel de Energía de Servicio) y MEL (Nivel Máximo de Energía).

El Nivel Máximo de Energía (MEL) de un kit de protección contra caída de rocas se define como la energía cinética de un bloque regular que impacta la estructura de retención considerada, con $MEL \geq \gamma \cdot SEL$ and $\gamma = 3$ (Ec. (1)).

Al final el nivel de energía MEL es:

$$MEL \geq 3 \cdot SEL \tag{1}$$

El Nivel de Energía de Servicio (SEL) de un kit de protección contra caída de rocas se define como la energía cinética de un bloque regular que impacta la estructura de retención considerada.

El procedimiento de prueba consiste en el lanzamiento de uno o más bloques de concreto, dependiendo si la evaluación es para el nivel MEL o SEL, con la energía

requerida. En el caso del procedimiento de evaluación del MEL, la barrera debe atrapar una roca con el nivel máximo de energía (100%). El sistema puede sufrir daños relevantes y la altura residual y la elongación del módulo después del impacto indican el nivel de calidad de la barrera.

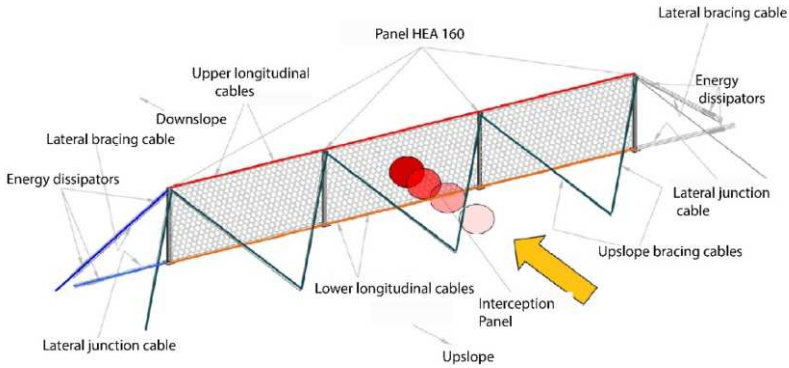


Figura 3. Configuración ensayo de Choque (Officine Maccaferri).

Este procedimiento identifica tres categorías para la barrera:

- Categoría A: $H_r > 50\% H_n$;
- Categoría B: $30\% H_n < H_r < 50\% H_n$.
- Categoría C: $H_r < 30\% H_n$

donde H_r es la altura residual y H_n la altura nominal como reporta la Figura 2.

El procedimiento para la definición del SEL consiste en el lanzamiento de dos bloques con 1/3 de la energía MEL sin provocar daños a la barrera. En este caso sólo se admiten daños menores y la altura residual después del primer impacto debe ser superior al 70%. El segundo impacto sólo necesita atrapar la roca. Las pruebas de choque se realizan siempre con una barrera con tres tramos que viene impactada en el tramo central. La Figura 3 indica la configuración del ensayo de choque.

2. Procedimiento de diseño y caso de estudio.

El caso de estudio propuesto en este artículo es una evaluación teórica para la instalación de una barrera de rocas en una mina con tajo a cielo abierto en el norte de México. La inestabilidad afectaba los bancos de excavación de la mina, que estaban sufriendo muchos problemas de caídos de rocas como consecuencia de las altas precipitaciones. En México, la estacionalidad de las lluvias es un gran problema para los taludes en general debido a la configuración geométrica de sus excavaciones. Además, en el caso de rocas expansivas, la infiltración de agua en el material se convierte en la causa principal de los caídos. El cambio en el contenido de agua puede ser visto como un aumento de la densidad del material y una disminución en la fuerza cohesiva. Especialmente en el caso tratado la calidad de la roca era sensible al efecto del agua (lutita). El agua que penetra en el material conduce la roca a través de una situación de inestabilidad. Además, el área a proteger tenía dimensiones grandes: 300 m de longitud con una altura de 100 m.

Por áreas con estas dimensiones es fácil verificar, Figura 4, como el costo de soluciones de revestimiento o enmallado, crezca proporcionalmente con las dimensiones

del talud, sin considerar los costos de mantenimiento. Mientras que las barreras dinámicas, el costo inicial de adquisición del sistema es más alto pero que se mantiene aproximadamente constante con el aumentar de las dimensiones geométricas del área a proteger.

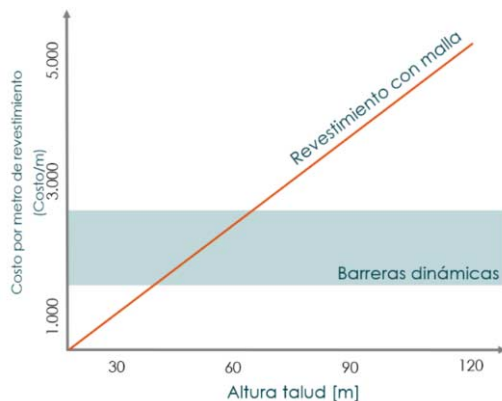


Figura 4. Comparación económica entre sistemas de Revestimientos (enmallados) y barreras dinámicas (Officine Maccaferri).

Asimismo, los ingenieros de operación de la mina a cielo abierto solicitaban tener un producto con un mantenimiento fácil y accesible y con la posibilidad de instalarlo en un lado de la vía de acceso al tajo.

En general, el diseño de las barreras dinámicas en las minas a cielo abierto implica un alto nivel de energía, por lo que se debe seguir el concepto de Nivel Máximo de Energía, como se explica en la ETAG 027. Actualmente el diseño de este tipo de solución implica estadísticas, evaluación de las trayectorias de los caídos y, a continuación, para enfrentar los altos niveles de incertidumbre relacionados con las situaciones de caídos en general, el diseñador debe considerar factores de seguridad. El software más reconocido a nivel mundial para realizar la simulación de rocas es RocFall (RocScience).

En este caso de estudio, la simulación se realizó considerando las siguientes características del talud y de la roca, dadas por el cliente:

- Tipo de roca: lutita, peso específico 20-22 kN / m³, ángulo de fricción 30-35 °;
- Tamaño del bloque más grande: diámetro máximo previsto 3 m;
- Altura del talud: alrededor de 100 m;
- Alta complejidad de la geometría del talud

Por los coeficientes de restitución tangencial y normal, todos con distribución normal, se utilizaron los datos proporcionados:

- Material “banqueta”: coeff. restitución normal 0.37, coeff. restitución tangencial 0.85 (color verde, Figura 5);
- Material “relleno”: coeff. restitución normal 0.26, coeff. restitución tangencial 0.73 (color amarillo, Figura 5);
- Material “talud”: coeff. restitución normal 0.37, coeff. restitución tangencial 0.80 (color gris, Figura 5);

La geometría de la pendiente utilizada en las simulaciones se muestra en la Figura 5, es muy compleja, con dos caminos de acceso uno en la parte superior del tajo y uno en la inferior, donde la mina solicita la instalación de la barrera dinámica. El ancho del

camino en el tajo es de unos 42 m y el espacio mínimo requerido para el tránsito de los camiones es de 30 m. Por lo tanto, también fue necesario evaluar la máxima deformación posible de la barrera, así como el nivel de energía. Las barreras dinámicas, como se menciona en la ETAG 027, se definen por tres parámetros principales: nivel máximo de energía, altura nominal y deformación. Las simulaciones realizadas con RocFall 6.0 permiten evaluar cuál es la mejor posición para ubicar la barrera, la distribución estadística de las velocidades de las rocas, la distribución estadística de la altura de las trayectorias y la energía.

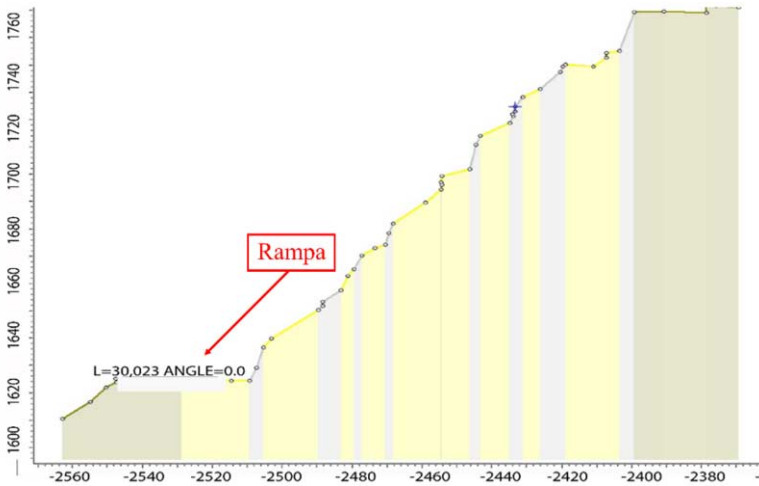


Figura 5. Geometría de la pendiente utilizada en las simulaciones.

Las sección analizada y reportada en Figura 5 se ubica en una parte inferior del tajo como se evidencia en Figura 6.



Figura 6. Ubicación del área afectada o de la rampa principal.

Para verificar una simulación de caída de rocas se recomienda validarla con una back análisis y siempre comparar los resultados numéricos con la realidad. El enfoque más interesante para diseñar las barreras de las rocas fue propuesto en 2006 por Peila D. & Oggeri C. [4], y consecuentemente implementado por la nueva norma italiana para las "medidas de protección contra las rocas" [3], según también Brunet, Giacchetti y Grimod [1]. Este enfoque sugiere un coeficiente de seguridad destinado a aumentar la energía estimada de impacto, basando la metodología de diseño en simulaciones de caídas, que normalmente se realizan con análisis probabilísticos. Utilizando el software RocFall, el primer paso del proceso de diseño es realizar una simulación sin la barrera, sólo para entender las trayectorias de los caídos y la distribución de las ubicaciones finales de los bloques, como muestra la Figura 7.

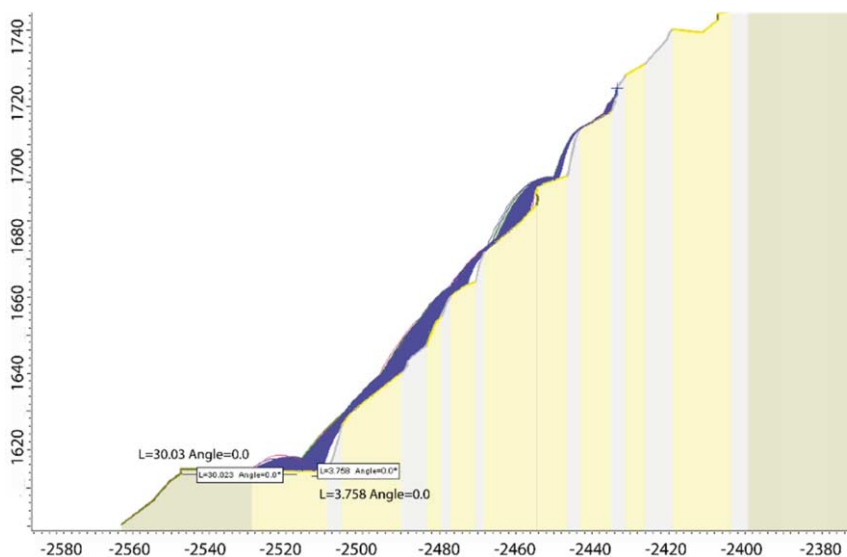


Figura 7. Detalles del sector de caídas y trayectorias de los caídos en la simulación de RocFall 6.

El número de simulaciones depende de la confianza del diseñador y de la calidad de los datos suministrados por el cliente o el dueño.

Posterior al análisis de las trayectorias de los caídos, es importante evaluar donde los bloques terminan su carrera (Figura 8). La distribución de las ubicaciones finales permite que el diseñador y el productor decidan cuál podría ser la mejor posición para colocar la barrera, con el fin de interceptar tantas rocas en caída como sea posible. Como las simulaciones de RocFall son bidimensionales, es necesario un control cruzado con la topografía del sitio para reportar el problema en 3D y rastrear la barrera en condiciones reales. Es un procedimiento esencial para definir cuántas y cuales secciones son necesarias. En este caso, la cantidad total de los bloques termina directamente sobre el camino de acceso más bajo, debido a la geometría de los bancos empinados de la mina. Para llevar a cabo las solicitudes de la Mina se decidió proponer la instalación de la barrera directamente en la vía de transporte. Como se mencionó en la parte superior de este artículo, la longitud total a proteger fue de 300 m y la longitud se dividió en 4 secciones, cada una de 80 m con un traslape de 10 m entre cada sección para tener una completa protección de la carretera.

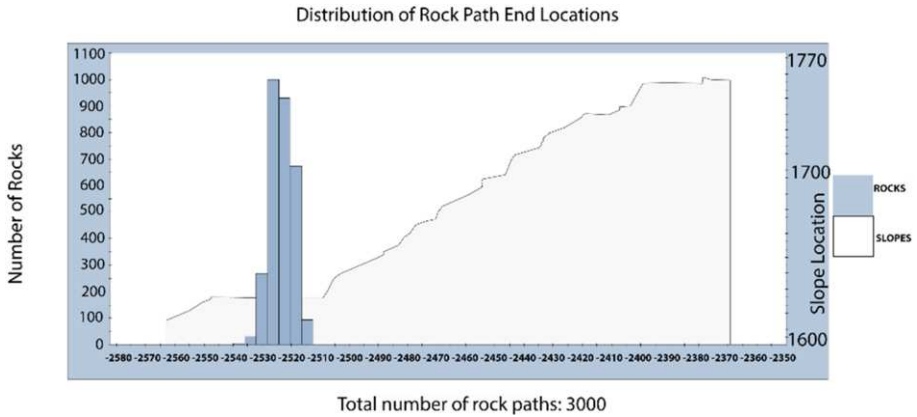


Figura 8. Distribución de los End path de los caídos.

El siguiente paso consiste en posicionar una barrera en el lugar seleccionado y definir sus características. El software ayuda a evaluar el nivel máximo de energía, la altura de los impactos y la distribución de la velocidad de las rocas, dando al diseñador la altura final y el tipo de barrera. Todos estos datos se utilizan para comprobar las propiedades de la barrera dinámica utilizando el procedimiento explicado en la UNI 11211: 4 – 2012 [3], con los factores de seguridad anteriormente mencionados.

La Figura 9 muestra el comportamiento de las trayectorias de los bloques después del posicionamiento de la barrera debido a que muestra los End Path de los caídos, que terminan todos en la rampa principal. Debido a esto colocar la barrera a un costado de la rampa permite interceptar casi todas las rocas que caen. La energía definida por el software fue de unos 3.000 kJ. Como se menciona en la UNI 11211: 4 – 2012 [3], la energía de diseño de la barrera, E_{sd} , se define como (Ec. (2)):

$$E_{sd} < E_{barrier} / \gamma_E \tag{2}$$

donde E_{sd} = nivel de energía de diseño desarrollado por el bloque contra la barrera; $E_{barrier}$ = energía absorbida por la barrera, tal como se define en el ensayo de impacto realizado según la ETAG 027 (MEL o SEL); γ_E = coeficiente de seguridad relacionado con el nivel de energía adoptado durante el diseño $\gamma_E > 1,0$ para el enfoque MEL; $\gamma_E = 1,0$ para el enfoque SEL y también relacionado con la longitud de la barrera $\gamma_E > 1,0$ si la barrera es menor que 30 m (98 pies), $\gamma_E = 1,0$ si la barrera tiene una longitud mínima de 30 m (98 pies) utilizado por esta análisis porque la barrera tiene mas que 30 m de longitud.

La posición de la barrera era una cuestión complicada: era necesario comprobar si existía suficiente espacio para instalar la barrera considerando su deformación en caso de impacto, ya que el camino de acceso no podía cerrarse, con el fin garantizar un tránsito constante de camiones. El software muestra la máxima deformación de la barrera (Figura 10). En este caso la deformación máxima para una barrera dinámica con una energía de 3.000 kJ es de 6 m, como muestra la especificación técnica del productor Maccaferri [5] El ancho total del camino 42 m, y los metros necesarios para el tránsito, 30 m. Por lo tanto, los 12 m restantes son suficientes para la instalación de barrera, considerando los cables aguas arriba, los anclajes y la deformación.

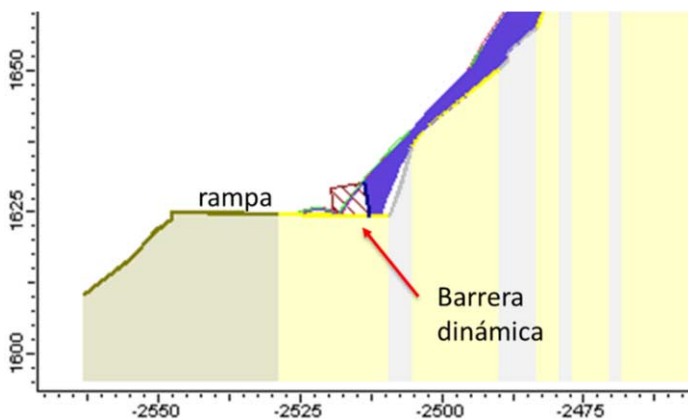


Figura 9. Detalle de retención de caídos por parte de la barrera dinámica.

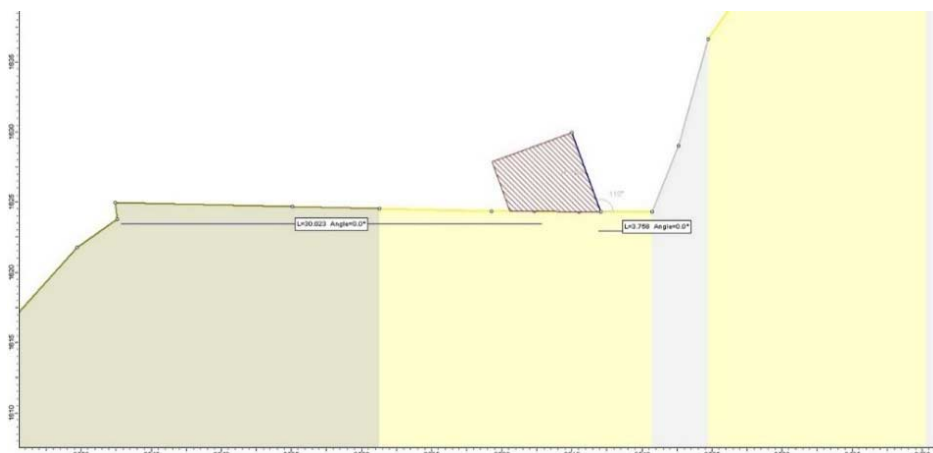


Figura 10. Máxima deformación de la barrera.

Posteriormente, la última parte del diseño implica el análisis de la altura de impacto y la distribución de la velocidad de traslación. El análisis de la distribución de la velocidad de los bloques (Figura 11) es un presupuesto básico para la definición de la energía de barrera. Como se informó en la Norma Italiana, la energía de diseño E_{sd} se define con la fórmula clásica de la energía cinética (Ec. (3)) aumentada por un coeficiente de seguridad ($\gamma_R \geq 1,0$), que considera el riesgo humano. En la Ec. (3), el efecto de giro de la roca que cae puede ser descuidado.

$$E_{sd} = \left(\frac{1}{2} M_d v_d^2\right) \gamma_R = 1804.23 \text{ kJ} \quad (3)$$

donde M_d = masa de diseño del bloque (Ec. (4)); v_d = velocidad de diseño del bloque (Ec. (5)); $\gamma_R = 1,2$ = situación con consecuencias económicas importantes pero que se pueden fácilmente reparar.

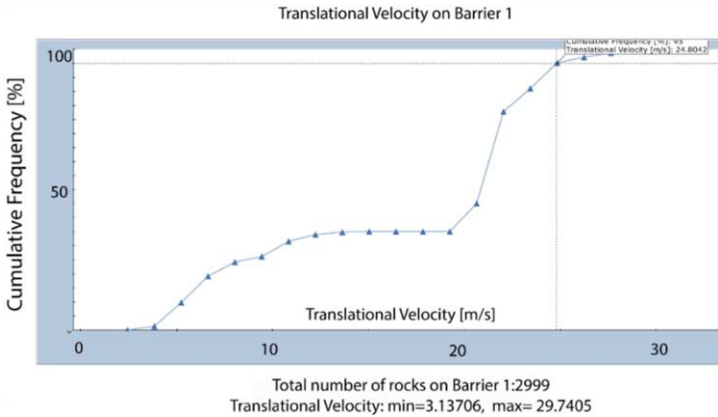


Figura 11. Distribución velocidad de los caídos.

Los coeficientes de seguridad están relacionados con la precisión de la encuesta, las características de las rocas y la simulación estática, como se explica más arriba:

$$M_d = (Vol_B \gamma) \gamma_{VOL} \gamma = 6996.00 \text{ Kg} \quad (4)$$

$$V_d = v_t \gamma_{Tr} \gamma_{Dp} = 23.27 \text{ m/s} \quad (5)$$

donde Vol_B = volumen del bloque de diseño; γ = peso unitario de la roca; γ_{VOL} = coeficiente de seguridad relacionado con la precisión de la encuesta de bloques de diseño ($\gamma_{VOL} = 1,06$); γ_{γ} = coeficiente de seguridad relacionado con la evaluación del peso unitario de la roca ($\gamma_{\gamma} = 1,00$); v_t = velocidad calculada con la simulación de la roca y considerando el percentil 95° de las velocidades; γ_{Tr} = coeficiente de seguridad relacionado con la fiabilidad de la simulación de rocas (en el caso de estudio $\gamma_{Tr} = 1,10$); γ_{Dp} = coeficiente de seguridad relacionado con la calidad del levantamiento topográfico (en el caso de estudio $\gamma_{Dp} = 1,03$).

El último parámetro por evaluar y comprobar es la altura final de la barrera definida con la siguiente ecuación (6) de la UNI 11211: 4 - 2012:

$$H_{tot} = H_d + f_{min} = 5.09 \text{ m} \quad (6)$$

donde f_{min} = zona libre, min 50 cm; H_{tot} = altura nominal de la barrera ensayada según la ETAG 027; H_d = altura de diseño de las trayectorias definidas con la siguiente Ec. (7):

$$H_d \geq H_{95} \gamma_{Tr} \gamma_{Dp} + R_{block} \gamma_R = 4.59 \text{ m} \quad (7)$$

donde H_{95} = altura de las trayectorias definidas con las simulaciones numéricas y teniendo en cuenta el percentil 95° de las alturas (Figura 12); R_{block} = radio medio del bloque de diseño; γ_R = coeficiente de seguridad en el radio del bloque ($\gamma_R = 1.0$); f_{min} = zona de seguridad que no puede ser impactada (generalmente $f_{min} \geq 50$ cm (2 pulgadas)).

Para el caso seleccionado la altura de la barrera de 3,000 kJ es de 6 m, considerando la distribución de la altura de impacto (Figura 12) y la zona libre.

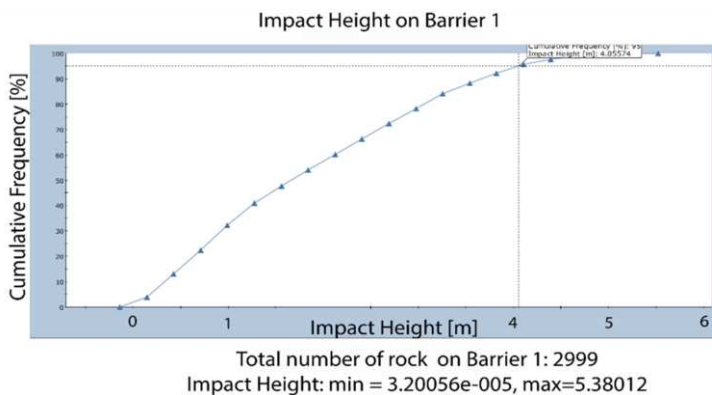


Figura 12. Distribución alturas de impacto.

3. Conclusiones

Las barreras se reconocen hoy en día como una de las medidas más eficaces de protección contra la caída de rocas. Debido a su complejidad, el diseño necesita una conexión constante entre las partes implicadas para definir la posición y las características de la barrera, relacionadas con las solicitudes del cliente y las características del sitio. La norma Europea ETAG 027 [2], y la norma italiana UNI 11211: 4 - 2012 [3], propusieron un esquema interesante para el diseño. El diseño de la barrera se basa en la simulación estadística y debe ser verificado con un proceso de back análisis, añadiendo coeficientes de seguridad para evitar fallas y accidentes.

El estrés provocado por la tipología de excavaciones que la minería conlleva es causa de inestabilidades en taludes y tanto como la geometría, las propiedades de los macizos rocosos y añadir condiciones meteorológicas complejas son factores que influyen en gran medida en cuanto a la elección del tipo de barrera dinámica y la posición de la instalación. Es opinión de los autores, tomando en cuenta todos los parámetros ya mencionados, las solicitudes del cliente y el procedimiento de diseño, que la medida de protección más eficaz es una barrera de rocas RMC 300A con una energía de impacto de 3,000 kJ, 6m de altura y máxima deformación de 6.05m. La barrera se deberá instalar en el lado interno de la carretera de transporte hasta el centro del tajo. La barrera con sus 320 m de longitud, dividida en cuatro secciones de 80 m, puede interceptar la totalidad de las rocas que caen, protegiendo el tránsito de camiones y los trabajadores de la mina durante las operaciones de excavación.

Referencias

- [1] Brunet, Giacchetti, Grimod, 2013, "Rockfall Barrier Behavior Under Multiple Impact events". 64th Highway Geology Symposium.
- [2] ETAG 027 GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL of FALLING ROCK PROTECTION KITS Edition September 2012, Amended April 2013.
- [3] OPERE DI DIFESA DELLA CADUTA MASSI – UNI 11211-4:2012
- [4] Peila D., Oggeri C. & Baratono P. (2006) "Barriere paramassi a rete. Interventi e dimensionamento". GEAM, Quaderni di studio e di documentazione, n. 26
- [5] Especificación técnica Barrera Dinámica RMC 300 A, Maccaferri de Mexcio Sa de Cv