



Atenuadores: Sistemas autolimpiables combinados. Protección contra desprendimientos y guiado

Roberto Luis¹, Rolando Romero² y Helene Hofmann³

Resumen: Los atenuadores son una solución de protección contra desprendimientos de rocas que combina una barrera flexible contra caída de rocas con una membrana de guiado de bloques o drapes. Hasta la fecha no existen soluciones formales para su dimensionamiento. En comparación con las barreras flexibles clásicas de protección contra caída de rocas, donde solo se considera la energía cinética traslacional y el bloque se detiene por completo; los atenuadores presentan un desafío de diseño en el que deben considerarse tanto la componente rotacional como traslacional de la velocidad del bloque que cae. Además, los sistemas atenuadores no están concebidos para detener el bloque, su función es modificar la trayectoria y moderar la velocidad. Para desarrollar un concepto de dimensionamiento que aborde estas dinámicas, es importante comprender completamente el proceso de atenuación. Un programa conjunto entre Willis & Norrish Rock Engineers, Ltd. (Canadá) y Geobrugg ha investigado de forma detallada este proceso. La carga en el sistema, los procesos de atenuación y la importancia del componente rotacional, se analizaron en una serie de ensayos a escala natural durante un período de tres años, en la cantera de Hope BC en la Columbia Británica (Canadá). Esta contribución, proporciona información sobre el análisis de los mecanismos de carga que actúan sobre el sistema atenuador, durante el impacto del bloque. La dinámica del movimiento del bloque se compara entre los resultados extraídos de los sensores (acelerómetro y giroscopio) integrados en los bloques de ensayo, el análisis de video de alta velocidad y las simulaciones de la caída mediante software especializado.

Palabras clave: Atenuadores, protección contra desprendimientos de rocas, barreras flexibles, cortinas de guiado, mallas de alto límite elástico

Abstract: Attenuators are a rockfall protection solution that combines a flexible rockfall barrier with a block drape. To date, there are no formal solutions for its dimensioning. Compared to classic flexible rockfall protection barriers, where only translational kinetic energy is considered, and the block comes to a complete stop; Attenuators present a design challenge in which both the rotational and translational component of the speed of the falling block must be considered. In addition, attenuating systems aren't designed to stop the block, their function is to modify the trajectory and moderate the speed. To develop a calculation concept that addresses these dynamics, it is important to fully understand the dimming process. A joint program between Willis & Norrish Rock Engineers, Ltd. (Canada) and Geobrugg has investigated this process in detail. System loading, attenuation processes and the importance of the rotational component were analyzed in a series of full-scale tests over a three-year period at the Hope BC quarry in British Columbia (Canada). This contribution provides information on the analysis of the load mechanisms that act on the attenuator system during the impact of the block. The dynamics of the movement of the block is compared between the results extracted from the sensors (accelerometer and gyroscope) integrated in the test blocks, the high-speed video analysis and the simulations of the fall using specialized software.

Keywords: Attenuators, rockfall protection, flexible barriers, drapes, high tensile strength meshes

Desarrollo

Los sistemas de protección compuestos por barreras están diseñados para interceptar y detener el bloque que viaja ladera abajo, absorbiendo la energía total, mientras que las cortinas de guiado se colocan en laderas o taludes para controlar-guiar los desprendimientos que se originan en la superficie y dirigirlos a un área de captación en el pie [1, 3, 4, 8]. Por lo tanto, los sistemas atenuadores ofrecen la función de intercepción de las barreras de caída de rocas, mientras que, al igual que las cortinas, guían las rocas a una cuneta de captación en la base del talud (fig. 1).

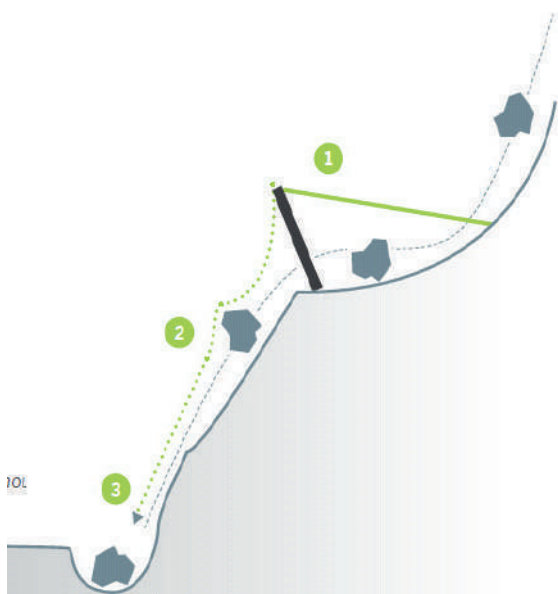


Fig. 1 Geometría simplificada del atenuador. Esquema que muestra la evolución de un bloque que llega a un atenuador en tres pasos (impacto, guiado y recolección).

Al interceptar el bloque, este puede llegar a la barrera de forma directa por una caída libre, tras impactar y rebotar sobre la superficie del terreno, a continuación, la membrana de guiado redirige la trayectoria, reduciendo su altura de rebote y su la velocidad [5, 6]. La deformación de la membrana (red) en el momento del impacto y el contacto (bloque-terreno-membrana) durante el transporte bajo la cortina, disipan una gran cantidad de energía [4]. El atenuador podría, disipar la energía cinética, y llevarla a los valores de diseño de la otra estructura de protección [5] pudiendo así esta última ser recuperada. Los atenuadores se han aplicado principalmente desde la década de 1990 en Norteamérica. En esta

fecha, se hicieron algunos ensayos, pero no se llegó a conclusiones sobre las pautas apropiadas para el dimensionamiento [2]. Para comprender la capacidad del atenuador para reducir la altura de rebote, la energía cinética y su eficiencia, se necesitaban más ensayos 1:1. La cantera Nicolum en Hope, Columbia Británica, fue elegida para realizar ensayos de campo en febrero de 2013, utilizando como antecedentes ensayos realizados con anterioridad por el propietario de la cantera, el Ministerio de Transporte e Infraestructura de Columbia Británica (Motil) en la década de 1990 [10]. La serie inicial de ensayos a escala natural del atenuador “prueba de concepto”, fue realizada durante 2014 y 2015 por Wyllie y Geobruigg. Este grupo de ensayos confirmó la idoneidad del lugar y de los sistemas de instrumentación utilizados en ese momento [10]. Luego se realizaron dos grandes series de ensayos en enero de 2016 y septiembre de 2017 [4]. La ladera tiene una altura de 60 m y es casi vertical con tres bancos inclinados donde se aloja una delgada capa de suelo que cubre el lecho rocoso. Debajo del primer banco, se ha acumulado algunos restos de roca. El suelo en la parte inferior de la ladera también está cubierto con una capa de tierra. Las rocas se liberan en la parte superior de la ladera con una excavadora, a una altura sobre el suelo de aproximadamente 5 m. Después de la serie de ensayos de 2016, todo el sistema se extendió a un ancho mayor para incrementar las proximidades de impacto durante los ensayos. El proceso de modelización contribuyó a tomar esta decisión, cuya efectividad se corroboró en de 2017. Aquí se presentan algunos resultados seleccionados de la última serie. Se utilizaron bloques graníticos naturales de aproximadamente 0,45m de diámetro y bloques cúbicos de hormigón armado de 0,55; 0,75 y 1,0m de diámetro, todos ellos con un orificio que permitía colocar la instrumentación, dentro de una carcasa de protección. Para la ubicación de la barrera se realizaron un total de 1000 simulaciones de desprendimientos, examinando la tasa de impactos de los bloques sobre el atenuador.

Los resultados de la simulación muestran que el 53,5% de las trayectorias impactaron sobre el atenuador. Muy cerca de los resultados alcanzados durante la serie de 2016 que fueron del 57%. Además, la distribución espacial de las trayectorias es muy similar tanto en las simulaciones como en los ensayos de campo registrados. Se observa que el 8,9% se perdió hacia el Oeste mientras el 19,2%

al Este del atenuador. De las $n=1000$ simulaciones de trayectoria modeladas con RAMMS::ROCK-FALL, las mismas mostraron congruencia con algunos de los eventos de desprendimiento medidos durante los ensayos de campo que se seleccionaron para el análisis. La figura 2 proporciona una visión general de la distribución espacial de las trayectorias simuladas [9].

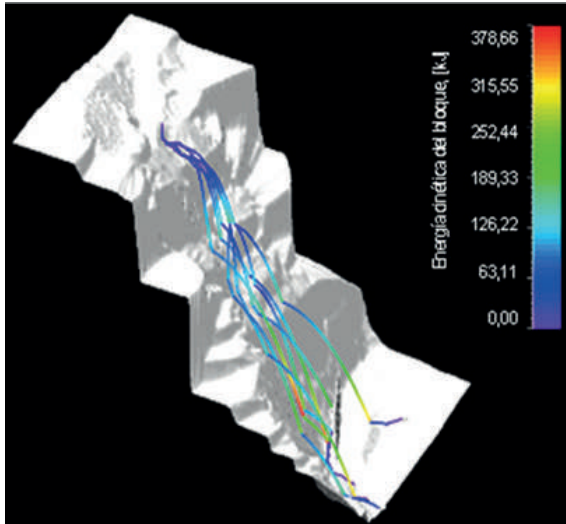


Fig. 2 Trayectorias modeladas que semejan el comportamiento observado durante los ensayos

La velocidad de traslación del bloque, así como la velocidad angular se miden a partir de los videos, con la ayuda de un software de código abierto y relativamente fácil de manejar a nivel principiante. Originalmente es un software de análisis de movimiento con fines deportivos, pero puede usarse para experimentos de caída de bloques. Una vez que se calibró una cierta distancia (el poste de 8m de longitud), la roca se puede rastrear de forma automática y manual, dependiendo de las condiciones de iluminación, desde la primera aparición en el fotograma hasta hace contacto con el suelo, guiado por la membrana o red (fig. 3). La velocidad se calcula a partir de los puntos x e y obtenidos del seguimiento y se corrige la profundidad. Los datos del sensor de movimiento del bloque se descargan del sensor utilizando el software patentado y se procesan para eliminar el ruido de la señal.

La evolución de la velocidad durante el proceso se representa en la figura 4. La velocidad en el impacto es de 27m/s y disminuye hasta 6m/s justo antes de hacer contacto con el suelo. Esto ilustra el proceso de atenuación, se observa cómo el bloque no se detiene por completo, sino que solo atenúa

su dinámica a medida que el bloque pasa a través del sistema.

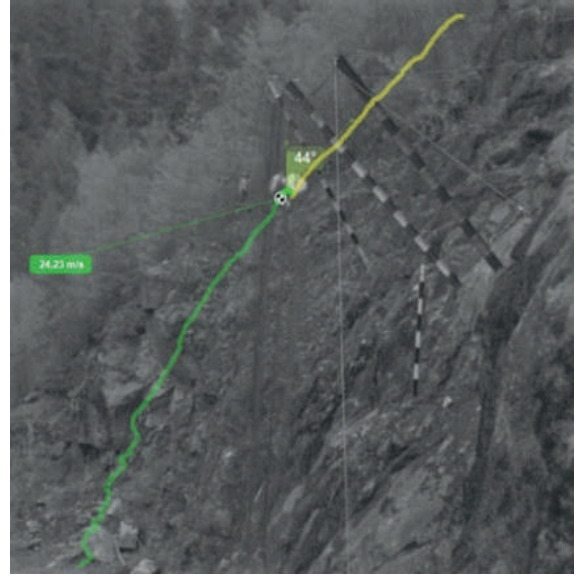


Fig. 3 Seguimiento de un bloque a lo largo de su caída con el software Kinovea

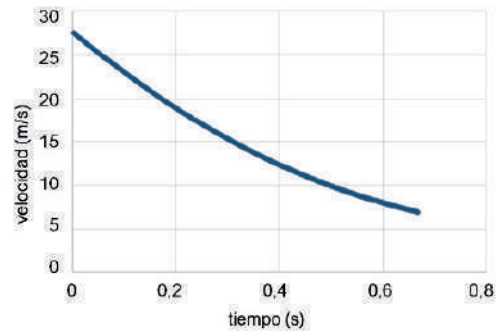


Fig. 4 Velocidad en m/s para el bloque desde el impacto con malla hasta poco antes de tocar suelo

Es posible comparar la trayectoria libre teórica del bloque con su trayectoria real (con el atenuador instalado), ilustrando el proceso de atenuación en la perspectiva de la distancia recorrida [7]. La figura 5 muestra cómo varía la altura de la trayectoria teórica del bloque sin estructura de contención, en comparación con la altura amortiguada debido a la presencia del atenuador. El análisis de video también se aplicó para medir la velocidad angular del bloque en rad/s.

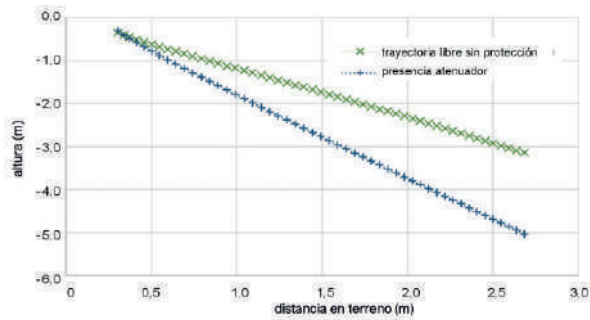


Fig. 5 Comparación entre el comportamiento teórico de trayectoria libre del bloque sin protección versus la trayectoria real con el impacto de la estructura de protección desde el momento del impacto en adelante.

La figura 6 ilustra la evolución en uno de los ensayos desde el impacto con membrana en adelante. La velocidad angular extraída del análisis de video podría compararse con las mediciones realizadas con el giroscopio del sensor de movimiento (fig. 7).

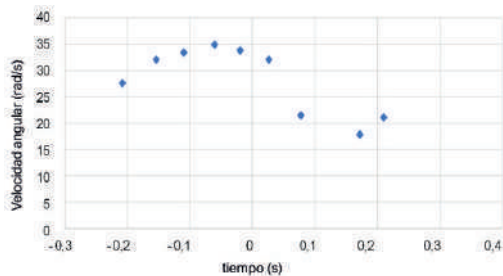


Fig. 6 Velocidad angular (rad/ s) del bloque $T = 0s$.

El primer pico corresponde al impacto inicial del bloque con la malla y el segundo pico se corresponde con el par máximo generado cuando la fricción entre la malla del atenuador y el bloque, provoca una inversión de la dirección de rotación del bloque, mientras rueda a lo largo de la malla.

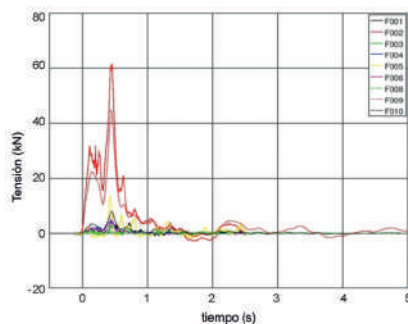


Fig. 7 Picos registrados por las células de carga (cable perimetral superior), $t = 0$ momento del impacto.

Tanto el impulso traslacional como el impulso rotacional del bloque que interactúa con el sistema atenuador, constituyen los principales casos de carga para los cuales hay que diseñar y son la base del concepto de diseño propuesto, conservación del momento [5,11]. Estos dos casos de carga parecen corresponder a las condiciones de contorno.

1. El impulso traslacional máximo presenta un riesgo de perforación de la malla, y
2. Un alto componente del impulso rotacional puede cortar la malla mientras guía el bloque.

Además, las lecturas de las células de carga han confirmado estos casos de carga, lo cual permite sentar las bases del principio de dimensionamiento.

Conclusiones

Los atenuadores constituyen por sí mismos una estructura flexible de protección contra desprendimientos, por ende, requieren un procedimiento de diseño racional. Las simulaciones arrojan resultados similares a los valores medidos en los ensayos a escala natural, que a la par, permiten obtener más información sobre el rango completo de la dinámica del movimiento de los bloques en el campo. La dinámica del desprendimiento se sitúa en un rango realista. La combinación de la simulación y el ensayo a escala natural (1:1) permite comprender mejor la dinámica del movimiento y el proceso de atenuación general. La prueba de concepto y las ventajas de los atenuadores se conocen desde hace mucho tiempo, sin embargo, con estos últimos resultados se ha desarrollado un nuevo enfoque de dimensionamiento y con él, sistemas estandarizados. Es evidente, a partir de los resultados obtenidos en este estudio, la necesidad de membranas de alta resistencia para hacer frente a los esfuerzos a cortante, inducidos por la rotación.

Referencias bibliográficas

- [1] Andrew, R.D., Bartingale R., and Hume H. Context Sensitive Rock Slope Design Solutions, Publication FHWA-CFL/TD-11-002. Federal Highway Administration, Central Federal Lands Highway Division, Lakewood, CO, 2011.
- [2] Arndt, B., Ortiz, T., Turner, K. Colorado's Full-Scale Field Testing of Rockfall

- Attenuator Systems, Transportation Research Circular E-C141, Transportation Research Board, October 2009.
- [3] Badger T.C. and Duffy J.D. Drapery Systems in Rockfall: Characterization and Control. Transportation Research Board, National Academy Press, Washington, D.C., 2012. pp 554-576.
- [4] Badger T.C., Duffy J.D., Sassudelli F., Ingraham P.C., Perreault, Muhunthan B., Radhakrishnan H., Bursi O.S., Molinari M., and Castelli E. Hybrid Barrier Systems for Rockfall Protection, in A. Volkwein et al. (eds) Proceedings from the Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection, Morschach, Switzerland, 2008. pp. 10-12.
- [5] Glover, J., Denk, M., Bourrier, F., Volkwein, A., Gerber, W. Measuring the kinetic energy dissipation effects of rockfall attenuating systems with video analysis. Conference Proceedings, Interpraevent, 2012.
- [6] Glover, J.; Volkwein, A.; Dufour, F.; Denk, M.; Roth, A. Rockfall attenuator and hybrid drape systems - design and testing considerations. In: Third Euro-Mediterranean Symposium on Advances in Geomaterials and Structures. Third Edition, Djerba, 2010. pp. 379-384.
- [7] Hofmann, H. (2017) Rockfall trajectories and dynamics analysis from 1:1 real rockfall tests. MSc Thesis, University of Portsmouth
- [8] Luis, R., Raïmat, C. Prieto, J. y Hofmann, H. (2020) Avances tecnológicos en la protección vs. desprendimientos. fundamentos para dimensionamiento de sistemas atenuadores. Ingeopres.
- [9] SLF, RAMMS:: ROCKFALL, retrieved July 2017
- [10] Wyllie et al. Attenuators for controlling rockfall: first results of a state-of-the-art full-scale testing program. Geovancouver 2016.
- [11] Wyllie, D., Shevlin, T., Glover, J., Wendeler, C. Development of design method for rockfall attenuators. Proceedings of the 68th Highway Geology Symposium, 2017.