

Tecnología de Protección Contra Desprendimientos Rocosos. Fundamentos del Diseños de Sistemas Atenuadores.

Rockfall Protection Technology. Fundamentals of Designing Attenuation Systems.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Roberto Luis ¹, Helen Hofman ², Sergio Mark ³, *

¹Geobrugg Iberica, Madrid, España.

²Geobrugg Ag, Romanshorn, Suiza.

³Geobrugg Andina, Santiago, Chile.

Historial del
artículo:

Resumen

Recibido

14-11-2023

Aceptado

16-04-2024

Publicado

25-08-2024

Palabras Clave:

Proyección contra
desprendimientos
de rocas

Sistemas

atenuadores

Análisis de

impacto

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. 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 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. (Canadá), Geobrugg North America, y Geobrugg (Suiza) 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 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 integrados en los bloques de ensayo, el análisis de video de alta velocidad y las simulaciones de la caída mediante software especializado.

Received

14-11-2023

Accepted

16-04-2024

Available

25-08-2024

Abstract

Keywords:

Rockfall Protection

Attenuator

Systems

Impact Analysis

Attenuators are a rockfall protection solution that combines a flexible rockfall barrier with a block-guiding membrane. To date, there are no formal solutions for their sizing. Compared to classical flexible rockfall protection barriers, which consider only translational kinetic energy and completely stop the block, attenuators present a design challenge where both the rotational and translational components of the falling block's velocity must be considered. Furthermore, attenuator systems are not intended to stop the block entirely; their function is to modify its trajectory and moderate its speed. To develop a sizing concept that addresses these dynamics, it is crucial to fully understand the attenuation process.

A joint program between Willis & Norrish Rock Engineers (Canada), Geobrugg North America, and Geobrugg (Switzerland) has investigated this process in detail. The load on the system, the attenuation processes, and the importance of the rotational component were analyzed in a series of full-scale tests over a period of three years at the Hope BC quarry in Canada. This contribution provides information on the analysis of the loading mechanisms acting on the attenuator system during block impact. The block's movement dynamics are compared between results extracted from sensors integrated into the test blocks, high-speed video analysis, and fall simulations using specialized software.

* Corresponding author at: Sergio Mark, Geobrugg Andina, Coronel Pereira 72 Of 401 Las Condes, Chile. E-mail address: sergio.mark@grobrugg.com.

RIOC

journal homepage: <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/index>

Vol. 12, no. 02, pp. 1–9, Agosto 2024

1. Introducción.

Los atenuadores interceptan la trayectoria de los bloques, reduciendo su altura de rebote y minorando su velocidad, por lo tanto, atenuando la energía cinética total. Entonces es posible un proceso de guiado controlado de la(s) roca(s) hacia un área de recolección designada, evitando mantenimientos, como los que se precisan en las barreras flexibles estándares. Este sistema de mitigación, de bajo mantenimiento está aumentando en popularidad en todo el mundo, pero no existen pautas de dimensionamiento. Hasta la fecha, se desconocen los mecanismos de carga y la importancia de la velocidad angular, así como el comportamiento direccional de las rocas tras el impacto. En un programa conjunto de investigación entre Wyllie & Norrish Rock Engineers, Ltd. (Canadá), Geobrugg North America, LLC, y Geobrugg AG (Suiza), se ha logrado un avance considerable en la comprensión del proceso de atenuación y los mecanismos de carga de los sistemas atenuadores. Cabe destacar que se analiza la importancia del componente rotacional del bloque durante el impacto. Los ensayos a escala natural en sistemas atenuadores se realizaron durante 2015, 2016 y 2017 en la Columbia Británica (Canadá). Esta contribución proporciona los resultados de la comparación de los componentes de aceleración y rotación entre los sensores de movimiento colocados en los bloques, el análisis de video y la simulación RAMMS:ROCKFALL y establece la base para un concepto de dimensionamiento racional.

1.1. Retrospectiva de los ensayos a escala natural.

Los ensayos a escala natural 1:1 han sido fundamentales para comprender la mecánica del desprendimiento de los bloques, tanto para el desarrollo de sistemas de protección contra caída de rocas, como para modelos de trayectoria e impacto. La necesidad de ensayar y comprender el fenómeno tiene una larga historia, algunos de los primeros esfuerzos para controlar la caída de rocas se remontan al inicio de la construcción del ferrocarril alrededor de 1834. Desde entonces se han llevado a cabo muchos programas de ensayos de caída de rocas. En la década de 1960, en EE. UU., Japón y Suiza comienzan experimentos exhaustivos que incluyen dichos ensayos de campo (1; 2). Más recientemente, en 2015, 2016 y 2017, se realizaron ensayos en Hope BC, Canadá, con el objetivo de probar las capacidades de un sistema atenuador (3).

1.2. Sistemas flexibles de protección que sirve de base a los atenuadores.

Los atenuadores combinan dos sistemas de control de caídas de rocas ampliamente conocidos: las barreras flexibles de protección contra desprendimientos y las cortinas de guiado o drapes. 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 (4; 5; 6; 7). Por lo tanto, los sistemas atenuadores ofrecen la función de interceptación 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 (figura 1).

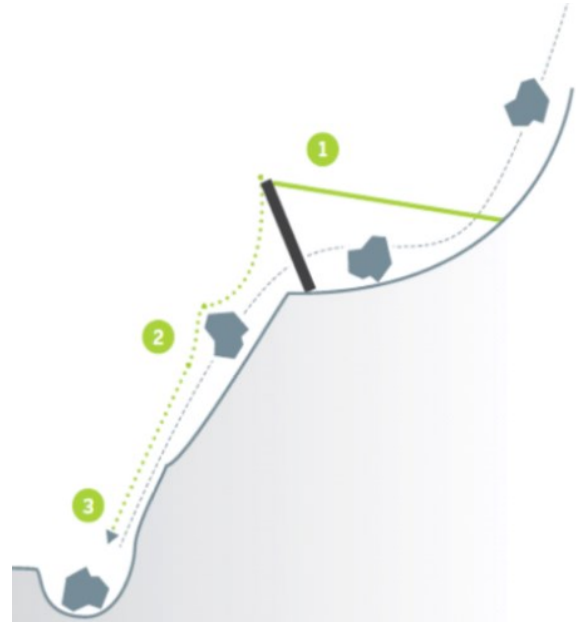


Figura 1. Geometría simplificada del atenuador. Esquema que muestra la evolución de un bloque que llega a un atenuador en tres pasos (impacto, guiado y recolección).

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 (8; 9). La deformación de la membrana (rojo) en el momento del impacto y el contacto (bloque-terreno-membrana) durante el transporte bajo la cortina, disipan una gran cantidad de energía (10). Los sistemas atenuadores son altamente aplicables a situaciones con una alta frecuencia de desprendimientos donde sería muy costoso limpiar de forma continua una barrera estándar, que retiene rocas en su estructura. Finalmente, los sistemas atenuadores ofrecen el potencial de mejorar las estructuras de protección existentes, como una galería de caída de rocas, por ejemplo, que no cumple con la altura o el nivel de energía requeridos para enfrentar el peligro real de desprendimiento. El atenuador podría, disipar la energía cinética, y llevarla a los valores de diseño de la otra estructura de protección (8) pudiendo así esta última ser recuperada. Para comprender la capacidad del atenuador para reducir la altura de rebote, la energía cinética y su eficiencia, se necesitaban más ensayos 1:1.

2. Metodología.

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 (12).

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 (12). Luego se realizaron dos grandes series de ensayos en enero de 2016 y septiembre de 2017. 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.

Tras los ensayos de 2015, se realizaron algunas voladuras de recorte (perfilado) para mejorar la probabilidad de aciertos de los impactos en el sistema atenuador (12). 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 durante las series 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. Las esquinas de los bloques de hormigón fueron pintadas de negro y sus caras de blanco, para mejorar la visibilidad en los videos.

Se instalaron células de carga en todos los cables de soporte con dos sistemas de adquisición de datos (DAS) (QuantumX MX840-B con ocho canales y HBM Spider) a cada lado del atenuador para atender un total de 10 células de carga (figura 2). El ensayo se grabó con dos cámaras de alta velocidad (HS), amablemente proporcionadas por el Instituto Federal Suizo de Bosques, Nieve y Paisaje (WSL) y varias otras cámaras para cubrir la mayoría de los ángulos de visión (frontal, lateral, superior) ver figura 2.

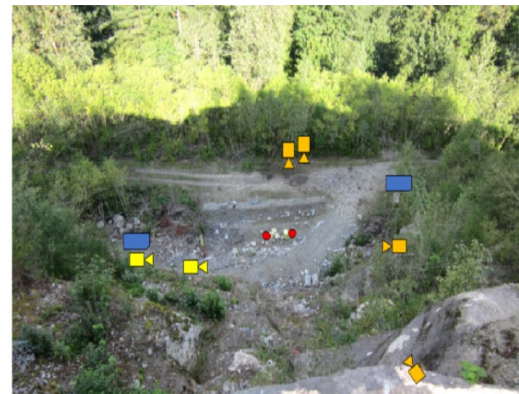


Figura 2. Vista en planta con la configuración completa de la instrumentación.

El análisis de velocidad y las observaciones de la interacción bloque-membrana-terreno se realizan utilizando los datos de la cámara de alta velocidad (500 fps). La cámara frontal se utiliza para documentar la ubicación del impacto y la profundidad de campo del bloque, lo que permite calcular un factor de corrección para el análisis de video de la vista lateral. Para los bloques, se utilizaron cuatro sensores de movimiento, uno de Diversified Technical Systems (DTS), una unidad modular Micro Slide (acelerómetro y giroscopio) que mide aceleraciones triaxiales y rotaciones a 20kHz. El sensor se coloca en una carcasa personalizada y se inserta en el centro de gravedad del bloque de ensayo (3). Los otros tres sensores fueron amablemente aportados por el SLF/WSL y estaban grabando a 2kHz.

3. Análisis de resultados.

3.1. Modelo y simulación.

Con el fin de obtener información sobre el comportamiento del bloque en su caída ladera abajo en el campo de ensayos, se hace la simulación del desprendimiento utilizando RAMMS::ROCKFALL (13). Es importante destacar que permite simular el comportamiento rotacional y las fuerzas de impacto durante el contacto del bloque con la red (14). La calibración del modelo de simulación de desprendimientos para el campo de ensayos se ejecutó en una investigación realizada por separado(15). El código del cuerpo rígido considera la forma natural de los bloques rocosos y tiene una extensa biblioteca de tipos de roca para elegir (figura 3). Las simulaciones ayudaron a diseñar la instalación de ensayos, ayudando a optimizar la ubicación del sistema atenuador en la ladera y proporcionaron datos valiosos de las distribuciones de velocidad de impacto esperadas, junto con las velocidades angulares que se rigen por las diferentes formas de bloque. El modelo se aplicó tanto para comparar con los datos medidos, como para optimizar la ubicación de atenuador dentro del campo de ensayos, para las series más recientes en 2017.

3.1.1. Parámetros de entrada.

Forma de roca: se eligió una forma de roca equivalente para representar mejor la forma de cubo de los bloques de ensayo. Se seleccionó una densidad de 2.300kg/m^3 , ya que era representativa de la litología in situ similar a la densidad de los dados de hormigón prefabricado reforzado utilizados para los ensayos. Para los bloques de hormigón, un volumen $0,407\text{m}^3$ y dimensiones $x/y/z = 1,02\text{m}/0,98\text{m}/0,84\text{m}$ lo que equivale a 937kg como valor representativo (figura 3).

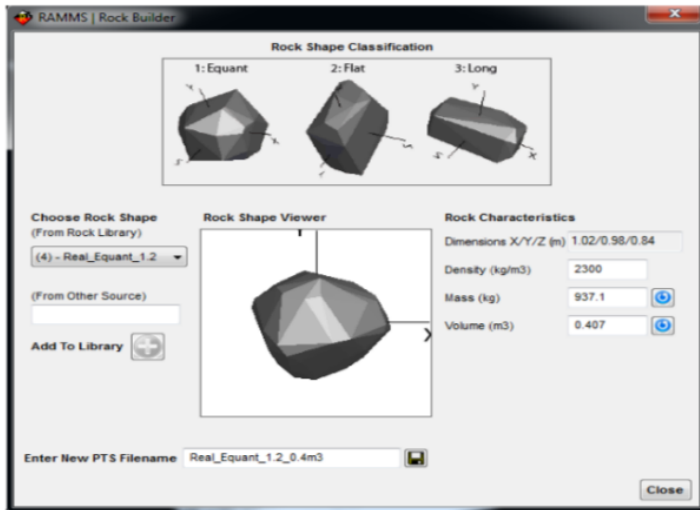


Figura 3. Clasificación de forma de bloque en RAMMS::ROCKFALL.

Se eligió como forma el dado o cubo (1:Equant) debido a que la mayoría de los bloques de hormigón y rocas naturales utilizadas en el ensayo semejan esta forma. La masa y la densidad se establecen en este ejemplo para ajustarse al bloque de ensayo de hormigón del ensayo T030, que se utiliza a lo largo de esta contribución, como elemento de comparación.

La **topografía** se obtuvo con métodos fotogramétricos aplicando algoritmos de estructura de movimiento (SfM) para obtener el modelo digital del terreno (MDT) de la cantera. Los tipos de suelo se definen en tres categorías de acuerdo con la pendiente de la ladera (aproximadamente 0 a 15° , 15° a 40° y 40° a 90°) y se caracterizan por ser roca blanda, dura y extradura de acuerdo con el manual del usuario (figura 4).

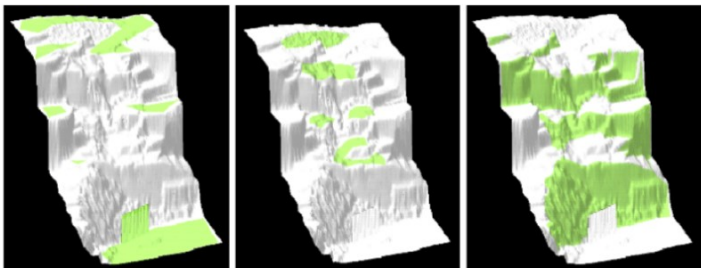


Figura 4. MDT y polígonos elegidos según la inclinación de la ladera para definir el

tipo de suelo.

Es de interés para el análisis muestrear la dinámica del fenómeno en la **ubicación propuesta de la barrera**. Con el fin de muestrear la dinámica del fenómeno en esta ubicación, se creó una pared-muro artificial en el MDT con el software GIS, que simula como se soportan los impactos a lo largo de una línea de perfil. Con la línea de muestreo, las trayectorias podrían analizarse para determinar la proporción de entrada en la región del atenuador y aquellas que potencialmente perdieron la estructura, junto con su dinámica (velocidad traslacional, velocidad angular, fuerza de impacto) en el punto de contacto.

3.1.2. Resultados del modelo.

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. Cabe destacar que los fallos en la zona Este coinciden en mejor medida con las simulaciones. Por otro lado, el 20,6% se detuvo en la ladera o pasó por encima del atenuador, que es casi el doble del porcentaje registrado en los ensayos de campo. De las $n=1000$ simulaciones de trayectoria modeladas con RAMMS::ROCKFALL, 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 5 proporciona una visión general de la distribución espacial de las trayectorias simuladas.

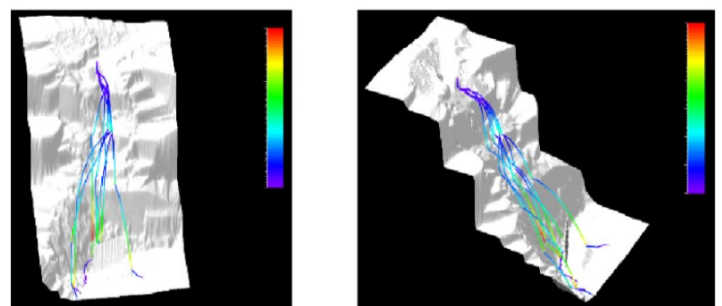


Figura 5. Las trayectorias individuales modeladas, semejan el comportamiento excéntrico obtenido durante los ensayos, lo que confirma la precisión del modelo.

El programa RAMMS::ROCKFALL almacena todas las trayectorias simuladas de una ejecución, luego las trayectorias individuales elegidas se pueden combinar en un MDT. En general, la distribución de la trayectoria en la ladera coincide con la observación de campo (figura 6).

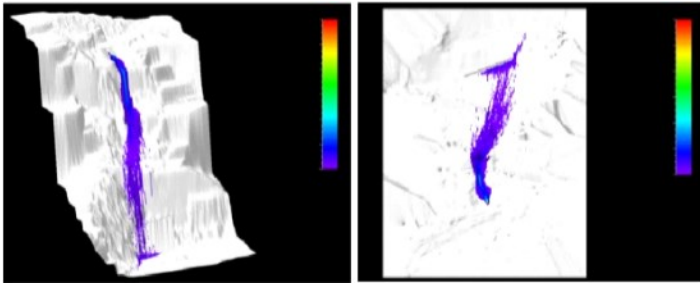


Figura 6. Área afectada por el paso de bloques, modelada con RAMMS :: ROCKFALL para 1000 bloques.

En RAMMS::ROCKFALL, la velocidad y la energía cinética total siempre se dan para toda la trayectoria cuando se observan 1000 trayectorias a la vez. Cuando esté interesado en la energía cinética traslacional y rotacional o los componentes x, y, z de la velocidad angular, se pueden estudiar hasta cien trayectorias a la vez. Muchas trayectorias se detienen justo por debajo de la barrera improvisada, por lo tanto, las estadísticas resumidas obtenidas se basan en un número pequeño de impactos, lo cual explica una cierta cantidad de error.

Las velocidades de traslación en RAMMS::ROCKFALL varían entre 0 y 30m/s. Este rango es visible en la figura 7. La velocidad máxima es de 25m/s, acercándose a los valores máximos del ensayo de campo, pero la distribución de frecuencias varía con la mayoría de los valores alrededor de 18 a 19m/s, muestran velocidades más lentas que las del análisis de video. La velocidad angular en RAMMS::ROCKFALL para 1000 trayectorias simuladas varía entre 0 a 6 rev/s; (figura 8), mientras, la distribución de frecuencia proporciona los valores principales que oscilan entre 3 a 4 rev/s.

Es notable que las energías cinéticas traslacionales oscilan entre 0 y 485 kJ, la energía cinética traslacional media para 1000 trayectorias es de 463 kJ con una desviación estándar de 13,7. Mientras que la energía cinética rotacional oscila entre 0 y 111 kJ con una media de 93 kJ y una desviación estándar de 10,1. Es importante señalar que la energía cinética rotacional constituye hasta el 20% de la energía cinética total.

La energía cinética total (figura 9) es una función de la energía cinética traslacional (dependiendo de la velocidad de traslación) y la energía cinética rotacional (dependiendo de la velocidad angular), su distribución se subestima ligeramente con la mayoría de los valores alrededor de 230 kJ, mientras que 300 kJ sería más realista en comparación el ensayo de campo.

Barrier - Statistics Summary:

Parameter: Velocity (m s⁻¹)

Min / Max: 0.00 / 24.98

Mean / Median: 16.50 / 19.07

Std Dev: 6.56

Q1 / Q3 / IQR: 15.66 / 20.59 / 4.93

Q90 / Q95 / Q99: 22.09 / 22.41 / 24.98

Scenario: Nicolum8

Line Profile: profile.shp

Traj./Stopped: 111/8

Nr of data values: 130

Histogram bin size: 1.92

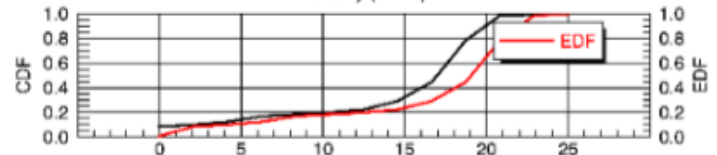
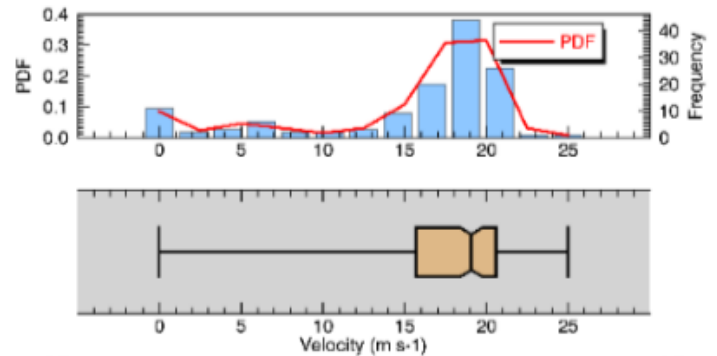


Figura 7. Distribución estadística de las velocidades de traslación modeladas para 119 bloques en función de densidad de probabilidad asociada (PDF), y en función de distribución acumulativa (CDF) y función de distribución empírica (EDF).

Barrier - Statistics Summary:

Parameter: Rotational Velocity Resultant

Min / Max: 0.00 / 6.23

Mean / Median: 3.43 / 3.71

Std Dev: 1.20

Q1 / Q3 / IQR: 3.18 / 4.16 / 0.97

Q90 / Q95 / Q99: 4.62 / 4.88 / 6.23

Scenario: Nicolum8

Line Profile: profile.shp

Traj./Stopped: 111/8

Nr of data values: 130

Histogram bin size: 0.37

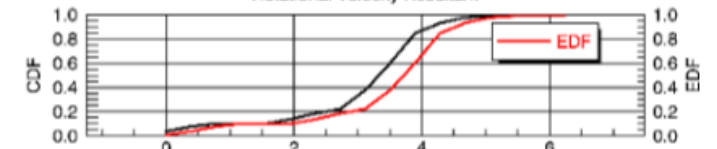
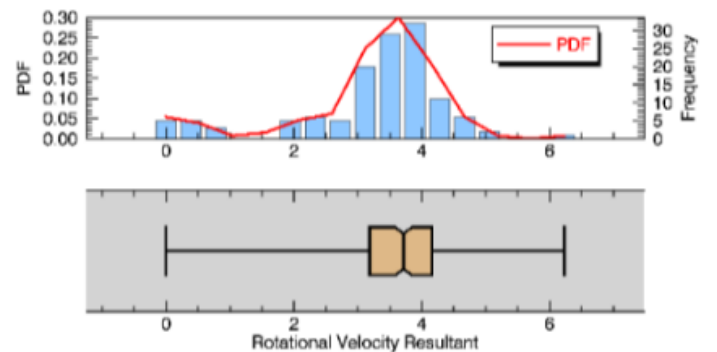


Figura 8. Distribución estadística de las velocidades angulares calculadas para 119 bloques.

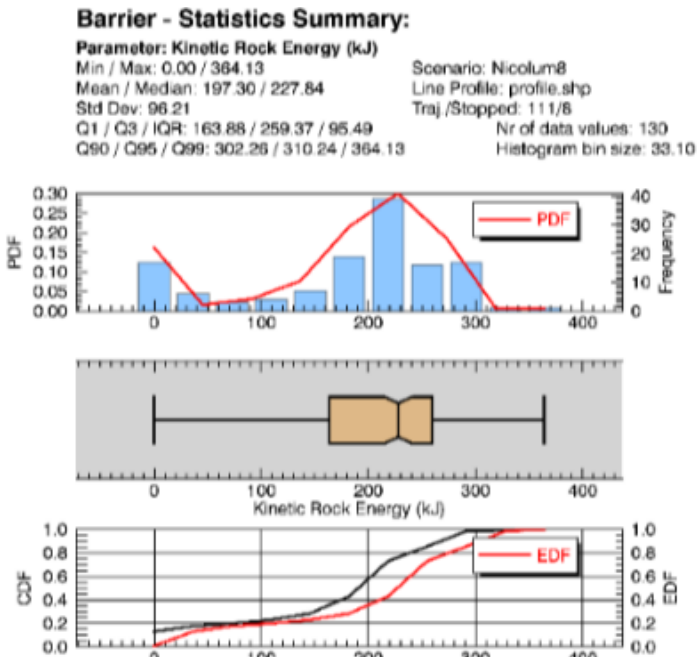


Figura 9. Energías cinéticas calculadas por RAMMS :: ROCKFALL para 119 trayectorias.

3.2. Ensayo a escala real.

3.2.1. Metodología.

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 análisis de video. En este caso, se utilizó el Kinovea (16) ya que es 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 (Figura 10). La velocidad se calcula a partir de los puntos x e y obtenidos del seguimiento y se corrige la profundidad como se describe en (17).

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.



Figura 10. Seguimiento de un bloque a lo largo de su caída con el software Kinovea.

3.2.2. Resultados.

La evolución de la velocidad durante el proceso se representa en la Figura 11. 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.

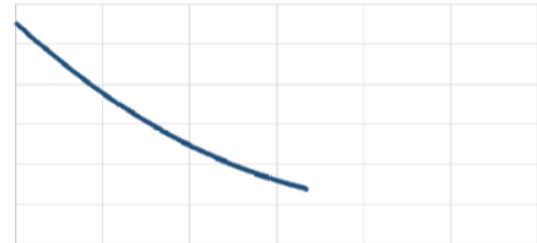


Figura 11. Velocidad en m/s para el bloque T030 desde el impacto con malla hasta poco antes de tocar suelo.

Es posible comparar la trayectoria libre teórica del bloque T030 con su trayectoria real (con el atenuador presente), ilustrando el proceso de atenuación en la perspectiva de la distancia recorrida. La Figura 12 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.

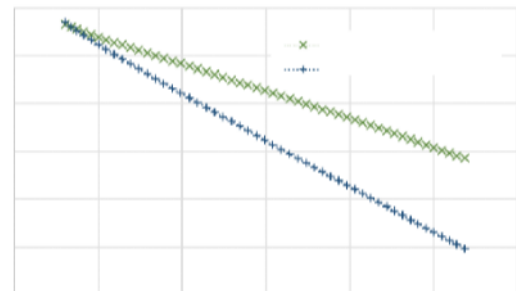


Figura 12. Comparación entre el comportamiento teórico de trayectoria libre del bloque T030 sin proyección versus la trayectoria real con el impacto de la estructura de protección desde el momento del impacto en adelante.

El análisis de video también se aplicó para medir la velocidad angular del bloque. Esto se logró rastreando la cara dada del bloque y marcando cada rotación de 90° en el software. La marca de tiempo de estos cuadros permite el cálculo de la velocidad angular en rad/s. La figura 13 ilustra la evolución en los ensayos T030 y T062 desde el impacto con membrana en adelante. La velocidad angular extraída del análisis de video podría compararse con las mediciones realizadas con la medición del giroscopio del sensor de movimiento de roca (figura 14).

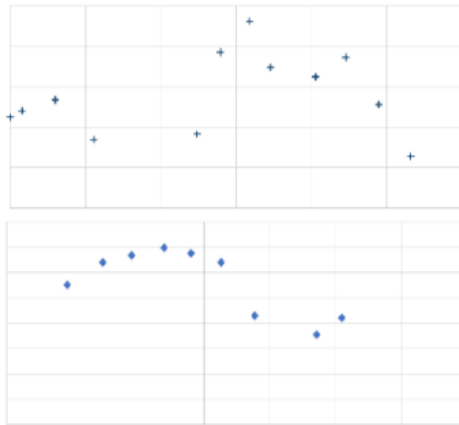


Figura 13. Velocidad angular (rad/s) del bloque T030 (izquierda) y T062 (derecha). Tiempo de impacto en $T = 0$ s.

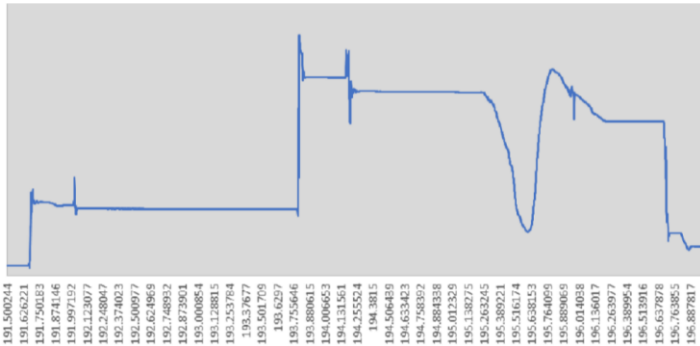


Figura 14. Gráfico del giroscopio de tres ejes resultante colocando en los bloques de hormigón. Ejemplo del ensayo T030. La evolución de la velocidad angular varía en el mismo orden de magnitud que para el análisis de video. El impacto es en $t=195,2$ ms.

La medición del giroscopio muestra la misma evolución de la velocidad angular al rendimiento de los resultados del análisis de video. El bloque T030 entra en la malla con una rotación inicial de aproximadamente 10 rad/s y 35 rad/s , disminuye y luego aumenta nuevamente hasta 25 rad/s antes de disminuir en pasos (también ligeramente visibles en la figura 13) hacia 0 eventualmente al llegar al suelo. El ejemplo T030 muestra bien el problema con los pasos de muestreo. Aunque el análisis del video capta la rotación de tendencia en trayectoria libre de 10 rad/s , pierde la aceleración corta antes del impacto donde el giroscopio

indica una velocidad de 33 rad/s (figura 14). La parte izquierda de la figura 13 y la figura 15 muestran una evolución similar para el ensayo T062, por lo tanto, las velocidades angulares a través del análisis de video parecen ser coherentes y el método de análisis de video puede aplicarse cuando no hay datos del sensor de movimiento del bloque.

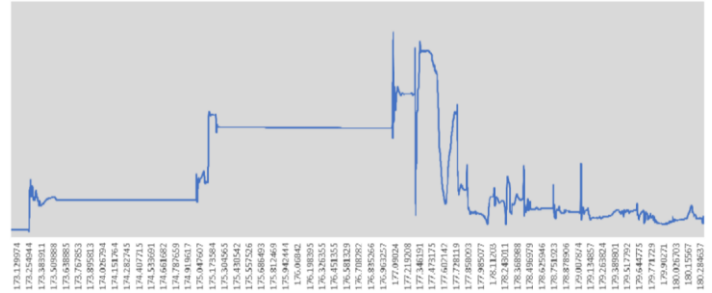


Figura 15. Gráfico del giroscopio de tres ejes, colocado en los bloques de hormigón. Ejemplo de ensayo T062. La velocidad angular varía en el mismo orden de magnitud, que en el análisis de video. Impacto en $t=177,4$ ms.

3.2.3. Discusión de los resultados.

Analizando los resultados aportados por las células de carga, se puede concluir que capturan/describen bien el comportamiento clásico de los sistemas atenuadores (Figura 16). 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 (los intervalos de tiempo coinciden, entre el gráfico resultante de la célula de carga y el análisis de video, donde se puede observar la inversión en la dirección de rotación).

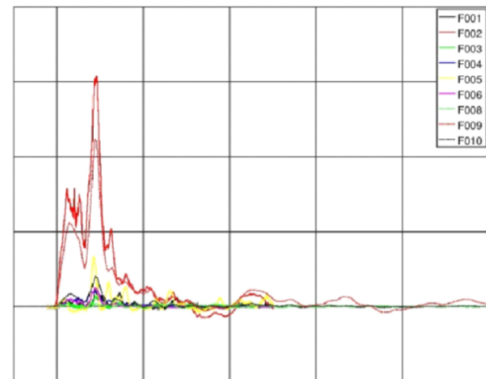


Figura 16. Dos picos registrados por las células de carga (F002 y F009 corresponde al cable perimetral superior), $t=0$ corresponde al momento de impacto.

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 los atenuadores han de diseñarse y son la base del concepto de diseño del atenuador propuesto, **conservación del**

momento (18). Estos dos casos de carga parecen corresponder a las condiciones de contorno de la malla.

- 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, ladera abajo.

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

4. Conclusiones.

Sin duda, los sistemas atenuadores constituyen un complemento muy interesante a las estructuras flexibles de protección contra desprendimientos, por lo tanto, requieren un procedimiento de diseño formal racional. Para concluir, 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 de pruebas. Además, los resultados de la simulación ayudaron a optimizar la configuración del campo de ensayos, para la serie de ensayos ejecutada en septiembre de 2017, en las que por ejemplo se incrementó el ancho del sistema atenuador. La ampliación de la barrera (atenuador) contribuyó con el aumento de la tasa de impactos en la serie 2017. La dinámica del desprendimiento se sitúa en un rango realista. Al parecer, el análisis de video está asociado con algún error, aunque la velocidad angular es comparable con la extraída de los sensores de movimiento. Aunque la resolución a nivel temporal no es la misma (intervalos de tiempo) entre el análisis de video y el sensor del movimiento (frecuencia 20 kHz), es posible usar los valores obtenidos del análisis de video para ensayos sin una grabación del sensor de movimiento, como la comparación entre ambos es satisfactoria.

En general, la combinación del modelado (simulación) y el ensayo a escala natural (1:1) permite comprender mejor la dinámica del movimiento, así como 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 está desarrollando un nuevo enfoque de dimensionamiento, para construir 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 de los bloques.

5. Referencias.

- Duffy, J. and Glover, J. A brief history of rockfall barrier testing. 6th Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection, Barcelona, Spain, 2017.
- Alkema, A. T., Westers, G., & Duffy, J. D. Summary of Worldwide Rockfall Tests.
- Glover, J., and Ammann, W. Geobrug internal testing report No. 1-a, Rockfall Attenuator Testing Nicolum Quarry, Hope BC., Global Risk Forum Davos, GRF, Switzerland, 2016.
- 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.
- Muhuthan, B., Shu S., Sasiharan N., Hattamleh O.A., Badger T.C., Lowell S.L., Duffy J.D. Analysis and Design of Wire Mesh/Cable Net Slope Protection, Washington State Transportation Center, Seattle, Washington, WA-RD 612.1, p. 267, 2005.
- Wyllie, D.C. and Norrish, N.I. Stabilization of rock slopes. In Landslides: Investigation and mitigation Transportation Research Board, National Academy Press, Washington, D.C. pp 474-504. TRB Special Report 247, 1996.
- Andrew, R.D., Barttingale 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Wyllie et al. Attenuators for controlling rockfall: first results of a state-of-the-art full-scale testing program. Geovancouver 2016.
- SLF, RAMMS:: ROCKFALL, retrieved July 2017 from: http://ramms.slf.ch/ramms/index.php?option=com_content

t&view=article&id=66&Itemid=93

- Leine, R. I., Schweizer, A., Christen, M., Glover, J., Bartelt, P., & Gerber, W. Simulation of rockfall trajectories with consideration of rock shape. *Multibody System Dynamics*, 32(2), 241- 271, 2014.
- Hofmann, H. Rockfall trajectories and dynamics analysis from 1:1 real rockfall tests. MSc Thesis, University of Portsmouth, unpublished, 2017.
- Kinovea, retrieved July 2017 from: <http://www.kinovea.org>
- Glover, J. Rock-shape and its role in rockfall dynamics. p.266, 2015.
- Wyllie, D., Shevlin, T., Glover, J., Wendeler, C. Development of design method for rockfall attenuators. *Proceedings of the 68th Highway Geology Symposium*, 2017.