

E

MEDIDA DE PARÁMETROS CINEMÁTICOS DE BLOQUES ROCOSOS EN UN ENSAYO A ESCALA REAL

Albert Prades-Valls⁽¹⁾, Jordi Corominas⁽²⁾, Nieves Lantada⁽²⁾, Gerard Matas⁽²⁾ y María Amparo Núñez-Andrés⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya
alberto.prades.i@upc.edu, m.amparo.nunez@upc.edu

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya
jordi.corominas@upc.edu, nieves.lantada@upc.edu, gerard.matas@upc.edu

RESUMEN

La evaluación del riesgo y el diseño de medidas de protección frente a desprendimientos de rocas requieren la predicción de las posibles trayectorias de los bloques susceptibles de desprenderse, así como la velocidad y la energía de llegada a las zonas que se deban proteger. Considerar la fragmentación introduce desafíos adicionales al modelado, tales como la energía disipada durante la fragmentación y la distribución de la energía restante entre los nuevos fragmentos. Para aclarar algunos de estos puntos se realizó un experimento a escala real, en el que se observaron las trayectorias de 16 bloques y de los fragmentos generados tras el impacto, empleando tres cámaras de video de alta velocidad. Para determinar la posición espacial de los bloques, hemos desarrollado un programa que permite calcular las velocidades, los momentos lineales, las energías en el instante anterior y posterior al impacto y, finalmente, los coeficientes de restitución asociados al impacto.

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación y gestión de los potenciales desprendimientos rocosos requieren, en primer lugar, la identificación de la fuente potencial de caída de rocas y, en segundo lugar, la predicción de las posibles trayectorias de los bloques rocosos durante la caída. Con el tiempo se han ido desarrollando una gran variedad de modelos numéricos que simulan la trayectoria de los bloques, las velocidades y las energías en cada punto de ésta y que, finalmente, sirven para determinar alturas de paso, energías de choque o las distancias máximas alcanzadas. Estos modelos suelen usar aproximaciones 2D o 2.5D, en las que los perfiles de pendiente requeridos para realizar el análisis 2D se obtienen a partir de modelos digitales de elevaciones utilizando algoritmos como la trayectoria siguiendo la pendiente máxima.

En la actualidad, los programas simulan trayectorias en el espacio tridimensional y la orografía suele estar representada por modelos digitales de elevaciones (MDE). Existen numerosos programas 3D, tanto comerciales: RAMMS (Leine et al. 2014), RockPro3D[®] o GeoRock3D[®] como de carácter científico: STONE (Guzzetti et al., 2002), HY-STONE (Crosta y Agliardi,

2004), Rockyfor3D (Dorren y Seijmonsbergen, 2003), Rockfall-Analyst (Lan et al., 2007) y RockGIS (Matas et al., 2020), entre otros. Muchos de estos, (Rockfall-Analyst y RockGIS, entre otros), asumen que un bloque rocoso en caída es una masa puntual de la cual se simula la velocidad después de las colisiones sin tener en cuenta las contribuciones debidas a la forma y al tamaño (enfoque de masa puntual). Sin embargo, otros programas, como RAMMS, permiten una descripción explícita de cuerpos poliédricos tridimensionales arbitrarios, incluyendo formas de roca naturales (enfoque de cuerpo rígido). En Dorren et al. (2003), Volkwein et al. (2011) y Li and Lan (2015) se realiza una amplia revisión de los avances con relación a los modelos más utilizados, sus supuestos y requisitos.

Con frecuencia, el bloque se rompe al impactar contra la superficie de la vertiente. Los fragmentos generados descienden por la pendiente rebotando, rodando, deslizándose y, en numerosas ocasiones, rompiéndose de nuevo, siguiendo distintas trayectorias hasta su completa parada. Por supuesto, el fenómeno de la fragmentación condiciona las trayectorias y las velocidades de impacto sobre los elementos sensibles (Giacomini et al., 2009; Corominas et al., 2012; Ruiz-Carulla et al., 2017, 2020). Se ha observado que la fragmentación puede aumentar sustancialmente el riesgo como consecuencia de la divergencia de las trayectorias de los fragmentos, hecho que amplía la extensión de la zona afectada (Sarro et al., 2014; Corominas et al., 2019). Por ello, algunos programas de simulación de caída de bloques han incorporado criterios que tienen en cuenta este fenómeno (Wang y Tonon, 2011; Zhao et al., 2017; Matas et al., 2017, 2020). Esta característica es fundamental para predecir nuevas trayectorias y energías involucradas, cuyo conocimiento es básico para el diseño más eficaz de las medidas de protección y para mejorar el análisis del riesgo.

La fragmentación es un fenómeno complejo y poco comprendido debido a la variedad de factores implicados. Algunos de ellos son intrínsecos a la naturaleza de la roca o masa rocosa en caída, como son la resistencia, la presencia de fisuras y las debilidades del bloque impactante en relación con la energía potencial asociada al impacto (Wang y Tonon, 2011; Haugh et al., 2016; Ye et al., 2019). Otros son debidos a las características de la superficie de impacto como puede ser su rigidez (De Blasio y Crosta, 2014; Uzi y Levy, 2018), la rugosidad o la presencia de vegetación. Y, finalmente, otros son debidos a la geometría y la cinemática, como: la velocidad de impacto, la tasa de carga, el ángulo de impacto y la geometría de la colisión, o el número de impactos sucesivos (Giacomini et al., 2009; Zhang 2000; Crosta et al., 2015; Ruiz-Carulla et al., 2020; Prades-Valls et al., 2022).

En la modelización de la caída de bloques, los parámetros de entrada más críticos son los asociados a la interacción de los bloques con el suelo: los coeficientes de restitución, que controlan el rebote de los bloques durante los sucesivos impactos (Asteriou et al., 2012; Buzzi et al., 2012); la irregularidad de la geometría de la pendiente y la microtopografía, que afectan a la variabilidad de las trayectorias (Crosta y Agliardi, 2004; Bourrier et al., 2021), y a la fiabilidad de las simulaciones (Lambert et al., 2013). La consideración de la fragmentación añade nuevos desafíos a la modelización, como: (i) criterio de rotura de bloques al impactar con el suelo; (ii) disipación de energía durante la fragmentación; (iii) distribución de la energía restante entre los nuevos fragmentos generados, y (iv) delineación de las trayectorias post-impacto de los fragmentos (Matas et al., 2017).

En este artículo se presentan los resultados de los experimentos de fragmentación de bloques a escala real. Se describen las características del lugar de ensayo, la metodología para la adquisición, registro y procesamiento de los datos y la interpretación de los resultados. Nuestro objetivo es: (i) mejorar la calidad y precisión del seguimiento de la trayectoria del bloque en caída; (ii) medir los parámetros cinemáticos del bloque; (iii) cuantificar el intercambio de energía durante el impacto; (iv) calcular los coeficientes de restitución, y (v) extraer parámetros cinemáticos de los fragmentos de roca resultantes.

Aunque el análisis de la fragmentación de rocas va más allá de este trabajo, presentamos un ejemplo de cómo se pueden procesar las imágenes de video para este tipo de análisis. Finalmente, hemos llevado a cabo el ejercicio de comparar los coeficientes de restitución y las energías de impacto de los bloques que fragmentan con los que no fragmentan.

2. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

En septiembre de 2017 se realizó una prueba experimental de caída de rocas a escala real en una cantera ubicada en el municipio de Vallirana, en la provincia de Barcelona. El lugar del experimento fue elegido porque ofrecía condiciones favorables para, por un lado, forzar la fragmentación de los bloques de prueba y, por otro, registrar algunos parámetros fundamentales del impacto. Se lanzaron veintiún bloques de piedra caliza con una densidad media de 2600 kg/m^3 . Los volúmenes, que oscilaban entre los 0.5 y los 2.3 m^3 , se dejaban caer desde una berma de unos 23.7 m de altura. Todos los bloques impactaron sobre una superficie rígida de discontinuidad bastante uniforme, ubicada aproximadamente a 8.5 m por debajo del punto de lanzamiento e inclinada 42.4° . El diseño aseguraba impactos lo suficientemente fuertes como para garantizar la fragmentación de los bloques en la mayoría de los casos. La configuración experimental se describe en Gili et al. (2022) y corresponde a la serie de pruebas #4, descrita por Matas et al. (2020) y Ruiz-Carulla et al. (2020). El presente trabajo se centra en la determinación de las características cinemáticas de los bloques en relación al primer impacto sobre la superficie de discontinuidad.

Los lanzamientos se grabaron con tres cámaras de video de alta velocidad SONY NEX-FS700R situadas lo suficientemente lejos de la zona de impacto para mantener al personal en lugar seguro. Para facilitar la visibilidad de los bloques en las imágenes, se les pintaron unos círculos máximos de diferentes colores (rojo, amarillo y verde) orientados a lo largo de tres ejes aproximadamente perpendiculares. De entre todos lo que se lanzaron se escogieron dieciséis bloques (Figura 1) para seguir las trayectorias durante su caída. El criterio de selección se basó en la calidad de las imágenes disponibles tomadas desde las tres cámaras, evitando aquellos videos que mostraban un exceso de polvo o aquellos cuyos fragmentos mayores en primer plano ocultaran los que tenían detrás.

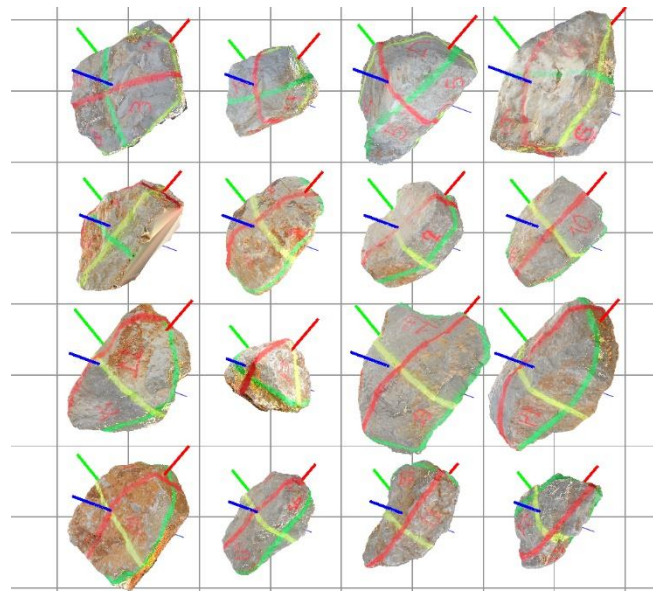


Figura 1. Muestra de los 16 modelos de los bloques a escala seguidos en este trabajo. Se muestran los ejes principales de simetría de los bloques en tres colores (eje x-rojo, eje y-verde, eje z-azul). La cuadrícula tiene 1 m de lado.

Para construir el marco de referencia espacial se dispusieron un total de catorce dianas más quince marcas adicionales que fueron pintadas sobre las paredes y el suelo de la zona de lanzamiento y

depósito (Figura 2C). Las coordenadas de los centros de las dianas se midieron varias veces a lo largo del experimento con una estación total Leica modelo TM30 sin reflector. También se instalaron dos receptores GPS bifrecuencia Leica de la serie 530, que permitieron la transformación de coordenadas locales al sistema de referencia geodésico ETRS89.

Las cámaras se montaron apuntando hacia el punto de impacto para obtener tres vistas distintas del mismo lugar. Esta geometría permitirá *a posteriori* determinar las coordenadas tridimensionales de cualquier punto utilizando las imágenes de al menos dos de las cámaras. Aunque solo se requieren dos cámaras para construir el modelo tridimensional, en nuestro experimento utilizamos tres por dos razones: (i) reducir los errores de medición accidentales, especialmente en profundidad; (ii) poder calcular las coordenadas de posición con dos cámaras si la tercera fallase, aunque se dispondría de menos precisión. Las tres cámaras estaban separadas entre sí unos 50 o 60 m y a una distancia de entre 60 y 65 m del punto de impacto (Figura 2). A estas distancias, un disparador de infrarrojos convencional no alcanza para activar simultáneamente las tres cámaras. Para solucionarlo se instaló una lámpara de flash modelo NIKON SB-800, que era visible desde todas las cámaras, y se usaron los destellos lumínicos como señal de sincronismo. Durante cada lanzamiento se daban manualmente tres destellos del flash: uno al principio, otro hacia la mitad de la caída y, finalmente, un último destello cuando el bloque o los fragmentos se detenían.



Figura 2. Esquema de la zona del experimento. En A se muestra la superficie donde impactan los bloques. B es una toma cenital de la zona. En C se muestra la disposición de las cámaras, el equipo topográfico y el flash. Marcadas en rojo se muestran algunas de las dianas dispuestas sobre el terreno.

Como marco de referencia temporal se tomó el del reloj interno de la electrónica de las cámaras de video, que se consideró suficientemente estable y preciso. Las cámaras se configuraron para tomar 400 fotogramas por segundo, lo que implica un intervalo de 2.5 ms entre dos fotogramas consecutivos.

3. METODOLOGÍA DESARROLLADA

La metodología propuesta en este trabajo tiene como objetivo obtener los parámetros geométricos necesarios para la descripción del movimiento de bloques y fragmentos. Para extraer la posición espacial respecto del tiempo de los bloques y fragmentos, se ha implementado un programa en lenguaje C++, al que se han añadido la biblioteca OpenGL para el tratamiento gráfico de modelos numéricos y la biblioteca OpenCV para el tratamiento de las imágenes. El programa se compone de diferentes módulos encargados de ejecutar cada una de las fases del proceso: i) abrir y

visualizar los tres videos; ii) sincronizar las tomas; iii) introducir los datos de orientación interna de las cámaras (distancia focal, número de píxeles, tamaño de píxeles, etc.); iv) realizar la orientación externa (determinar la posición y orientación de las cámaras), y vi) adquirir coordenadas. En esta última fase el programa permite operar simultáneamente con los tres videos y calcular las coordenadas del terreno de un objeto, ya sea un bloque o un fragmento visible desde al menos dos de las cámaras; aunque para minimizar los errores de medición es preferible que sea visible desde las tres vistas.

3.1. Marco de referencia espacial

Una vez establecidas las coordenadas de las dianas como se ha comentado en la sección anterior, el paso siguiente consistió en referir las cámaras de video al marco de referencia topográfico. Eso significa estimar los centros de proyección de los sistemas ópticos de las cámaras y los ángulos de orientación con respecto al sistema de referencia que se ha montado. Se trata del proceso fotogramétrico conocido como orientación externa y representa la reconstrucción de la posición en el espacio de los haces de luz que generaron la imagen.

El error interno del sistema fotogramétrico se determinó midiendo las coordenadas imagen de las dianas y calculando sus correspondientes coordenadas terreno. Las coordenadas resultantes se restan de las medidas directamente por topografía para obtener los residuos. En el caso que nos ocupa, usando las tres cámaras, la precisión en el posicionado nos da un residuo de $\varepsilon = \pm 3$ cm. Si se usan únicamente dos cámaras los errores aumentan dependiendo de qué pareja de cámaras se escojan. En la mejor configuración, los errores son de aproximadamente $\varepsilon = \pm 5$ cm y en el peor de los casos ascienden a $\varepsilon = \pm 15$ cm.

A partir de aquí, se pueden calcular las tres coordenadas terreno de cualquier objeto cuyas coordenadas imagen puedan ser medidas en al menos dos fotogramas.

3.2. Seguimiento de los fragmentos

Cuando se produce la fragmentación del bloque, el programa que hemos desarrollado permite calcular la posición de los fragmentos partiendo de las medidas tomadas sobre las imágenes en distintos instantes. Medimos, siempre que sea posible, aquellos fragmentos que describen trayectorias parabólicas. Para nuestros propósitos, basta con tomar dos puntos suficientemente separados en el tiempo, porque minimiza la transmisión de los errores, y luego ajustar la trayectoria del fragmento con una parábola estimando la posición inicial y la velocidad inicial para la trayectoria entre los puntos medidos, ya que la aceleración coincide con la gravedad y por lo tanto es conocida. A partir de los valores medidos, interpolamos las posiciones intermedias entre estos dos instantes y, además, extrapolamos las posiciones para los instantes anteriores y posteriores. La extrapolación a instantes anteriores es muy importante en nuestro procedimiento porque no es posible obtener coordenadas de los fragmentos justo en el momento del impacto. En ese instante, la mayoría de los fragmentos aún no existen o están detrás, ocultos por otros fragmentos situados en primer plano. Por lo tanto, medimos unos instantes después del impacto cuando los fragmentos están lo suficientemente separados entre sí y perfectamente visibles. Luego ajustamos una parábola y usamos la extrapolación para calcular la posición y la velocidad en el instante cero del impacto. Así pues, este método permite determinar las velocidades de rebote de los fragmentos. Por otro lado, la extrapolación para instantes posteriores, especialmente para trayectorias parabólicas largas, se usa para seguir y corregir si fuese necesario la trayectoria calculada y reemplazarla por una más precisa.



Figura 3. Muestra de tres fotogramas tomados en el mismo instante con los vectores proyectados de las velocidades de distintos fragmentos del bloque #15.

El seguimiento de los fragmentos para obtener sus posiciones es un proceso lento debido al gran número de ellos, la presencia de polvo y las oclusiones de unos bloques por otros. En la práctica, con la resolución disponible solo se pueden rastrear los fragmentos más grandes (Figura 3).

3.3. Masa de los fragmentos

Después de cada lanzamiento, se tomaron entre 20 y 40 imágenes (Figura 4A) de los fragmentos dispersos por el suelo con una cámara montada en un dron. Con esas fotografías se reconstruyeron los respectivos modelos tridimensionales (Figura 4B) con el programa Agisoft Photoscan[®]. Posteriormente, con la ayuda del programa MeshLab (Cignoni et al., 2008), se extrajeron los modelos individuales de los fragmentos (Figura 4C) operación que nos permitió cuantificar sus volúmenes y masas (Figura 4D).

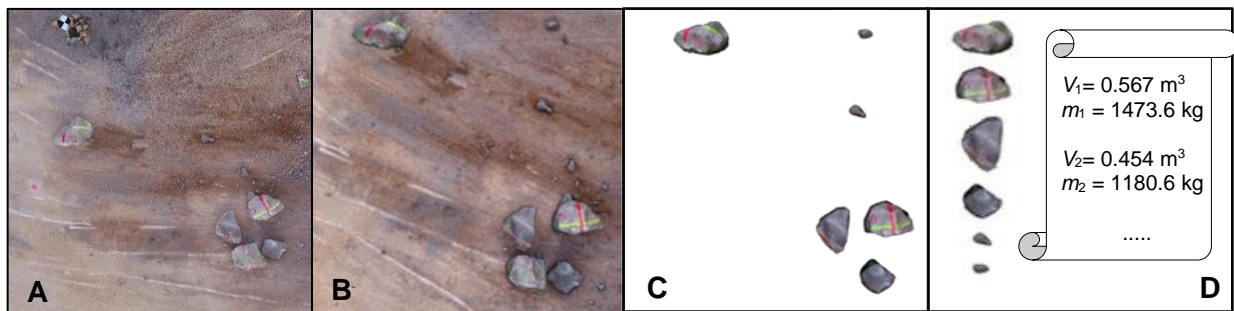


Figura 4. Del juego de fotografías tomadas después del impacto (A) se obtiene el modelo de la zona (B). Finalmente, se separan los modelos de cada fragmento para calcular sus volúmenes.

Una vez que la masa y la velocidad de cada fragmento están disponibles, se calculan las magnitudes derivadas.

Definimos el coeficiente de restitución para los bloques fragmentados, únicamente en el primer impacto, como la relación entre la suma de los momentos de los fragmentos un instante después del impacto y el momento del bloque un instante antes del impacto:

$$R = \frac{\sum_{k=1}^N m_k v_k}{m v_i} \quad (1)$$

De la misma manera, el balance de energías del impacto se puede calcular a partir de la energía de rebote de cada uno de los fragmentos que se hayan medido. La energía disipada se expresa por:

$$E_d = E_i - E_r = \frac{1}{2} m v_i^2 - \sum_{k=1}^N \frac{1}{2} m_k v_k^2 - \frac{1}{2} m_r \tilde{v}^2 \quad (2)$$

donde m y v_i son la masa y la velocidad del bloque en el instante del impacto, m_k y v_k son la masa y la velocidad del k -ésimo fragmento medido, respectivamente, m_r es la masa de los bloques no medidos y \bar{v} es la velocidad mediana de los fragmentos medidos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan las velocidades y masas medidas de los bloques y de los fragmentos de la muestra escogida. Con estas magnitudes se calculan la energía cinética y el momento lineal en el instante anterior y posterior al impacto. A su vez, estos parámetros cinemáticos nos permiten calcular el coeficiente de restitución y el balance energético de los bloques fragmentados y se comparan con los obtenidos con los bloques que no fragmentan. Se muestra también, por una parte, la relación que se pueda establecer entre la energía de impacto y los coeficientes de restitución y, por otra, la relación de uno de los indicadores de fragmentación (el del fragmento de mayor volumen) y los coeficientes de restitución.

4.1. Comprobación de la precisión del método

En primer lugar, hemos puesto a prueba la precisión del procedimiento fotogramétrico. Como ejemplo, presentamos la medida de las posiciones en caída libre del fragmento # 1 del bloque 15 después del impacto contra la superficie de discontinuidad. Se hizo un seguimiento de la posición del fragmento cada 50 ms durante todo el vuelo, que duró un total de segundo y medio antes de que este impactara contra el suelo. Posteriormente, se ajustó una función parabólica a la coordenada Z respecto del tiempo. El valor de la aceleración de la gravedad nos sirve para chequear el cálculo completo, que abarca desde las medidas de la posición obtenidas por el sistema fotogramétrico hasta las medidas del tiempo que suministra el sistema de control electrónico. Como resultado del ajuste, además de la estimación de los parámetros, se obtienen los errores en su cálculo, resultando para este fragmento #1:

$$\begin{aligned} Z_0 &= 478.40 \pm 0.03 \text{ m} \\ v_{z0} &= 1.82 \pm 0.08 \text{ m/s} \\ g &= 9.8 \pm 0.1 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

El valor de la gravedad (g) se obtiene a partir de las medidas fotogramétricas de la posición de un cuerpo en caída libre. Por otra parte, el error en la posición (Z), de ± 3 cm, obtenido por el ajuste coincide con la estimación que obtuvimos midiendo el error interno a partir de las coordenadas de las dianas. Del ajuste también obtenemos una estimación del error en la velocidad (v) y será el que se usará posteriormente para el cálculo de los errores en el cálculo de las energías cinéticas, los momentos lineales y los coeficientes de restitución.

4.2. Extracción de masas y velocidades

Los bloques impactaron contra la vertiente con velocidades en el rango entre los 10.0 y 13.3 m/s, siendo la velocidad media de 12.1 m/s. En general, los bloques mayores eran lanzados desde una altura ligeramente menor y los menores desde un poco más arriba. Esto explica la variabilidad observada en las velocidades de impacto. De los dieciséis bloques que se siguieron, cinco no se fragmentaron durante el primer impacto. De estos últimos, dos de ellos llegaron al final de la trayectoria completamente enteros (#4 y #11). Los otros tres se fragmentaron en impactos posteriores. En la Tabla 1 se presentan las masas de estos bloques (m), las componentes de las velocidades (v_{ix} , v_{iy} , v_{iz}) y el módulo (v_i) antes y (v_{rx} , v_{ry} , v_{rz}) y el módulo (v_r) después del primer impacto, las energías de impacto (E_i), de rebote (E_r), disipadas (E_d), y los coeficientes de restitución (R).

#	m kg	v_{ix} m/s	v_{iy} m/s	v_{iz} m/s	v_i m/s	v_{rx} m/s	v_{ry} m/s	v_{rz} m/s	v_r m/s	R	E_i kJ	E_r kJ	E_d kJ
4	1830.4	0.93	-0.07	-12.52	12.55	-5.02	0.41	-3.59	6.19	0.49	144.3	35.0	109.3
7	2275.0	0.47	-0.28	-12.06	12.07	-3.38	0.23	-2.45	4.18	0.35	165.8	19.9	145.9
11	4022.2	1.03	-0.08	-11.67	11.72	-5.56	0.04	-2.13	5.95	0.51	276.0	71.3	204.7
12	1684.8	1.02	0.01	-12.84	12.88	-5.29	2.00	-1.21	5.78	0.45	139.8	28.2	111.6
14	4141.8	-0.56	0.05	-11.93	11.94	-3.82	0.79	-2.31	4.53	0.38	295.4	42.6	252.8

Tabla 1. Bloques que no fragmentaron durante el primer impacto. Masa de los bloques y las velocidades detalladas en el instante antes y después del impacto, coeficientes de restitución y energías de impacto, rebote y disipada.

Los once bloques restantes se fragmentaron durante el primer impacto y el tratamiento se torna más complicado. Para calcular el coeficiente de restitución (R) y el balance de energía se construyeron los modelos 3D de cada uno de los treinta y seis fragmentos generados. Sobre las imágenes de video se hizo un seguimiento de la trayectoria de cada uno de ellos desde el momento de su generación hasta que quedaba completamente parado.

Una vez se dispone de la masa y la velocidad de cada fragmento (Tabla 2), se pueden calcular las magnitudes derivadas. Para calcular el momento lineal de rebote se sumaron los momentos lineales de los fragmentos que se pudieron medir. Para no subestimar la aportación de los fragmentos no medidos, se hizo una estimación de su momento lineal. Por una parte, la masa se obtuvo restando la masa de los fragmentos medidos de la masa original del bloque. Esta diferencia (Tabla 2) oscila entre el 1.7 y el 25.6 % de la masa original. Por otra parte, a esa masa se le asignó la velocidad mediana de las velocidades de los fragmentos medidos. Se tomó la mediana porque es un estimador menos sensible a los valores atípicos que el valor medio. Entendemos que el error de considerar esta aproximación es mucho menor que no tenerlo en cuenta o, lo que sería equivalente, que asignarle una velocidad cero a esos fragmentos no medidos.

Bloque justo antes del impacto			Fragmentos seguidos después del primer impacto										Masa no seguida				
#	m_i kg	v_i m/s	f_1		f_2		f_3		f_4		f_5		f_6		m (n/s) kg	m (n/s) %	\bar{v} m/s
			m (kg)	v (m/s)	m (kg)	v (m/s)	m (kg)	v (m/s)	m (kg)	v (m/s)	m (kg)	v (m/s)	m (kg)	v (m/s)			
3	3229.2	11.4	874.0	6.1	616.0	4.7	759.5	7.5	641.9	6.9	61.1	3.4			276.7	8.6	6.5
5	4089.8	10.0	1473.6	5.3	1180.6	3.1	1264.6	6.5	95.1	7.4					75.79	1.9	5.9
6	5657.6	10.2	2051.0	8.1	1157.3	4.1	904.9	3.9	353.3	4.6	135.1	7.0			1055.9	18.7	4.6
8	2243.1	12.3	1325.2	6.6	993.4	8.6									-75.5	3.4	7.6
9	2215.2	12.6	1276.0	4.2	508.5	2.8	89.5	2.6							341.1	15.4	2.8
10	2137.2	13.3	1373.3	7.4	92.9	5.9	123.0	9.7							548.1	25.6	7.4
13	4654.0	11.2	4461.7	7.8	113.2	6.6									79.0	1.7	7.2
15	3429.4	12.7	1326.4	6.7	1303.4	9.2	103.0	15.0	92.5	6.3	70.4	7.8	71.3	8.0	462.3	13.5	7.9
16	1417.0	12.5	743.2	9.0	546.2	8.2									127.5	9.0	8.6
19	1482.0	12.9	1308.7	5.4	62.7	9.0									110.5	7.5	7.2
21	1274.0	12.6	1217.6	8.0	18.2	7.1									38.2	3.0	7.5

Tabla 2. Resultados de las mediciones de las velocidades de los bloques en el instante previo al impacto y las de los fragmentos rebotados después del impacto. Se presentan también las masas de los bloques y de los fragmentos extraídas a partir del cálculo de sus volúmenes.

En general, solo se pudieron seguir los fragmentos más grandes de entre todos los generados después del primer impacto. La suma de las masas de los fragmentos medidos representa entre el 81.3 y el 98.3 % de la masa del bloque original y son los que se llevan la mayor parte del momento y de la energía de rebote, por lo que despreñar los fragmentos más pequeños no es significativo, y consideramos que el seguimiento de los fragmentos más grandes es aceptable para el cálculo de los balances de energía. Es importante hacer notar que, aunque los fragmentos más pequeños se llevan una pequeña parte de la energía, en ocasiones, se detectan algunos que son despedidos a velocidades muy altas respecto del resto, con el consiguiente riesgo para los elementos expuestos.

4.3. Coeficientes de restitución respecto de la energía de impacto

Los coeficientes de restitución se calculan como la relación entre el momento incidente y el de rebote. En la Figura 5 se muestra la gráfica que contrasta estos coeficientes de restitución calculados con la energía de impacto.

Comparando los bloques que fragmentan y los que no, se observa que los primeros muestran una ligera tendencia a tener un coeficiente de restitución mayor, lo que debería confirmarse con el análisis de más casos. Para los bloques que no fragmentan los coeficientes de restitución cubren una amplia gama de valores, entre 0.35 y 0.51, lo cual sugiere que es un parámetro que no depende únicamente del sustrato sobre el que los bloques impacten.

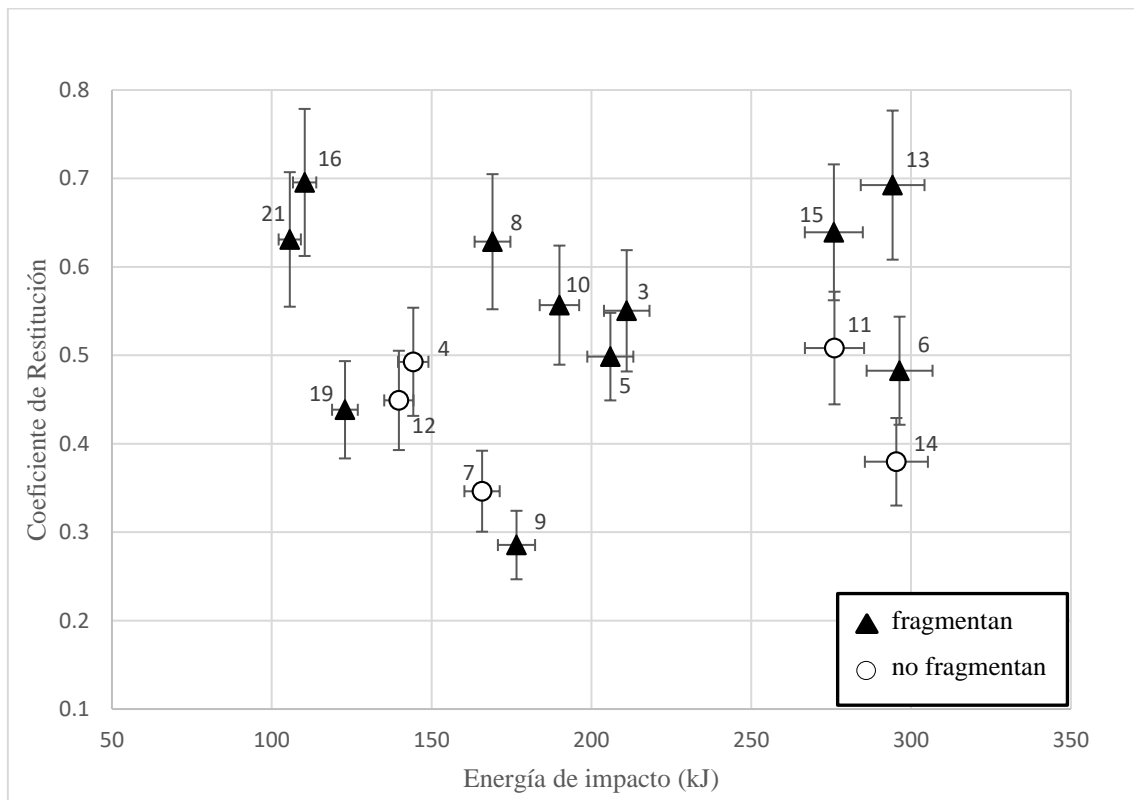


Figura 5. Contraste de los coeficientes de restitución respecto de la energía de impacto. Las barras muestran el error estimado de cada una de las magnitudes.

En este ensayo, en particular, los bloques golpean la misma superficie de discontinuidad y casi con la misma velocidad de incidencia. Aun así, los coeficientes de restitución, tanto si el bloque se fragmenta o no, presentan una amplia gama de valores. Esto confirma las observaciones de otros investigadores en el sentido de que unos pocos parámetros cinemáticos no son suficientes para explicar esta dispersión de valores. El rebote de los bloques o fragmentos después del impacto depende de factores que aún no se han entendido completamente (Crosta et al., 2015).

4.4. Relación $V_{m\acute{a}x}/V_o$ respecto de los coeficientes de restitución

Existen muchas maneras de cuantificar el grado de fragmentación de un bloque rocoso. Algunos autores apuntan que el tamaño del fragmento más grande se puede usar como uno de esos descriptores (Bowman et al., 2014; Haug et al., 2016). Para cuantificar el grado de fragmentación, Ruiz-Carulla, Corominas et al. (2020) proponen que la fragmentación estará mejor caracterizada si, además del tamaño del fragmento mayor, se tuviera en cuenta la distribución de los tamaños de todos los fragmentos.

En la gráfica de la Figura 6 se representa la relación entre el cociente del volumen del fragmento

mayor respecto del volumen inicial ($V_{\text{máx}}/V_o$) y el coeficiente de restitución. En ella se observan dos comportamientos relativamente distintos dependiendo de si el bloque fragmenta o no. Los bloques que no fragmentan o que lo hacen en poca medida tienden a tener coeficientes de restitución más pequeños en comparación con los bloques que producen muchos fragmentos, pero pequeños. Vemos a grandes rasgos que es una tendencia y que, sin embargo, los bloques #9 y #13 no la siguen. Este comportamiento sugiere que la fragmentación restringe la disipación de energía durante el impacto porque los fragmentos rebotados se llevan, en forma de energía cinética, buena parte de la energía del impacto.

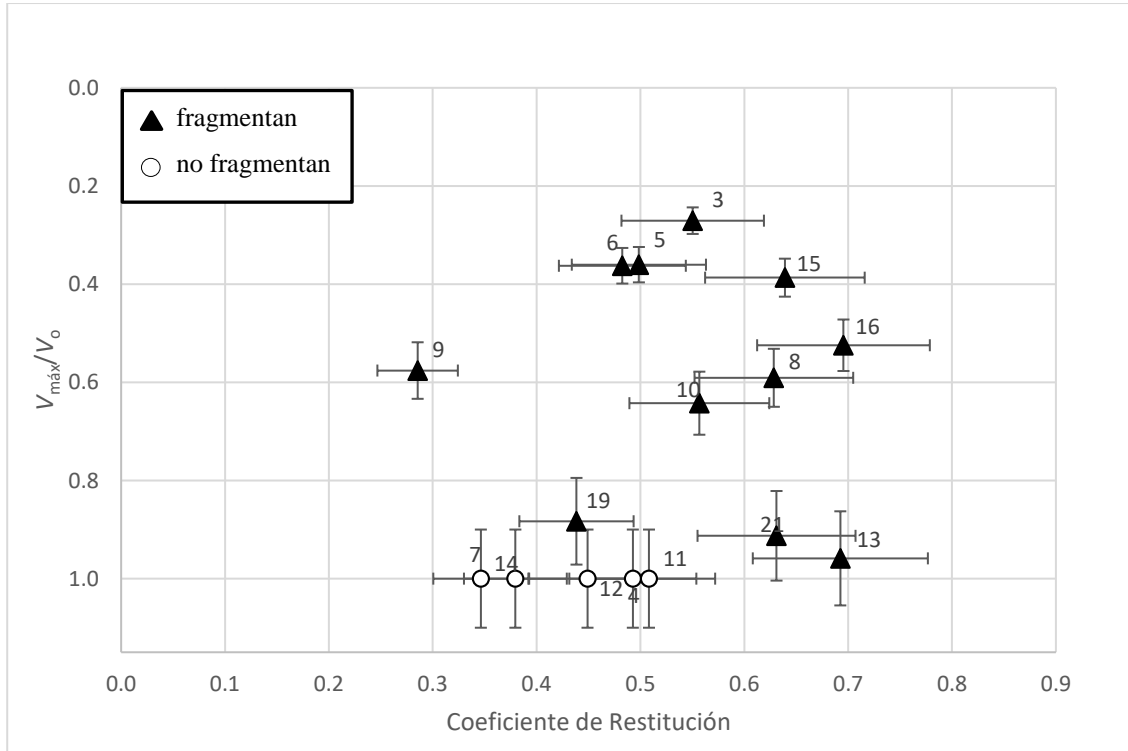


Figura 6. Contraste entre el cociente del volumen del fragmento mayor ($V_{\text{máx}}$) respecto del volumen inicial V_o (durante el primer impacto) y el coeficiente de restitución. Las barras de error representan el error propagado de los provenientes de las medidas en la posición y en los volúmenes.

5. CONCLUSIONES

En este experimento a escala real se ha realizado el seguimiento de un total de dieciséis bloques lanzados y de los fragmentos mayores generados tras su impacto con el terreno. Dada la novedad del procedimiento planteado ha sido necesario implementar un programa que nos permite rastrear fragmentos de roca, y determinar su posición espacial y velocidad de traslación. Para estos fragmentos, no es posible construir su modelo tridimensional, por lo que solo los fragmentos mayores a 0.02 m^3 pudieron ser seguidos. A pesar de esta limitación, la masa de los fragmentos seguidos representa entre el 81.3 y el 98.1 % de la masa del bloque inicial, con la excepción de uno de los bloques. Esto hace posible calcular los coeficientes de restitución y el balance energético de los bloques fragmentados.

Nuestra metodología permite la determinación de las trayectorias tridimensionales de los fragmentos así como las velocidades en cada punto, de especial interés en los instantes antes y después del primer impacto para calcular balances de energía y coeficientes de restitución. El seguimiento de los fragmentos nos ha permitido observar algunos aspectos menos conocidos como el hecho de que los fragmentos reboten con diferentes velocidades y que estas son significativamente superiores a las de los bloques que no rompen.

No ha sido posible definir un umbral energético que prediga si un bloque se fragmentará o no, lo que confirma los resultados de las pruebas realizado por otros grupos de investigación.

Los coeficientes de restitución obtenidos muestran un alto grado de solapamiento aunque se detecta una tendencia a que sean mayores para los bloques que rompen. La discriminación entre poblaciones mejora al utilizar la relación entre $V_{\text{máx}}/V_o$, que parece ser un buen descriptor del proceso de fragmentación. A pesar de que las condiciones de liberación de los bloques son muy similares, que estos golpean en la misma superficie de discontinuidad con solo pequeñas variaciones en las velocidades de incidencia, energías cinéticas de impacto y ángulos, los coeficientes de restitución obtenidos presentan una amplia gama de valores, tanto para los bloques que se rompen como para los que no. Este confirma observaciones previas sobre que algunos parámetros cinemáticos no son suficientes para determinar los valores del coeficiente de restitución.

6. AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido desarrollado en el marco del Proyecto de Investigación “Caracterización y modelado de desprendimientos de rocas” con el acrónimo RockModels, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España, y cofinanciado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) sobre el marco del Plan Estatal de Investigación Científico-Técnica e Innovación con código de referencia BIA2016-75668-P (AEI/FEDER,UE) y el proyecto de investigación “Avances en el análisis cuantitativo del riesgo de caída de rocas (QRA) incorporando desarrollos en geomática (GeoRisk)” con referencia PID2019-103974RB-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100 011033, Ministerio de Ciencia e Innovación (MCIN) y la Agencia Estatal de Investigación (AEI).

7. REFERENCIAS

- Asteriou, P., Saroglou, H. and Tsiambaos, G. (2012). Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficients of restitution for rock fall analysis. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Volume 54, Pages 103-113.
- Bourrier, F., Toe, D., Garcia, B., Baroth, J. and Lambert, S. (2021). Experimental investigations on complex block propagation for the assessment of propagation models quality. *Landslides*, 18:639-654.
- Bowman, E.T., Andrew Take W. (2014). The runout of chalk cliff collapses in England and France—case studies and physical model experiments. *Landslides* 12(2):225-239.
- Buzzi, O., Giacomini, A. and Spadari, M. (2012). Laboratory Investigation on High Values of Restitution Coefficients. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 45(1):35-43.
- Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., et al. (2008). MeshLab: An open-source mesh processing tool. In: 6th Eurographics Italian Chapter Conference 2008 - Proceedings.
- Corominas, J., Mavrouli, O., Santana, D. and Moya J. (2012). Simplified approach for obtaining the block volume distribution of fragmental rockfalls. In: Eberhardt E, Froese C, Turner AK, Leroueil S (eds) *Landslides and engineered slopes*, 2, pp. 1159–1164.
- Corominas, J., Matas, G. and Ruiz-Carulla, R. (2019). Quantitative analysis of risk from fragmental rockfalls. *Landslides* 16, 5–21.
- Crosta, G.B., Agliardi, F., (2004). Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4: 583-598.
- Crosta, G.B., Agliardi, F., Frattini, P., Lari, S. (2015). Key Issues in Rock Fall Modeling, Hazard and Risk Assessment for Rockfall Protection. G. Lollino et al. (eds.), *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 2*, Springer International Publishing
- De Blasio, F.V. and Crosta, G.B. (2014). Simple physical model for the fragmentation of rock avalanches. *Acta Mech.* 225(1):243–252.
- Dorren, L.K.A. and Seijmonsbergen, A.C. (2003). Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale. *Geomorphology* 56(1):49-64.
- Giacomini, A., Buzzi, O., Renard, B., Giani, G. (2009). Experimental studies on fragmentation of rock falls on impact with rock surfaces. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 46:708-715.

- Gili, J.A., Ruiz-Carulla R., Matas, G., Moya, J., Prades, A., Corominas, J., Lantada, N., Núñez-Andrés, M.A., Buill, F., Puig, C., Martínez-Bofill, J., Saló, Ll., Mavrouli, O. (2022). Rockfalls: analysis of the block fragmentation through field experiments. *Landslides*.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., and Agliardi, F. (2002). STONE: a computer program for the three dimensional simulation of rock-falls, *Comput. Geosci.*, 28, 1079–1093.
- Haug, Ø. T., M. Rosenau, K. Leever, Oncken, O. (2016). On the energy budgets of fragmenting rockfalls and rockslides: Insights from experiments, *J. Geophys. Res. Earth*, 121, 1310–1327.
- Lambert, S., Bourrier, F., Toe, D. (2013). Improving three-dimensional rockfall trajectory simulation codes for assessing the efficiency of protective embankments. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 60:26–36.
- Lan, H., Martin, D., and Lim, C. (2007). RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling, *Comput. Geosci.*, 33, 262–279.
- Leine R.I., Schweizer A., Christen M., Glover J., Bartelt, P. and Gerber W. (2014). Simulation of rockfall trajectories with consideration of rock shape. *Multibody Syst. Dyn.* 32, 241–271.
- Li, L. and Lan, H. (2015). Probabilistic modeling of rockfall trajectories: a review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 1: 1-14.
- Matas, G., Lantada, N., Corominas, J., Gili, J.A., Ruiz-Carulla, R., Prades A. (2017). RockGIS: A GIS-based model for the analysis of fragmentation in rockfalls. *Landslides* 14(5), 1565-1578.
- Matas, G., Lantada, N., Corominas, J., Gili, J.A., Ruiz-Carulla, R., Prades, A. (2020). Simulation of full-scale rockfall tests with a fragmentation model. *Geosciences*, 10 (5), 168, Special Issue "Rock Fall Hazard and Risk Assessment".
- Prades-Valls, A., Corominas, J., Lantada, N., Matas, G., Núñez-Andrés, M.A., (2022). Capturing rockfall kinematic and fragmentation parameters using high-speed camera system. *Engineering Geology*.
- Ruiz-Carulla, R., Corominas, J. and Mavrouli, O. (2017). A fractal fragmentation model for rockfalls. *Landslides*.
- Ruiz-Carulla, R., J. Corominas, J. A. Gili, G. Matas, N. Lantada, J. Moya, A. Prades, M.A. Núñez-Andrés, F. Buill and C. Puig, (2020). Analysis of fragmentation of rock blocks from real-scale tests. *Geosciences*, 10 (8), 308, Special Issue "Rockfall Hazard".
- Sarro, R., Mateos, R.M., García-Moreno, I., Herrera, G., Reichenbach, P., Laín L. and Paredes, C. (2014). The Son Poc rockfall (Mallorca, Spain) on the 6th of March 2013: 3D simulation. *Landslides* 11:493–503.
- Uzi, A. and Levy, A. (2018). Energy absorption by the particle and the surface during impact, *Wear*, 404-405, 92–110.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse V. (2011). Rockfall characterization and structural protection—a review. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 11:2617–2651.
- Wang, Y., Tonon, F. (2011). Discrete element modeling of rock fragmentation upon impact in rock fall analysis. *Rock Mech. Rock Eng.* 44:23–35.
- Ye, Y., Zeng, Y., Thoeni, K., Giacomini, A. (2019). An Experimental and Theoretical Study of the Normal Coefficient of Restitution for Marble Spheres. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52:1705–1722.
- Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vo. 22 (11): 1330 – 1334.
- Zhao, T., Crosta, G.B., Utili, S. and De Blasio, F.V. (2017). Investigation of rock fragmentation during rockfalls and rock avalanches via 3D discrete element analyses. *J. Geoph. Res. Earth Surf.*, 122, 678–695.