ENSAYOS DE CAMPO NECESARIOS PARA EXTENDER EL NIVEL DE SEGURIDAD EN LOS SISTEMAS FLEXIBLES DE PROTECCIÓN CONTRA DESPRENDIMIENTO DE ROCAS

En 2001 se publicó la primera directiva [7, 8] para la homologación de los kits de barreras dinámicas para la protección contra desprendimientos rocosos FOEN[1]. Este documento normativo estableció de forma rigurosa la metodología para ensayar los sistemas de barreras dinámicas, con el objeto de garantizar su correcto funcionamiento. Este procedimiento regulador fue muy bien acogido a nivel global, principalmente por entidades gubernamentales de países donde los problemas de desprendimientos de rocas tienen un peso muy importante, por este motivo se extendió, además de en centro Europa, a muchas regiones de los Estados Unidos, Australia y Japón. Los procedimientos de esta regulación aún son utilizados en muchos países montañosos con alta frecuencia de desprendimientos, para el diseño de las protecciones de viviendas, edificios públicos y carreteras con elevada intensidad de tráfico.

Roberto J. Luis-Fonseca[a].
Dr. Ing. Caminos, Canales y Puertos
Julio Prieto Fernández[a].
Ing. Minas
Carles Raïmat Quintana[a].
Dr. Ing. Civil
Armin Roduner[a].
Ing. Civil, MSc.
Helene Lanter[a].
Geólogo, MSc.
Manuel Eicher[a].
COO, MBA

[a]Grupo Geobrugg

1.- ANTECEDENTES

A partir de la experiencia de la directiva Suiza, con la activa participación de sus miembros, la EOTA[2], elaboró una Directiva Europea de Aprobación Técnica (ETAG[3] 027) [4] para estandarizar esta actividad a nivel europeo, que fue publicada el 1 de febrero de 2008, y que en julio de 2018 (debido a un cambio de estrategia y nomenclatura en la EOTA), devino en el actual documento regulador vigente (DEE[4]-340059-00-0106) [5], cuya puesta en práctica ha tenido diverso nivel de acogida en cada país de la Unión Europea, dependiendo de la variedad de procedimientos administrativos e influencias particulares presentes a nivel país. Aunque este es el orden cronológico, el nivel restrictivo o de mayor seguridad, siempre ha prevalecido en la metodología inicial descrita por la regulación de origen Suizo [7, 8].

En los últimos años, Geobrugg ha desarrollado un programa de investigaciones (I+D+i) en colaboración con WSL[5] -SLF[6], con la supervisión europea del TSÜS[7]. Dicha investigación ha concluido en la necesidad de ejecutar un riguroso paquete complementario de ensayos de campo en puntos sensibles de los kits de protección contra desprendimientos, que conlleva un gran paso de avance en la dirección de la seguridad [2].

El objetivo de este artículo es hacer un breve resumen de la situación normativa actual, recordando algunas diferencias metodológicas, y niveles de exigencia técnica en los documentos vigentes. Finalmente, se explican las novedades que a partir de 2020, se han implementado a nivel de ensayos, con el objetivo de robustecer el factor de seguridad en las protecciones.

2.- REALIDAD NORMATIVA ACTUAL

En Suiza, hasta el 31 de enero de 2018 estuvo vigente la directriz sobre el ensayo de tipo de barreras de protección contra caída de rocas [7] fechada en 2001 y su actualización de 2006 [8]. El FOEN subvencionó proyectos en los que se utilizaron barreras que pasaron el ensayo de acuerdo con esta directriz [1]. Desde 2001, un total de 32 barreras de protección de diversos fabricantes, se sometieron a ensayos, 28 de ellas cumplieron con los requisitos y cuyos certificados que se pueden consultar en la web de la FOEN: www.bafu.admin.ch/Typenpruefung

En 2018 FOEN hizo pública una guía complementaria al citado DEE denominada 'Conceptos básicos para evaluar la calidad de las barreras de protección contra caída de rocas y su cimentación' [1]. El propósito principal de esta guía es ayudar a los usuarios de las barreras de protección contra caída de rocas a determinar si los productos en el mercado cumplen con sus requisitos y necesidades. El contenido de estas instrucciones consiste esencialmente en información sobre el estado más actual del conocimiento, sobre cómo se pueden evaluar las barreras de protección con respecto a su idoneidad práctica en una aplicación específica. Esta idoneidad práctica y el cumplimiento de las normas y directrices es uno de los requisitos previos para recomendar la utilización de una barrera de protección contra caída de rocas específica. En algunas zonas geográficas, estos requisitos van más allá de las exigencias de puesta en el mercado y uso de las barreras según el DEE actualmente vigente [5], ya que la idoneidad práctica de las barreras de protección es el factor principal a la hora de examinar los proyectos. Por lo tanto, es posible que una barrera de protección contra caída de rocas esté aprobada de acuerdo con el DEE, pero no debe usarse en proyectos debido a la falta de idoneidad práctica en el terreno. Esto debe ser aclarado en cada caso individual. Un ejemplo de esto es la falta de requisitos previos para el correcto anclaje de dichas barreras.

Como se ha descrito, en 2008 la Unión Europea introdujo el ETAG 027 [4] un procedimiento de aprobación y ensayo de conformidad para las barreras de protección contra caída de rocas. El 21 de junio de 1999, la Confederación Suiza y la UE concluyeron un acuerdo sobre el reconocimiento mutuo de las evaluaciones de la conformidad [21]. Como resultado de este acuerdo, la ETAG 027 a partir de 2018 también pasó a ser válida en Suiza. Dado que el acuerdo no permite ningún método de evaluación específico de un país, que se desvíe de la ETAG 027, Suiza derogó la directiva introducida en 2001 [7, 8]. Debido al Reglamento de Productos de Construcción (UE) No. 305/2011, durante los años 2016 a 2018 la EOTA trabajó en la citada conversión de la ETAG 027 en un DEE. Como consecuencia de este cambio, ya no se puede demostrar la utilidad de un producto empleando un DITE[8], ahora se emplea un ETE[9], que recoge el rendimiento según criterios seleccionados. Esto luego sirve como base para emitir una Declaración de Prestaciones (DoP[10]) y el marcado CE (ambos por parte del fabricante).

El procedimiento de evaluación europeo tiene como objetivo garantizar que solo se comercialicen barreras de protección contra caída de rocas de alta calidad en la Unión Europea (UE). El DEE se expresa principalmente sobre la evaluación de la aplicabilidad, la evaluación y certificación de la conformidad y el marcado CE. Los ensayos de campo son necesarios para obtener la evaluación técnica europea de un kit para barreras de protección contra caída de rocas. Los detalles técnicos para la realización de estos ensayos son los que se especifican principalmente en el DEE. Entre otras cosas, se describen los componentes individuales de una barrera de protección y se explican los términos utilizados. Según el DEE, organismos reconocidos pueden emitir evaluaciones técnicas europeas (ETE) para barreras de protección contra caída de rocas. Además, el DEE designa las tareas a cumplir por los organismos

responsables y define los procedimientos de ensayo. Finalmente, también describen las tareas del fabricante para asegurar la calidad de la producción, es decir, el procedimiento de control de producción en fábrica.

2.1. Comparación entre las directrices normativas

Los procedimientos de ensayo descritos en las directrices suizas y europeas son similares. Sin embargo, es necesario mencionar algunas diferencias, Volkwein [19] muestra algunos ejemplos. Según la directriz suiza se debe registrar la energía de trabajo (SEL[11]) que se necesita para mantener una barrera después de un ensayo con el 50% del nivel máximo de energía de impacto (MEL[12]) y se verifica la documentación sobre si la instalación de un sistema es factible y se puede realizar libre de error. Por su parte, la directriz europea prescribe dos impactos secuenciales (con el 33% del nivel máximo de energía, SEL) sobre la misma posición y exige un control de producción en fábrica para garantizar la consistencia del rendimiento del producto.

Los ensayos según la directriz suiza requieren bloques en caída libre vertical que impacten una barrera montada en una pared rocosa (casi) vertical, mientras que la directriz europea también permite impactos inclinados y horizontales. Las características comunes y las diferencias entre las directrices suizas y europeas se presentan en [9]. Las instrucciones de la guía práctica suiza [1] están destinadas a ayudar a los usuarios a encontrar el producto adecuado para sus requisitos y necesidades. El informe describe el estado actual de los conocimientos sobre cómo evaluar los kits de protección contra caídas de rocas con respecto a su idoneidad práctica para aplicaciones específicas. Pero con las directrices actuales es posible que un kit de protección contra caídas de rocas esté aprobado según el DEE, sin embargo, no sea adecuado para un escenario específico debido a la falta de aspectos prácticos en el terreno.

Desde 2001 en Suiza, se ha aplicado un procedimiento de ensayos con $\omega = 90^\circ$ (ángulo entre la trayectoria del bloque y la horizontal) es decir caída libre - vertical. Por el contrario, el actual DEE-340059-00-0106 [5] (y desde el inicio en 2008 la ETAG 027 [4, 19, 20]) permite ángulos de trayectoria de $0^\circ \leq \omega \leq 90^\circ$, es decir, ensayos horizontales e inclinados.

Hasta 2013, con una excepción, las barreras de protección aprobadas por ETAG 027 se ensayaron con $\omega \sim 30^\circ$ o $\omega = 90^\circ$. Un estudio comparativo del WSL-SLF [16] mostró que estos ángulos tienen influencia en las fuerzas máximas medidas y la distancia de frenado. Por otro lado, los elementos de frenado se estiran hasta un 50% más con un ensayo vertical que con un ensayo inclinado. Además, la altura residual en un ensayo vertical es aproximadamente un 15% más baja que después de un ensayo inclinado (~10 % de la altura nominal). Esto significa que: Ambos procedimientos ($\omega \sim 30^\circ$ o $\leq 90^\circ$) pueden considerarse equivalentes si el ensayo DEE se realiza en caída libre.

Sin embargo, si el ensayo según el DEE se realiza inclinado con $\omega > 30^\circ$, se deben proporcionar evidencias adicionales:

a. la elongación de los elementos de frenado debe tener una reserva del 50% con respecto a la elongación en el ensayo MEL inclinado.

b. si la resistencia de los elementos de frenado aumenta con el aumento de la elongación, las partes de la barrera conectadas a los elementos de frenado (cables, soportes, redes) deben tener las necesarias reservas de capacidad de carga.

c. la estructura de todo el sistema debe permitir la mayor elongación del freno.

d. la altura de la barrera de protección debe seleccionarse de modo que se compense un 15% menos de la altura útil restante (~10% de la altura nominal).

Los ensayos realizados con ángulos inferiores a 30° no deben considerarse equivalentes a los verticales e inclinados más pronunciados. En algún caso los ensayos con $\omega \sim 0^\circ$ han demostrado que los bloques de ensayos pueden ser lanzados hacia atrás fuera de la barrera después del proceso de frenado y, por lo tanto, las mediciones necesarias de algunos valores del sistema de protección, no se pueden realizar correctamente. Los resultados del estudio comparativo solo se aplican de forma limitada para inclinaciones de trayectorias muy pequeñas. Para hacer justicia a las diversas aplicaciones y requisitos resultantes de la ubicación de las barreras utilizadas, se debe incluir un procedimiento de ensayo o las evidencias antes enumeradas en los criterios de idoneidad de las ofertas. Los siguientes documentos deben ser entregados para evaluar los criterios especificados:

- documentación técnica (incluidos planos y cálculo de las solicitaciones relevantes)
- instrucciones de montaje
- manual de mantenimiento

Además de las dimensiones, pesos y calidades de los materiales, la documentación técnica también incluye información sobre el montaje de los elementos. También se requieren planos de diseño e información especial. Los puntos importantes aquí son las trayectorias del proyectil en la red y las fuerzas decisivas en los cables de soporte. Durante el ensayo, las fuerzas que se miden en cables de soporte, tensión y retención deben resumirse en la documentación técnica. Esto permite comparar las barreras de protección de forma individual. Además del orden de ensamblado de los elementos, las instrucciones de montaje también

deben contener información sobre el replanteo. Además, la información adicional sobre el trabajo de perforación o los posibles riesgos de accidentes es valiosa. El manual de mantenimiento contiene información sobre la inspección, la reparación y el procedimiento de reparación.

2.2. Requisitos técnicos prioritarios a considerar

La calidad y funcionalidad de una barrera de protección instalada en el campo no solo depende de la calidad de la propia barrera, sino también de muchos otros factores [11]. Para que una barrera funcione correctamente y de la manera prevista a largo plazo, se deben observar las siguientes áreas:

- dimensionamiento de la barrera y posicionamiento en el terreno.
- anclajes y cimentaciones.
- instalación insitu de la barrera. Calidad en la ejecución de los anclajes y las cimentaciones
- control, mantenimiento y reparación.

Varios actores son responsables de mantener una buena calidad en las áreas anteriores. Además del fabricante, también deben ser considerados responsables el proyectista, el contratista y el propietario (por lo general la administración). Solo si todos los involucrados son conscientes de su responsabilidad, se puede velar por la calidad e incrementar la seguridad el funcionamiento de las barreras de protección.

La experiencia con la utilización previa de barreras de protección [1] ha demostrado que sólo aquellas que cumplen con altos requisitos de calidad son adecuadas para garantizar la seguridad que se les exige. Hay un grupo de criterios que tienen prioridad y deben cumplirse al 100%, de lo contrario, faltarán elementos cruciales para el funcionamiento del sistema de seguridad en general. Si, por ejemplo, los anclajes son demasiado débiles debido a cálculos incorrectos, la red más fuerte no sirve de nada.

Estos requisitos técnicos se pueden encontrar en los documentos del fabricante. Por un lado, son los documentos de la Evaluación Técnica Europea (ETE) y, por otro lado, los documentos especialmente solicitados sobre la documentación técnica, las instrucciones de montaje o el manual de mantenimiento. Los requisitos prescritos se refieren a los siguientes puntos:

- trayectorias del cuerpo lanzado sobre la red (diagramas de distancia/tiempo desde el primer contacto con la red hasta la elongación máxima, incluidos los datos)
- masa, velocidad, distancia de frenado y tiempo de frenado durante el ensayo
- barrera categoría A: altura residual $h_R \geq 50\%\ h_N$ después del ensayo MEL
- inclinación del talud de referencia
- altura nominal h_N y altura residual h_R en los ensayos
- croquis de los anclajes
- cargas relevantes en los anclajes
- deflexión máxima (distancia de frenado)
- arriostramiento intermedio (separación de cables) para barreras largas
- La altura residual h_R se mide según el ensayo MEL y debe ser superior al 50% de la altura nominal ($h_R \geq 50\%\ h_N$). Si el procedimiento de ensayo se llevó a cabo con un paramento inclinado (inclinación de la trayectoria del bloque $\omega > 30°$), entonces la altura residual debe aumentarse $h_R \geq 65\ \%\ h_N$ para compensar el efecto de la altura residual un 15 % más baja en este tipo de ensayo. Las solicitaciones relevantes deben calcularse utilizando la metodología presentada por FOEN según [1].

La distancia máxima de frenado según las clases de energía no debe exceder el valor especificado en la Tabla 2. La función para calcular la distancia máxima de frenado w es:

$$w = 1{,}534 \times \ln(\text{valor MEL en kJ}) - 3{,}06 \quad (1)$$

Nivel de energía	0	1	2	3	4	5	6	7	8
MEL ≥	100	250	500	1000	1500	2000	3000	4500	>4500
Elongación máx.	4	5,5	6,5	7,5	8,5	9	9,5	10	w*

Tabla 1. Distancias de frenado en función de la clase energética [1] -* emplear la expresión (1)

En la Tabla 2, la distancia de frenado calculada w se redondea al siguiente medio metro. En el caso de que la barrera contenga elementos de frenado solo en los anclajes laterales, se requiere una restricción en la longitud de la barrera. Puede ser un máximo de 60 m sin anclaje intermedio con separación de cables de suspensión y frenos. El arriostramiento intermedio debe estar registrado y descrito en la documentación técnica y en las instrucciones de montaje. Si una barrera de protección no cumple uno de los criterios anteriores, no debería adquirirse ni utilizarse.

Si los documentos presentados durante la adquisición no se pueden utilizar para demostrar completamente que se han cumplido los requisitos técnicos prioritarios, se debe realizar un ensayo en una instalación independiente para verificar la calidad. Los criterios necesarios se pueden medir y evaluar. Esta comprobación sirve como inspección de entrada y debe realizarse antes de la adquisición definitiva. También se indica una verificación si existen dudas justificadas y significativas sobre la calidad de la barrera. La adaptabilidad de las barreras en el terreno es importante. La construcción también debe poder erigirse en terrenos difíciles y en espacios relativamente reducidos. Las barreras deben poder instalarse de la forma más segura y sencilla posible. Solo las barreras bien mantenidas cumplen su función.

En el caso de barreras donde los trabajos de mantenimiento se pueden realizar de forma fácil y segura, también se realizan periódicamente los trabajos necesarios. Por lo tanto, las barreras que son fáciles de mantener tienen una ventaja. Todos estos criterios adicionales no se tienen en cuenta en la Evaluación Técnica Europea (ETE), pero es recomendable la evaluación por puntos que propone FOEN. Para más detalles consultar anexos A1-A5 de la guía 'Conceptos básicos para evaluar la calidad de las barreras de protección contra caída de rocas y su cimentación' [1].

2.3. Consideraciones particulares para los puntos de anclaje

En la documentación técnica debe indicarse claramente el cálculo de las solicitaciones en los cables [1]. La base para su determinación son las fuerzas medidas durante el ensayo y las dimensiones de la barrera utilizada en el ensayo. Las cargas equivalentes estáticas se calculan a partir de las solicitaciones medidas en campo. Estos deben especificarse en tamaño y dirección. En el caso de múltiples mediciones de los esfuerzos en los cables de soporte, se debe comprobar qué anclaje ha estado sometido a la mayor carga. Las cargas estáticas equivalentes deben especificarse como fuerzas de anclaje.

Hoy en día, los avances tecnológicos en los sistemas de medición están permitiendo obtener las solicitaciones en las cimentaciones y anclajes que hace una década eran muy costosas. Esto es relevante para los fabricantes, ya que las incertidumbres a la hora de realizar ensayos están disminuyendo. Estas incertidumbres se deben considerar mediante la introducción de un factor de seguridad [2]:

- las fuerzas medidas en la homologación incluyen no sólo las condiciones más estrictas de la caída vertical, sino también los efectos compensadores de la posición central en la que los bloques impactan la red. Las deformaciones excéntricas cerca de los postes o más cerca de los cables de soporte someterán a los cables individuales a fuerzas adicionales que aún no se conocen.
- Por esta razón, las fuerzas máximas medidas resultantes de la prueba principal con 100% de energía deben incrementarse en un 30%. Estas fuerzas incrementadas se deben introducir en los cálculos posteriores como cargas estáticas equivalentes (2).

$$Q_e = 1{,}3 \cdot F_{max} \qquad (2)$$

donde: Q_e es la carga estática equivalente y F_{max} es la fuerza medida en el ensayo

Si la aplicabilidad no se puede evaluar de manera concluyente usando los criterios descritos por FOEN, se debe solicitar un ensayo de extracción. Se imponen requisitos especialmente altos a los anclajes y cimientos. Estos deben soportar un impacto sin sufrir daños, ya que la afección suele ser difícil de determinar. Especialmente cuando están bajo tierra. Un reemplazo o reparación de una base dañada es complejo y costoso. Por lo tanto, deben hacerse robustos. La base para el uso de barreras de protección en proyectos son las cargas estáticas equivalentes o las cargas de anclaje especificadas en los documentos del fabricante. Sin embargo, tienen en cuenta las condiciones durante el ensayo y no son idénticas a las del proyecto concreto. Las medidas anticorrosivas necesarias para los anclajes de acero sirven para proteger contra la corrosión anódica. Al anclar las barreras de protección contra la caída de rocas, se utilizan tres niveles de protección. Normalmente se utiliza el nivel de protección 1. Esto significa que se insertan al menos 20 mm de mortero de cemento entre el elemento de tensión y la pared del pozo. Además, también se puede exigir un espesor de sacrificio (oxidación) de 2 mm. Si la vida útil planificada de la barrera es solo temporal, no son necesarias medidas especiales (nivel de protección 0). Si, por el contrario, se imponen requisitos más altos a la protección contra la corrosión, se debe utilizar el nivel de protección 2. En tal caso se recomienda el enfundado del anclaje (doble protección). El espesor del mortero de cemento interior debe ser de al menos 5 mm para la producción en fábrica y se deben aplicar al menos 20 mm de mortero de cemento en obra (Tabla 2).

Nivel de protección	Anclajes de barra o micropilote (bases)	Anclaje flexible (cables)
0	sin medidas especiales	sin medidas especiales
1 1a	• mortero de cemento de 20 mm entre la armadura la pared del taladro • espesor de sacrifico 2 mm	galvanizado
2	• manguito de plástico corrugado con extremo perforado. • el tubo de revestimiento se introduce en el hormigón. • mortero de cemento de 20 mm entre el tubo de revestimiento y la pared del taladro • entre el la armadura y el taladro, mortero de cemento de 5 mm para la producción en fábrica	cabeza de anclaje hormigonada, solape de al menos 50 mm
3	• NO se utiliza para barreras de protección contra la caída de rocas	

Tabla 2. Medidas de protección contra la corrosión en función de los niveles de protección [1].

En las proximidades de líneas ferroviarias (de corriente continua), también se debe utilizar el nivel de protección 2. Es importante asegurarse de que los micropilotes estén eléctricamente aislados.

El mortero para la inyección de anclajes y micropilotes debe seguir las instrucciones vigentes y se debe someter a los ensayos que describe la DEE 340059-00-0106.

Para más detalles consultar anexos B1-B3 de la guía 'Conceptos básicos para evaluar la calidad de las barreras de protección contra caída de rocas y su cimentación' [1].

2.4. Requisitos complementarios planteados por organizaciones gubernamentales locales

Además de en Suiza, otras organizaciones gubernamentales han comenzado a definir criterios de desempeño complementarios, Austria, Francia e Italia, destacando la propuesta austriaca de WLV[13] [14].

El Servicio Austriaco para el Control de Torrentes y Avalanchas (WLV) es un departamento dentro del Ministerio Federal de Agricultura, Silvicultura, Medio Ambiente y Gestión del Agua, responsable de la competencia técnica y la gestión de la construcción para todo lo relacionado con riesgos naturales como inundaciones, deslizamientos de tierra, desprendimientos y avalanchas que presentan un alto riesgo de seguridad para la población, vivienda, e infraestructura.

En 2002, WLV publicó un documento titulado 'Directrices para la verificación de barreras de protección contra de caída de rocas' que se utilizó como base para probar y verificar los sistemas, que se actualizó en 2005, y en 2010 se publicó una versión revisada de la directriz que abordaba la adopción de las directrices ETAG 027 en Europa.

Esta propuesta austriaca de WLV [14] también confirma la necesidad establecer la verificación de la capacidad del sistema siguiendo ensayos de campo a escala 1:1, sin embargo, no hace énfasis en el ángulo del ensayo (promoviendo en empleo de ensayos casi horizontales), simplemente añade algunos requisitos complementarios:

- El bloque de ensayos debe tener una densidad mínima de 25kN/m³
- El kit ensayado estará anclado de forma análoga a como estaría durante la aplicación en obra.
- La velocidad del bloque en el impacto debe ser de 25 m/s (± 3%)
- Las fallas de los componentes (p.e., cables rotos en la red primaria, grilletes, cables de retención o cables de costura, postes o pasadores entre el poste y la placa base rotos) no están permitidas para sistemas con una capacidad de 1.000 kJ o menos. Se puede aceptar la falla de componentes individuales para sistemas que excedan los 1.000 kJ si el Organismo de Evaluación Técnica (OET[14]) certifica que el sistema aprobó el examen de certificación, con o sin condiciones.
- La deformación plástica es esperable y admisible siempre que esté documentada, los ensayos han de ser supervisados y documentados OET.

La consideración de factores de seguridad parciales para el proyecto (mayoración o minoración), en función de la importancia de emplazamiento (impacto en la vida humana e infraestructuras), es quizá la aportación de mayor relevancia de la propuesta austriaca (tabla 3).

Factores de seguridad parciales	1.- Bajo impacto en vidas humanas o consecuencias económicas modestas (pe. infraestructuras agrícolas, graneros, invernaderos, almacenes)	2.- Impacto medio en vidas humanas o consecuencias económicas considerables pe. edificios destinados a vivienda u oficinas)	3.- Alto impacto en vidas humanas o consecuencias económicas significativas (pe. edificios públicos, estadios, salas de conciertos, escuelas, hospitales)
Energía del impacto	1,00	1,05	1,15
Capacidad de absorción	1,00	1,05	1,15
Altura de rebote	1,05	1,10	1,30
Altura de barrera	1,00	1,05	1,10
Elongación	1,20	1,20	1,20

Tabla 3. Factores de seguridad de diseño en función de la importancia del emplazamiento [14].

De forma complementaria se establecen ciertos límites para los espacios o aberturas máximos remantemente en las barreras tras el impacto en el MEL (tabla 4).

También se hacen recomendaciones sobre el sistema de anclajes referidas a las normativas locales de Austria, como por ejemplo:

- El diámetro mínimo del taladro será de 90 mm excepto en roca firme, con una cobertura mínima la armadura de refuerzo de 20 mm
- La distancia mínima entre micropilotes es de 1 m a excepción de los anclajes de placa base
- La armadura de refuerzo (barra) estará centrado en el taladro
- La inclinación mínima es de 15° respecto a la horizontal
- La inyección se realizará desde el fondo del orificio hacia la superficie
- Los micropilotes que se someten principalmente a esfuerzos de compresión deben utilizar tubos de refuerzo, bloques de hormigón o similar en los primeros 0,5 m en roca blanda o fracturada y al menos 1 m en suelo
- El taladro debe estar orientado de tal forma que se consiga minimizar los esfuerzos a cortante en el anclaje

La experiencia con la utilización de sistemas de protección, ha demostrado que, sólo aquellos que cumplen con los más altos requisitos de calidad, son capaces de garantizar la seguridad necesaria

Importancia del emplazamiento	Desperfectos inadmisibles durante el ensayo MEL
1	No hay criterios adicionales; la directiva EOTA es suficiente
2	Tras el impacto: • no deben producirse aperturas en la barrera ³ 0,4 m en la zona situada por debajo de la altura residual, entre el cable de soporte inferior y el terreno. • no se deben formar aperturas laterales entre la red y los postes extremos ³ 10 % de la altura nominal, cuando los campos laterales (extremos) se encuentran dentro del área de peligro. • no puede producirse roturas en la red principal, ni en los cables de soporte o retención. • se admite la rotura de la conexión entre la red y los cables de soporte, si se es capaz de generar un nuevo límite de red con capacidad de carga y conexión apropiada.
3	Tras el impacto: • no deben producirse aperturas en la barrera ³ 0,2 m en la zona situada por debajo de la altura residual, entre el cable de soporte inferior y el terreno. • no se deben formar aperturas laterales entre la red y los postes extremos ³ 10 % de la altura nominal, cuando los campos laterales (extremos) se encuentran dentro del área de peligro. • no puede producirse ninguna rotura en la red principal, ni en los cables de soporte o retención, aunque se permite la rotura de hilos de un cordón, siempre que no se trate de un cordón completo. • no se admite la rotura de la conexión entre la red y los cables de soporte.

Tabla 4. Control opcional de aberturas según la importancia del emplazamiento [14] (* Si las aberturas laterales son mayores o iguales al 10% de la altura nominal, la longitud total de la línea de barrera debe prolongarse en medio tramo. Si el tramo extremo se encuentra fuera del área peligrosa, esta condición no ha de ser considerada).

Por su parte en Francia existe la 'Normativa nacional para pantallas flexibles para la detención de bloques rocosos del CEREMA[15]' [3], que recomienda para complementar la DEE lo siguiente:

- Considerar la información del producto, dada en particular por ensayos a escala natural, para diseñar una estructura y adaptarse a la multiplicidad de marcado CE para barreras.
- Tener noción de obra y no de producto: el producto debe adaptarse al emplazamiento y no al revés.
- Principio básico (Tabla 5): emplear un catálogo de posibles especificaciones de la estructura para su dimensionamiento (especificación principal) y la elección de un producto adaptado a las características particulares esperadas del funcionamiento de la estructura de protección (especificación secundaria).

Especificación	Tipo	Método de justificación definido	Observaciones
nivel de energía efectiva	Principal	Sí	indispensable
altura efectiva	Principal	Sí	indispensable
longitud efectiva	Principal	Sí	indispensable
elongación máxima	Principal	Sí	proximidad al objeto a proteger
huella máxima	Principal	Sí	zona de implantación restringida
altura residual efectiva	Principal	Sí	según el nivel de servicio
faldones	Principal	Sí	irregularidades topográficas
costes de mantenimiento	Secundaria	Sí	precio teniendo en cuenta la durabilidad de la obra
costes de reparación	Secundaria	Sí	precio teniendo en cuenta la durabilidad de la obra
vida útil contra la corrosión	Secundaria	Sí	precio teniendo en cuenta la durabilidad de la obra
apertura de la red	Secundaria	Sí	Caída de bloques pequeños
longitud máxima de los tramos	Secundaria		a mayor dimensión mayor eficacia en obra
huella mínima	Secundaria	Sí	zona de implantación restringida
posibilidad de helitransporte	Secundaria	Sí	zona de difícil acceso
independencia de los tramos	Secundaria	No, a título informativo	necesidad de minimizar la exposición al riesgo, precio en función de la duración de la obra, a mayor dimensión mayor eficacia en obra
tiempo de instalación requerido	Secundaria	No, a título informativo	necesidad de minimizar la exposición al riesgo
compensación no desechable	Secundaria	No, a título informativo	zona de acceso limitado, naturaleza del problema
tipo de anclaje para los cables	Secundaria	No, a título informativo	zona natural, zona de acceso difícil

Tabla 5. Especificaciones principales y secundarias según CEREMA [3].

Como dato adicional, se requiere al fabricante por norma general, además de la DoP y del Certificado de Marcado CE, el manual de instalación en obra, así como de la guía de utilización, mantenimiento y reparación del sistema a instalar.

En el caso específico de Italia se añaden recomendaciones de proyecto que aparecen recogidas en la UNI[16] 11211 [18], que no guardan relación directa con las exigencias al kit de protección contra desprendimientos, solamente propone el uso del SEL en vez del MEL como criterio de diseño, lo cual es tal vez muy conservador. La norma UNI EN 11211 se publicó en 2012 y fue revisada durante los años siguientes. Un capítulo más a los 4 escritos inicialmente, más algunos apéndices se añadieron y la última revisión se publicó en octubre de 2018. La comisión responsable de esta norma está compuesta por fabricantes, técnicos de las principales autoridades italianas implicadas en las medidas de protección contra los desprendimientos de rocas, pero también por ingenieros y contratistas especializados.

La parte más importante para el diseño se encuentra en el capítulo 4, donde se enumeran todos los procedimientos que se deben considerar durante el diseño del proyecto. Entre ellos se encuentra, por ejemplo, una prescripción relativa al número de módulos funcionales que componen toda la barrera. Por motivos específicos, puede suceder que una barrera deba tener una longitud inferior a 30 m, que es la longitud única teórica ensayada según [5]. La norma UNI 11211-4 permite la instalación de 20 o incluso 10 metros si: la barrera se ensaya (y se certifica) en el campo para tales

longitudes o la energía calculada se multiplica por un Factor de Seguridad, que aumenta la clase de absorción de energía según DEE.

En cuanto a los factores de seguridad, el enfoque de la norma sigue las reglas básicas de los Eurocódigos, amplificando las acciones y reduciendo las reacciones. Para las medidas contra desprendimientos de rocas, por ejemplo, un punto crucial es la topografía de la zona estudiada. Cuanto mayor sea el detalle (escala), menor deberá ser el factor de seguridad parcial que tenga en cuenta las incertidumbres restantes. Lo mismo se aplica a las dimensiones de bloque de ensayo y varios otros aspectos o parámetros que pueden afectar los resultados del estudio (es decir, los resultados de energía y altura de rebote, tomados en su percentil 95% en un cierto punto de verificación de la sección de análisis).

Aunque dentro de la UNI 11211 se menciona varias veces la antigua ETAG 27 [4], en ningún caso se hace referencia al DEE [5], luego no está actualizada. Finalmente, esta norma se corresponde con los tipos/ modelos de barreras contra caída de rocas disponibles en el mercado. Esta incongruencia ocasiona que se puedan realizar diseños (proyectos) en los que, por ejemplo, se especifique una barrera de 3.000 kJ de energía con una altura nominal de 3 m, o una barrera de energía de 1.000 kJ con una altura nominal de 6 m.

Aunque el diseño sea formalmente correcto, siguiendo el enfoque de la UNI 11211, puede resultar que se proponga un tipo de barrera contra caídas de rocas que no sea distribuida por nadie, simplemente porque no está certificada según el DEE vigente. Esta es la cuestión principal: la UNI 11211 no cuestiona la validez de los DEE disponibles. La realidad es, sin lugar duda contradictoria, la ETAG 27 (no vigente) está destinada a productos mientras la UNI 11211 a métodos y procedimientos de diseño.

3.- ÚLTIMAS NOVEDADES EN ENSAYOS, PARA EL INCREMENTO DE LA SEGURIDAD Y LA EFECTIVIDAD

Los cambios en la gestión de la responsabilidad en la certificación por parte de la EOTA durante 2018 han dado un vuelco en la interpretación de los certificados y de alguna manera en lo más importante, la responsabilidad. A partir de la aparición de los DEE, aun cuando el fabricante recibe un certificado emitido por una entidad legal de certificación, es el propio fabricante quien se responsabiliza con la calidad del sistema y sus prestaciones, quedando en sus manos toda la responsabilidad ante el cliente final, lo que no cambia en ningún caso es el procedimiento de ensayo, que ya venía definido desde 2008 con la ETAG 027.

En cualquier caso, los ensayos descritos en las directrices actuales no representan las condiciones reales y, por tanto, se dan problemas de rendimiento que conducen a fallos en sistemas reales. En particular el procedimiento actual según [5] hace que sea muy difícil para los clientes y proyectistas evaluar una solución que pueda diseñarse de acuerdo con el riesgo, sin tener que sobredimensionar un sistema, lo que a su vez provoca considerables costos adicionales evitables.

Ciertamente, las barreras contra caídas de rocas se han consolidado en todo el mundo como una medida de protección eficaz. Al mismo tiempo, el nivel de absorción de energía de los sistemas actuales se ha multiplicado por 6, lo que puede justificar la adaptación del procedimiento de ensayos. Uno de los resultados de los experimentos a gran escala es que es posible estructurar ensayos adicionales, similares a los que las autoridades exigen desde los años 90. Estos ensayos deberían realizarse de forma adicional a los requerimientos que plantea el DEE para que los proyectistas y los propietarios de la obra, tengan más certeza sobre la capacidad de toda la superficie protectora.

Desde 2020 en colaboración con WSL-SLF, Geobrugg comienza a desarrollar un conjunto de ensayos adicionales para satisfacer estas necesidades del mercado, elaborando un paquete de recomendaciones complementarias resultantes de investigaciones y ensayos de campo (múltiples impactos) a escala natural, que va más allá de las enmiendas o requisitos adicionales antes descritos y que sin duda ayudan a incrementar el Coeficiente de Seguridad de las protecciones contra caída de rocas [2, 17]. En la figura 1 se muestra de forma esquemática cuál es el nivel de seguridad hasta hoy conseguido por las barreras ensayadas según las normas vigentes, incluidos los complementos citados. El impacto se produce en medio del tramo funcional central, con ello se garantiza un área (verde) donde la barrera cumple al 100% con todos los requerimientos establecidos, en la medida el impacto real se aleja de este punto central, la seguridad ira disminuyendo (transición del verde al rojo en el mapa de calor).

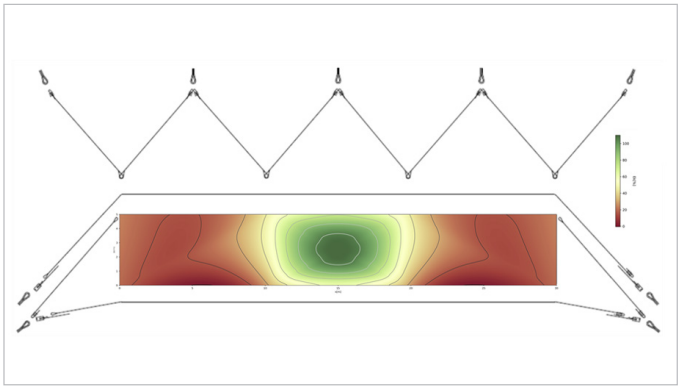

Fig. 1. Distribución de la energía en porcentaje acuerdo con las directivas actuales [2, 17].

Sin embargo, las expectativas del usuario o cliente final de los sistemas son realmente mucho mayores (Figs. 2 y 3), y si bien es cierto que la práctica ha demostrado que los sistemas ensayados según la directiva FOEN de 2001-2006 [7, 8], son muy eficientes y efectivos en una extensa área dentro de los tramos funcionales central y lateral, también es cierto que el procedimiento y ensayos de campo a realizar, para dar garantía a esta afirmación no estaban definidos hasta 2020.

La experiencia acumulada, así como ensayos adicionales realizados directamente sobre los postes y otros puntos críticos (fig. 10), permite extender el área de seguridad en la protección. Como regla general, hay que considerar que el bloque impacta en la zona inferior de la barrera, el contacto con el terreno es cercano y por tanto la disipación de energía a través del suelo suele ser significativa. Esto llevaría a la figura 3, donde la superficie de máxima protección se puede extender hasta el área inferior de la barrera.

Criterios de diseño [12] que garantizan un enfoque más seguro de la aplicación de los kits de protecciones contra desprendimientos (fig. 4):

1. Utilizar como base EOTA [5] garantizando la clase A para hR
2. Emplear ensayo vertical caída libre con contraste de ensayos en terreno natural [2, 6, 7]
3. Mantener criterios de control de la elongación según FOEN [6, 7]
4. Mantener racionalidad de los dispositivos de freno en U con la mejor respuesta tenso - deformacional
5. Controlar las aperturas post impacto según [14]
6. Realizar ensayo de impacto MEL excéntrico según [2]
7. Realizar ensayo de impacto MEL en sección extrema según [2]
8. Realizar ensayo de impacto MEL en zonas críticas (separación de cables) según [2]

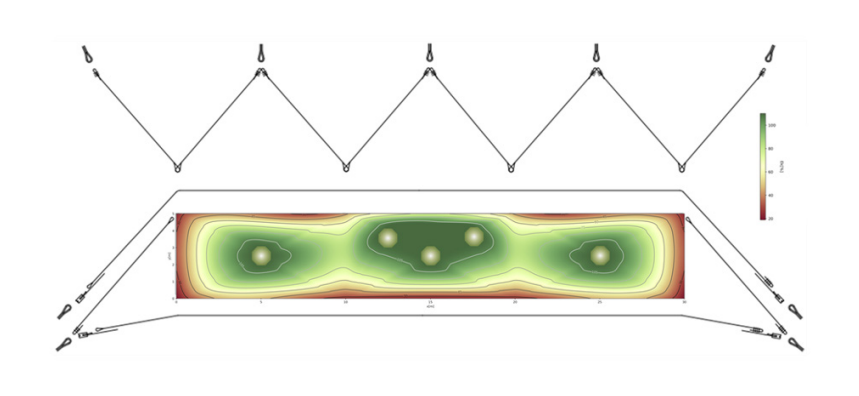

Fig. 2. Esquema de la distribución teórica de energía (en % de MEL) en la superficie de la barrera, considerando el ensayo en terreno natural y los ensayos verticales adicionales en puntos críticos la superficie [2, 17].

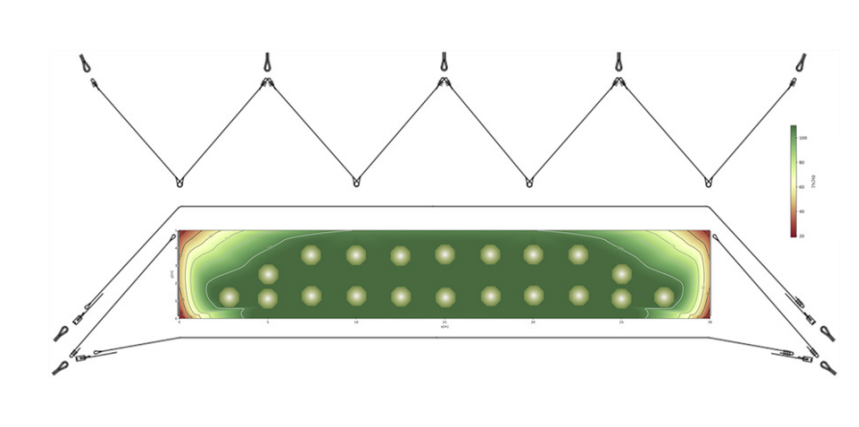

Fig. 3. Esquema de la distribución teórica de energía (en % de MEL) en la superficie de la barrera, considerando el ensayo en terreno natural, los ensayos verticales adicionales en puntos críticos de la superficie protectora y la experiencia acumulada sobre caída de rocas y comportamiento de la barrera [2, 17].

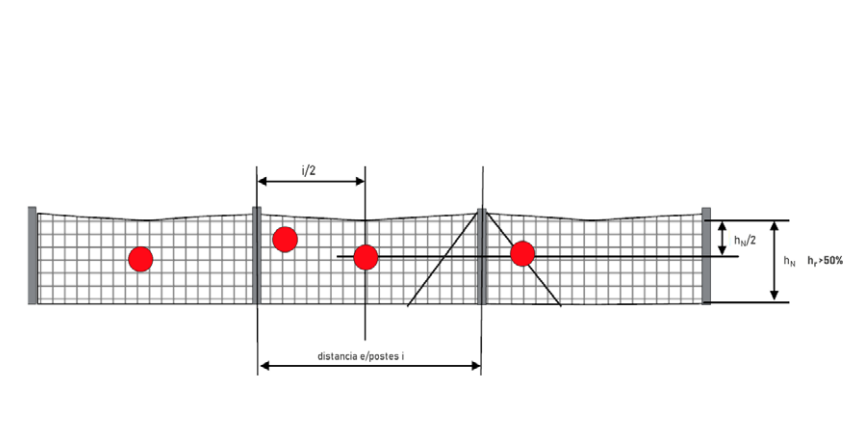

Fig. 4. Esquema puntos críticos para ensayo según nuevo procedimiento extendido.

A continuación, un ensayo a escala 1:1 sobre ladera natural en el Puerto de Flüela en Suiza (fig. 5), donde se pueden observar la influencia de los impactos excéntricos en condiciones reales sobre la barrera, así como la influencia de la rotación, forma y dimensiones del bloque de ensayo, en la energía del impacto.

Fig. 6. Posición aproximada de los 30 puntos de impacto de los ensayos de campo en el Puerto de Flüela [2].

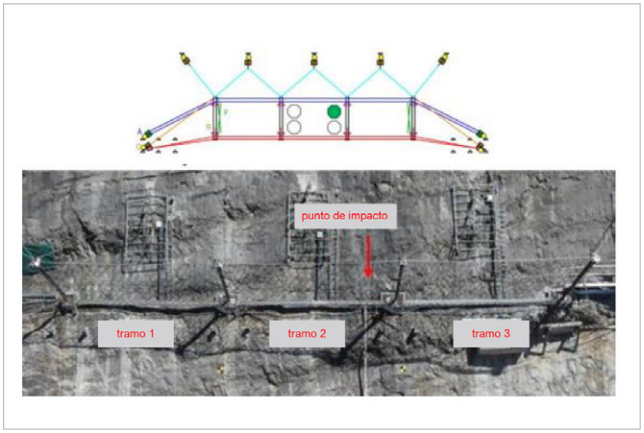

Fig. 7. Impacto excéntrico MEL, en la esquina superior, cerca de la cabeza del poste del medio de un sistema de tres tramos [17].

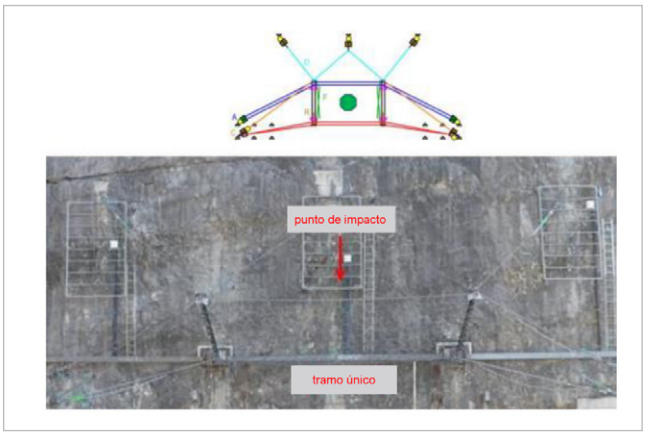

Fig. 8. Impacto en tramo único MEL, correspondiente a un impacto de tramo extremo [17].

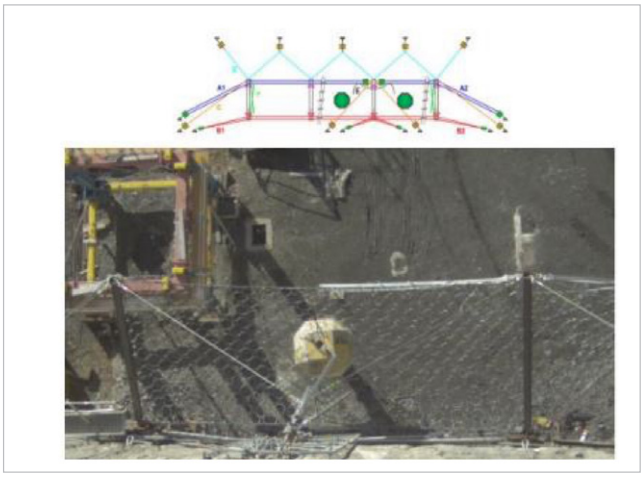

Fig. 9. Ensayo centrado MEL sobre un tramo funcional con separación de cables (100%) [17].

Como parte de esta investigación se realizaron un total de 30 experimentos durante los años 2019 y 2020 [2], con bloques de forma diversa y masa entre 840 kg y 320 kg (Fig. 6).

Los resultados más significativos de estos ensayos con rotación y excéntricos en comparación con los ensayos de caída libre son:

- Incremento en las solicitaciones en las cabezas de los postes.
- reducción de la energía cinética al 67%.
- Incremento en las solicitaciones en los cables de retención al monte en las secciones extremas 33%.

De aquí la propuesta de realizar un conjunto de ensayos adicionales [2, 17] para cumplir con las citadas expectativas del cliente, en cuanto a seguridad en toda el área de la barrera (Fig. 3):

1. MEL-E ensayo de impacto MEL excéntrico en el tramo funcional central (fig. 7)
2. MEL-F ensayo de impacto MEL en sección extrema, única o de dos tramos (fig. 8)
3. MEL-S ensayo de impacto MEL en zonas críticas (separación de cables) (fig. 9)

Estos ensayos han sido realizados de ensayos [17] en la cantera de Lochezen, en Walenstadt, Suiza, supervisados por el TSÜS como OET.

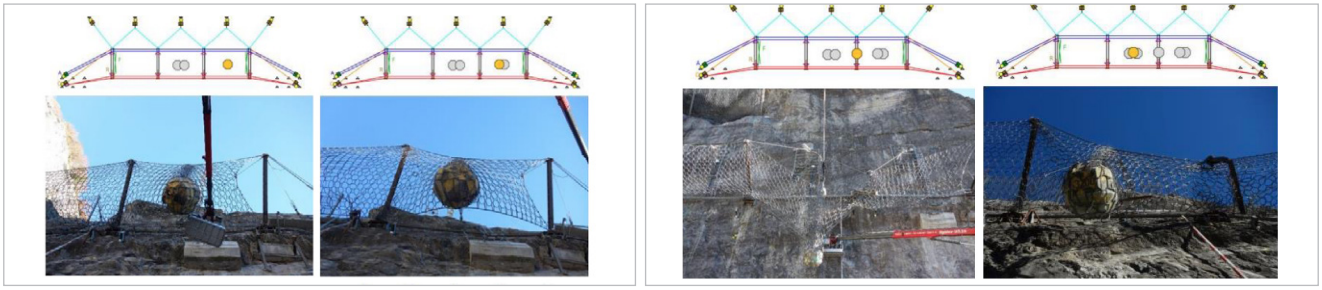

Fig. 10. Sucesión de varios impactos SEL en una misma barrera sin reparaciones entre ensayos [17].

Por último, una interrogante que siempre surge es: ¿cuál es la capacidad remanente que tiene una barrera tras un impacto de máxima energía [15]? Para profundizar en este tema, tras certificar una barrera de 3.000 kJ con un ensayo MEL y dos impactos SEL consecutivos, se procedió a realizar ensayos, con impactos SEL en varios lugares críticos de la barrera, tratando de replicar los impactos observados en el campo a lo largo de los años, así como durante el proyecto de investigación con WSL- SLF (fig.10).

4.- OBSERVACIONES FINALES

Sin duda, la aparición de una directiva como la ETAG 027 en 2008 significó un paso de avance, en tanto no existía ninguna directiva europea para el control y/o regulación de estas importantes medidas de seguridad.

Esta directiva inicial devenida en el DEE 340059-00-0106 diez años más tarde, ayudó fijar unos parámetros mínimos que han de cumplir los sistemas de protección contra desprendimientos de roca, evitando algunas soluciones improvisadas, carentes de rigor, que se ven en la práctica y que son extremadamente peligrosas, ya que como se sabe, lo que está en juego en general, son vidas humanas cuyo valor económico es difícilmente calculable.

Fig. 11. Evolución de los ensayos a escala natural [12, 13].

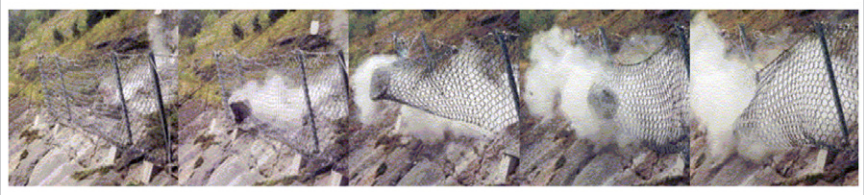

Fig. 12. Secuencia impacto bloque de 5.600 kg a 27 m/s. Ensayo teleférico inclinado 1997 Beckenried RX-200 (2000kJ) [12, 13].

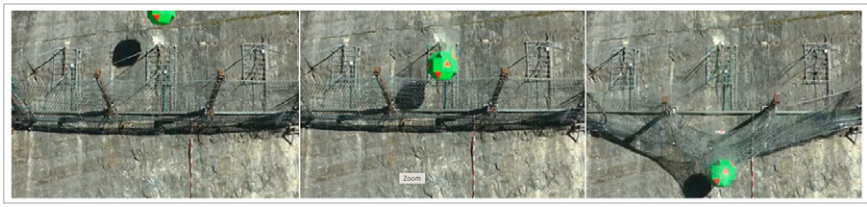

Fig.13. Secuencia impacto bloque de 25.000 kg desde 42 m de altura. Ensayo vertical en Walenstadt barrera de 10MJ (2017) [12]

A pesar del paso de avance antes señalado, la normativa europea es aún más permisiva que la norma desarrollada en Suiza en 2001, y por lo tanto ofrece menos garantías ya que las condiciones de ensayo y medición, que presuntamente se exigen, dan lugar a interpretaciones sobre todo en cuanto a tolerancias, otras son completamente teóricas, difíciles de conseguir en el momento del ensayo, tal y como se ha expresado, con teleférico inclinado es casi imposible repetir dos ensayos equivalentes, lo que ha motivado que más de 90% de los fabricantes a fecha de hoy realizan los ensayos de forma vertical. A continuación, algunas fotos de la evolución de los polígonos de ensayos desde finales de la década del 70 de siglo pasado hasta la fecha de hoy (fig. 11) [12].

Durante la década de los 90 se realizaron en Suiza numerosos ensayos, bajo la supervisión del WSL-SLF. Los ensayos se realizaron en campos como el situado en Beckenried (fig. 12) que contaba con teleférico inclinado y algunas de los ensayos que se ejecutaron fueron fallidos. En reiteradas ocasiones fue necesario repetirlos para conseguir los objetivos planteados, por lo impreciso de la instalación.

A partir de 2001, se iniciaron ensayos de caída libre en el campo de ensayos de Walenstadt (fig.13). La experiencia demuestra que la forma que ofrece mayores garantías, de asegurar la ulterior correcta utilización de los sistemas de barreras de protección contra desprendimientos, es seguir un procedimiento bien restrictivo, que parte entre otros detalles de realizar el ensayo a caída libre.

En los últimos 20 años, las responsabilidades de aprobación y supervisión de estos ensayos han cambiado. Los ensayos comparativos fueron promovidos originalmente por las autoridades con el objetivo principal de encontrar un procedimiento que proporcione suficiente protección a las personas y a las infraestructuras. Hoy en día, los fabricantes deben cumplir de forma fiable los criterios de los ensayos oficiales para su homologación. Los institutos acreditados son responsables de realizar estos ensayos; garantizan el cumplimiento del procedimiento de prescrito. Durante los últimos 20 años, los kits de protección contra caídas de bloques se han consolidado como una medida de protección eficaz y la solución es reconocida en todo el mundo. La capacidad de absorción de energía se ha multiplicado por 6, desde un máximo de 1.500 kJ a 11.000 kJ. El mayor rendimiento de los sistemas, los nuevos mercados y el actual DEE [5] establecido a nivel global, han creado una competencia que existe en muchos mercados.

Esto ha tenido un efecto positivo en la relación costo-beneficio de los sistemas disponibles en el mercado. La premisa para representar los supuestos mencionados en las directrices es que el mercado ha crecido exponencialmente en los últimos 40 años. Las barreras flexibles han evolucionado desde ser una solución especializada para ubicaciones con niveles de energía específicos hasta sistemas rentables ampliamente utilizados.

Los aportes de los últimos años relacionados con la incorporación de ensayos de contraste en ladera natural [2, 7] y en zonas críticas de las barreras, que la normativa vigente no contempla, se consideran un paso de avance positivo en el sentido de dar mayores garantías y seguridad a un elemento tan importante, como son los sistemas de protección contra desprendimientos. Esta nueva metodología en breve debería ser parte de la actualización normativa que se desarrolle a este respecto. A la vista de las consideraciones detalladas en el presente artículo es conveniente y muy recomendable, conocer en el momento de seleccionar una barrera dinámica para proteger una infraestructura determinada, las condiciones de seguridad que pueden aportar los diferentes sistemas. ■

Nº	Siglas	Inglés	Español	Ubicación
1	FOEN	Federal Office for the Environment	Oficina Federal de Medioambiente	Berna, Suiza
2	EOTA	European Organisation for Technical Assessment	Organización Europea de Evaluación Técnica	Bruselas, Bélgica
3	ETAG	European Technical Approval Guideline	Directiva Europea para la Aprobación Técnica	
4	EAD/DEE	European Assessment Document	Documento de Evaluación Europeo	
5	WSL	Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research	Instituto de Investigaciones del Bosque, la Nieve y el Paisaje	Birmensdorf, Suiza
6	SLF	Institute for Snow and Avalanche Research	Instituto de Investigación de Nieve y Avalanchas (forma parte de WSL)	Davos, Suiza
7	TSÜS	Building, Testing and Research Institute	Instituto Técnico y de Ensayos de la Construcción	Bratislava, Eslovaquia
8	ETA/DITE	European Technical Approval	Documento de Idoneidad Técnica Europeo	
9	ETA/ETE	European Technical Assessment	Evaluación Técnica Europea	
10	DoP	Declaration of Performances	Declaración de Prestaciones	
11	SEL	Service Energy Level	Nivel de Energía de Servicio	
12	MEL	Maximum Energy Level	Máximo Nivel de Energía	
13	WLV	Service for the Control of Torrents and Avalanches	Servicio para el Control de Torrentes y Avalanchas	Viena, Austria
14	TAB/OET	Technical Assessment Body	Organismo de Evaluación Técnica	
15	CEREMA	Public agency for developing public expertise in the fields of urban planning, regional cohesion and ecological and energy transition	Agencia pública para el desarrollo de la experiencia pública en los ámbitos de la planificación urbana, la cohesión regional y la transición ecológica y energética	París, Francia
16	UNI	Italian standardization body	Organismo italiano de normalización	Milán, Italia

Referencias

[1] BAFU [FOEN] (2018) Grundlagen zur Qualitätsbeurteilung von Steinschlagschutznetzen und deren Fundation. Bundesamt für Umwelt. Bern

[2] Caviezel, A. Munch, J., Bartelt, P & Lanter, A. (2022) Rockfall Barrier Service Loads for Rock Impacts with Spin Theory and experiments. WSL. Birmensdorf.

[3] CEREMA (2014) Réglementation nationale des écrans souples pour la détention des blocs rocheux. France

[4] EOTA (2008) Guideline for European Technical approval of falling rock protection kits. ETAG 27. Brussels.

[5] EOTA (2018) EAD-340059-00-0106. Falling Rock Protection Kits. Brussels.

[6] Geobrugg (2023) Rockfall protection systems. https://www.geobrugg.com

[7] Gerber, W. (2001) Guideline for the approval of rockfall protection kits. Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL) and the Swiss Federal Research Institute. WSL. Berne.

[8] Gerber, W. (2006) Guideline for the approval of rockfall protection kits. Amendment 2006. Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL) and the Swiss Federal Research Institute. WSL. Berne.

[9] Gerber. W., Böll, A. & Ammann, W. (2001) Filed testing of rockfall protection barriers. A comparison between inclined ropeway and vertical crane testing. WSL. Birmensdorf.

[10] González Gallego, J. & Luis Fonseca, R. (2007) Optimization criteria for using of rockfall protection. Congress ISMR. Lisbon.

[11] Luis Fonseca, R. & González Gallego, J. (2008) Protección contra desprendimiento de rocas. Barreras dinámicas. Ingeoter 10. Madrid.

[12] Luis Fonseca, R. Raïmat, C., Prieto, J. y Altimir, J. (2022) Últimas tendencias en procedimientos normativos para la certificación de kits de barreras de protección contra desprendimientos de rocas. Ingeopres Ed. Especial. Pirineos 2022.

[13] Luis Fonseca, R. y Torrebadella, J. (2008) Análisis comparativo entre la norma Suiza y la ETAG 027. Andorra.

[14] ONR 24810 (2020) Technical protection against rockfall. Terms and definitions, effects of actions, design, monitoring and maintenance, Vienna

[15] Roduner, A. Lanter, H., Eicher M. (2023) Latest developments to increase the quality of flexible rockfall protection barriers. ISRM 2023. Salzburg

[16] Roth, A. (2006) Remarks to the report for the EOTA EXCOM, ETAG for falling rock protection kits. WG 01-06/02. Zurich

[17] TSÜS (2020) Technical report 70200042/1 Evaluation and assessment of eccentric, single and support rope separation impact test on Falling Rock Protection Barrier Rocco-2000. Bratislava

[18] UNI 11211 (2019). Opere di difesa dalla caduta massi. Parte 1: Termini e definizioni (27.09.18). Parte 2: Programma preliminare di intervento (18.01.07). Parte 3: Progetto preliminare (28.06.18). Parte 4: Progetto definitivo ed esecutivo (18.10.18) e Parte 5: Ispezione, Monitoraggio, Manutenzione e ruolo dei Gestori (16.05.19). Milano

[19] Volkwein, A. & Stähli, M. (2013) In Influence of different test methods according to ETAG 027 - summary. WSL. Birmensdorf

[20] Volkwein, A. (2019) Review of Approval of Flexible Rockfall Protection Systems According to ETAG 027. Geosciences vol. 9. Basel

[21] MRA SR 0.946.526.81 (1999) Abkommenzwischen der Schweizerischen Eidgenossenschaft und der Europäischen Gemeinschaft über die gegenseitige Anerkennung von Konformitätsbewertungen, Bern Switzerland