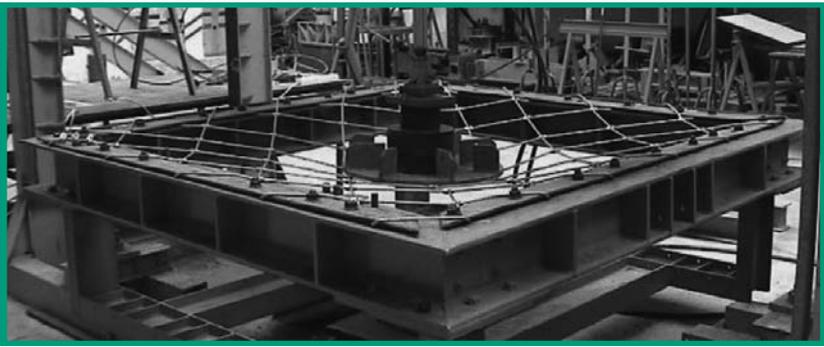


*Research and  
Development of Tests  
for the Certification  
of Dynamic Rockfall  
Barriers*

# Desarrollo e Investigación de Ensayos para la Certificación de Pantallas Dinámicas para la Contención de Caída de Rocas



## Autores

**CASTRO-FRESNO D.** Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción. Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos. Universidad de Cantabria, España  
email: daniel.castro@unican.es

**LÓPEZ-QUIJADA, L.** Escuela de Ingeniería en Construcción, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Valparaíso, Chile  
email: luis.lopez@ucv.cl

**SAÑUDO-FONTANEDA, L.** Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción. Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos. Universidad de Cantabria, España  
email: luisangel.sanudo@unican.es

**MERY-GARCÍA, J.P.** Escuela de Construcción Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile  
email: jpmary@uc.cl

**Fecha de recepción** 15/10/2009

**Fecha de aceptación** 04/11/2009

## Resumen

El Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos de la Escuela de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, en España, lleva más de 18 años desarrollando y certificando sistemas de protección y estabilización de taludes y laderas. Los ensayos realizados sobre los distintos componentes de una pantalla dinámica han sido de dos tipos: estáticos y dinámicos. Los ensayos estáticos se realizaron sobre elementos independientes; los propios cables, las grapas de fijación del cruce de cables en las redes (ensayadas a deslizamiento y corte), así como ensayos de carga puntual y repartida sobre paños de redes de cables y finalmente, ensayos de tracción directa sobre frenos o disipadores de energía. Mientras que

el único ensayo dinámico realizado fue el de una pantalla a escala real. Todos los ensayos cumplieron con las expectativas, excepto el estático de carga repartida. Este ensayo presenta incertidumbre en el área de contacto con la red. Estos ensayos han demostrado en la mayoría de los casos ser adecuados para representar los fenómenos que se producen en la vida útil de una pantalla. Sin embargo, en cada uno de ellos existen consideraciones a tener en cuenta, tanto para su realización, como para su utilización en el diseño y en la simulación numérica. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es mostrar los principales resultados de todas estas investigaciones, presentando las ventajas y desventajas encontradas en la implementación de cada prueba.

**Palabras clave:** Pantallas dinámicas, estabilización de taludes, ensayos de laboratorio.

## Abstract

*The Department of Transports and Technology of Projects and Processes of the School of Civil Engineering of the University of Cantabria (Spain) has over 18 years developed and certified rockfall protection and slope stabilization systems. Concerning the first, two types of tests have been applied on each element of the rockfall barriers: dynamic and static-based loads tests. Static tests (slow loads) were applied to single elements such as wires, cables, cable connectors (sliding and shear strength tested) as well as to concentrated and distributed loads on a cable net, and tensile tests on brake devices (energy dissipators). While static tests were performed on single*

*elements, a dynamic test was performed on a full-scale rockfall barrier. All tests satisfactorily met the expectations, except for the distributed based loads. The latter involves uncertainties in the load plate - net contact area. Most of the applied tests have shown that they are fit to represent the mechanical phenomena acting on the barrier. However, in each case several considerations must be taken into account, not only during the test practice but also in the design phase and numerical simulation of the barriers. Hence, this paper is focused on describing the main results of the dynamic rockfall barrier tests and their advantages and disadvantages.*

**Key words:** *Dynamic rockfall barriers, slope stabilization, laboratory test.*

## Introducción

Las pantallas dinámicas para la detención de caída de rocas son sistemas formados por varias piezas. Por esta razón, su comportamiento es definido por el funcionamiento conjunto de todas las piezas y no por la suma de los comportamientos de cada una de ellas. Esto se debe a la superposición de deformaciones y tensiones entre las piezas de la pantalla.

Las pantallas se diseñan para resistir impactos de 100 a 5000 kJ siendo los más comunes los de 250 a 700 kJ. Estos impactos generan tensiones dinámicas a través de la pantalla, mayores a las calculadas de forma estática. Esto se debe a que la fuerza dinámica está relacionada con el tiempo en que actúa. Este razonamiento define que a igual energía inducida, mientras mayor sea la velocidad de la roca, mayor será el daño causado (López, 2007a). La diferencia de los valores se debe a que los diseños estáticos clásicos se realizan por métodos vectoriales racionales (Smith y Duffy, 1990). Por otra parte, los diseños dinámicos se realizan mediante aproximación numérica que toma en cuenta un incremento de fuerzas en el tiempo. Por ello, la solución a estos sistemas de ecuaciones basados en métodos matriciales requiere de potentes ordenadores. Sin embargo, las condiciones de borde y la configuración del problema dependen de tantas variables, que no es posible representar en forma precisa el comportamiento de las pantallas. Esto se debe fundamentalmente a la forma de instalar, ensamblar y fabricar los sistemas, ya que dichas situaciones son de difícil simulación. Es por este motivo que las simulaciones, a pesar de ser los métodos más avanzados para conocer el comportamiento resistente de una pantalla, no sirven por sí solas. Necesitan ser calibradas y validadas mediante valores reales. Una vez hecho esto, las simulaciones se convierten en una herramienta más valiosa que el mismo ensayo a escala (Cazzani *et al.*, 2002). Se pueden variar con relativa facilidad sus configuraciones y obtener nuevos valores, a bajo coste.

Para comprender el comportamiento global de una pantalla, lo óptimo es realizar un ensayo a escala real. No obstante, en muchas ocasiones, las distintas partes del sistema se comercializan por separado. Esto hace que cada parte deba de ser ensayada para conocer si cumple con los estándares mínimos. Dichos estándares están relacionados con la función que desempeña cada pieza en la pantalla.

Por este motivo, el Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos de la Universidad de Cantabria ha desarrollado ensayos tanto para la pantalla completa, como para sus partes componentes (red de cables, estructura y disipadores de energía). El objetivo de estos ensayos es el de conocer el comportamiento de las partes componentes de la pantalla y el de la propia

pantalla, comportamientos que son utilizados para su diseño y la evaluación de los ensayos.

## Ensayos de cables

Los ensayos de cables son las pruebas más simples y básicas de una pantalla. A pesar de su sencillez son importantes para el diseño y la simulación. Sus resultados definen el estándar mínimo del cable y orientan acerca de la homogeneidad de las resistencias del proveedor. El ensayo está normalizado por la norma UNE 7326:1988. Para el diseño hay dos metodologías clásicas: una estática y otra dinámica. En ambos casos, el ensayo del cable define el parámetro de la deformación. En el caso del diseño estático se utiliza la deformación máxima alcanzada en el ensayo. Sin embargo, en el dinámico y en el estático, mediante métodos numéricos, interesa la curva completa de esfuerzo-deformación. Dicha gráfica representa la relación no lineal entre el desplazamiento y la carga unitaria, dando mayor precisión a los cálculos. Cabe destacar que en las simulaciones de la pantalla se busca el fallo de las piezas definidas por el diseñador. Mientras que los cables se mantienen íntegros.

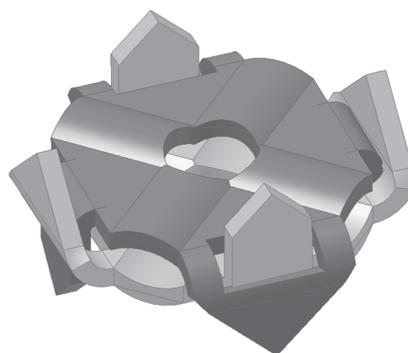
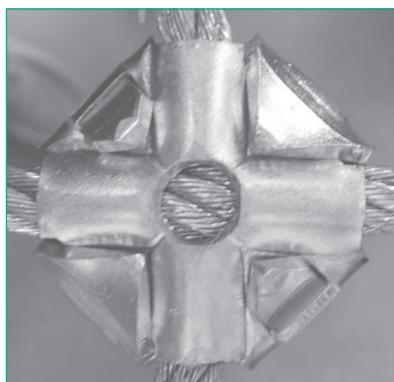
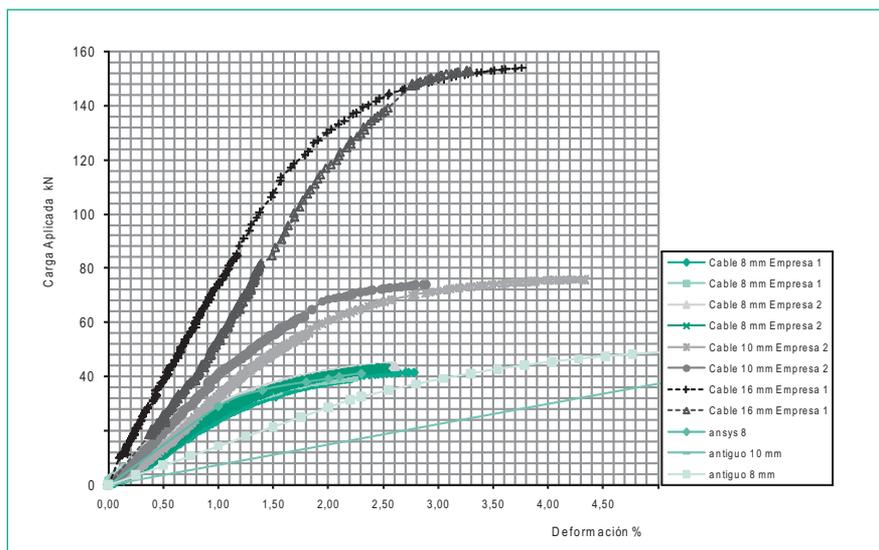
En los ensayos que se han llevado a cabo (López, 2007a), los valores de resistencia a la tracción son generalmente homogéneos. No obstante, los valores de deformación del cable son heterogéneos (ver Figura 1). Esto genera un error de diseño cuando se trabaja con la deformación del cable ensayado. Este hecho puede llegar a sobredimensionar o subdimensionar la pantalla, con el consiguiente encarecimiento o fallo del sistema (Sasiharan *et al.*, 2006). Así, en el diseño por métodos estáticos se toma la deformación máxima del ensayo. Unido esto a que el método es conservador, genera una pantalla sobredimensionada, tanto en las tensiones, como en las deformaciones. Esto se contrarresta con la deficiencia del método al no tomar en cuenta los *peaks* dinámicos. Sin embargo, en los métodos estáticos y dinámicos con elementos finitos, se produce un buen ajuste con respecto a las tensiones, aunque no así con las deformaciones.

## Ensayo de uniones

Para caracterizar el comportamiento de la unión o grapa (Figura 2), que fija dos cables que se cruzan para formar la cuadrícula de una red, se desarrollaron dos ensayos denominados de corte y deslizamiento (Castro-Fresno *et al.*, 2009). Ambos representan una carga generada por un impacto de roca intentando abrir la cuadrícula de la red. Por tanto, el valor entregado en la prueba sirve para incluir en el diseño los esfuerzos generados en la cuadrícula. Esto sirve para la modelación numérica, ya que en el diseño estático tradicional no se incluye.

**Figura 1**

Gráfico Carga-Deformación para diferentes diámetros de cable y empresas fabricantes. Ensayo por tracción directa.



**Figura 2**

Grapa metálica de unión

El ensayo de deslizamiento informa sobre la fuerza necesaria para producir el desplazamiento relativo de dos cables unidos mediante una grapa metálica. Para su realización, un trozo de cable se fija por ambos extremos horizontalmente por medio de dos mordazas. Se aplica una fuerza al cable que lo cruza y que está unido a este en uno de sus extremos hasta que se produzca el deslizamiento. Cabe destacar que en este ensayo se obtienen resultados que informan acerca del comportamiento al deslizamiento relativo de la grapa, y no de la rotura de la misma. Se considera el fallo en el sistema cuando la grapa comienza a deslizar, lo que en la práctica significa que el suelo deforma y desplaza la cuadrícula que mantiene fijas las grapas.

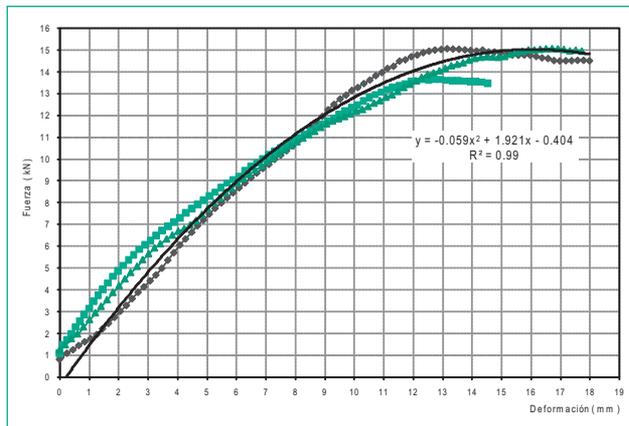
En la Figura 3 se muestra el resultado de este ensayo. En él se puede observar un comportamiento homogéneo de las muestras, lo que permite estimar una correlación cuadrática con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) eva-

luado en 0.99, entre la fuerza y la deformación (López *et al.*, 2007b). Este punto confirma que aunque existan zonas de un comportamiento un tanto errático de las muestras, no es importante sobre el valor medio de la curva de regresión.

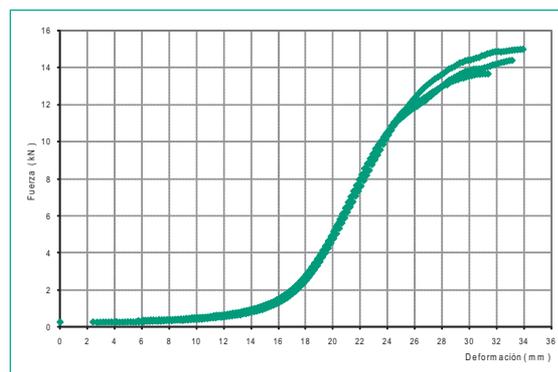
Por otro lado, en el ensayo de corte se obtiene el valor de la fuerza mínima que produce el deslizamiento de dos cables que se cruzan unidos por una grapa. Este desplazamiento viene inducido por la aplicación de una fuerza en un extremo de un cable, cuando se fija un extremo del otro trozo. Ambas fijaciones se realizan mediante mordazas de la máquina de ensayo. La rotura del sistema se produce por deslizamiento de los cables con respecto a la grapa, sin que estos sufran algún daño. En la Figura 4 se observa el comportamiento de tres muestras sometidas a este ensayo. Se puede observar que el movimiento es homogéneo, lo que valida el ensayo.

**Figura 3**

Ensayos de deslizamiento a las uniones  
(curvas de ensayo y de regresión)

**Figura 4**

Curva generada por el ensayo de corte realizado a grapas de 10 mm, donde se observa un comportamiento homogéneo del desplazamiento en función de la carga aplicada



## Ensayos de las redes

Una vez ensayados los componentes de las redes de cable de forma independiente, las grapas de unión y el propio cable, se realizan ensayos estáticos para evaluar el comportamiento de las redes.

Se define como red de cables a una malla compuesta por cables que forman una cuadrícula cuyos puntos de intersección se unen mediante un elemento de fijación. En el caso de estudio, dicho elemento de fijación corresponde a una grapa de unión. La unidad de fabricación es una red cuadrada de dimensiones 2m x 2m. La red está formada en su interior por un cable generalmente de 8 mm, tipo 6x18+1 o similar.

En este caso, las máquinas deben disponer de una potencia adecuada para generar el fallo de la red. Además, dichas máquinas necesitarán de nuevos complementos para el ensayo. En el caso de estudio, los primeros ensayos se realizaron en 1990. Se utilizó un marco metálico de perfiles HEB de sección 200 mm x 200 mm, en el cual se montó un cilindro hidráulico que ejercía una fuerza de 600 kN. Esta fuerza se repartía hacia la red mediante dispositivos que se explican a continuación. Este ensayo entrega resultados importantes y se ha convertido hasta hoy en la prueba de mayor relevancia, después de los ensayos a escala natural in situ. Esto se debe a que entrega un valor real de la deformación de la red al momento de la rotura. La única desventaja de este ensayo es que se hace a una velocidad de carga lenta, al igual que los ensayos de cable y las uniones. Esto produce una incertidumbre del comportamiento dinámico. Sin embargo, con los valores estáticos se pueden realizar simulaciones dinámicas.

Assumiendo una misma energía de impacto de una roca sobre una red se pueden visualizar dos situaciones; un impacto puntual de una roca pequeña y uno distribuido producido por una roca de grandes dimensiones. Es por esto que se desarrollaron dos ensayos para simular el trabajo en condiciones desfavorables. El ensayo de carga puntual y el de carga repartida, cuyas condiciones de trabajo pueden ser simuladas mediante programas de elementos finitos (Del Coz *et al.*, 2009 y Castro-Fresno *et al.*, 2008).

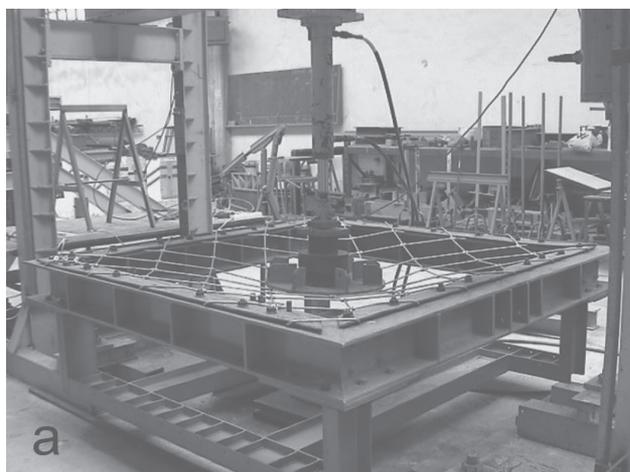
Se denomina ensayo de carga puntual a la prueba donde se calcula el valor de la carga mínima que produce la rotura de un paño de red de cables al aplicar una carga perpendicular a la malla. Esta carga aplicada se concentra en el centro de la misma por medio de una placa de reparto. Se considera la rotura de la red cuando se produce el fallo de alguno de sus elementos, cables, grapas o casquillos. Esta carga representa los esfuerzos puntuales que se pueden producir sobre la red una vez anclada a un talud rocoso o una roca de pequeño diámetro equivalente (López y Castro-Fresno, 2009).

El procedimiento de ensayo consiste en anclar la red de cables al marco de ensayo, consiguiendo que los puntos exteriores permanezcan fijos. La carga concentrada se aplica mediante un gato hidráulico que dirige las cargas en su extremo mediante una placa circular de 600 mm de diámetro. Simultáneamente, se mide la deformación de la malla en el eje de la carga aplicada (ver Figura 5a). El resultado del ensayo es la carga máxima soportada por la muestra y su deformación en el centro del paño.

Por otro lado, el ensayo de carga distribuida busca el valor de la fuerza mínima que produce la rotura de un

**Figura 5**

a) Ensayos de laboratorio de carga puntual. b) Ensayo de laboratorio de carga repartida



pañó de red de cable al aplicar una carga perpendicular a la malla, uniformemente repartida a lo largo de ella. Esta carga representa los esfuerzos que produce una masa de suelo o roca al movilizarse intentando desplazar la red. En este ensayo se consigue la carga uniformemente repartida a través de una prensa que posee en su extremo una placa circular de 750 mm diámetro. Esta, a su vez, incide sobre sacos de gravilla puestos en forma piramidal. Esto garantiza un reparto uniforme de la carga a lo largo de toda la red. El resultado del ensayo es la carga máxima soportada por la muestra y su deformación medida en el eje de la carga aplicada, (ver Figura 5b). La sobrecarga inducida por los sacos es de 2000 kg.

Los ensayos generaron resultados concluyentes en cuanto a la relación esfuerzo-deformación de las redes. Estas cumplen una relación cuadrática o radical dependiendo de la configuración de las variables sobre los ejes de la función graficada. Los ensayos dieron resultados homogéneos sin ninguna variable cuestionable. Esto corrobora la efectividad de los ensayos, por cuanto informa de manera óptima acerca de la resistencia a la rotura de las redes. Esta resistencia es acorde a las condiciones propias del laboratorio. Todas las muestras fallaron por deficiencia del cable, permaneciendo siempre intactas las grapas. Esto garantiza que el elemento restrictivo en la red de cables es la resistencia del propio cable, considerando el tipo de grapa ensayada.

En el ensayo de carga puntual se obtuvieron resultados concluyentes que permiten determinar relaciones de carga y desplazamiento importantes tanto para el diseño estático, como dinámico. Sin embargo, el ensayo de carga repartida tiene una deficiencia relacionada con

la incertidumbre habida en el área de contacto entre la carga inducida y la red. Todo ello, a pesar de haberse llegado a resultados homogéneos y repetibles. Esto es debido a que la carga sobre los sacos de gravilla se distribuye en forma de un bulbo desconocido. Por tanto, sin este dato no se puede obtener el esfuerzo real sobre la pantalla. Esto dificulta el diseño clásico y la simulación por elementos finitos.

## Ensayos de los disipadores

Se define a los disipadores como los elementos de la pantalla que absorben energía del impacto, ya sea en forma elástica o plástica. Generalmente se utilizan en pantallas sometidas a impactos de mediana y alta energía, es decir a partir de 500 kJ y en casos que la configuración del resto de elementos del sistema lo requiera, a partir de 300 kJ. Los disipadores se instalan en un punto del sistema que se quiere resguardar o en un punto donde confluyen los esfuerzos.

Los ensayos de los disipadores son importantes por tres razones. La primera de ellas está relacionada con el comportamiento del disipador al ser sometido a una carga. Es decir, verificar que el disipador funcione. La segunda tiene que ver con la necesidad de conocer el rango de carga en el que el funciona. Esto se debe a que en ocasiones el disipador no se activa en un impacto. Esto ocurre porque las tensiones del impacto que llegan al punto donde está instalado son menores que el nivel de carga necesario para que comience a trabajar. La tercera razón obedece a la necesidad de conocer la energía absorbida por el disipador. Esta se obtiene a partir del desplazamiento producido a cada nivel de

carga del ensayo, no importando en este caso la velocidad de carga. De esta manera, el fabricante puede comparar el comportamiento de su dissipador y mejorarlo. Permite al diseñador realizar una configuración con altas probabilidades de funcionar frente al impacto de diseño. Nuevamente, el ensayo del dissipador carece de variables dinámicas, pero sirve para el diseño mediante métodos numéricos.

## Ensayos de la pantalla a escala real

Los ensayos a escala natural se diferencian de los anteriores por dos motivos fundamentales. En primer lugar hacen trabajar a todos los sistemas en conjunto, generando un comportamiento grupal, real y preciso de la pantalla a un nivel de energía dado. En segundo lugar, son ensayos dinámicos. Por tanto, representan en forma precisa tanto la acción sobre la pantalla como la reacción de esta.

Se puede decir que hay dos grandes modalidades de ensayos in situ: los ensayos de talud inclinado y los de talud vertical. Los primeros son muy comunes, ya que es fácil encontrar un talud inclinado. La instalación de la pantalla es fácil. No obstante, el sistema de lanzamiento de la roca que impactará con la pantalla es difícil de implementar. Esto se debe a que en este caso es necesario un riel elevado donde transite la roca en su caída diagonal. Posteriormente necesitará un sistema para soltar la roca que parabólicamente impactará a la red. Es muy difícil con este método alcanzar de forma precisa el blanco, ya que al soltar la roca se producen vibraciones que hacen que la roca no golpee justo en el blanco. Por otro lado es difícil ser preciso con el punto donde se debe soltar la roca. Se necesitan tiros de calibración.

En segundo lugar, se encuentran los ensayos verticales. Estos son más fáciles de implementar, ya que la pantalla se instala horizontalmente en la pared de la quebrada que tiene su cara vertical. En ocasiones, esto se realiza con alguna dificultad, pero esto se contrarresta con la facilidad de instalación del sistema de tiro. En la parte superior se instala con facilidad un sistema que posicione la roca sobre el punto de impacto. Para realizar el ensayo se posiciona una roca en dicha parte superior mediante una grúa, la cual se puede guiar al punto de impacto con una plomada. No necesita de tiros de calibración y al momento de impactar la roca en la pantalla, esta absorbe en forma íntegra la energía del impacto. No ocurre así en la diagonal, donde la inclinación del talud permite que la roca rebote en el suelo. Esto ayuda a disipar energía en la red. Situación no deseada en el caso del ensayo diagonal. Asimismo, en el ensayo vertical, la energía disipada se obtiene fácilmente por la fórmula de

energía potencial. Mientras que en el ensayo diagonal, el rebote y otros aspectos dificultan la precisión de los cálculos.

En el caso del Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos de la Universidad de Cantabria se han realizado 6 ensayos a escala en el año 1996 en Suiza (Fonseca, 1995). Este ensayo entregó valiosa información acerca del impacto y del procedimiento de ensayo. Se puede mencionar como punto importante de la prueba lo concerniente a la instrumentación. Esta consistió en la utilización de video, imágenes y señales. La fotografía no sirve de mucho si no está sincronizada con el evento. De todas formas, aunque así fuese, una fotografía de un momento no es muy útil. Por otro lado, el video sí es importante porque sirve para detectar causas de posibles fallos. Además de detectar mediante su uso deficiencias en el diseño. Es importante conocer cómo la pantalla va activando sus distintas partes a medida que el impacto comienza a recorrerla. Sin embargo, el video no sirve de mucho si no se conocen las deformaciones, o en su defecto las tensiones resistidas por cada elemento. Más aún, tampoco sirven las resistencias máximas de cada elemento si no se relacionan con los demás elementos, puesto que no se conoce el momento en que estos esfuerzos llegan a la pieza correspondiente para su activación.

Por otro lado, en los ensayos se pudo comprobar que la mayoría de los impactos se producía en un tiempo total de 1 segundo. Es decir, este es el tiempo en que la roca permanecía en la pantalla. Sin embargo, el tiempo mínimo en que se producía la mayor tensión en los cables correspondía aproximadamente a 0.2 segundo. Conocida esta información queda claro que hay pocos sistemas para hacer mediciones de carga en cada elemento y además en paralelo. Es por eso que se utilizaron galgas extensométricas. Posteriormente, mediante una curva esfuerzo-deformación se relaciona la deformación con la tensión de la pieza. Sin embargo, de nada sirve que la galga entregue una buena señal, si el equipo que la lee es lento en su medición. Para un evento de 0.2 segundo son necesarias al menos unas 100 mediciones. Esto define una velocidad de 50 mediciones cada 0.1 segundo, es decir 500 mediciones en un segundo (500 Hz). Se hace esta explicación porque la mayoría de los equipos que registran las lecturas de las galgas extensométricas tienen una velocidad de lectura de 2 a 10 mediciones por segundo. Esto genera errores en la medición de un impacto, ya que se pierden *peaks* de carga entre medida y medida. Por tanto, 1000 mediciones por segundo es lo adecuado, cuando las máquinas dinámicas pueden medir fácilmente a 10 kHz.

La situación óptima consiste en hacer mediciones antes y después de cada elemento sometido a carga. Sin

## Conclusiones

embargo, normalmente se tiene un módulo de pantalla para instalar e instrumentar consistente en tres paños. Esto da al menos 4 postes, 5 tirantes, y un mínimo de 6 tramos de cable. Esto define un total de 15 puntos para medir tensiones exclusivamente. Si se desea conocer la influencia de cada elemento mencionado en la disipación de energía se deberían hacer mediciones al principio y final del elemento. Esto duplica la cantidad de puntos, es decir, un mínimo de 30 puntos. Esto significa que para evaluar bien un ensayo a escala real de una pantalla se necesita un equipo dinámico de al menos 1 kHz de velocidad. Este equipo debe disponer de al menos 31 canales para evaluar bien el comportamiento de la pantalla. No obstante, las galgas no pueden ser adheridas a los cables en forma directa. La vibración y elongación de los elementos las destruirían, ya que cada galga tiene una deformación máxima mucho menor que la que experimentan las partes de la pantalla. Para resolver este problema se diseñó una pieza auxiliar donde se instalarían las galgas, y que fue calibrada en laboratorio. Su sección hace que al momento del impacto se deforme en el rango de trabajo de la galga, es decir reduce o incrementa el esfuerzo que llega a ella. De esta manera, la galga puede leer sin problemas esta deformación. Estas piezas se instalan antes y después de los objetos a medir, y no debiera distinguirse un comportamiento distinto en la red. Esto es debido a que los elementos son rígidos con una deformación mínima que no influye en la disipación energética de esta. No obstante, estos elementos pueden sufrir errores de medición eléctrica por tres motivos: desequilibrio del puente de Wheatstone, largo del cable y temperatura. Lo que se resuelve haciendo que el puente del Wheatstone se construya con las 4 galgas del mismo fabricante o que la máquina complete el puente internamente. Además de que los cables sean excitados con un voltaje mayor al que se necesita en laboratorio y que las galgas sean conectadas a 3 hilos para compensar los errores de temperatura. De esta forma, el equipo tiene una precisión mayor.

Otro punto importante es la amplificación de la señal para obtener un valor que pueda ser fácilmente medido. También es importante el filtrado de la señal, el cual permite distinguir entre la señal emitida por el ensayo y el ruido ambiental o del equipo. Estas últimas son señales indeseadas, no correspondientes al ensayo.

De estos ensayos (López, 2007a), se obtiene como conclusión que los valores dinámicos son mucho mayores que los estáticos. También se concluye que los valores máximos se dan en momentos distintos en cada elemento. Los esfuerzos viajan y se acomodan a lo largo del sistema. Esto genera la necesidad de conocer el momento y los valores de estos esfuerzos, ya que ellos definen si una pieza se activa o no y en qué momento.

En general se puede concluir que existen dos tipos de ensayos, los dinámicos y los estáticos. Los dinámicos realizados a escala natural se realizan a la pantalla completa y entregan una correcta y precisa información acerca del comportamiento dinámico tensional y deformacional de la red. Mientras que los ensayos estáticos son realizados a las partes componentes de la pantalla en laboratorio. Sirven para conocer a priori los valores de resistencia y deformación de las partes de la red. Además, sirven para realizar un diseño estático, pseudodinámico y en el mejor de los casos hacer simulaciones dinámicas a partir del comportamiento estático de los elementos. Todo esto permitido por la tecnología actual.

La realización de los ensayos estáticos es de un coste varias veces menor que el de la realización de un ensayo dinámico a escala real. Por tanto, la tendencia ha sido realizar ensayos de laboratorio estáticos. Posteriormente, por medio de simulación computacional e introduciendo los valores de los ensayos estáticos se llega a un dimensionamiento de la pantalla completa. Sin embargo, siempre es recomendable comprobar al menos una configuración con un ensayo a escala natural.

En los ensayos a las redes, ya sean mediante cargas puntuales o repartidas, la mayor desventaja es que se hace a una velocidad de carga lenta, al igual que los ensayos de cable y las uniones. Esto provoca la incertidumbre del comportamiento dinámico. Sin embargo, con los valores estáticos se pueden realizar simulaciones dinámicas.

Los ensayos de la unión han sido muy importantes en el momento del diseño, ya que los valores de tensión de la red pueden ser comparados con los de resistencia de la unión. De esta manera se puede saber si la red mantendrá su forma al momento del impacto. Sin estos ensayos no se conoce la fuerza de corte de la red, lo que puede inducir a que esta falle aunque todo el sistema restante este bien calculado.

Analizando las pruebas llevadas a cabo sobre las redes de cable se puede decir que los ensayos desarrollados de carga puntual y repartida representan bien el tamaño de una roca pequeña y grande, respectivamente. Sin embargo, en el caso del ensayo de carga repartida mediante los sacos de arena no se distribuye la carga íntegramente a través de todos los sacos. Lo que ocurre es que existe un bulbo de presión que distribuye la fuerza aplicada por la placa a través de algunos sacos, que si bien es cierto no permite abarcar el total de la red, aumenta el área de contacto de la placa donde se aplica la fuerza. Este incremento del área distribuye mejor las tensiones sobre la red, pero no es posible conocer a ciencia cierta el área donde se distribuye la carga en los sacos. El área

solo se puede calcular mediante el análisis numérico hecho por Castro-Fresno *et al.*, 2008.

Con respecto a los ensayos en escala natural, es necesario tener una adecuada instrumentación, consistente en un lector continuo con al menos 500 mediciones por

segundo. Esto se debe a que las cargas máximas ocurren entre los 0.2 y 0.8 segundo. Por tanto, se deben medir cargas cada 0.1 segundo lo que hace necesarios unos 50 puntos por cada 0.1 segundo. Estas mediciones deben ser medidas al mismo tiempo en varias piezas para poder conocer el flujo de los esfuerzos de la red.

## Referencias

1. Castro-Fresno D., López L., Blanco E., Zamora D. (2009). Design and Evaluation of Two Laboratory Tests for the Meshes of a Flexible Stabilization System Anchored to the Slope. *Geotechnical Testing Journal*. Editorial Office American Institute of Physics. Article accepted for publication on 2009.
2. Castro-Fresno, D., Del Coz, J., López, L., and García, P. (2008). "Evaluation of the Resistant Capacity of Cable Nets Using the Finite Element Method and Experimental Validation" *Engineering Geology*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, Vol. 100, pp. 1–10.
3. Cazzani, A., Mongiovi, L. & Frenez, T. (2002), "Dynamic Finite Element Analysis of Interceptive Devices for Falling Rocks", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 39, no. 3, pp. 303-321.
4. Del Coz, J. J., García, P. J., Castro, D., and Blanco, E. (2009). "Nonlinear Analysis of Cable Networks by FEM and Experimental Validation", *International Journal of Computer Mathematics*, SI-CMMSE-2007, Taylor & Francis, London, UK.
5. Fonseca, R. (1995). Tesis Doctoral, Desarrollo de Nuevos Sistemas de Protección de Taludes y Laderas Rocosas: Pantallas Dinámicas. Universidad de Cantabria. Santander, España.
6. López, L. (2007a). Desarrollo y Análisis de Una Pantalla Dinámica para la Disipación de Impactos de Baja Energía, como Elemento de Protección Contra la Caída de Rocas, Utilizando Modelos Matemáticos, Programas de Elementos Finitos y Ensayos de Laboratorio, Tomando en Cuenta Variables Dinámicas. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. España.
7. López, L. *et al.* (2007b). "Desarrollo de Pantallas Dinámicas para la Protección de Caída de Rocas. El Caso de MTC". VI Congreso Chileno de Geotecnia.
8. López, L. y Castro Fresno, D. (2009). "Investigación, Desarrollo y Aplicación de un Sistema de Estabilización de Taludes con Redes de Cables". *Desafíos y Avances de la Geotecnia Joven en Sudamérica*. III Conferencia Sudamericana de Ingenieros Geotécnicos Jóvenes, Córdoba, Argentina. p.p. 165-168.
9. Sasiharan, N., Muhunthan, B., Badger, T.C., Shu, S. & Carradine, D.M. (2006). "Numerical Analysis of the Performance of Wire Mesh and Cable Net Rockfall Protection Systems", *Engineering Geology*, vol. 88, no. 1-2, pp. 121-132.
10. Smith, D. y Duffy, J. (1990). Field Test and Evaluation of Rockfall Restraining Nets, California Department of Transportation Materials and Research, Report No. CAVTL 90/05, June. LA. USA.