

Diseño de una nueva pantalla dinámica de protección contra la caída de piedras

Por José Antonio Hinojosa Cabrera
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales
y Puertos

Francisco Ballester Muñoz
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales
y Puertos

Juan Antonio Torres Vila
Dr. Ingeniero Civil



Vista general de una pantalla dinámica.

EL problema de la protección contra las caídas de piedras sobre las vías de comunicación, aunque es un tema muy debatido, no está totalmente solucionado debido, entre otros factores, a la variedad de situaciones que se pueden presentar, requiriendo cada una un tratamiento específico.

Soluciones tales como el anclaje y calzado de las rocas, muros y contrafuertes de hormigón, colocación de mallas y gunitado, entre otras, están muy definidas y tienen un campo de aplicación específico para los taludes de excavación en rocas alterables.

No sucede lo mismo cuando se trata de detener las rocas que se desprenden de las zonas más altas

de la ladera o de los taludes no protegidos y que, al caer, siguen una trayectoria que puede alcanzar la calzada.

En estos casos la mayoría de las soluciones utilizadas en diferentes países, está compuesta por una pantalla al pie del talud, prudentemente separada de la calzada y que consiste en una hilera de postes metálicos anclados sobre un muro o una base de hormigón directamente sobre el terreno, los cuales están cerrados por una malla metálica, situada generalmente del lado de la ladera. Las mallas pueden ser electrosoldadas, de alambres de simple o triple torsión, con o sin cables a lo largo de las mismas.

Estos sistemas, que denominaremos "estáticos", han ido buscando una mayor capacidad de absorción de impactos, aumentando la robustez de sus elementos. Su desventaja fundamental es la baja capacidad de absorción de energía, la baja eficiencia de la utilización de los materiales componentes, y la dificultad elevada de su mantenimiento.

Sistemas dinámicos para la protección contra caída de piedras

Los sistemas hasta ahora desarrollados por "Industrial Enterprise" y "Brugg" (1), consisten en mallas de cables de acero monta-

das en cables y postes metálicos, con diferentes dispositivos de disipación, capaces de absorber energías elevadas.

Recientemente ha sido desarrollado un nuevo sistema de mallas dinámicas por la firma francesa Sisyphé, el cual ha sido realizado en colaboración con la firma española Nova Ingeco S.L. de San Sebastián (4) con mallas desde 900 hasta 5 000 kilojulios de capacidad de absorción de energía. Este sistema presenta como uno de los elementos originales fundamentales los disipadores de energía de tubos metálicos, situados en los cables de anclaje a la ladera, que incrementan la capacidad de trabajo de este sistema (figura 1). Estas mallas han demostrado su efectividad, y se utilizan fundamentalmente para detener grandes bloques de roca en las zonas altas de las laderas.



Desprendimiento detenido por una malla dinámica.

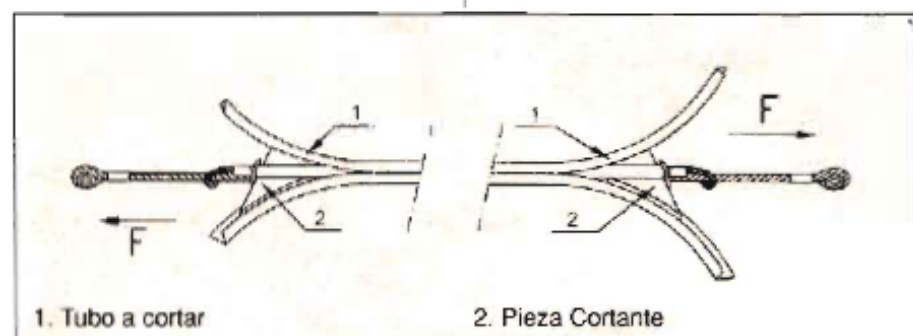


Fig. 1. Disipador de energía Nova Ingeco.

Nueva pantalla dinámica para la protección contra la caída de piedras sobre la calzada

Principio del sistema. El nuevo sistema diseñado tiene como fundamento la realización de una pantalla que, ante el impacto de una piedra, movilice sus elementos, deformándose y desplazándose en la medida que se van cargando, absorbiendo paulatinamente la energía cinética acumulada por la roca en su movimiento, mediante el trabajo de las fuerzas de reacción que opone la malla.

Descripción del sistema. Consiste en una serie de perfiles laminados apoyados en una placa de acero, articulada y anclada sobre un muro o base de hormigón.

Por la parte superior e inferior de los perfiles y del lado de la cal-

zada, pasan dos cables de acero cuyos extremos están anclados a la ladera. Una doble malla de simple torsión, fijada a los citados cables, cierra cada paño. En las fotos se puede ver una vista general de la

“**E**ste sistema presenta como uno de los elementos originales fundamentales los disipadores de energía de tubos metálicos, situados en los cables de anclaje a la ladera, que incrementan la capacidad de trabajo de este sistema.”

pantalla, así como sus postes, donde se puede apreciar la disposición de la malla, los cables longitudinales y el mecanismo de la base donde se encuentran los dos muelles de elastómeros.

Entre el extremo de cada cable y el anclaje a la ladera se coloca un muelle de elastómeros, el cual permite un desplazamiento limitado de los cables al ser cargados.

Los muelles están compuestos por una serie de anillos de elastómeros tipo EPDM, de dureza determinada y resistentes a la acción de los agentes atmosféricos. Controlando la dureza del elastómero y el número de anillos se puede regular la deformación de los muelles para el rango de carga de trabajo.

Funcionamiento de las pantallas dinámicas. La roca, al impactar sobre la red, la deforma y tensiona, con una fuerza que es transmitida a los cables, los cuales son tensionados y deformados elásticamente, accionando los muelles de elastómeros que se encuentran en sus extremos. Los cables tiran de los perfiles vecinos, que, al girar, accionan los muelles de elastómeros de la base. Esto provoca que el frenado de la roca se realice a lo largo de un recorrido determinado. El desplazamiento de la cabeza del perfil varía la dirección del cable superior, arrastrando en su desplazamiento al perfil vecino, descargando los perfiles del

pañó impactado y distribuyendo las cargas a los postes vecinos, con lo que se hace trabajar a toda la pantalla además de movilizar la inercia de su masa. Esto hace trabajar la pantalla como un conjunto.

Una vez frenado el impacto de la piedra, el sistema queda cargado de energía debido, por una parte, a la compresión de los muelles de elastómeros de los cables y la base de los perfiles, y por otra a la deformación elástica de los cables, los perfiles y la componente elástica de la deformación de la malla. Esta energía es devuelta a la roca como una fuerza en sentido opuesto al movimiento, ayudando a lanzarla tras la pantalla y tendiendo a recuperar la posición descargada.

Mantenimiento. El sistema concebido es de muy fácil mantenimiento. En caso de fallo de un perfil por impacto directo, puede ser quitado de la placa de apoyo y descolgado de la malla para reponerle.

En el caso de fallo de un paño de malla por un fuerte impacto o una deformación exagerada, se sueltan los cables verticales de unión a las mallas vecinas, y se libera de los cables longitudinales, reponiéndose.

La limpieza de la parte trasera de la malla puede realizarse fácilmente desmontando la malla de la parte superior y abatiéndola sobre el muro, una vez liberada la tensión de montaje de los cables de acero.

Análisis dinámico de las estructuras de contención contra la caída de piedras

Las obras de protección de este tipo se diseñan para soportar impactos de rocas que con pesos, volúmenes y formas diferentes, y a diferentes velocidades, llegan hasta la obra de protección, la cual debe detenerlas antes de que alcancen la calzada. Por tanto, estas estructuras deben ser diseñadas para soportar fuertes impactos, que serán absorbidos de diferente forma por la pantalla, dependiendo de su rigidez.

Rocas pequeñas a elevadas velocidades pueden causar efectos sobre la estructura de contención de similar magnitud, e incluso su-



Poste de la pantalla dinámica con los muelles de elastómeros en la base.

periores, al causado por el impacto de grandes bloques de roca a bajas velocidades.

Por tanto, el efecto que producen sobre las estructuras de contención debe ser expresado en términos de la energía del impacto producido.

La energía cinética que alcanzan las rocas en el movimiento de caída ladera abajo, es la medida más común para el dimensionamiento de las obras de protección. El movimiento de caída de las rocas (cuerpo rígido) se manifiesta como la composición de un movimiento traslacional, más uno rotacional (energía cinética en movimiento).

Por tanto, la energía cinética total de una masa de roca que rueda ladera abajo es la suma de la energía cinética traslacional E_{ct} , y de la energía cinética angular, E_{ca} .

$$E_{Ctot} = E_{ct} + E_{ca}$$

$$E_{Ctot} = 1/2 \cdot m \cdot v^2 + 1/2 \cdot I \cdot \omega^2$$

donde:

W - peso de la roca

m - masa de la roca: $\frac{W}{g}$

v - velocidad en el momento del impacto

I - momento de inercia

ω - velocidad angular.

A efectos prácticos, se desprecia la energía cinética angular, por ser de menor magnitud y difícil de evaluar su efecto sobre la pantalla, tomándose para el cálculo solamente la energía cinética traslacional:

$$E_{Ctot} = 1/2 \cdot m \cdot v^2$$

Una roca que al caer golpea la cara de un talud o ladera tiene un movimiento de descenso, cuya trayectoria depende fundamentalmente de la pendiente de la ladera (5):



- Talud 1:4. La roca en caída libre llega a la cuneta sin tocar el talud.
- Talud 1:2. La roca cae dando saltos al rebotar con los salientes del pie del talud.
- Talud 1:1. (o más suave) La roca rueda sin separarse prácticamente del talud.

Fig. 2. Trayectoria esperada de las rocas en un talud según la pendiente.

Existen programas de ordenador que permiten la simulación del movimiento de las piedras en las

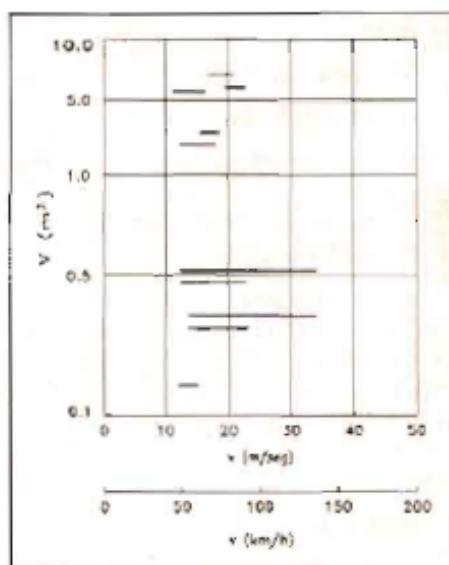


Fig. 3. Relaciones experimentales entre el volumen de la masa y la velocidad de impacto.

laderas. No obstante vale la pena aclarar que, para casos simples y debido a la incertidumbre en la definición de una serie de datos que deben ser estimados, es suficiente calcular la energía cinética traslacional y, con esta información, proceder al diseño de las pantallas.

De acuerdo con resultados de carácter experimental (figura 3), y para condiciones medias de ladera (2), se ofrece a manera de guía la relación entre los volúmenes de las rocas y las velocidades de impacto.

Los datos de la figura 3 muestran que las rocas de mayor volumen (mayor de 0,5 m³), tienden a rodar a lo largo de la ladera, siendo prácticamente independiente la velocidad de traslación del volumen

de roca. Las rocas de tamaño medio (volumen aproximado de 0,5 m³), alcanzan las mayores velocidades. Las rocas de menor volumen presentan una tendencia elevada al rebote, disminuyendo la velocidad con la magnitud de su masa.

Para las pantallas de energía

media y media-alta, la velocidad a utilizar para el cálculo de la energía que deben absorber estas pantallas se puede tomar del orden de 50-60 km/h.

En la figura 4, se presenta una relación entre peso de rocas, velocidades de impacto y energía de la masa, como una guía a efectos

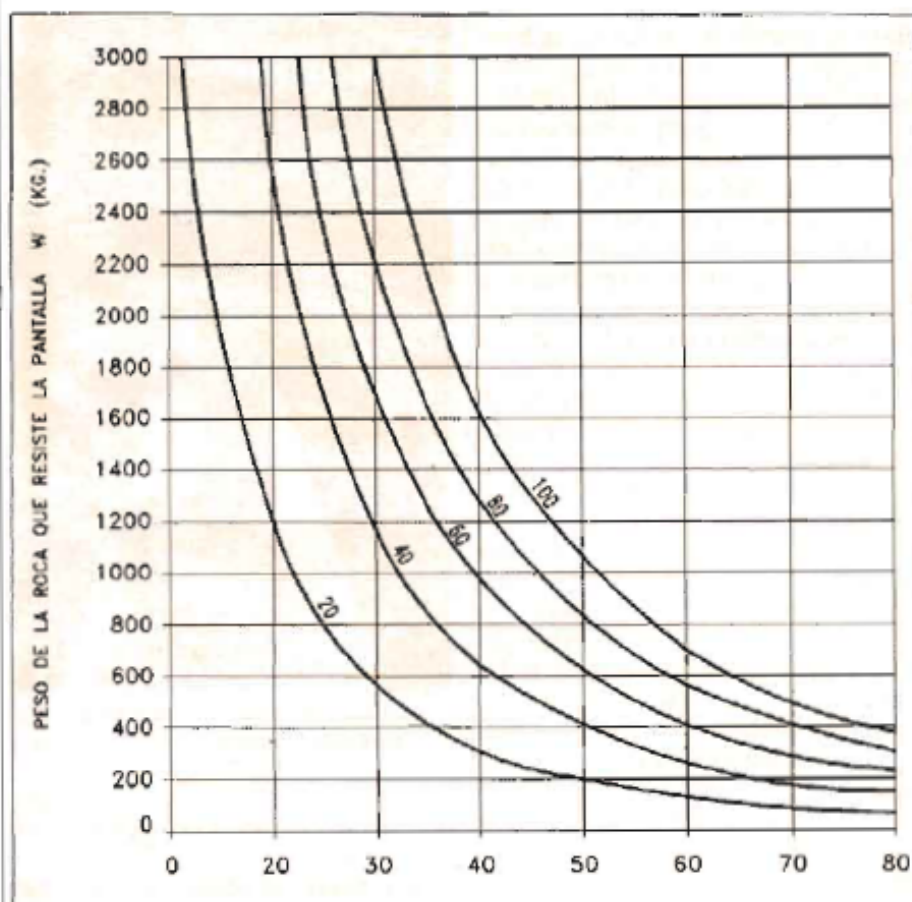


Figura 4. Relación entre el peso de las rocas y las velocidades para diferentes magnitudes de energía.

prácticos del diseño o comprobación de las pantallas.

Independientemente de la rigidez de la pantalla, la detención de las rocas se produce cuando se alcanza la condición de igualdad entre la energía cinética que tiene la piedra en el momento del impacto, y el trabajo de las fuerzas de reacción durante la deformación y desplazamiento de la estructura (enfoque energético del análisis):

$$E_c = \omega_r$$

Así, el trabajo de las fuerzas de reacción que la pantalla opone al movimiento puede calcularse por la siguiente fórmula:

$$\omega_r = \int_0^{\Delta_{max}} R \cdot d\Delta$$

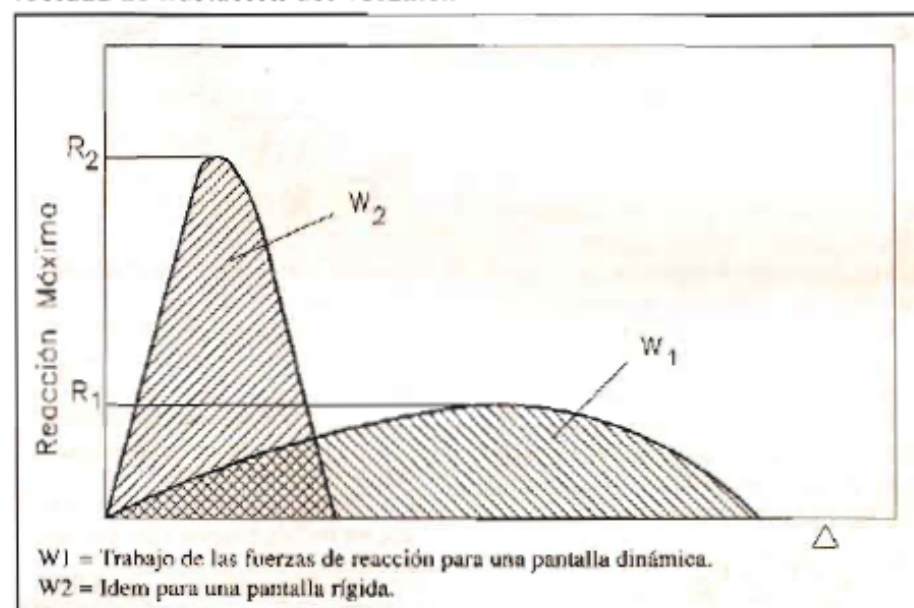


Figura 5. Esquema fuerza de reacción-desplazamiento de la malla.

donde: R - fuerza de reacción que opone la pantalla en la misma dirección y sentido contrario al movimiento de la roca.

Δ - desplazamiento del punto de contacto de la roca hasta que se detiene.

El análisis de esta expresión conduce a que (figura 5), para el caso de obras rígidas, debido al pequeño desplazamiento que ofrecen, las fuerzas de reacción son muy elevadas. En cambio, en las pantallas de tipo flexible, a las que se ha denominado dinámicas, debido al desplazamiento que ofrece la estructura, se neutraliza la fuerza del impacto, y así se absorbe la misma energía con fuerzas de reacción de menor magnitud.

A efectos prácticos, debido a la dificultad de determinar la ecuación de la curva y fuerza de reacción-desplazamiento de la pantalla para, y a partir de la misma, obtener el trabajo total realizado, o sea, la integral de la función, que no es más que el área bajo la curva, se calculará este área como la suma de dos triángulos. Por tanto, la expresión para el cálculo de las fuerzas de reacción será:

$$W_t = 1/2 \cdot R_{\text{med}} \cdot \Delta_{\text{med}}$$

Una vía alternativa del análisis



Detalle de la unión y los cables al poste de la pantalla dinámica.



Pantalla estática destruida por impacto de piedras.

dinámico de la pantalla es el planteamiento del equilibrio entre la cantidad de movimiento que tiene la roca en el momento del impacto con respecto al impulso en sentido contrario al movimiento, que es ejercido por las fuerzas de reacción y que provocan el frenado de la roca.

Impulso = Cantidad de movimiento

$$\bar{R} \cdot t = m \cdot v$$

siendo: t - tiempo transcurrido desde el contacto con la malla hasta que la roca se detiene.

v - velocidad traslacional en el momento del impacto.

R - fuerza de reacción media que actúa durante el tiempo t .

Este procedimiento, adecuado para la evaluación experimental del comportamiento de la pantalla, a los efectos del diseño es inoperante, dada la imposibilidad de conocer con exactitud los valores de t y v . Por tanto, para el diseño de las pantallas dinámicas es más racional aplicar el principio físico, (visto anteriormente) de la correspondencia entre el trabajo de las fuerzas de reacción y la energía entregada al sistema por la roca en el momento del impacto.

Conociendo la carga máxima al punzonamiento que resisten las mallas, se pueden calcular las fuer-

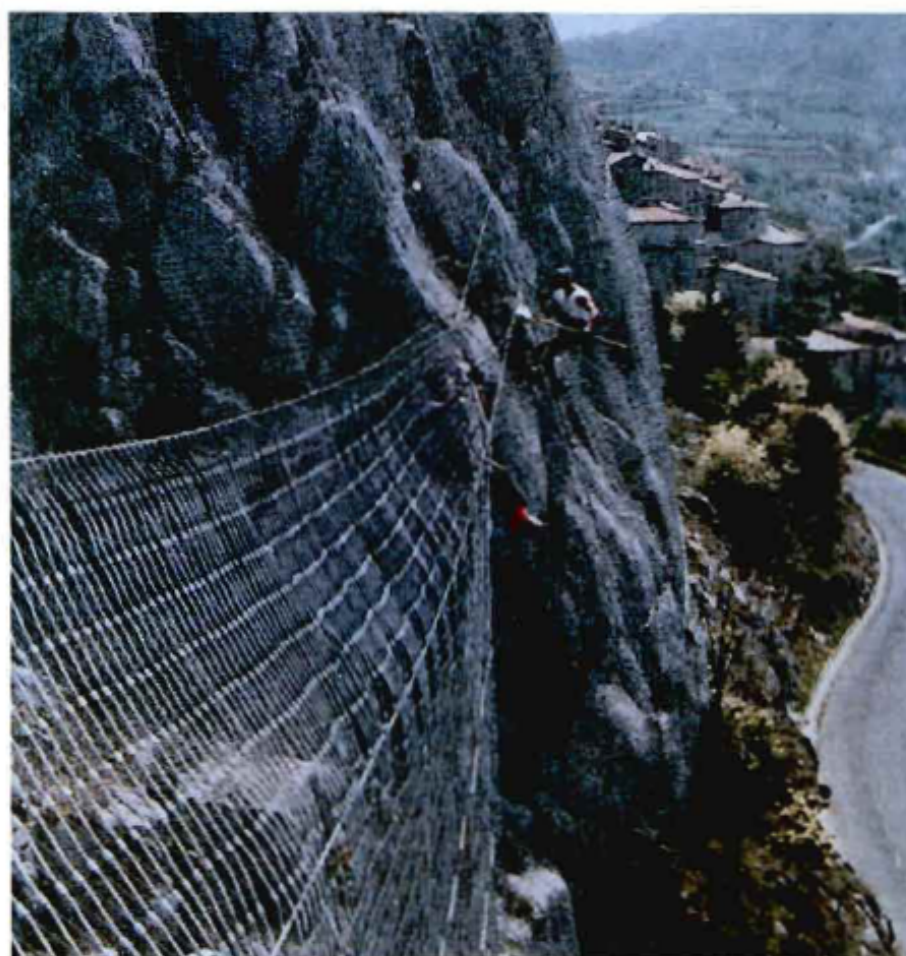
zas que se van a transmitir a cada uno de los elementos de la pantalla y, en consecuencia, determinar el desplazamiento máximo que tendría el punto de contacto de la roca en la malla ($\Delta_{\max}$). Para el caso presentado, los resultados obtenidos son los siguientes:

- Energía máxima que es capaz de absorber la pantalla..... 75 kJ
- Máxima tensión en el cable longitudinal..... 67.5 kN
- Momento máximo en la base del perfil para la condición más desfavorable 50 kNm

Comparando diferentes tipos de pantallas con malla doble de simple torsión (50x50 y alambre de 2.7 mm) y de resistencia 77 kN, según sea la pantalla rígida o dinámica y en función de la distancia entre los postes, se obtienen los valores reflejados en la siguiente tabla N° 1.

Conclusiones.

- La capacidad de absorción de energía de las pantallas dinámicas es cuatro veces superior al sistema tradicional estático, soportando el mismo tipo de malla sobre perfiles rígidos anclados en la base y sepa-



Malla de protección de doble torsión, reforzada por una malla de cables.

TABLA N° 1

Resumen de los cálculos comparativos para diferentes tipos de pantallas

(Doble malla de simple torsión 50 x 50, e = 2,7 mm e impacto centrado en el paño)

Tipo de Pantalla	H (m)	D (m)	M _{max} (kN.m)	Δ (m)	E (kJ)
Rígida sobre postes empotrados	2	2	90,42	0,47	18
Rígida sobre postes empotrados	2	4	90,42	0,94	36
Dinámica sobre postes empotrados	2	4	38,50	1,57	60
Dinámica sobre postes basculantes	2	4	26,30	1,97	75

H: altura del poste.

D: distancia entre postes.

M_{max}: momento máximo en la base del poste.

Δ : deformación máxima de la pantalla.

E: energía absorbida por la pantalla antes de la rotura de la malla.

rados a una distancia aproximada de 2 metros.

- El valor del momento máximo en la base de los perfiles es casi dos veces menor en las pantallas dinámicas que en las rígidas, además de reducir en más de la mitad el número de postes.

- El sistema dinámico permite un mantenimiento fácil, tanto en lo que se refiere a la sustitución de elementos dañados, como a la limpieza de la parte posterior del muro en caso de colmatación.

- El coste de construcción de este tipo de pantalla dinámica es similar al de los sistemas estáticos tradicionales.

Referencias.

1. Smith, Duane D., Duffy, John D., "Field test and evaluation of rockfall restraining nets", California Department of Transportation, Transportation Material and Research, Report N° CA/TL 90/05, June 1990.
2. Peckover F.L., Kerr J.W.G.

"Treatment and maintenance of rock slopes on transportation routes". Canadian Geotechnical Journal. Vol. 14, 1977.

3. Agostini R., Mazzalai P., Pappetti A. "Filets métalliques à mailles hexagonales pour la protection des falaises et talus". Frande Gabions S.A., 1988.

4. Nuevo sistema de redes dinámicas contra desprendimientos rocosos. Nova Ingeco S. L.; San Sebastián, 1990.

5. Ritchie A.M., "Evaluation of rockfall and its control". Highway Research Board Record 17. Washington, D.C. 1963 ■

José A. Hinojosa Cabrera es Subdirector General Adjunto de Tecnología y Proyectos de la Dirección Gral. de Carreteras (MOPET).

Francisco Ballester Muñoz, es Catedrático de Ingeniería de la Construcción, Director del Dpto. de Transporte y Tecnología de Proyectos y Procesos, Universidad de Cantabria.

Juan Antonio Torres Vila, es Director del Dpto. de Ingeniería Vial, Universidad de La Habana.



Malla metálica de protección contra desprendimientos de piedras.