TRATAMIENTO DEL MACIZO ROCOSO DEL FERROCARRIL DE CREMALLERA DE MONISTROL A MONTSERRAT

COMELLAS OLIVA, Josep. Ing. de Caminos. Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.
PARET GARCIA, David. Geólogo. Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.
TERRADO PABLO, Eduard Josep. Geólogo. Inaccés Geotècnica Vertical, S.L.
OLIVERAS ALOY, Ricard. Ing.Tec. de Minas. Inaccés Geotècnica Vertical, S.L.

RESUMEN:

En esta comunicación se presentan los trabajos de estabilización y protección frente a desprendimientos rocosos, realizados en el ferrocarril de cremallera de Monistrol a Montserrat durante el año 2.001.

Estos trabajos fueron ejecutados previamente a la instalación de la nueva infraestructura que Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya puso en servicio el año 2.003. Anteriormente había circulado un tren cremallera desde el año 1.892 al 1.957 que se clausuró fundamentalmente por motivos económicos.

Debido a la complejidad de actuación para solucionar los problemas de estabilidad que se detectaron en la traza de la nueva infraestructura y a los condicionantes de operatividad y respeto medioambiental, Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya redactó un proyecto con soluciones técnicas singulares y complejas, la ejecución de las cuales fueron adjudicadas mediante concurso público a la empresa Inacces Geotécnica Vertical S.L., la cual utilizó sistemas de ejecución de alta especialización para resolver los condicionantes orográficos y de acceso que suponía la ubicación de los trabajos a realizar.

INTRODUCCIÓN:

Cuando la administración pública catalana se propuso restituir el antiguo tren de Cremallera de Monistrol a Montserrat para mejorar la accesibilidad al santuario, facilitar el aparcamiento de vehículos y reducir la afectación medioambiental, pretendió con ello también restituir un icono ligado a la historia de la montaña y que era reclamado por varios sectores sociales.

Así, a Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya se le planteaba el reto de restituir una infraestructura con los condicionantes técnicos y de seguridad exigibles para el siglo XXI en un macizo con una orografía complicada, protegido medioambientalmente al ser un parque natural, y con un alto índice de riesgos naturales.

Todo esto llevó a F.G.C. a plantearse de una manera muy especial las diferentes soluciones a los problemas que se iban planteando, las cuales en muchos casos necesitaban de un determinado grado de ingenio y innovación en cuanto a los procedimientos de trabajo.

Después de varios años de estudio del comportamiento del macizo, Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya llevó a cabo la construcción de una infraestructura de seis quilómetros de longitud, la cual se dotó de una buena gama de sistemas de protección contra los riesgos geológicos.

GEOMORFOLOGÍA Y CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO:

El macizo de Montserrat se encuentra ubicado en el margen oriental de la unidad morfoestructural denominada depresión o cuenca del Ebro, en el límite con la cadena costera catalana (ver figura 1).

Fig.1: Situación del Macizo de Montserrat dentro de la Cuenca del Ebro

Éste macizo está formado íntegramente por materiales paleógenos de origen sedimentario pertenecientes a un sistema deltaico (ver figura 2) el cual formaba abanicos aluviales fruto del aporte de materiales del interior del macizo de los catalánides, situados al este, hacia la cuenca del Ebro.

Los diferentes procesos tectónicos y erosivos han dejado como resultado un macizo aislado con un particular y singular relieve definido por la presencia de un núcleo del macizo formado por paquetes conglomeráticos bien cimentados dispuestos subhorizontalmente, los cuales presentan dos familias de diaclasas principales dispuestas ortogonalmente, por las que avanza preferencialmente la meteorización y erosión resultando una morfología columnar de los paquetes conglomeráticos característica del macizo.

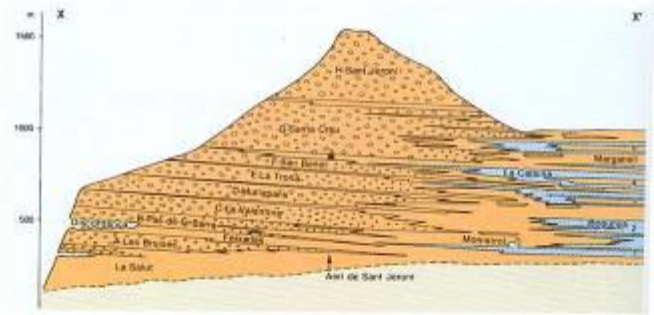


Fig. 2: Sección litológica representativa del macizo.

Fig.3: Trazado del ferrocarril

Siguiendo el trazado del ferrocarril (figura 3) desde su origen en Monistrol de Montserrat, pueblo ubicado en el pie del macizo y a orillas del río Llobregat, primero nos encontramos con una morfología fluvial de fondo de valle.

Una vez atravesado el río a la cota 140, la traza del cremallera va subiendo progresivamente por la ladera del macizo con pendientes suaves al principio pasando a partir del p.k. 2+700 a presentarse una morfología caracterizada por grandes acantilados rocosos al pie de los cuales circula el trazado del ferrocarril, hasta llegar al monasterio de Montserrat ubicado en la cota 700.

PROBLEMAS DE ESTABILIDAD:

Con el fin de establecer cuáles eran los principales riesgos geológicos provenientes del macizo rocoso, Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya, ya inició en 1990 estudios de riesgos de desprendimientos, los cuales, durante un periodo de tiempo de diez años, dieron información suficiente como para tener un criterio de actuación destinado a minimizar los riesgos existentes antes de iniciarse la ejecución de las obras.

Los principales problemas de estabilidad detectados fueron la caída de bloques rocosos por las laderas de la montaña.

Éstas caídas tienen su origen en la erosión de los niveles lutíticos intercalados entre los estratos conglomeráticos más resistentes a la meteorización, lo que origina que queden en voladizo bloques rocosos que, especialmente en épocas de lluvia, son desestabilizados por la presión hidrostàtica ejercida sobre las fisuras abiertas aprovechando el diaclasado regional vertical. Hay que destacar que el clima mediterráneo se caracteriza por las lluvias torrenciales que se producen en primavera y otoño.

Otro desencadenante de las caídas es el efecto cuña ejercido sobre estas fisuras por los ciclos hielo-deshielo durante el invierno.

También hay que destacar el efecto producido por el empuje de las raíces de la vegetación arbórea existente sobre los bloques rocosos más superficiales e inestables.

Fig.4: Volumen rocoso desprendido.

Estos bloques potencialmente inestables, pueden llegar a tener dimensiones considerables de hasta varias decenas de metros cúbicos.

Un ejemplo aparece en la figura 4 donde se puede apreciar un bloque rocoso saneado manualmente con palancas y gatos hidráulicos el cual llegó a la traza del cremallera.

Por último, otra topología de caída detectada es el deslizamiento de grandes porciones de ladera siguiendo una discontinuidad mediante deslizamientos de tipo planar a favor de discontinuidades dispuestas a favor de la pendiente.

Fig.5: Desprendimiento de la *"Paret Seca*".

Este es el caso del desprendimiento de "la pared seca" (figura 5) acaecido en 1995, durante el cual hubo un gran deslizamiento de material rocoso de varios cientos de metros cúbicos.
Este deslizamiento se originó a favor de una junta con marcado buzamiento hacia el acantilado y tuvo como límite lateral y de cabeza las dos familias de diaclasas regionales existentes.

Los derrames de material desprendido quedaron repartidos a lo largo de toda la ladera del macizo, llegando hasta zonas próximas al pueblo ubicadas a más de 500 metros de la zona de salida.

A lo largo de la traza del derrame se llegaron a detectar bloques rocosos de hasta 100 m^3 de volumen.

Todos estos movimientos de masa originan unos depósitos de ladera, que en caso de encontrarse en cotas superiores a las de la traza de la infraestructura, es necesario valorar su estado de equilibrio al no ser descartable su removilización desde la misma ladera.

Especialmente preocupante es encontrar bloques caídos en la cabecera de los taludes de la traza ya que la simple erosión del suelo en que reposan pueden provocar caídas de bloques desde la cabeza del talud.

TRABAJOS DE ESTABILIZACIÓN REALIZADOS:

Así, con estos antecedentes, Ferrocarrils de la Generalitat estructuró la obra de protección en dos fases:

1 - Una primera consistente en el saneo de los elementos rocosos inestables de los acantilados conglomeráticos, de las laderas y de los taludes de la traza.

2 - Una segunda que consistió en la ejecución de actuaciones de protección contra la caída de piedras y estabilización in situ de volúmenes rocosos potencialmente inestables.

Debido a la inaccesibilidad de los puntos a sanear y/o estabilizar, muchos de los trabajos realizados tuvieron que ejecutarse con la ayuda de técnicas de escalada y con operarios expertos en estas labores debido al riesgo laboral específico existente y a la alta especialización de las labores a ejecutar.
Este tipo de actuaciones permitió además respetar en gran manera el ecosistema existente en el macizo y deteriorar lo menos posible el medioambiente, al mismo tiempo que se realizaron actuaciones de muy bajo impacto visual.

1 - Saneo de elementos rosos inestables:

Este grupo de trabajos consistió en realizar un saneo del macizo rocoso mediante un proceso de purga y minado de los elementos rocosos inestables existentes en el macizo.

Esta fue la primera fase de actuación previa a cualquier otra de obra, por el riesgo que conllevaba a cualquier persona o equipo que pudiera operar por debajo de los acantilados a sanear.

Al valorar que no sería posible realizar el saneo con el tren cremallera en fase de explotación, no se escatimó ningún recurso para sanear cualquier bloque con riesgo potencial de caída.

*Purgas manuales**:***

Los trabajos de purga consistieron en desestabilizar manualmente los elementos rocosos mediante la utilización de palancas y gatos hidráulicos. (ver figura 6).

Fig.6: Operarios en labores de purga.

Para el acceso a los puntos de saneo tan sólo fue necesario el desbroce de pequeños senderos en algunos puntos y realizar sujeciones con clavos en la roca para descolgar los operarios con cuerdas, con lo que el impacto sobre el ecosistema fue mínimo.
Con este procedimiento se llegaron a purgar elementos rocosos de volúmenes que llegaron a los 12 m^3.

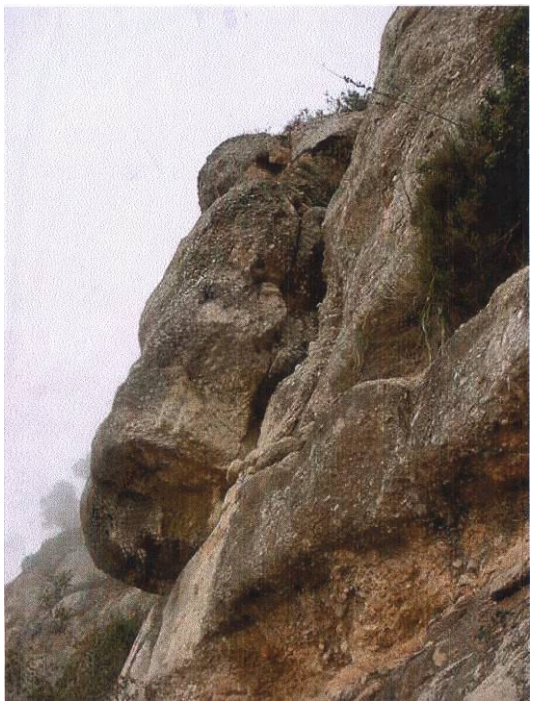
En total se llegaron a invertir 3.144 horas de operario especializado destinadas a estas labores.

Minados:

Los elementos rocosos que por sus dimensiones y peligrosidad operativa no podían ser purgados manualmente, fueron eliminados mediante voladuras controladas.(figura 7).

Las voladuras fueron diseñadas por la dirección de obra pudiéndose ver en la figura nº 8 un croquis tipo de la trama de perforaciones, su profundidad y las cargas aplicadas.

Fig.7: Trabajos de minado



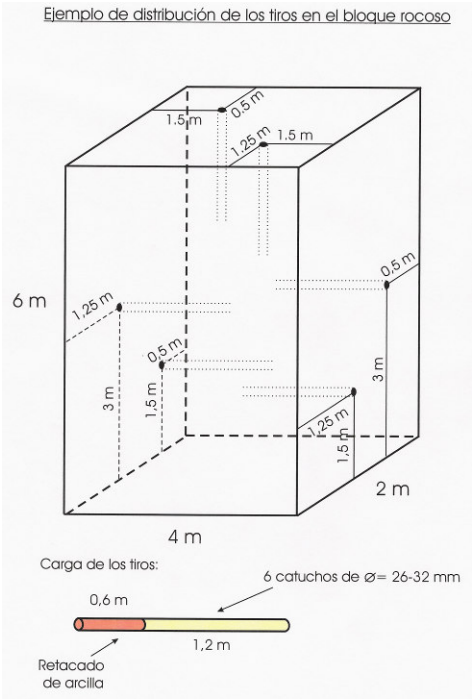


Fig.8: Ejemplo de diseño de minado.

En total se realizaron minados en 57 bloques rocosos gran parte de los cuales tuvieron que ser perforados y cargados por personal especializado en trabajos verticales por su dificultad técnica de acceso. En alguno de los casos los elementos minados llegaron a realizarse en bloques rocosos de hasta 90 m^3 de volumen.

Siempre, después de haberse realizado la voladura, se procedió a realizar una purga manual de la zona minada por quedar pequeños fragmentos de la voladura sin caer, y en algunos casos también se tuvo que completar con alguna estabilización puntual. Asimismo también se repasaba el trayecto dejado por el derrame de piedras para sanear las que habían quedado en la ladera antes de llegar a la traza.

2 – Actuaciones de protección y estabilización:

Durante los trabajos de saneo realizados en primera instancia, se hicieron inspecciones in situ por parte de geólogos de la dirección de obra y de la contrata mediante procedimientos de trabajos verticales y con reconocimientos realizados desde helicóptero, con el fin de determinar posibles riesgos no detectados en proyecto y al mismo tiempo revisar los puntos que en proyecto venían como zonas de actuación.

Fruto de estas inspecciones se realizó el replanteo definitivo de obra el cual acabó definiendo qué actuaciones y en qué cantidad eran necesarias.
En total se dividió la traza en 29 sectores de actuación en función de los trabajos a realizar y su operatividad.
Las unidades de obra realizadas las podríamos dividir en dos grandes grupos; un primer grupo correspondiente a actuaciones destinadas a estabilizar o proteger los puntos inestables in situ, y un segundo grupo de actuaciones consistente en proteger la traza de la infraestructura mediante la interceptación de las caídas durante el trayecto de caída.

a - *Actuaciones de estabilización y protección in situ:*

- Mallas de triple torsión de protección de taludes
- Mallas de cable de acero
- Bulones de acero
- Fajas de cable
- Contrafuertes de hormigón armado

b - *Actuaciones destinadas a interceptar las caídas de rocas durante el trayecto:*

- Barreras antidesprendimientos dinámicas
- Barreras antidesprendimientos fijas
- Viseras antidesprendimientos

Las actuaciones de interceptación se definieron allá donde la actuación in situ sobre las zonas de partida era demasiado costosa por abarcar estas una gran superficie.

Hay que reseñar que determinadas zonas inestables pueden llegar a proporcionar caídas con valores energéticos de tal magnitud que no podrían ser interceptadas por las barreras o viseras antidesprendimientos, por lo que éstas a menudo se vieron complementadas con actuaciones directas sobre los escarpes de roca para estabilizar volúmenes de roca de grandes dimensiones.

Mallas de triple torsión de protección de taludes:

Esta actuación (fig.9) es ampliamente conocida en el sector y consiste en el cubrimiento de los taludes con mallas de alambre de acero galvanizado en triple torsión con el fin de evitar el desprendimiento de piedras sobre el trazado de la vía.

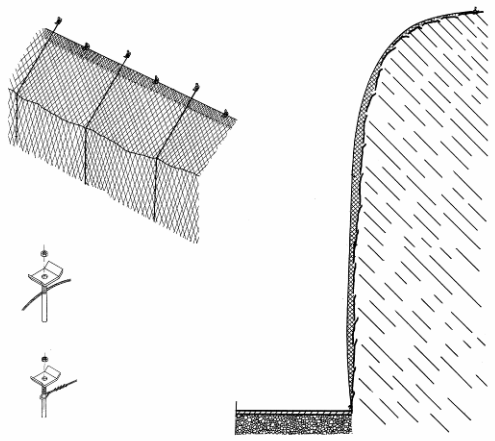


Fig.9: Mallas de triple torsión

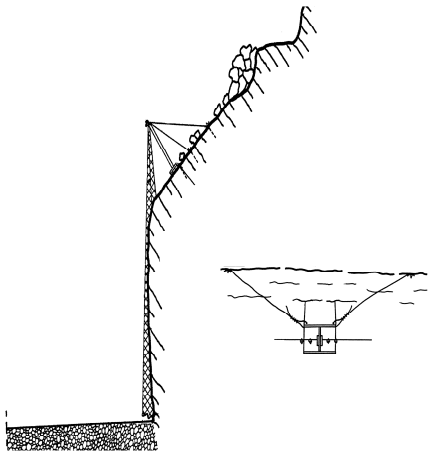


Fig.10: Mallas t. t. con postes

Una variante de esta actuación consiste en construir en la cabeza de talud una estructura con postes de acero sobre la que se fija la malla la cual tiene como finalidad interceptar las piedras de pequeña dimensión que puedan caer desde la ladera montañosa. (Figura 10).

Mallas de cable de acero:

Esta actuación consiste en cubrir las zonas descompuestas del talud que no pueden ser controladas mediante una simple malla de triple torsión, con una red de cable de acero que usualmente suele ser de 8 mm de diámetro y con una luz de cuadro de 300x300 mm.

Estas mallas van sujetas a zonas sanas y estables del talud mediante bulones y/o eslingas de acero.

Es usual forrar estas mallas de cable con malla de triple torsión para no dejar pasar las piedras de menor tamaño.

Bulones de acero:

Esta actuación se llevó a cabo de forma selectiva y con un dimensionado del bulonaje adecuado para cada caso con el fin de optimizar al máximo los medios debido a las dificultades técnicas de ejecución existentes.

Así, casi en su totalidad, fue necesario realizar el bulonaje con técnicas de trabajos verticales y con equipos adecuados al terreno.

En el caso de los bulones de mayor longitud y diámetro se tuvo que emplear perforadoras colgadas de grúas, y en los casos de mayor inaccesibilidad se tuvo que posicionar las perforadoras con helicóptero (figuras 11 i 12). En estas intervenciones, en el momento de la colocación de las barras de acero en la perforación, éstas se transportaron mediante helicóptero y una vez apuntadas en la boca del taladro por un operario colgado en la pared, el mismo helicóptero empujaba la barras.

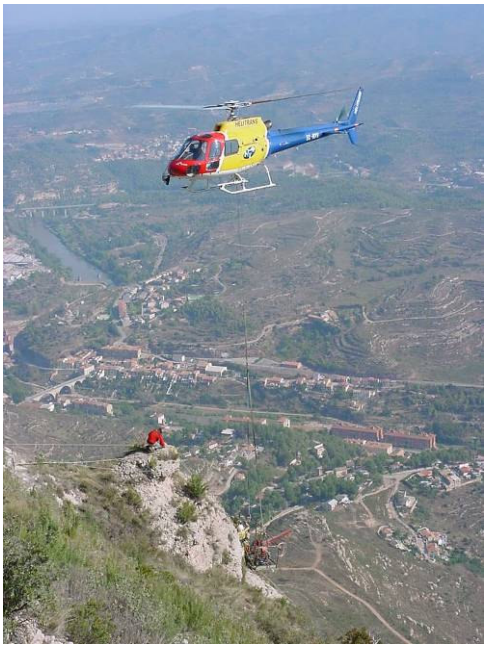


Fig.11: Posicionamiento de perforadora

Fig.12: Trabajos de perforación

En total se realizaron los siguientes bulones:

Longitud bulón	∅ Barra(mm)	∅Perf.(mm)	Cantidad (Ud)	Total (ml)
2	25	42	5	10
3	25	42	15	45
2	32	50	20	40
3	32	50	20	60
4	32	50	17	68
6	32	90	45	270
10	40	90	25	250
12	40	90	40	480
Total			**187**	**1.223**

Fajas en cable de acero:

Este sistema consiste en estabilizar in situ los bloques de roca rodeándolos con cables de acero unidos a anclajes de eslinga realizados en la pared rocosa sana y estable.

Estos cables se ponen en tensión para impedir cualquier movimiento del bloque rocoso.

Recalces de hormigón armado:

Esta actuación se realizó sólo en un sector y se ejecutó como medida de refuerzo para evitar que unos bulones de d=40 mm y 12 metros de longitud que se realizaron para estabilizar un gran prisma rocoso de varios cientos de metros cúbicos, trabajaran a cizalla, ya que esta columna de roca estaba en gran medida descalzado. (Figura 13).

Este recalce de hormigón armado, de 9 m^3 de volumen, se construyó en la base extraplomada del prisma rocoso, con la dificultad que se tuvo que realizar a 12 metros de altura por encima justo de la traza. Esta estructura de hormigón armado se ancló a la pared rocosa estable mediante 20 bulones de 3 metros de longitud y 32 mm de diámetro.

Fig. 13: Croquis representativo de un recalce de hormigón y ejemplo en la obra.

Barreras antidesprendimientos dinámicas:
Este tipo de barrera se caracteriza por tener la capacidad de interceptar caídas de bloques rocosos con valores energéticos de alta magnitud.

Esta capacidad de absorción de energía viene dada por su capacidad de deformación y por sus dispositivos de disipación de energía denominados “frenos”.

Están formadas por paneles de malla de cable sostenidos mediante postes metálicos micropilotados al terreno. (Ver figura 14).

Las mallas de cable están unidas al terreno mediante vientos sujetos a anclajes al terreno.

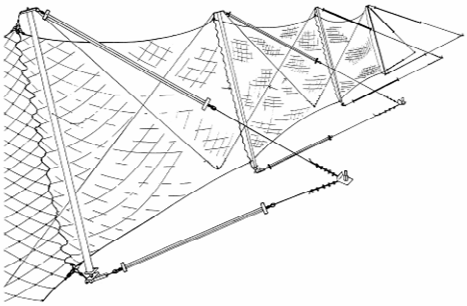


Fig.14: Croquis de barreras dinámicas antidesprendimientos.

A lo largo de la traza del cremallera de Montserrat se instalaron un total de 1.380 metros lineales de barreras dinámicas en varios tramos de los cuales 1.365 fueron barreras de 5.000 Kj de capacidad de absorción de energía y 5 metros de altura y 15 m.l. correspondieron a una barrera de 1.000 Kj de capacidad de absorción y 3 metros de altura.

Un ejemplo de estas intervenciones se puede apreciar en las fotografías de la figura 15.

Fig.15: Barreras dinámicas h=5m E=5.000 Kj.

Barreras antidesprendimientos fijas:

Este tipo de intervención es equivalente a las barreras dinámicas sólo que las barreras fijas sólo tienen capacidad de interceptar bloques rocosos con poca energía cinética.

Los elementos con que están construidas son similares a las dinámicas sólo que tienen mucha menos capacidad de deformación, la base del poste no está articulada y no poseen frenos disipadores de energía.

Se instalaron en zonas donde las caídas eran de baja magnitud y la superficie de salida era muy extensa siendo esta opción mucho más económica.

En total se instalaron dos barreras de este tipo:

Longitud barrera	Altura (en m)
38 m.l.	3
12 m.l.	2

Viseras antidesprendimientos:

Esta intervención equivale a una barrera antidesprendimientos pero en lugar de estar ubicada en una ladera con pendientes suaves, está instalada en un acantilado rocoso vertical y se dispone horizontalmente.

En la traza del cremallera se construyeron dos viseras, una de 100 metros de longitud y otra de 40 metros con alturas variables ya que la longitud de los postes tuvo que ser variable para poder adaptarse la visera a la pared rocosa y que la visera cubriera completamente la plataforma de la traza. (Ver figura 16).

Para poder realizar esta actuación fue de suma importancia realizar una topografía previa de la pared rocosa para poder fabricar todos y cada uno de los elementos de la visera a medida.

Fig.16: Viseras del sector 22 (p.k. 5+340-5+440).

Esta actuación permitió evitar cubrir un acantilado rocoso de unos 80 metros de altura por 100 de longitud aproximadamente además de proteger contra las caídas de piedras de poca entidad provenientes de la ladera superior a la cabecera de talud, con la consiguiente reducción de impacto visual sobre el macizo.

CONCLUSIONES:

La construcción del nuevo tren de cremallera de Monistrol a Montserrat, debido a la morfología y características geológicas del macizo por la que tenía que construirse la infraestructura, presentaba como punto crítico la definición y ejecución de los trabajos de mitigación y protección contra la caída de rocas sobre la traza del ferrocarril.

Este hecho propició que se realizara un estudio y seguimiento de los problemas a abordar con tiempo suficiente para poder definir las tareas con garantías de éxito.

Al mismo tiempo, las características de las laderas y acantilados a estabilizar requirieron un alto grado de especialización de la empresa adjudicataria siendo necesario el uso de técnicas fuera de lo común en el sector de la construcción.

Un punto determinante en la intervención y que creemos que seria interesante considerar en futuras obras de características análogas, es realizar un saneo de los elementos más inestables y deteriorados del macizo previo al inicio de cualquier otra intervención en la obra.

Este hecho permite realizar una labor preventiva para los futuros equipos que han de trabajar en la obra y, si al mismo tiempo, personal técnico especializado inspecciona el macizo y define el estado en que ha quedado después del saneo, se pueden corroborar o mejorar las actuaciones previstas en proyecto.

De crucial importancia también ha sido realizar las actuaciones intentando impactar en la menor medida posible al entorno natural por tratarse este de una zona protegida, habiéndose evitado el tener que realizar caminos de acceso para maquinaria pesada para realizar las labores de saneo y estabilización del macizo rocoso.

La valoración de las tareas realizadas a fecha de hoy (Abril del 2005), y ya con el tren cremallera funcionando desde hace ya casi dos años, es totalmente positiva tanto desde el punto de vista de la inexistencia de incidencias en cuanto a caídas de piedras se refiere como también desde el punto de vista ambiental, pues los desbroces realizados se han regenerado totalmente y gran parte de las actuaciones cada vez están más integradas dentro de la vegetación.

Así pues y como nota final hemos de añadir que por difíciles e irrealizables que parezcan, todos los trabajos pueden llevarse a cabo siempre y cuando se prevean con antelación y se disponga de los medios y equipos cualificados para ello.

BIBLIOGRAFÍA:

- Projecte constructiu del ferrocarril del Cremallera de Monistrol a Montserrat. FGC (GPO) (Febrero. 2001).

- Projecte constructiu de tractament del massís rocós del ferrocarril de Cremallera de Monistrol a Montserrat. FGC. Nova Ingeco (Noviembre.2000).

- Historia Natural dels Països Catalans. Vol.II: Geologia. Editorial Enciclopedia Catalana S.A. (1992).

- Estudi de riscos i projecte de protecció del massís rocós per l'accés a l'Abadia de Montserrat mitjançant ferrocarril (Octubre.1990).