

TRABAJOS DE PROTECCIÓN FRENTE A DESPRENDIMIENTOS DE ROCAS Y ESTABILIZACIÓN PROFUNDA EN LA PRESA DE CANELLES - ENDESA

**Conesa Baños. FRANCISCO J. (1), Greco Flores. MARCELO (2) y Romana García.
MANUEL (3)**

⁽¹⁾ ENDESA GENERACIÓN – Responsable Obra Civil Zona Ebro Pirineo
Francisco.conesa@enel.com

⁽²⁾ Paramassi Ibérica SL - Gerente
mgf@paramassi.es

⁽³⁾ Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Civil – Transporte y Territorio
Escuela de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid
manuel.romana@upm.es

RESUMEN

Las actuaciones existentes en la Presa de Canelles son un testimonio de cómo han evolucionado las técnicas de estabilización de laderas rocosas a lo largo de más de medio siglo. Desde su construcción se ha intervenido en los macizos de los estribos y se han dispuesto barreras de contención para bloques sueltos. El caso descrito es el conjunto de las actuaciones emprendidas tras un desprendimiento que afectó al desagüe de fondo. Tras este incidente, el gestor de la infraestructura, Endesa Generación, decidió abordar trabajos adicionales para aplicar métodos de trabajo, técnicas, equipos y optimización de recursos para reducir el riesgo en sucesos futuros, y ha contado para ello con la experiencia de Paramassi Ibérica, el artículo describe estas actuaciones, incluyendo el diseño y las obras auxiliares.

1. INTRODUCCIÓN

En noviembre de 2018 se produjo un desprendimiento rocoso de una masa con un peso estimado de 1.800 t. Este desprendimiento partió de la parte intermedia de la ladera del estribo izquierdo, en la cerrada de la presa de Canelles, y afectó a las pasarelas de reconocimiento y al desagüe de fondo, en el paramento de aguas abajo de esta estructura. Rápidamente se realizaron labores de saneo y estabilización, comenzando con la primera toma de datos del talud para realizar un sostenimiento que dotara de mayor estabilidad al macizo frente a desprendimientos como el sucedido.

Las labores de toma de datos consistieron en la observación directa del talud, las galerías del macizo, una inspección de detalle en zonas inaccesibles realizada con personal de trabajos en altura y un levantamiento de la zona con imágenes suficientes para la generación de un modelo tridimensional del terreno mediante fotogrametría.

Con toda la información recogida, además del estudio de la información existente de actuaciones anteriores, incluido el proyecto de construcción de la presa, y asumiendo las necesidades

expresadas por el Gestor, se determinó una actuación en la ladera en cuatro fases, que fueron las siguientes: un saneo global de la ladera, la disposición de una membrana flexible ajustada al relieve, formada por mallas de triple torsión y redes de anillos de acero, el bulonado con anclajes pasivos y la disposición de anclajes activos de estabilización profunda. El objetivo global fue estabilizar el macizo y evitar futuros desprendimientos. Asimismo, y considerando las instalaciones de Endesa Generación al pie de la ladera, se acometieron una serie de obras de protección auxiliares en diferentes puntos, mediante pantallas dinámicas y mallas adosadas.

2. DESCRIPCIÓN DE LA PRESA Y SU MARCO GEOLÓGICO

La Central Hidráulica de Canelles es un aprovechamiento hidroeléctrico de pie de presa, en funcionamiento desde 1960, con una potencia de 108 MW, situado en el río Noguera Ribagorzana. El embalse está creado por la presa, acodándose en la cerrada que le da nombre. La tipología de la presa es de bóveda de hormigón, siendo su altura de 151 m y su longitud de coronación de 210 m. Dispone de un aliviadero de superficie exento con vertido en túnel en la margen derecha y un desagüe de fondo regulado con una válvula de mariposa, alojada en un recinto en la margen izquierda.

Durante las primeras fases de llenado se pudo comprobar que la impermeabilidad del macizo no era la esperada, apareciendo unas importantes filtraciones aguas abajo. Por ello se abordó la ejecución de varias campañas de impermeabilización y estabilización de los macizos mediante pantallas de inyección desde galerías y en superficie. En el estribo derecho se construyó un muro anclado, mientras que, en el izquierdo, para mejorar la estabilidad del macizo, se construyeron las denominadas *galerías de atado*, túneles de diámetro reducido con un importante revestimiento fuertemente armado y de gran espesor, que atraviesan el estribo en su parte de aguas abajo.

Dentro de la orogenia alpina de la formación de los Pirineos, en sus características láminas cabalgantes de la zona Surpirenaica central, se sitúan las denominadas Sierras marginales, de las cuales forma parte la sierra de Blancafort, en la que se cimenta la presa de Canelles. Estos materiales principalmente mesozoicos, se encuentran sometidos a pliegues de gran escala, resultado de la tectónica regional descrita.

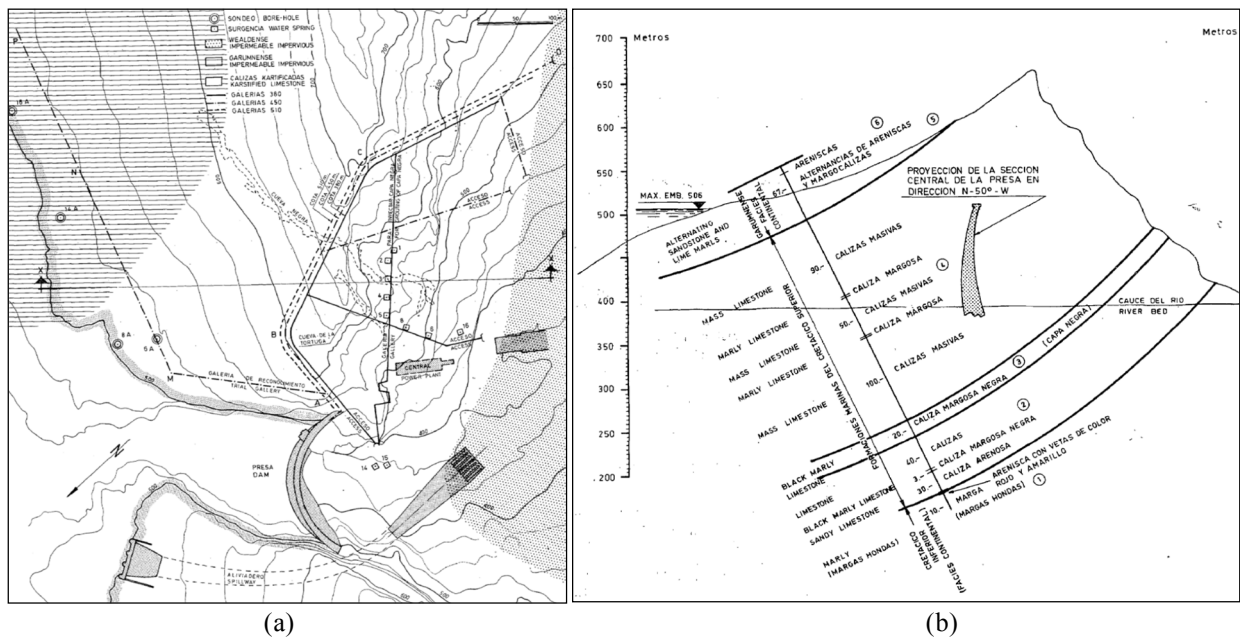


Figura 1. (a) Planta del estribo izquierdo y (b) Corte esquemático de las unidades estratigráficas del estribo izquierdo de la presa de Canelles. Fuente: [3]

La geomorfología, ligada a la geología y la tectónica de la zona, hace que los valles tengan una orientación NO-SE, E-O, reflejos de los pliegues y cabalgamientos descritos. Esto da lugar a los relieves escarpados como la sierra de Blancafort y el valle que forma el vaso del mismo.

Las formas kársticas se han formado en los macizos calizos y a favor de las diaclasas. Las cuevas más importantes de la zona se encuentran precisamente en la sierra de Blancafort. Las formas kársticas de los estribos han perjudicado la impermeabilidad natural de la roca, y por ello fueron necesarias las inyecciones. Sin embargo, no son alteraciones de gran extensión, por lo que no afectan a la estabilidad del macizo rocoso objeto de este estudio.

La cerrada se encuentra en unas calizas masivas con intercalaciones de calcarenitas y calizas margosas, con una potencia estimada de 250 m, que se puede alojar entre el Campaniense y el Maastrichtiense. Tienen un color rojizo, por rubefacción de la matriz. Hacia techo adquieren un carácter más margoso, dándole en principio algo más de impermeabilidad, aunque todo este tramo es muy permeable en su conjunto por la importancia de las diaclasas estudiadas y a la disolución kárstica desarrollada. Es en este tramo en donde se encuentran las importantes cuevas de la zona, pero lejos de la presa.

Las discontinuidades tienen su origen en la formación genética del macizo, por la estratificación y laminación, donde podemos incluir la familia de la Estratificación (E) y de origen tectónico, el resto, afectadas por la relajación de las tensiones por la orografía resultante, compatibles con la formación del anticlinal de Canelles y los esfuerzos tectónicos necesarios.

3. TRABAJOS DE INSPECCIÓN Y VALORACIÓN

Se planteó una campaña de toma de datos geométricos y estructurales complementaria a los datos que ya disponía Endesa Generación, sobre la estructura de la roca y discontinuidades, con un inventario de medidas de orientación y buzamiento y un conjunto extenso de estaciones geomecánicas en todo el entorno de la cerrada. Esta campaña consistió en inspecciones visuales directas, vuelos con pasadas con solape con dron, campaña de toma de imágenes con fotografías y video de detalle, y un levantamiento fotogramétrico.

La suma de los datos ya existentes con los resultados de estas tomas de datos adicionales permitió generar un Modelo Digital del Terreno, contar con una evaluación estructural del macizo y una geometría muy precisa del problema. Con este modelo tridimensional del macizo, y observando virtualmente las discontinuidades, se determinaron los diferentes bloques, la planimetría y los volúmenes de roca que debían tratarse. Todos estos componentes se unieron en los modelos empleados para el cálculo de la estabilización necesaria.

Así fue posible establecer una división por bloques, y una prioridad en su tratamiento en función del riesgo de afección a la infraestructura- Además, se realizó un estudio de trayectorias de los posibles desprendimientos y la eventual amenaza a las áreas en uso, lo que permitió optimizar los recursos.



Figura 2. Vista de los trabajos de colocación de mallas por encima de la coronación de la presa.

4. CONDICIONANTES IMPUESTOS POR LAS INFRAESTRUCTURAS EXISTENTES

Los condicionantes establecidos por la propiedad fueron que la instalación debía seguir en funcionamiento durante los trabajos, con minimización del riesgo añadido, y el mantenimiento de la circulación por todas las pistas y carreteras durante los trabajos. Esto, unido a las características de la misma, tales como accesos disponibles, gálibos y alturas, proximidad de las zonas en las que se actuaría a instalaciones eléctricas, y la consideración de trabajos en condiciones meteorológicas desfavorables, obligó al uso de medios no convencionales, como trabajos verticales, grúas de gran altura y, para la logística de algunos elementos, el uso de helicóptero.

La gestión de estos equipos especializados, y de coste unitario elevado, requiere una coordinación muy importante entre las empresas participantes, siempre con el objetivo primario de mantener la seguridad de las personas, y el secundario de contar con una logística optimizada y eficaz.

5. SANEAMIENTO. PROTECCIÓN SUPERFICIAL.

Las primeras tareas tras el desprendimiento consistieron en la delimitación de zonas en las que pudieran caer bloques, y un saneo intenso de la ladera, con especialistas trabajando con técnicas de trabajos verticales, inspeccionando de cerca los bloques, y desplazando pequeños bloques inestables, o que pudieran ser movilizados por las cuerdas o medios disponibles. Libres ya del riesgo de desprendimientos inmediatos, fue posible proceder al reconocimiento profundo del área a tratar, y a la fase de protección frente a desprendimientos superficiales.

Para esta fase de protección de la infraestructura frente a la caída de eventuales bloques superficiales se instalaron más de 25.000 m² de malla de triple torsión y 11.200 m² de redes de anillos de acero de alto límite elástico. Las membranas se fijaron con hasta 2.400 m de bulones pasivos de diferentes longitudes, para por un lado fijar puntualmente bloques rocosos de tamaño medio y por otro poder retener los posibles bloques de tamaño medio y pequeño, sujetándolos entre los paños de la cuadrícula realizada. Para lograr un mejor ajuste a la ladera, y el refuerzo de la resistencia de retención de las membranas, se dispusieron más de 13.000 m cables de acero. Las redes de anillos mantienen una excelente resistencia mientras que pueden ajustarse perfectamente a geometrías tanto regulares como irregulares; ambas situaciones se daban en la ladera.

6. PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA SOLUCIÓN: ALTERNATIVA FRENTE AL MURO ANCLADO

La amenaza de caída de bloques en este estribo se ve gobernada por la geometría de las discontinuidades. Se identificaron los posibles desprendimientos de bloques mediante roturas planas y en cuña. Si se impide el desplazamiento a favor de las juntas se elimina el riesgo de roturas por pandeo y por vuelco, ya que estos fallos requieren inicialmente un deslizamiento que facilite la apertura de grietas o juntas en los planos de debilidad, o el fallo por pandeo.

De los reconocimientos efectuados, y de la información incluida en el Anejo de Geotecnia, se identifican los bloques indicados en la figura 3, a partir de la geometría presentada en la figura 4. Cabe añadir que las discontinuidades que limitaban los bloques fueron evaluadas mediante la su reconstrucción fotogramétrica, y una posterior confirmación visual. El modelo 3D permitió también medir distancias y separaciones, así como la diferencia con la planeidad de las discontinuidades. Estas medidas nunca hubieran podido establecerse por métodos manuales. Además, el modelo permitió observar con detalle zonas de muy difícil acceso.

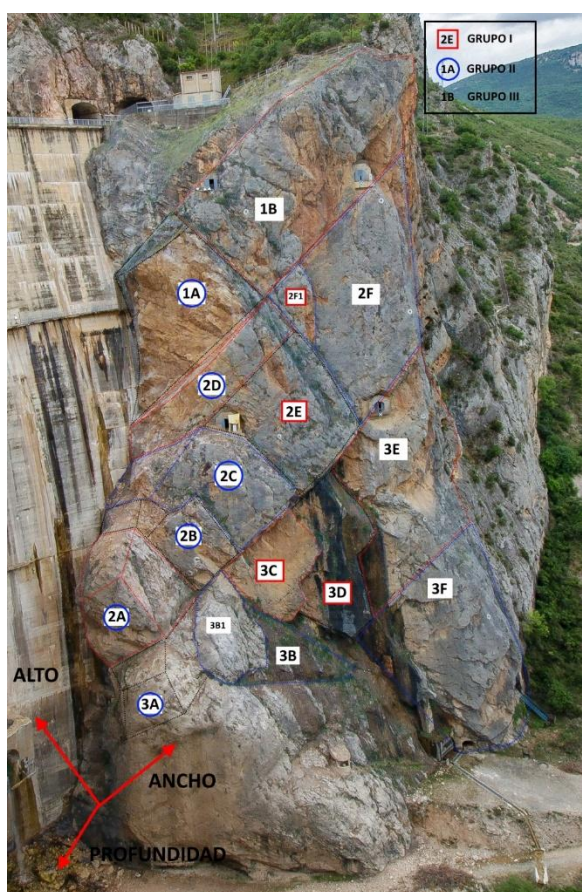


Figura 3.

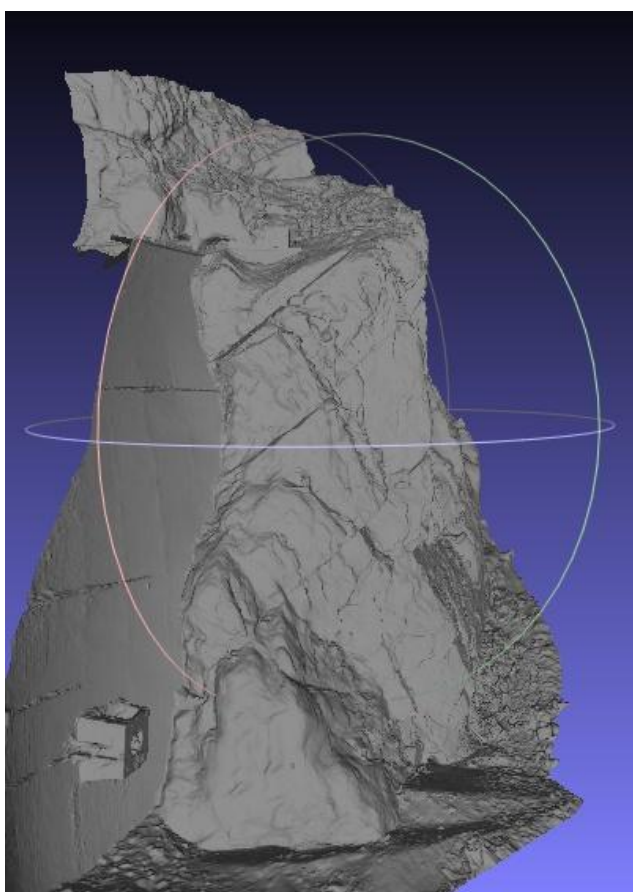


Figura 4.

Figuras 3 y 4. (3) Definición de bloques según el Grupo de riesgo y (4) Vista del Modelo Digital del Terreno del estribo izquierdo de la presa de Canelles.

Las actuaciones existentes en la presa, que datan de la construcción y años posteriores, son en la margen derecha un muro de hormigón y en la margen izquierda las mencionadas galerías de atado, tienen objetivos diferentes de la actuación que ahora se plantea. Se hicieron para consolidar los estribos como apoyos de la presa, aunque de manera indirecta el muro evita los desprendimientos en la zona de actuación.

La solución de mallas y redes de acero de la primera actuación son una solución complementaria y compatible con la solución de anclajes que se diseña ahora: los anclajes inmovilizan de forma activa los bloques decamétricos, y las mallas son un sostenimiento pasivo orientado a contener bloques desde tamaño centimétrico a métrico. Un bloque de uno a dos metros que cayera desde una altura de decenas de metros constituye un riesgo grande para las instalaciones, y debe ser controlado.

Tomando como ejes de referencia los marcados en la figura 3, se determinaron tanto las dimensiones de los bloques como las familias de juntas en las que están apoyados o pudieran eventualmente deslizar. Se han definido los 15 bloques que independientemente se pueden evaluar y los que conjugados con los adyacentes que también pueden ser inestables. En algunos casos se han tenido en cuenta subdivisiones de bloques, como en el caso de los bloques 2F1 y 3B1, por su singularidad.

Se procedió a la identificación de cada bloque, asignando a cada uno un número y una letra. En función de la amenaza que cada bloque constituye para la infraestructura, se consideraron tres grupos, que son los siguientes:

- Grupo I, Bloques exentos, sin apoyo en la base, o extraplomados.
- Grupo II, Bloques apoyados en la base que, en caso de fallar, caen hacia la presa.
- Grupo III, Bloques que, en caso de fallar, no caerían hacia la presa.

La amenaza de cada grupo es menor que la del grupo anterior. Para el diseño del sostenimiento necesario es preciso establecer los umbrales de seguridad que sirvan de base para una estimación fiable del grado de estabilidad del talud. Evaluando las recomendaciones habituales y los niveles de riesgo definidos, se establecen para todos los bloques, y en situación definitiva, bajo cargas permanentes en seco un coeficiente mínimo de 1,50; para situaciones excepcionales bajo cargas no permanentes (agua y hielo) 1,50 para los bloques de los grupos I y II, y 1,2 para los bloques del Grupo III, que eran los menos desfavorables, ya que su movilización no pondría en riesgo la presa.

Se optó por una solución mediante anclajes de barra, desestimándose otras opciones como anclajes de cable, muros, etc. para este caso, por ser menos adecuados o de coste más elevado. Los anclajes de barra de acero, aunque tienen una capacidad de carga máxima menor que los de cable, son más adecuados por la posibilidad de unir varios tramos, facilitando así toda la logística, desde su transporte hasta cualquier punto de la ladera hasta su manipulación in situ.



Figura 5. Cesta sostenida por grúa para la ejecución de anclajes, estribo izquierdo de la presa de Canelles.

La elección del tipo de anclaje de barra estará determinada por su capacidad mecánica, por la dificultad de su construcción y manejo, por el coste y su disponibilidad inmediata en el mercado. Para ello se tomó cada bloque o conjunto de bloques de manera independiente, sin tener en cuenta la trabazón entre ellos, lo que está del lado de la seguridad. La trabazón ente bloques contribuye a una mayor estabilidad del conjunto.

El anclaje de barra de alta resistencia debe considerarse permanente, y no provisional, al construirse para una duración superior a dos años. Por lo tanto, se tiene que asegurar su durabilidad en todo su conjunto, tendón y cabeza. También se ha de tener en cuenta la inclinación de la perforación, desde el punto de vista estructural y de imprecisiones en la ejecución.

Para determinar la idoneidad de las posibles soluciones se realizó una campaña de ensayo de anclajes de barra con inyección de lechada y con cartuchos de resina en el túnel en roca viva excavado en el macizo, al que se accede desde la coronación de la presa. Los resultados de los ensayos en los anclajes con resina no fueron completamente satisfactorios, pero sí los de lechada, optándose finalmente por esta solución.

Con todos los datos, tras un estudio comparativo y con la experiencia en trabajos similares, se concluye que la opción más conveniente, desde el análisis técnico-económico, es la correspondiente a los bulones tipo Gewi⁺35, con un diámetro mínimo de perforación de 75 mm y una inclinación de 20° más de la perpendicular a la ladera, con inyección de lechada de cemento tipo 42,5-R, para obtener una resistencia característica mayor de 25 MPa, una carga de tesado nominal del acero mediante gatos y una longitud mínima de bulbo de 3 m.

Para cada bloque y para cada grupo de bloques se determinó el número de anclajes total con las premisas anteriores, con el factor de seguridad objetivo determinado. Las longitudes nominales de los anclajes se hallaron considerando la longitud de bulbo, la potencia del bloque que se sujeta, que debe ser atravesado, y el restante necesario para las labores de tesado. La longitud real se hizo redondeando este valor a una longitud comercial disponible.

7. EJECUCIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN PROFUNDA

Una vez definidas las características de los anclajes, se replantearon inicialmente de forma virtual en el MDT creado, adaptándose a las discontinuidades, espesores y forma de cada bloque o grupo de ellos. Esta distribución de la posición de cada anclaje, creada en gabinete, se ajustó en campo, y permitió la creación de varios tajos. Para la perforación se usaron martillos perforadores a rotoperusión en cabeza y fueron manejados por personal especializado en trabajos verticales y desde una cesta suspendida de una grúa.

Con la grúa se introdujeron las barras preparadas, con doble protección, con los centradores y vainas en la zona libre, preparadas con los conductos de inyección y purga correspondientes. Tras el fraguado de la lechada se procedió al tesado de los anclajes hasta la carga nominal del bulón Gewi 35+. Para ello se usaron gatos hidráulicos sobre las cestas suspendidas. Tras ello se recortaba el sobrante de cada anclaje, de haberlo, y se colocaba la caperuza de protección. El 100 % de los bulones fueron tesados siguiendo el protocolo respectivo, como garantía de calidad. Posteriormente, se marcaron gran parte de ellos con prismas para su control topográfico durante la continuación de la explotación de la obra, y poder detectar eventuales movimientos.

8. OBRAS AUXILIARES

Las pantallas dinámicas complementarias se disponen aguas abajo del estribo, y se justifican por la actividad habitual de personas en las instalaciones que protegen, además de su elevado valor

económico. Se replantearon teniendo en cuenta la zonificación de los diferentes espacios y zonas de trabajo. Las pantallas dinámicas, como se sabe, permiten recoger bloques hasta una cierta energía mediante la acción de disipadores de energía unidos a membranas de gran resistencia al punzonamiento. La combinación de estas protecciones con las actuaciones activas en el talud, consistentes en mallas, redes y anclajes, permite optimizar costes y asegurar un control de riesgos eficaz y eficiente.

Tras buscar los emplazamientos más adecuados para las pantallas, se decidió la instalación de 95 m de pantallas de una energía de 150 kJ, 70 m de 660 kJ, 50 m de 1500 kJ y 80 m de 3000 kJ, respectivamente.



Figura 6. Colocación de elementos de pantallas dinámicas con grúa.

9. TRABAJOS DE IMPLANTACIÓN: ACCESOS Y EMPLAZAMIENTOS / GRÚAS Y HELICÓPTEROS

El filtro final que se ejerce sobre cada una de las soluciones técnicas adoptadas en este trabajo fue la Seguridad y Salud de los intervinientes y la adecuada accesibilidad a los tajos. Con estos requisitos se desarrolló una logística que permitiera, dentro de mantener las afecciones en unos mínimos seguros, la optimización de costes y la minimización de operaciones. Como se puede ver, la altura de los taludes en los que se actúa supera los 160 m, y era preciso ejecutar unidades de obra muy lejos de los accesos existentes, la pista de pie de presa y la carretera de su coronación.

Por todo ello, se han empleado grandes grúas autopropulsadas de 450 t de peso y hasta 115 m de altura) en el pie de presa, y otras dos de 150 y 250 t en la coronación. El objetivo era acortar los plazos de ejecución manteniendo dos tajos en la margen izquierda, tanto desplegando materiales y sustentando las cestas para los equipos perforadores como en las propias labores de ejecución de los anclajes.

Fue fundamental la participación de personal cualificado en trabajos verticales, combinando las técnicas de escalada con los medios convencionales, sobre todo en el tendido de las mallas y redes de anillos. En la instalación de las pantallas dinámicas, además de los medios anteriores, se empleó un helicóptero como medio de carga y despliegue logístico. Dados los requisitos meteorológicos para volar el helicóptero, y su coste, es preciso hacer un ajuste fino de la logística y coordinación de los equipos.

Estos medios se han utilizado en cuatro fases desde diciembre de 2018 hasta abril de 2021, según las actividades, desde el saneo inicial, la instalación posterior de las protecciones y la estabilización profunda en la margen izquierda, y las obras auxiliares en las dos márgenes y accesos a la central.

10. CONCLUSIONES Y LECCIONES APRENDIDAS

Si bien la cerrada de Canelles constituye un excelente enclave para la ubicación de una presa, la calidad del macizo rocoso no cumple todo lo necesario para este desempeño, sin actuaciones adicionales para mejorar la infraestructura. La rápida evolución de la Mecánica de rocas en las últimas décadas ha contribuido a poder asegurar el macizo con las técnicas y tecnologías existentes en cada momento. Estas técnicas se han empleado con acierto, y la infraestructura ha sido explotada con éxito durante décadas, y su conservación y mejora ha llevado a actuaciones adicionales empujadas por los cambios tecnológicos y sociales, marcadamente todo lo relacionado con la protección de los trabajadores y la seguridad y salud.

Recientemente se produjo un desprendimiento rocoso local, en relación con las dimensiones de la ladera, si bien importante por su tamaño. Resultó dañado el desagüe de fondo, y con ello se ha puesto de manifiesto la necesidad de realizar un sostenimiento de los bloques más superficiales, que, si bien no afectan a la estabilidad del macizo, sí pueden afectar a la operación de la infraestructura y al personal de explotación y conservación.

Esta estabilización profunda de los grandes bloques se ha realizado con anclajes de barra activos, mientras que los bloques de menor tamaño -entre decimétrico y métrico- se han estabilizado con mallas de triple torsión y redes de anillos de acero con alto límite elástico, que, combinados con anclajes más cortos de barra, contribuyen a su contención y estabilización. Para el cálculo de los anclajes se ha partido de la evaluación de su factor de seguridad inicial, definiendo una consolidación hasta lograr el factor de seguridad objetivo, según la amenaza que constituye cada bloque.

Las grandes dimensiones y ubicación de la infraestructura, con su relieve abrupto y laderas de gran inclinación, han obligado -para acortar plazos y mejorar la logística- al uso de medios y técnicas no habituales, como grandes grúas, trabajos verticales y helicópteros, lo que también ha condicionado las soluciones elegidas.

Teniendo siempre en primer plano la seguridad del personal y la optimización de los recursos, estas obras las realizan las personas, que se coordinan y trabajan juntas desde empresas como Endesa Generación y, en este caso, Paramassi Ibérica, aportando experiencia, nuevas técnicas, adaptabilidad y mentes abiertas.



Figura 7. Izado de cargas desde la coronación de la presa.

11. REFERENCIAS

Romana García, M., 2019. “Proyecto de sostenimiento de ladera en el estribo izquierdo de la presa de Canelles, Os de Balaguer, provincia de Lleida”. No publicado.

Vallarino, Eugenio, 1998. “Tratado Básico de Presas”, 2 tomos, 4ª. Edición, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos,

Millet, G. y Álvarez, A. 1973 “Impermeabilización del macizo Kárstico de Canelles” Revista de obras públicas.

Fondos fotográficos de Paramassi Ibérica. No publicados.

Vera Torres J.A., 2004. “*Geología de España*”. Salamanca: Sociedad Geológica de España.