presa pretensada

Allt-Na-Lairige

JAMES ARTHUR BANKS, ingeniero

531 - 34

Para el aprovechamiento hidroeléctrico de la cuenca superior del río
Allt-Na-Lairige (Escocia)
se ha construido una presa de 22,55 m de altura y 414 m de longitud, que presenta
la innovación, en Inglaterra, de utilizar los procedimientos del pretensado en las obras
hidráulicas.

I N S T I T U T O T E C N I C O D E L A C O N S T R U C C I O

Para aprovechar las aguas de la cuenca superior del río Allt-Na-Lairige, del norte de Escocia (Gran Bretaña), la North of Scotland Hydro-Electric Board ha construido una presa de 22,25 m de altura y 414 m de longitud.

Los 400.000 m³ de embalse máximo se derivan, por medio de una galería de 2.000 m de longitud y una tubería forzada de 530 m de longitud y diámetro variable de 1,37 a 0,90 m, constituyendo un salto de 244 m de altura, a una central cuya potencia instalada se eleva a 6.000 kw. Como se puede apreciar, el aprovechamiento no presenta por sí solo gran importancia, pero sí un marcado interés desde el punto de vista estructural, pues la mayor parte de la longitud de la presa se ha construido de hormigón pretensado.

La toma de agua se ha realizado en una parte de la presa donde no se ha pretensado, con objeto de dar libre cabida a las instalaciones de válvulas y desarenado, por lo que esta parte es de tipo gravedad. Igualmente, uno de los estribos y la zona del otro, correspondiente al vertedero, también son de tipo gravedad, ya que la carga es menor y el azud del vertedero dificulta el empleo del procedimiento pretensado. Por tanto, los perfiles correspondientes a estas zonas tienen espesores distintos.

El terreno de apoyo de la presa está constituido por apuntamientos graníticos, escasamente recubiertos por una capa de tierra o arrastres de 1,50 m de potencia.

Estudiada previamente la posibilidad económica francamente ventajosa para los procedimientos pretensados, sobre el clásico método de gravedad, y habida cuenta de la aplicación del pretensado con éxito en el recrecimiento de presas ya existentes, la única decisión final que debía tomarse consistió en la elección del tipo de armaduras, es decir, el empleo de cables o simplemente barras, pues en una obra de nueva planta se dispone de mayor campo para poder disponer del procedimiento de anclaje inferior.

El resultado de esta consideración condujo a elegir barras Lee McCall, agrupadas convenientemente, ancladas en pocillos y conservadas en amplios conductos que permiten la fácil inspección y relleno de hormigón sin los peligros e imperfecciones a que dan lugar las inyecciones de mortero en las vainas o tubos de los cables.

Con objeto de facilitar la disposición general de los grupos o paquetes de armaduras se dispuso el vertedero en una extremidad de la presa; y la torre de mando, compuertas y limpia-rejillas mecánicas sobre un bloque cuya estabilidad se logra por gravedad. Esta subdivisión de la estructura en partes dió por resultado una construcción más unificada, racional y sencilla.

El proyecto debía redactarse sin tracción alguna en el paramento de aguas arriba, tolerando una tensión de 3,5 kg/cm² por tracción en el de aguas abajo.

Determinación del esfuerzo de pretensado

Se llegó a la conclusión de un reparto uniforme sobre toda la longitud de la presa del esfuerzo total de pretensado, teniendo en cuenta: que las armaduras debían tesarase manteniendo una tensión uniforme en toda su longitud; que los pocillos debían tener el menor diámetro posible para permitir su acceso; la longitud de los bloques y el espaciamiento de los pocillos verticales para anclajes y armaduras respecto a las juntas de construcción que el hormigonado de los bloques deja; la distancia mínima entre anclajes para evitar la superposición de efectos de las reacciones de éstos en la roca de anclaje y, finalmente, la normalización de encofrados que se deduce de un perfil uniforme.

Considerando una altura óptima de 19,50 m, el esfuerzo por metro era de 186 toneladas. En principio se dió una longitud de 12,80 m a los bloques, los anclajes se espaciaron a 6,40 m y a los pocillos se les asignó 1,50 m de diámetro; con estos datos provisionales, pendientes de los resultados de un ensayo experimental de anclaje que se efectuó en las proximidades de la central, el esfuerzo total por anclaje fué de 1,176 toneladas.

sección y detalle de pretensado

En este ensayo, realizado en el fondo de un pocillo de 5,5 m de profundidad, se emplearon gatos planos—tipo Freyssinet—embebidos en hormigón. Cuando se llegó a una carga de 4,400 toneladas, uno de los gatos cedió. La deformación máxima superficial aparente en la roca fué de 2,5 mm, sin que se pudiera apreciar ninguna rotura en la roca, por lo que se llegó a la conclusión de que bastaba con 5,50 m de profundidad para una carga lineal de 1,176 toneladas por metro, contando con un coeficiente 2 de seguridad en el fondo del pocillo del anclaje respecto a la concentración de cargas alrededor de la periferia.

Barras y manguitos

Como se dijo anteriormente, las armaduras para el pretensado consisten en paquetes de barras Lee-McCall, de acero de alta resistencia, que, unidas entre extremidades de trozos parciales de la longitud total, por medio de manguitos fileteados, presentaron ciertos inconvenientes de tipo mecánico en estas uniones, debido, por una parte, a defectos de las terrajas utilizadas en el fileteado de roscas, y por otra parte a la forma de hélices y diferencia de materiales entre el manguito y barra.

Los paquetes de barra están formados por 28 barras, de 28,57 mm de diámetro cada una, en las partes de presa de mayor altura, número que se reduce a 22 donde la altura es menor. Los paquetes se espaciaron a 6,40 m, y se anclaron en el fondo de pocillos que se llevaron a 8,20 m de profundidad en la roca. El fondo del anclaje está constituido por una placa y un abocinamiento del pocillo. Con esta profundidad, y con un esfuerzo total de tesado de 45.900 toneladas, se necesitaría el peso de una cuña o prisma triangular con arista en el fondo y un diedro en esta arista a 45° para equilibrar el esfuerzo del pretensado.

planta

1. Eje de la presa.—2. Faja geológica.—3. Restricción.—4. Derivación.—5. Derivación de aguas.
6. Pasarela.—7. Arco.—8. Restricción de aguas.—9. Galería a la central.—10. Portal de la galería.

alzado

1. Extrito.—2. Bloque gravedad.—3. Aliviadero gravedad.—4. Parte pretensada.—5. Sala de compuertas.—6. Roca.—7. Faja geológica.—8. Terreno.—9. Fondo cimiento.—10. Abocinamiento anclado.
11. Galería de inspección.

detalles constructivos

1. Pasarela de 2,25 metros.
2. Anclaje con tuerca.—3. Antepecho.—4. Placa de anclaje de 31 mm.—5. Canaleta para hormigonar.—6. Barrilla.—7. Ménsula de la calzada.—8. Elementos del entramado de anclaje.—9. Barras recubiertas.—10. Dren provisional.—11. Barras sin recubrir.—12. Disposición del anclaje superior.—13. Eje presa.—14. Espacio libre para hormigonar.—15. Elementos del entramado de anclaje.—16. 28 barras.—17. Diámetro interior pocillo, 1,20 m.—18. Placa de anclaje.—19. Manguitos recubiertos.—20. Enrase primera tongada hormigón.—21. Armaduras de anclaje.—22. Armadura.—23. Barras soporte de placa.—24. Diámetro, 2,10 metros.—25. Eje del bloque.—26. Antepecho.—27. Hueco provisional de acceso al anclaje.—28. Junta de construcción.—29. Reticulación metálica a uno y otro lado del anclaje.—30. Armaduras del entramado de anclaje.—31. Antepecho.—32. 28 barras.—33. Taladro ϕ , 23 cm impermeabilización.—34. Conducto rellenado con hormigón.—35. Ménsula de la calzada.—36. Agujero ϕ , 33 cm en la placa.—37. Barrilla.—38. Banda de impermeabilización.—39. Taladro a rellenar de mortero.

El pretensado ha logrado una gran seguridad contra los esfuerzos tangenciales en la parte superior de la presa, donde en un plano 8,50 m más abajo que la coronación, la relación entre empuje horizontal y componentes verticales con subpresión máxima es de 0,19, que correspondería a un factor de 0,73 en una presa gravedad con un paramento de aguas abajo de 0,73 de pendiente. Esta ventaja en pequeñas alturas, respecto a los tipos de gravedad, van disminuyendo cuando aquella aumenta, y, en este caso particular, es igual para la altura de 22,25 metros.

Estabilidad comparada

Los estudios de la estabilidad de la presa se han realizado comparando la estructura de la presa con otra de gravedad de la misma altura, llegando a la conclusión que las garantías contra el vuelco en este tipo de presas es mayor que la que proporcionan las de gravedad a medida que aumenta la altura.

Por presentar diferentes características el banco de roca de la presa, y aquel en que se hicieron los ensayos de carga, el suponer un prisma de carga o equilibrio con caras a 45° no es más que una hipótesis más o menos real, ya que el comportamiento de la roca es siempre del orden aproximado.

El anclaje de la parte superior se halla a un nivel un poco más bajo que el del plano de coronación, y el procedimiento de fijación se ha realizado también por medio de placas metálicas y tuercas de retención.

Los paquetes de barras se colocaron en el eje de la tercera parte del espesor de la presa, permitiendo así suponer que el esfuerzo de pretensado se repartiría uniformemente en toda la sección hasta una profundidad equivalente a la correspondiente al espaciamiento entre paquetes, en cuyo caso el paramento de aguas arriba se hallaría libre de tracciones y el de aguas abajo sólo estaría sometido a tracción en la parte inferior. Para parar a esta tracción, inferior a $3,50 \text{ kg/cm}^2$, se ha colocado una armadura reticulada en la parte del paramento que se halla sometida a tracción.

La diferencia de tensiones en el hormigón con embalse lleno o vacío es muy pequeña, afectando la carga por barra en unos 500 kg. La tensión final por barra es de 37 toneladas, que corresponde a unas 164 toneladas por metro de presa.

En el cálculo de tensiones de pretensado, la estabilidad libre de tracciones en el paramento de aguas arriba, y suponiendo una subpresión conservadora, es decir, igual a la carga hidrostática, da un margen de cuatro toneladas por barra antes de que aparezcan tracciones en el paramento de aguas arriba. Con el embalse vacío y 164 toneladas de carga por metro de presa, se obtiene la tracción máxima de $3,50 \text{ kg/cm}^2$ en el paramento de aguas abajo, caso que es el más desfavorable.

En las placas de anclaje la compresión inducida al hormigón es del orden de 172 kg/cm^2 , mientras que en el resto del hormigón esta tensión es mucho menor. Si aprovechando esta circunstancia se hubiere reducido la sección de la presa, lo que parece factible a primera vista, el esfuerzo de pretensado que se necesitaría para lograr una estabilidad similar complicaría de tal forma las actuales condiciones que el resultado sería económicamente negativo respecto al conseguido. Esta carga reducida de trabajo impuesta al hormigón, las escasas pérdidas por deslizamiento de barras en los anclajes y la casi seguridad de una reducida deformación lenta del acero con estas cargas ligeras, dan suficiente seguridad para no llegar a la aparición de tracciones en el paramento de aguas arriba por relajación o fatiga del acero, máxime teniendo en cuenta la protección de éste contra la corrosión.

Barras para el anclaje inferior.

Anclaje provisional para el tercer trozo.

Anclaje provisional para el segundo trozo.

Tesando las barras con gatos.
Vista de las barras.

Fotos: W. RALSTON, Ltd

Detalles de construcción

El terreno, aunque de diferente estructuración al que se hicieron los ensayos para el anclaje, no presentó dificultad para cimientos, y la única variación introducida consistió en profundizar un poco más los pocillos de anclaje para contrarrestar los defectos que se encontraron en la perforación de los pocillos.

Los áridos empleados son de tipo granítico, procedentes del escombro de la excavación de la galería de toma y derivación. Parte de la arena utilizada se obtuvo en la explotación de depósitos naturales; y el resto, de piedra machacada y molida. El hormigón, amasado en central, se colocó en obra con la ayuda de grúas y cazo con compuerta inferior. El cemento empleado se suministró a granel.

Las barras para el pretensado se subdividieron en varios trozos, que se unieron entre sí por medio de manguitos. El primer trozo, de anclaje, de unos 2,40 m de longitud, fué el menor de todos, con objeto de facilitar el trabajo, su posición y el hormigonado.

Hormigonadas las partes inferiores abocinadas de los pocillos, se continuó el hormigonado, dejando un conducto en coincidencia con los ejes de cada uno de los pocillos para la colocación del segundo trozo de las barras. Cuando el hormigonado salió sobre la roca, es decir, fuera de cimientos, se colocaron los segundos trozos de barras en cada conducto, empalmándolas después con las barras de los anclajes. Esta operación se realizó preparando una placa de anclaje provisional en la parte superior del conducto para las barras. Estos segundos trozos de barras, así como los primeros, se revistieron convenientemente con materiales bituminosos previamente estudiados y resistentes a la corrosión. Una vez tesados ligeramente para fijarlos en posición se hormigonó la parte inferior, consiguiendo dejar sólidamente en posición adecuada la parte superior de las barras en espera de unirse con los terceros y últimos trozos.

Terminada la fijación de estos segundos trozos, se procedió a retirar la placa de anclaje provisional y se continuó el hormigonado de la presa hasta la cota 300,50 m, que corresponde a unos 4 m más baja que la coronación de la presa. El conducto que se dejó para la colocación de estos terceros cables tiene $0,68 \times 1,20$ m de sección, espacio suficiente para permitir vibrar y colocar el hormigón que lo debía rellenar después de tesar las barras.

En la parte superior de cada uno de estos conductos se montó un entramado metálico sobre el que se apoyaría el tercero y último trozo de barras, con su correspondiente placa

de anclaje provisional. Montado el paquete de cada conducto en el exterior, se le colocó en el interior del conducto por medio de una grúa. Las barras de este tercer trozo, que se extienden en toda su longitud hasta la coronación de la presa, se revistieron con un material similar al de las del primer trozo de anclaje y, además, se las envolvió con tubos metálicos que, sirviendo de puntales, ayudaron al entramado metálico del soporte de la placa provisional de anclaje a resistir un primer ligero tesado para enderezar y fijar en posición las barras.

Cuando las barras se tesaron a razón de dos toneladas para cada una de ellas, se empezó a hormigonar esta parte superior del anclaje dejando embebido el entramado en el hormigón. Después de las primeras tongadas de hormigón, cuando las barras estaban fijadas, se retiraron los tubos y la placa provisional, continuando el hormigonado hasta la parte superior o anclaje definitivo, pero dejando un conducto central de 0,30 m de diámetro para hormigonar el conducto inferior donde las barras no han sido revestidas.

Una galería interior de registro de la presa tiene acceso a un cierto número de conductos o pocillos dejados en el hormigón. Estas ventanas han servido para controlar las operaciones de tesado y del hormigonado parcial del conducto, a cuya finalidad se dejaron ventosas en la parte inferior y superior del conducto.

Puesta en tensión de las barras

Colocadas las placas definitivas de anclaje sobre sus apoyos correspondientes, sobresaliendo sobre ellas las extremidades fileteadas de las barras y colocadas las arandelas de estabilidad y repetición entre tuercas y placa, se procedió a la instalación de los gatos que, operando por enroscado, debían tesar las barras. Aparte de los manómetros de tensión de los gatos, las tensiones se midieron por medio de elongímetros y alargamiento del metal de las barras. Para un esfuerzo de 37 toneladas, correspondiente a una barra de 32,76 m de longitud, el alargamiento de esta barra fué de 109 milímetros.

Con objeto de repartirlo más uniformemente posible el esfuerzo de pretensado, se operaba simultáneamente en los dos paquetes de armaduras de cada bloque de la presa, y en cada uno de éstos sólo se ponían en tensión la mitad del número de barras de cada paquete.

En el período inicial de tesado, la tensión en el gato era de dos toneladas más que el esfuerzo correspondiente al alargamiento de la barra. Esto obedecía al rozamiento momentáneo del revestimiento de los trozos inferior y superior de la barra. Al cabo de unos días, la caída de dos toneladas en el gato se tradujo en un cambio de media tonelada en el elongómetro, y la tensión se igualó en toda la extensión de la barra.

Con objeto de seguir de cerca los efectos de relajación y pérdida de tensión, las barras se dejaron libremente en el conducto durante tres meses, en los que no se pudo observar ni relajación ni otras pérdidas, por lo que después de tesar el resto de las barras se procedió, una semana después, a hormigonar los conductos libres de las barras.

En total se tesaron 4.440 barras, algunas de las cuales se rompieron. Las causas de estos accidentes no parecen apoyarse en la calidad del acero, sino en las roscas de los empalmes, las cuales después de un examen cuidadoso se descubrió habían sido fileteadas con una terraja defectuosa. Algunas barras se rompieron en la parte del anclaje, y no pudieron ser sustituidas, pero las demás, en total 10, y todas las que se creyó eran defectuosas, se cambiaron.

Consecuentemente, se aumentó cinco toneladas más el esfuerzo de tesado de todas las barras, consiguiendo así una estabilidad perfecta y un paramento de aguas arriba libre de tracciones.

Juntas

Aunque durante el hormigonado no se permitieron tongadas de más de 1,50 m de potencia, ni superposición de capas antes de cinco días, ni hormigonar en bloques adyacentes antes de ocho semanas, como la

longitud de los bloques es de 12,80 m, se temió a los efectos de la retracción. Esto dió lugar a proyectar un tipo de junta con impermeabilización y libertad de movimiento en la proximidad al paramento de aguas arriba, llaves en el núcleo central del bloque y caras repicadas para mejorar la adherencia en la región del paramento de aguas abajo.

La impermeabilización se consigue con un taponado de labios de la junta con mastique de betún en el paramento, una banda de caucho a 38 cm del paramento y un pocillo de 23 cm de diámetro, 1,15 m del paramento, que se rellena con mortero. Para permitir las deformaciones próximas al paramento, debidas al cambio de temperatura, las caras en los 38 cm de profundidad de la junta se han recubierto con una capa de mastique de betún, de 1,5 mm de espesor.

La junta que separa la zona pretensada de la de gravedad, se ha formado con una capa de betún en toda la profundidad y un pocillo, también de 23 cm de diámetro, pero relleno de material bituminoso en este caso, con todo lo cual se espera conseguir libertad en la deformación sin perder la impermeabilización.

Se dudó en el orden de sucesión de las inyecciones, pero finalmente se decidió inyectar en dos fases, una antes de pretensar y la otra dirigida hacia los anclajes, después de terminar las operaciones de tesado. La primera tuvo por objeto la formación de una pantalla de impermeabilización; y la segunda, asegurarse que, de haber aparecido algún desgarre en los anclajes, poder taponar las grietas.

Disposición para medir las deformaciones

La toma de datos exactos para determinar las deformaciones exige un dispositivo de puntos y referencias escrupulosamente elegidos. Para poder seguir el fenómeno evolutivo con el tiempo de las deformaciones en las barras, una de éstas, cada dos paquetes, es decir, en cada uno de los bloques, se revistió en toda su longitud, dejando una ventanilla en la galería de registro desde donde se la podía inspeccionar. Esta barra tiene un acceso en la parte superior del anclaje, con objeto de poderle aplicar un gato y verificar su tensión directamente o simultáneamente con un elongómetro colocado en la parte accesible desde la ventanilla. Otra barra por bloque, también accesible desde la galería, pero que sólo va revestida en el anclaje inferior y superior, sirve para comprobar la relajación de tensiones.

Para conocer la deformación relativa entre el bloque donde se han instalado las compuertas, tipo gravedad, con los bloques adyacentes, se colocaron unas placas que permitieron averiguar que la deformación relativa entre estos bloques después de pretensar fué de unos tres milímetros hacia el paramento de aguas arriba.

La deformación relativa entre otros bloques también fué sometida a observación, pero sea por la acción de llaves en los labios de las juntas o por la propia adherencia entre ellos, todo parece suceder como si la presa se comportase monolíticamente en su conjunto. Esto no obstante, y después de algún tiempo, la deformación relativa fué del orden de tres milímetros.

Todas estas medidas, con sus dificultades aparentes, dado su escaso valor absoluto, se tomaron con embalse variable, ya que éste se hallaba en curso de formación, de acuerdo con ciertas instrucciones al objeto exigidas.

Conclusión

El autor es de la opinión que, después de la experiencia adquirida en este primer ensayo real utilitario, en cualquier proyecto de presa, los procedimientos pretensados deben ser estudiados con interés, pues según él esta modalidad constructiva tiene ventajas sobre los procedimientos clásicos ordinarios.

Este trabajo ha sido extractado de la conferencia que pronunció el autor en The Institution of Civil Engineers, de Inglaterra, a quien nosotros agradecemos la cortesía de su envío.

J. J. U.