

La chimenea de equilibrio de Altomira^(*)

Por **LUIS TORRENT RODRIGUEZ**
Ingeniero de Caminos, C. y P.

JOSE MARIA RAMIREZ BARRIOS
Ingeniero Técnico de Obras Públicas

Se describen en el artículo las características y el método de construcción de la chimenea de equilibrio de la elevación reversible de Altomira, cabecera del Acueducto Tajo-Segura. Se trata de una obra muy singular, no sólo por el hecho de estar totalmente fuera del macizo rocoso atravesado por la galería de presión, sino también por sus dimensiones (25 metros de diámetro interno y 69,5 metros de altura) que producen en su pretensada estructura unas solicitaciones verdaderamente excepcionales.

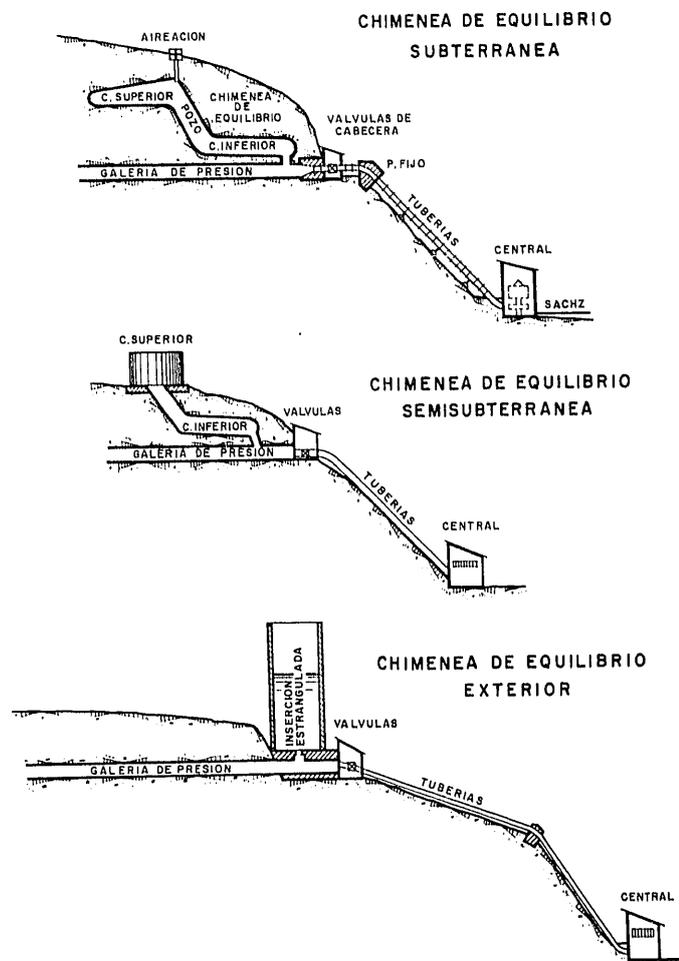
GENERALIDADES

Las instalaciones hidroeléctricas con largas conducciones en presión, bien sean anteriores o posteriores a la casa de máquinas, requieren la construcción de cámaras o chimeneas de equilibrio para limitar los efectos de las sobrepresiones transitorias —golpe de ariete— y evitar su propagación a todo el circuito. Las dimensiones de estas cámaras dependen, como es sabido, de las características de la instalación: longitud y sección de la galería en carga y de las tuberías, caudales del aprovechamiento, desnivel utilizado, sobrevelocidades y sobrepresiones admisibles, etc. Todos estos factores suelen conducir a volúmenes importantes en las chimeneas, principalmente en los extremos de la carrera del salto; es decir, para los niveles del agua correspondiente a los saltos máximo y mínimo. Como consecuencia de ello, las cámaras de equilibrio se construyen, generalmente, como estructuras subterráneas, dotándolas de los ensanchamientos o galerías necesarios para conseguir las secciones horizontales del plano de agua que exigen los condicionantes señalados.

El entronque con la galería de presión suele ubicarse en las proximidades de la ladera del macizo atravesado por ésta, con objeto de que la longitud protegida de sobrepresiones sea máxima, y que la necesaria aireación superior de la chimenea no obligue a construir largos pozos. Sin embargo, desde un punto de vista constructivo, no es conveniente llevar el punto de inserción muy al borde de la ladera, pues las condiciones del macizo rocoso serán, posiblemente, menos adecuadas para la excavación y sostenimiento de la estructura sub-

terránea de la chimenea, colaboración con el revestimiento, etc.

Este esquema típico de las conducciones en carga del salto está condicionado por la topografía y la geología del emplazamiento: en laderas muy



(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 30 de noviembre de 1980.

LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO DE ALTOMIRA

En el caso de la instalación reversible de Altomira, esta última disposición tampoco era aconsejable, debido a las características del espolón rocoso en que debía asentarse la chimenea y, por ello, se proyectó totalmente externa. Como es natural, se estudiaron otras alternativas que habrían obviado este problema; pero el emplazamiento de la casa de máquinas al pie de la presa de Bolarque fue un factor muy condicionante de todo el trazado de la instalación, por sus notables ventajas respecto a cualquier solución de central subterránea o sumergida, y ello obligó a construir la chimenea en su actual ubicación, que deja todavía una longitud de conducciones en presión sometida al golpe de ariete de algo más de un kilómetro.

DATOS DE PARTIDA Y DEFINICIONES

La instalación reversible de Altomira consta, en esquema, de los siguientes elementos:

- Obras de toma en la presa de Bolarque y tuberías de aspiración.
- Central reversible, con cuatro grupos cuyos caudales nominales unitarios son de 24,75 metros cúbicos por segundo en turbinación y 16,5 m³/seg. en bombeo.
- Tuberías de impulsión, protegidas por sendas válvulas de cabecera, con un desnivel de 245 metros y 1.025 metros de longitud media.
- Pantalón de unión de las tuberías y tramo blindado de la galería en presión, donde se inserta la chimenea.
- Galería de presión de 13.800 metros de longitud y 5,35 metros de diámetro interior.
- Embalse de regulación —diaria y semanal— de La Bujeda, con 6,8 Hm³ de capacidad útil.

Tomada la decisión de levantar la chimenea como una torre exterior al macizo de apoyo, como un depósito circular de grandes dimensiones, parecía evidente que la estructura tenía que estar pretensada para poder soportar las presiones de la carga estática y pérdidas de la galería más las producidas por las oscilaciones de masa del sistema. En efecto, la diferencia de niveles de explotación en La Bujeda es de 21,50 metros; la pérdida de carga en bombeo con cuatro grupos, se estimó en 14,50 metros, mientras que la de turbinación con tres máquinas era de 18 metros, aproximadamente. A la suma de estas cantidades, 54 metros, había que añadir los descensos y ascensos transitorios, que dependen del diámetro de la torre y de la forma de la inserción, más un margen de error en las estimaciones de rugosidad de las conducciones, lo que eleva la carga de agua en la base

Elevación de Altomira, cabecera del Trasvase Tajo-Segura.

tendidas, la ubicación de la chimenea tendrá que desplazarse hacia el interior del macizo, desplazamiento que estará influenciado también por las características geológicas locales. Ambos factores pueden conducir a dejar afectadas por el golpe de ariete importantes longitudes de los elementos en presión, entorpeciendo la regulación de las máquinas de la central y, en definitiva, encareciendo la instalación. En determinadas circunstancias, la solución de este problema está en aprovechar en lo posible el recubrimiento de la galería, excavando en el macizo la parte inferior de la chimenea, y construir exteriormente el resto de la estructura necesaria.

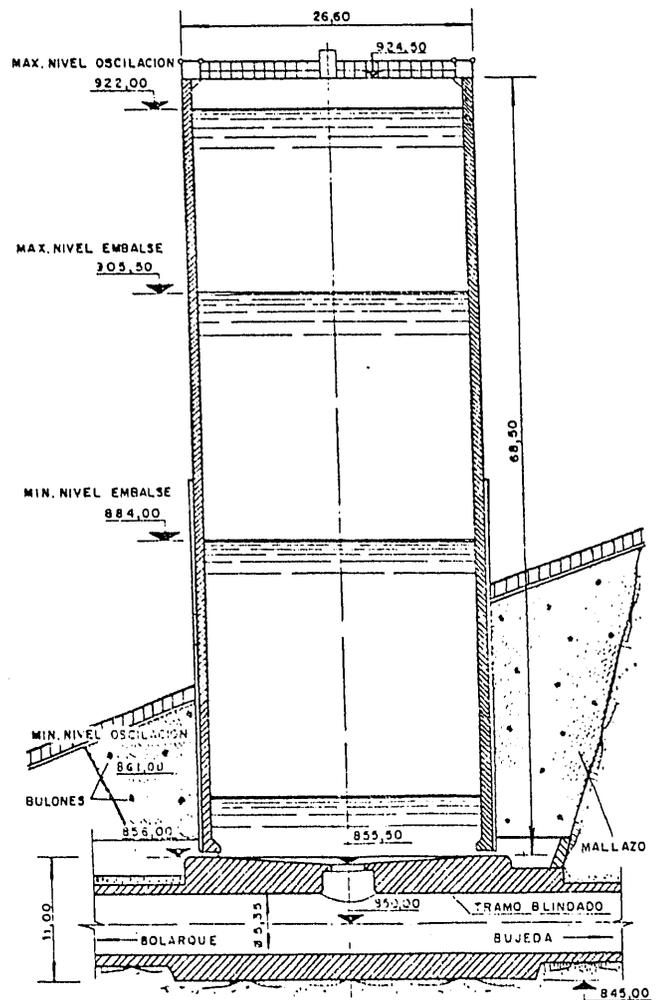
LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO DE ALTOMIRA

de la chimenea por encima de 60 metros. Como el diámetro mínimo requerido por las condiciones de estabilidad es de 12 metros, la combinación de estas magnitudes produce esfuerzos de tracción en el arranque de la cámara que, de ser absorbidos por una estructura de hormigón armado obligaría a espesores muy poco adecuados.

La chimenea del proyecto tenía un diámetro interior de 20 metros; pero estudios hidráulicos posteriores, realizados durante la fase de construcción de las instalaciones, aconsejaron su ampliación a 25 metros, con objeto de poder recrecer el embalse de La Bujeda incrementando en un hectómetro cúbico su capacidad y también para reducir la oscilación, permitiendo una mayor utilización de los grupos de la central. En la determinación del diámetro final se analizaron diferentes posibilidades de estrangulamiento en la inserción, que fueron ensayadas en laboratorio.

La estructura proyectada inicialmente para el fuste de la chimenea, con pretensado exterior por bobinado continuo, resultaba poco aconsejable para las nuevas dimensiones del depósito, llevando a un número de capas del arrollamiento absolutamente inusitado en estas construcciones. Incluso con el diámetro y la disposición prevista en el mencionado proyecto (carga máxima sobre el fuste 57,6 metros de agua) el pretensado exterior era ya una extrapolación de la experiencia en estas estructuras que se utilizan en depósitos o silos de menores diámetros o menores alturas. La protección del cable del enrollamiento se realiza a posteriori, con hormigón proyectado o gunita, dando lugar a dos formas de trabajo del hormigón: la del núcleo, en estado de compresión, y la de la gunita, en tracción ante las variaciones de carga, retracción, efectos térmicos, etc. Aunque en los cálculos no se considere ninguna resistencia de esta capa de protección, lo que sí es evidente es que se fisurará al cabo de un cierto número de ciclos de carga, disminuyendo su capacidad de protección de los cables, con la consiguiente amenaza de corrosión bajo tensión de los mismos. Para evitar esto se pueden emplear aceros galvanizados, de costo muy alto, o rehacer periódicamente la capa de gunita, lo que en el caso de esta chimenea resultaría todavía más costoso y complicado, por su altura. En las cámaras de equilibrio y más aún en las de una instalación reversible como es la de Altomira, los ciclos de carga y descarga son tan frecuentes que, en nuestra opinión, desaconsejan el empleo de estructuras pretensadas exteriormente, por las causas señaladas.

Atendiendo a estas consideraciones, se cambió el tipo estructural del proyecto, adoptándose un pretensado interno de la torre, sistema Freyssinet, con cables de alta resistencia alojados en vainas y anclados en sus dos extremos. Una vez puestos

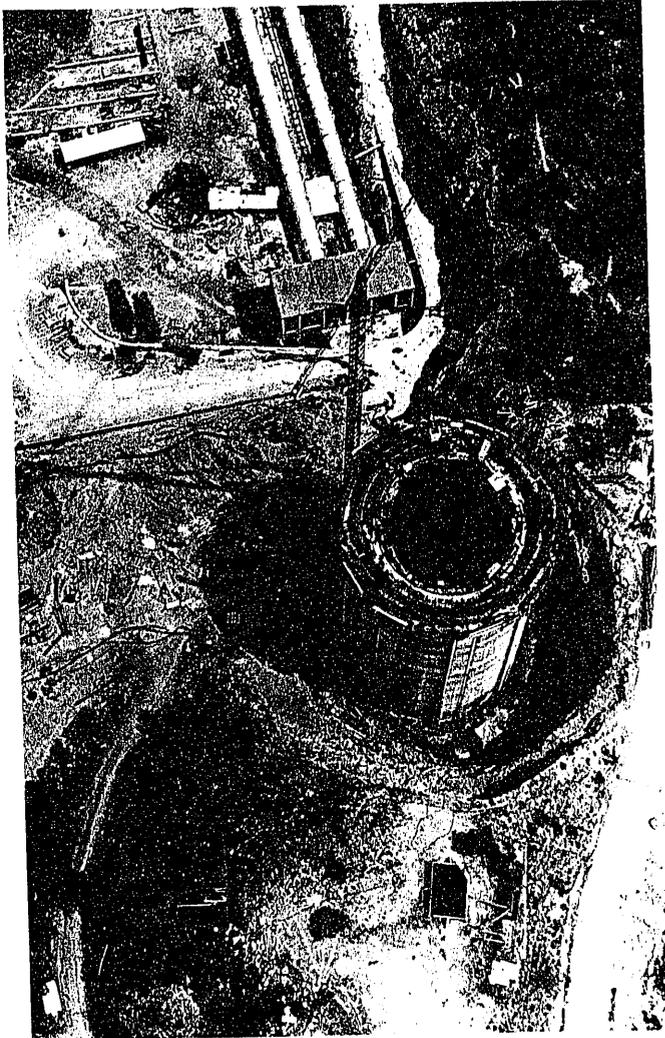


en tensión e inyectados los conductos con mortero a presión, se cubren las cabezas de anclaje con hormigón, pero no existen capas de material trabajando de diferente manera, y el estado tensional del hormigón es siempre de compresión, si el cálculo del pretensado ha sido correcto. Existen numerosos antecedentes de este tipo de obras, algunas de ellas en España, que llevan años construidas y se han comportado perfectamente; si bien es cierto que no tenemos noticia de que, en ninguna de ellas, la combinación diámetro altura de carga sea tan excepcional como la de esta chimenea de Altomira.

DESCRIPCION DE LAS OBRAS

La base de apoyo de la chimenea está formada por una gran tortada de hormigón en la que queda incluida la conexión entre las tuberías forzadas y la galería de presión, con un tramo blindado al que se suelda verticalmente la inserción estrangulada de la cámara de equilibrio.

LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO DE ALTOMIRA



Su hormigonado se hizo por grandes bloques a excepción del último metro, fuertemente armado, que se dividió en ocho sectores para reducir los efectos de la retracción y se hormigonaron alternadamente. En la corona circular donde apoya el fuste, las especificaciones pedían, además de una horizontalidad perfecta, que la luz entre una regla de un metro de longitud, apoyada sobre el hormigón y éste, fuese menor de un milímetro, lo que obligó a pulir con máquina dicha zona hasta cumplir las normas.

La siguiente operación consistió en pegar una junta de caucho cloropreno de 45 centímetros de ancha y cinco centímetros de espesor sobre el perímetro de apoyo, de unos 80 metros de desarrollo. Los bordes se soldaron después de cortarlos en bisel por medio de una lámina de caucho especial y la aplicación de calor. En la memoria del proyecto se justificaba esta solución intermedia entre la articulación y el apoyo deslizante, ya que al poder girar y desplazarse horizontalmente la pared del fuste existiendo sólo una ligera coacción por parte

del cloropreno a estos movimientos, los momentos verticales son muy reducidos sin presentar además los graves inconvenientes constructivos de las soluciones articuladas o deslizantes.

En cuanto a la estructura cilíndrica pretensada del fuste, el anclaje de los cables semicirculares se dispuso en ocho pilas, cuatro de las cuales llegaban hasta la coronación de la chimenea y el resto quedaban interrumpidas a media altura. Por otra parte una serie de cables verticales cosían longitudinalmente el fuste asegurando la estanqueidad de posibles juntas de construcción. El sistema de ejecución fue el de hormigonado continuo con encofrado deslizante.

Un tema delicado en este tipo de obras es la precisión en la disposición de anclajes y vainas, sobre todo de los primeros, pues una vez establecido con los mismos una referencia, la colocación de las vainas no representa un problema especial, salvo el derivado de la velocidad de deslizamiento que como veremos más adelante admite pocas oscilaciones, si queremos obtener un hormigón de calidad y sobre todo estanco, lo que marca unos ritmos de puesta en obra importantes. Esto se resolvió colocando los anclajes en unas cabezas prefabricadas en taller a pie de obra que los agrupaban de forma que se consiguiesen longitudes de cabezas lo más parecidas posibles.

Los cables empleados fueron de dos clases: en los primeros 51 metros contando desde el arranque se utilizaron de 12 T-15 y en el resto de 12 \varnothing 8. Los primeros se componían de 12 torones de un diámetro aparente de 15 milímetros, compuesto por siete alambres de cinco milímetros, lo que suponía un diámetro aparente medio total de unos 55 milímetros y los segundos por 12 alambres de \varnothing 8 milímetros.

La separación de los torones se movía aproximadamente entre los 16 centímetros en la base de la chimenea y 45 centímetros arriba, y los cables de 12 \varnothing 8 empezaban con 15 centímetros y terminaban con 54 centímetros. Esto unido a la armadura normal con sus cercos correspondientes, en un ancho de pared de 80 centímetros, da una idea de la gran densidad de hierro que se acumula dentro del encofrado.

Antes de iniciar el hormigonado, se habían fabricado la totalidad de las cabezas en las que se pintó la numeración que le correspondía a cada una para evitar confusiones, así como los cables de 12 T-15. Quedando tan solo algunos de 12 \varnothing 8 que se fabricaron sobre la marcha.

También fueron objeto de un control muy riguroso los áridos y el cemento para conseguir un hormigón de 300 Kg/cm² de resistencia característica que dada la época del año en que se construyó la chimenea (finales de julio y agosto) necesitaba

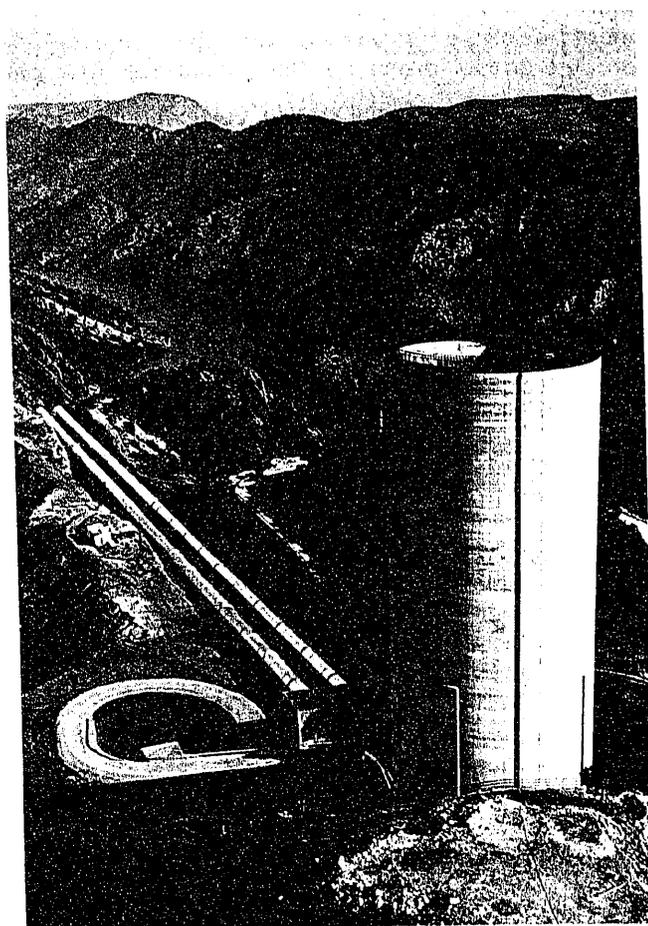
LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO DE ALTOMIRA

un retardador del fraguado para poder deslizar sin que se pegase al encofrado. Este era de madera forrada de chapa de cinc por la cara en contacto con el hormigón para facilitar el deslizamiento y a su vez evitar el desgaste de la madera a lo largo de los 68,5 metros de ascensión. Su altura era de un metro.

Una vez que estuvo montado, antes de proceder a la construcción de la plataforma interior por la que tenían que circular dos pequeños dumpers repartiéndose el hormigón y del sistema de elevación, se hormigonó para obtener un primer anillo con la rigidez suficiente para el montaje de la estructura que iba a ser deslizada y que constaba de una plataforma principal, enrasada con la parte superior del encofrado, y dos secundarias, una superior que servía para ir montando la ferralla y otra inferior colgada de la principal destinada al fratasado, arreglo de pequeños desperfectos o irregularidades en los paramentos, así como al curado del hormigón.

La junta así creada en el hormigón a la cota de un metro sobre base se trató con resina epoxi inmediatamente antes de comenzar el hormigonado del fuste para conseguir una unión lo más perfecta posible entre los dos hormigones. Un fallo en el comportamiento del retardador de fraguado obligó a parar el deslizamiento cuando se llevaban algo más de cinco metros recorridos, ante la cantidad de dificultades que acarrearaba, sobre todo a las horas de calor, el rápido fraguado del cemento, lo que originó entre otras cosas, la obstrucción de cuatro vainas con la imposibilidad de enhebrar los cables correspondientes. Reconsiderando de nuevo el problema y tras solucionar las dificultades habidas, cinco días después se reanudaba definitivamente el deslizamiento con un nuevo retardador, que había de comportarse francamente bien hasta el final del hormigonado. La dosificación empleada de este producto fue del 3 al 4 % del peso del cemento según se hormigonase por la noche o por el día.

La maquinaria y medios auxiliares más importantes que utilizó la contrata en este trabajo fueron los siguientes: una planta de fabricación de hormigón con dosificación en peso situada en las inmediaciones de la chimenea; dos grúas torre para suministrar las cabezas prefabricadas, las bobinas de cables, las vainas, ferralla, etc.; dos bombas de hormigón, una de las cuales era de repuesto; dos camiones hormigonera y un ascensor de cremallera adosado al paramento del fuste, al que le añadía rodadura conforme se iba subiendo y que servía para el transporte del personal que trabajaba en tres turnos las veinticuatro horas del día. Además de esto había dos pequeños dumpers de 1/4 de metro cúbico, con vuelco lateral para repartir el hormigón por el perímetro del trabajo, vibradores de aguja eléctricos, una máquina para enfilar los cables que se sustituyó por dos pequeños cables-



tantes también eléctricos, bastante más eficaces que la enfiladora, etc.

Naturalmente hay que incluir en este capítulo el sistema de deslizamiento compuesto, en esencia por una caseta de control y unos gatos. Estos en número de 92 se unían al encofrado por parejas mediante unos yugos metálicos y un circuito hidráulico de alta presión los enlazaba entre sí y a la caseta.

La reacción para conseguir el esfuerzo ascensional se localizaba en unas barras de acero cilíndricas de unos 35 milímetros de diámetro y empalmables cada seis metros sobre las que actuaban los gatos. Estos eran también cilíndricos con un émbolo central hueco para permitir el paso de la barra de trepa. Interiormente, unos dientes mordían la barra en la posición de descanso y se aflojaban para permitir la ascensión. Esta se controlaba en cada gato mediante un cursor que se fijaba a la barra de reacción mediante un prisionero.

En la caseta se ubicaba la bomba movida por un motor eléctrico, el depósito de aceite del circuito y un sistema automático de disparo con un mecanismo de tiempo para que el conjunto funcionase con la periodicidad adecuada al ritmo de la obra.

LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO DE ALTOMIRA

Para deslizar los 68,5 metros del fuste se emplearon veintitrés días, lo que nos da una media diaria de casi tres metros y, como el recorrido medio de los gatos era de unos 30 milímetros, se produjeron del orden de 100 elevaciones por día.

Un control esencial era la verticalidad, ya que una desviación importante no es corregible en las estructuras deslizadas y, por tanto, la observación de las plomadas era casi constante. Estas, colgadas de la plataforma principal, eran unas simples probetas cilíndricas de hormigón sujetas a un alambre que se desenrollaba conforme se subía. En total había ocho plomadas, cuatro interiores y otras tantas por fuera. La guía del encofrado se realizaba variando el recorrido de los gatos actuando sobre el cursor antes citado que hacía de tope.

Antes de terminar el hormigonado se dejaron embutidas en la coronación de la chimenea unas vigas metálicas en posición vertical para soldarlas a la plataforma y poder así liberar los gatos para darles la vuelta y proceder a la recuperación de las barras de trepa, lo que se consiguió en un 60 por 100 aproximadamente. Simultáneamente se desmontaron las plataformas secundarias dejando exclusivamente la principal por su parte interior como zona de trabajo para enhebrar los cables verticales y rematar la coronación.

Para el tensado de cables fue necesario disponer unos andamios móviles colgados de la coronación y abarcando todo el contorno del fuste. Se utilizaron cuatro gatos, de forma que si no surgían problemas se tensaban unos 20 cables al día; es decir, 10 anillos completos. Las operaciones comenzaron en la parte baja subiendo por dos pilas largas opuestas. Una vez arriba se procedió a tensar los 55 cables verticales de dos en dos opuestos diametralmente (en realidad sólo 51 ya que no fue posible enhebrar cuatro de ellos por estar obstruida la vaina). Aunque el proyecto determinaba que

la tensión se hiciese siempre de abajo hacia arriba, la premura del tiempo hizo, ante la lentitud de subir y bajar los andamios a mano, que se cambiase el plan de tensado y en consecuencia, las otras dos pilas largas se tensaron empezando por arriba. Para las cortas se empleó el mismo procedimiento.

Mientras tanto, y una vez terminados los trabajos en la coronación se bajó la plataforma principal deslizándola con los propios gatos, a la vez que se repasaba el paramento interior arreglando los pequeños desperfectos que había dejado el deslizamiento.

Una vez ejecutado el tensado de los 576 cables horizontales y de los verticales, se utilizó el andamio para inyectar las vainas con lechada de cemento. Esta operación adquiría una especial relevancia por tratarse de un depósito de agua por lo que se esmeró la ejecución y la vigilancia del tajo para asegurar un perfecto llenado de todas las vainas y proteger así de la corrosión los cables que, en definitiva, forman la estructura resistente de la chimenea.

Como esta operación se realizó ya en tiempo frío, fue necesario tomar precauciones contra los hielos, por lo que además de añadir un anticongelante a la mezcla, se limitaron las horas de trabajo a las del cuerpo del día e incluso se llegó a calentar el agua.

Dadas las dificultades de los primeros metros del deslizamiento y ante el temor de que hubiesen quedado juntas en el hormigón por las que pudiera salir el agua, se decidió impermeabilizar los seis metros primeros interiormente. Para ello, pintó el paramento con pintura de resina apóxida, previo sableado del mismo para quitarle la cascarilla al hormigón y descarnarlo ligeramente de forma que la penetración y adherencia de la resina fuese máxima.