depósito pretensado OREBRO

KURT ERIKSSON, ingeniero

El nuevo depósito elevado de Örebro, se halla ubicado en el centro de la ciudad y, por tanto, ha tenido que considerarse cuidadosamente su composición exterior. Debido al gran volumen, unos 9.000 m³, y una altura de unos 50 m entre el suelo y el nivel superior de aguas, la solución cilíndrica con soportes dispuestos circularmente o de paredes cilíndricas hubiese resultado excesivamente masiva. El hormigón pretensado permitió llegar a una estructura más ligera y de línea más elegante, cuya forma se fué perfilando desde los primeros tanteos.

Las paredes exteriores del depósito, pretensado horizontalmente, son cónicas y de 1 : 1,5 de pendiente. El diámetro máximo es de 46 m, y la superficie externa es poliédrica, de 32 caras, que, alternativamente, se han recrecido 20 cm para lograr espesor para los anclajes.

Se ha dado consideración especial a la zona de transición entre la lámina cónica y el anillo de rigidez, zona que se ha dispuesto en la parte superior del tronco cilíndrico que soporta el depósito. El peso propio y del agua, en una sección superior circular, da origen a una compresión de sentido meridiano. Si se considera un anillo en la zona de transición, la compresión meridiana tiene una componente que contrarresta la presión del agua sobre el anillo. Por medio de elección apropiada del radio del meridiano, se puede, pues, llegar a una resultante en el anillo de compresión simple.

Como el anillo de rigidez de la parte inferior de la capa del depósito se halla también sometido a compresión, los efectos en el borde son moderados sobre los diferentes elementos estructurales en el fondo del depósito propiamente dicho.

Los ensayos en modelo reducido sirvieron para comprobar que el anillo de rigidez y paredes se comportaron de acuerdo con las previsiones del análisis estructural.

El fuste o tronco que soporta el depósito tiene 10,50 m de diámetro exterior. Debido a una falla en el banco de roca de apoyo, los cimientos se llevaron a una cota 10 m por debajo del nivel superficial del suelo.

Para consolidar la roca, se inyectó a unos 20 m de profundidad a partir de la base de cimientos. El hueco formado en esta excavación de cimientos servirá para construir tres plantas subterráneas destinadas a servicios auxiliares. En la parte interior del fuste existe una escalera y un núcleo central cilíndrico con dos ascensores, cada uno de los cuales tiene una capacidad para 10 personas.

Para la televisión y radio se han previsto dos departamentos en la parte cilíndrica del fuste, así como un mástil en la parte superior de la estructura.

La parte central de la cubierta se ha reservado para un restaurante. Esta cubierta consiste en una lámina cónica soportada por otra lámina, también cónica. El forjado del restaurante se ha formado con 32 vigas prefabricadas, pretensadas radialmente, que descansan sobre el muro interior del depósito y sobre una serie de pilares en circunferencia que descansan sobre la pared cónica del depósito. Radialmente al exterior del restaurante se ha dejado un balcón circular para admirar las vistas que le rodean. La parte exterior del balcón se suspende formando una lámina cónica, que constituye una parte de la cubierta. El espesor de las láminas de cubierta es, generalmente, de 0,12 m. Estas estructuras no se han pretensado; pero el anillo o zuncho perimetral que une el borde exterior de la cubierta con las paredes cónicas del depósito, se ha pretensado horizontalmente.

La estructura de cubierta se ha proyectado para conformarse con la impresión monolítica del conjunto del depósito, cuyo exterior se ha pintado, exteriormente, con lechada de cemento blanco y de color gris claro.

En la sección puede apreciarse la disposición de las armaduras de pretensado. La zona de doble curvatura, sometida a compresión, no necesita del pretensado. Este último se ha calculado para que no existan anillos con tensión en cualquiera de las combinaciones de carga, incluyendo temperatura y efectos de retracción.

Al contratista se le dejó la libre elección respecto al sistema para pretensar, pero el esfuerzo total y distribución se estipularon claramente.

detalle de pretensado

Se eligió el sistema Freyssinet, con cables de 12 alambres de 7 mm de diámetro cada uno. Los alambres tenían una tensión de rotura de 150 kg/mm² y 0,2 % de límite elástico de prueba con una carga de 125 kg/mm².

Las pérdidas por deformación lenta, retracción y rozamiento se calcularon de acuerdo con las normas DIN 4227 y los resultados de los ensayos. Para el coeficiente de rozamiento se admitió 0,35.

Antes de anclar, los cables se tesaron a 115 kg/mm². Después de deducir todas las pérdidas, el esfuerzo medio por cable es de unas 37 toneladas.

El número total de cables es de 206. Cada anillo consiste en dos cables, solapados uno respecto de otro en las extremidades. La mayor longitud de un cable es de 76 metros.

Los paños o recrecidos de 20 cm reservados para los anclajes se pudieron haber reducido a 4 u 8, pero se prefirió 16 debido a razones estéticas. Los cables del anillo superior se anclaron en unos rebajes, rellenos después con hormigón una vez terminadas las operaciones de tesado.

El pretensado se realizó en dos fases; en la primera, llevada a la práctica tan pronto como se pudo, se tesaron el 20 % de los cables para inducir cierto estado de compresión en el hormigón y evitar la fisuración debido a la retracción. Al final se procedió a las inyecciones, para las que se empleó un cemento de elevada resistencia inmediata mezclado con 1 % de «Intrusion Aid». La relación agua/cemento varió de 0,34 a 0,37.

El encofrado para el hormigonado constituyó uno de los mayores problemas constructivos, debido a la altura y forma propia del de-

detalle de maniobra de elevación

- A Válvula de descarga.
- B Tuerca de seguridad
- C Resortes para asegurar el contacto.
- D Placa de distribución de carga.
- E Bloque auxiliar de aluminio, de 10 cm.
- F Bloque de hormigón, de 29 cm.
- G Encofrado deslizante.

pósito. La parte externa del depósito, en conjunto con el anillo de base o unión con el fuste y el apoyo para el cilindro interior, debían hormigonarse en una sola operación, por temerse que el entramado del encofrado pudiera ser causa de grietas en las paredes cónicas del depósito. El contratista se encargó de resolver este problema por sí solo; para ello, evitó los entramados de gran altura y facilitó la colocación del hormigón en obra construyendo el depósito a nivel sobre el suelo. Después de haberlo hormigonado, pretensado, probado y pintado, se levantó el depósito a su posición definitiva, unos 35 m sobre el terreno, por medio de gatos hidráulicos. A medida que el depósito se levantaba, se iban construyendo los muros cilíndricos.

En la construcción de dos hangares del aeropuerto de Marignane se emplearon procedimientos de elevación de la misma magnitud, si bien es verdad que las condiciones allí eran algo diferentes.

Se empleó cemento portland de baja temperatura de fraguado para retardar el endurecimiento del hormigón, en vista de la gran longitud del perímetro de hormigón que debía conservarse fresco. La retracción debida a cambios de temperatura durante el curado fué también baja, así como el riesgo de agrietamiento en el hormigón en vías de fraguado, fenómeno que podría motivar el asiento del entramado de los encofrados.

La lámina cónica se hormigonó sin encofrado superior. La zona correspondiente a la doble curvatura se encofró en sus dos partes, por encima y por debajo.

El hormigón se transportó desde la central a la parte superior del depósito por medio de un montacargas, volcado en una tolva, y, desde ésta, por medio de canaletas, al tajo de hormigonado. El transporte lateral se hacía ayudándose de una grúa. Después de haber colocado y vibrado el hormigón, se alisaba con paleta su superficie.

La primera fase del pretensado se ejecutó dos semanas después de hormigonar; y la segunda, tres semanas más tarde. Los muros interiores del depósito se hormigonaron simultáneamente. Terminada esta operación se llenó el depósito con agua para probar su estado de impermeabilización. Después de pequeños retoques en la superficie externa se procedió a pintarla, dejando terminado el depósito y en espera para ser elevado a su posición definitiva.

La caja de la escalera y la parte superior del cilindro de la caja de ascensores se hormigonaron durante el trabajo de elevación. Más

tarde se terminó la estructura de la cubierta y la instalación de tuberías, ascensores y equipo sanitario y eléctrico.

La operación para elevar el depósito resultó ser la más espectacular de todo el trabajo. El peso de la estructura que debía elevarse era de 3.200 toneladas. La elevación se hizo con ayuda de 32 gatos hidráulicos, que se fijaron invertidos, con la base hacia arriba y la punta hacia abajo, en la parte inferior del muro del fuste cilíndrico. La capacidad nominal de los gatos era de 100 toneladas, y una presión de aceite que se elevaba a 400 kg/cm². Esto no obstante, se ensayaron a 200 toneladas, principalmente para juzgar su grado de impermeabilización. Cada gato iba provisto de una válvula de admisión, una de salida y una de reflejo combinada con un manómetro. La carrera de los gatos era de 15 cm, y se equiparon con tuercas de seguridad que podían retener la carga si desaparecía la presión en el aceite.

Antes de llegar a la solución final para el sistema operativo de los gatos, precedieron cuidadosos estudios y discusiones. De acuerdo con esto, 29 gatos se conectaron con una bomba movida con motor, reteniendo otra bomba de recambio. Las otras bombas se colocaron en las terceras partes de la circunferencia, y alimentadas de aceite de otras bombas movidas a mano. Tres de los gatos del sistema principal se podían conectar alternativamente, con bombas accionadas a mano, para poder compensar en caso de carga excéntrica debida al viento y a la falta de uniformidad al colocar el hormigón. La idea consistió en repartir la carga general sobre los 29 gatos. Estos debían proporcionar un empuje ligeramente inferior al necesario para empezar la elevación. La carga restante debía ser suministrada por los otros tres gatos accionados manualmente, es decir, gatos «gobernantes». Con estos tres gatos se controlaba la velocidad de elevación en estos tres puntos.

Después de una elevación de 12 cm, se aflojaba un gato y se le llevaba a su posición primitiva por medio de resortes, colocando debajo un bloque de aluminio, de 10 cm, que serviría de apoyo para volver a elevar. Se cerraba la válvula de escape, abriéndose después la de admisión, volviendo el gato a entrar en presión. Esta misma operación se repetía en cada uno de los gatos restantes, generalmente dos a la vez. Después de una nueva elevación se volvía a colocar con otro bloque de 10 cm y, la tercera vez, se quitaban los bloques de aluminio y se colocaba otro de hormigón, de 29 cm y de buena calidad. Estos bloques cilíndricos, de hormigón muy resistente, se habían preparado en número de 4.000 previamente.

Fotos: LUNDQUIST-BILD y SPECIALFOTO

Así se conseguía una elevación parcial de 29 cm de altura y un anillo cilíndrico de igual altura, en el que se quedaban embebidos los bloques en el hormigón fresco.

Las armaduras verticales se iban elevando a través de tubos verticales colocados en el fondo del pie del fuste.

La operación de elevación se controlaba respecto a alineación, inclinación y rotación desde un cuadro de maniobra que se suspendió del depósito. Entre los instrumentos de control se contaba con plomadas, niveles y lámparas que se encendían y apagaban a medida que el nivel del agua de los tubos comunicantes instalados en la cubierta se movía hacia arriba o para abajo y a cierta distancia de la línea de referencia del nivel de los tubos comunicantes.

Durante las operaciones de elevación no hubo que lamentar inconveniente alguno. Después de vencer algunas dificultades, la operación se desarrolló a una velocidad de 58 cm por día, que equivale a dos bloques cilíndricos de hormigón. Estas maniobras duraron por espacio de unos tres meses.

Al terminar de elevar el depósito, fueron tomadas las medidas pertinentes para que si un día se deseaba elevar aún más el depósito pudiera hacerse sin grandes inconvenientes.

El depósito se ha soportado libremente sobre el fuste cilíndrico, porque las armaduras verticales no se han anclado en el depósito.

El depósito elevado de Orebro pone de manifiesto las posibilidades de nuevas formas por el empleo del hormigón pretensado. El coste de la construcción es ligeramente inferior, o por lo menos no mayor, al de un depósito de tipo convencional de igual capacidad, si se consideran los anexos del restaurante, radio, televisión, etc.

El depósito es propiedad del departamento de Obras Públicas de Orebro. La empresa A B Vattenbyggnadsbyran (VBB), de Estocolmo, se encargó de la parte de ingeniería y arquitectura del proyecto. El contratista fué A. B. Svenska Stenbeläggningar, de Uppsala, y el equipo para la elevación lo suministró A B Nike, de Eskilstuna.

J. J. U.