

Nota técnica

Aplicaciones del concreto en las obras hidráulicas de abastecimiento

Humberto Luna Núñez

Comisión de Aguas del Valle de México, SARH

El abastecimiento de agua a las grandes urbes requiere del análisis, diseño, construcción y operación de sistemas hidráulicos complejos, tales como presas de almacenamiento y derivación, plantas de bombeo, líneas de conducción, instalaciones de energía, edificios y otras estructuras civiles en donde el concreto es uno de los elementos estructurales más importantes. A medida que se requiere construir estas obras en sitios más alejados y difíciles, que los materiales tradicionales son más costosos y que la tecnología evoluciona en relación con los materiales, equipos y procedimientos de construcción, es necesario introducir innovaciones en los conceptos de diseño, en las estructuras físicas mismas y en los organismos encargados de su diseño, construcción y operación. En este artículo se describen brevemente cinco experiencias en las que los requerimientos de mayor capacidad en las obras y tiempos de construcción más cortos han propiciado la aplicación de nuevos métodos de construcción y una adecuación de los criterios de diseño de algunas estructuras.

Tuberías de concreto reforzado

Hasta hace unos diez años las tuberías de concreto reforzado más grandes de fabricación nacional eran de 72" de diámetro, para resistir cargas equivalentes de columna de agua hasta de 120 m.

Ante el incremento de gastos y cargas demandados por los nuevos proyectos para el abastecimiento del área metropolitana de la ciudad de México, los cuales requirieron de tuberías más grandes y de mayor resistencia, la industria nacional ha dado una respuesta positiva y a la fecha se puede disponer en el país de tuberías de concreto reforzado de 99" de diámetro para soportar presiones equivalentes a 150 m de columna de agua. Estas tuberías son de acero de presfuerzo helicoidal, que proporciona la resistencia requerida; para grandes cargas, algunas tienen embebida una camisa de acero que les da la impermeabilidad necesaria y se fabrican con juntas de espiga y campana o con juntas del tipo *lock joint*.

En el acueducto del sistema Cutzamala se han

instalado alrededor de 120 km de esta tubería, la cual ha funcionado hasta hoy en día prácticamente sin problemas (véase ilustración 1).

Las líneas de conducción de alta presión son por lo general de acero y suelen tenderse superficialmente; su bajo espesor no puede soportar grandes cargas exteriores. Requieren de juntas de expansión para absorber los cambios de temperatura y se apoyan sobre silleas en cuyos puntos se construyen atiesadores para evitar deformaciones de membrana. Para prevenir la corrosión externa es preciso darles un mantenimiento continuo.

Una nueva aplicación del concreto surgió cuando se construyeron algunas de las rampas de alta presión del sistema Cutzamala, ahogando la tubería de acero en un dado de concreto y apoyando éste directamente sobre el terreno natural. Así, se eliminó la necesidad de colocar apoyos especiales y juntas de expansión; por otro lado, se ahorró el costoso mantenimiento preventivo. Adicionalmente a estas ventajas, el tiempo de construcción se redujo una tercera parte y se eli-

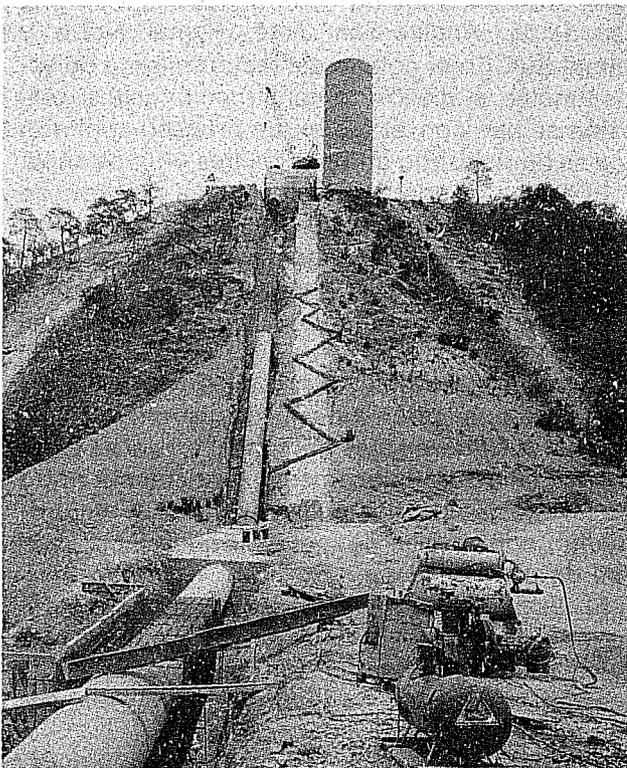


1. Tuberías de concreto reforzado de 99" de diámetro

minó el uso de piezas especiales que requerían aceros de alta resistencia no disponibles en el país (véase ilustración 2).

Tanques de regulación y almacenamiento

Para lograr una operación flexible y eficiente de los sistemas de distribución de agua potable en las grandes urbes se requiere de tanques de regulación y almacenamiento cada vez de mayor capacidad; en la ciudad de México es común



2. Rampas de alta presión

encontrar tanques con una capacidad de 10 000 m³. Dichos tanques deben garantizar una impermeabilidad absoluta, ya que almacenan agua muy costosa, generalmente potabilizada y bombeada a varios cientos de altura.

La causa principal de las fugas de agua en un tanque es el agrietamiento. De la experiencia se conoce que las grietas capilares con anchos menores de 1/10 mm no afectan la impermeabilidad.

En la actualidad, es posible calcular con suficiente precisión el ancho medio de las grietas producidas por cargas permanentes o por cambios de temperatura; pero dado que el ancho máximo real puede ser del doble del ancho medio, las normas de diseño para tanques de almacenamiento son ya más estrictas que las especificadas en lo referente a la protección contra la corrosión.

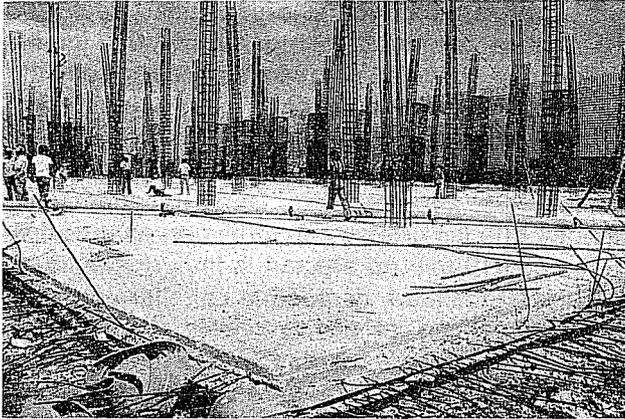
En el diseño de tanques de almacenamiento es recomendable evitar la formación de grietas de tensión, lo cual se consigue limitando los esfuerzos de este tipo al aumentar el peralte o espesor de muros y losas en relación con el requerido en condiciones de carga normal.

Así mismo, con espesores mayores —sobre todo en las losas de piso— se reduce la posibilidad de que las grietas causadas por el fraguado alcancen ambas superficies. La formación de grietas durante el fraguado disminuye notoriamente si se usan concretos con revenimientos menores de 5 cm, con volúmenes mínimos de arena y grava de mayor tamaño.

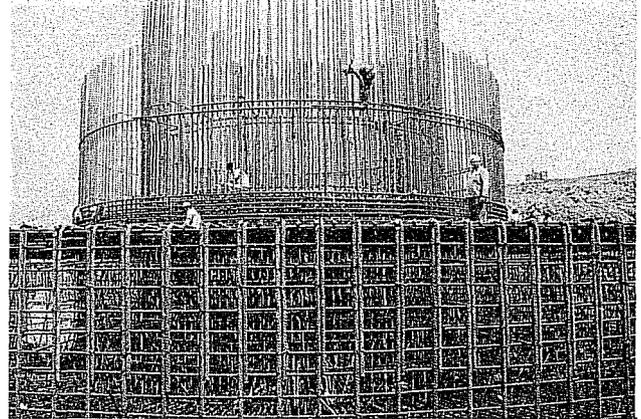
Ningún tanque de las dimensiones mencionadas puede construirse en un solo colado, por lo que son inevitables las juntas de construcción. En un buen diseño estas juntas deben disminuirse al máximo para no presentar puntos débiles; bien planeadas y preparadas no sólo permiten una construcción más económica, sino que mantienen los tiempos de colado dentro de límites razonables. El tanque de almacenamiento Pericos, que actualmente construye la Comisión de Aguas del Valle de México en el Valle del Lerma (cerca de la ciudad de Toluca), dentro del sistema Cutzamala, es un buen ejemplo de aplicación de este principio de diseño (véase ilustración 3).

Torres de sumergencia y de oscilación

Un tipo de estructuras frecuente en los grandes sistemas de bombeo son las torres de sumergencia y las de oscilación; estas estructuras se construyen antes y después de las plantas de bombeo, con objeto de garantizar el cebado y la sumergen-



3. Construcción del tanque Pericos



4. Armado estructural (torre de oscilación 1, Colorines)

cia de las bombas, y de reducir el efecto del golpe de ariete en las líneas de conducción. Por lo general, estos tanques son cilíndricos y de gran altura; dentro de ellos se producen oscilaciones en masa del agua por efecto de maniobras o paro total de los equipos de bombeo.

Los requerimientos de impermeabilidad en estas estructuras son más difíciles de cumplir debido a las grandes presiones hidrostáticas a que están sujetas; por este motivo es conveniente eliminar las juntas de construcción. Entre otros factores, esto fue fundamental para que en el sistema Cutzamala se optara por construir en forma monolítica estas estructuras, para lo cual fue necesario emplear un procedimiento de construcción de colado continuo.

Un ejemplo de esta operación es el colado de la torre de oscilación de la planta de bombeo número tres del sistema Cutzamala. Esta estructura es de 55 m de altura; tiene un diámetro interior de 10 m y muros de 1.20 m de espesor; en esta torre se colocaron 4400 m³ de concreto y 625 toneladas de acero de refuerzo en una operación de colado continuo que duró 15 días.

Durante el colado se utilizó una cimbra circular deslizante de 2 m de altura, apoyada en columnas de acero que quedaron ahogadas en los muros de la torre durante el proceso. La cimbra se avanzaba hacia arriba 18 cm cada hora por medio de gatos hidráulicos. Durante el avance el concreto descubierto tenía 10 horas de edad, por lo que el que se usó fue dosificado para lograr a dicha edad la capacidad de carga suficiente para soportar los esfuerzos producidos por el concreto, la cimbra y el equipo empleado (véase ilustración 4).

Durante esta operación fue determinante la velocidad de colocación del refuerzo horizontal,

constituido por dos anillos formados por varillas de 1 1/2" de diámetro, colocados cada 10 cm. Lo anterior requirió realizar alrededor de 20 traslapes de varilla cada hora, para lo cual se emplearon mufas —que hacen la unión de varillas por presión y en frío— con lo que se logró la rapidez requerida. (véase ilustración 5).

Instrumentación de túneles

La línea de conducción del sistema Cutzamala tiene cuatro tramos de túnel denominados Agua Escondida, Analco-San José, Ramal Norte y Ramal Sur. En el colado del recubrimiento de estos túneles, el diseño, la construcción y la supervisión se han convertido en un proceso continuo que se ha realizado durante los tres últimos años.

El diseño de ademes y refuerzo del concreto de recubrimiento se ha hecho empleando en algunos casos el método del elemento finito para conocer el estado de esfuerzo —deformación del recubrimiento y de la masa rocosa en el entorno del túnel.

La supervisión incluye la medición de las deformaciones que sufren a través del tiempo diversas secciones transversales del túnel, lo cual se efectúa midiendo periódicamente la distancia entre los testigos colocados en la roca o en el recubrimiento, con varillas de metal "Invar" y micrómetros de alta precisión.

El levantamiento geométrico cada dos metros de las secciones excavadas en la roca, mediante rayos laser que permiten configurar y graficar en cuestión de segundos, sirve para calcular volúmenes de excavación y de concreto.

El análisis de esta información ha permitido verificar los tramos críticos del túnel, donde en oca-

siones ha sido preciso modificar el ademado o el refuerzo del concreto, o bien el procedimiento constructivo.

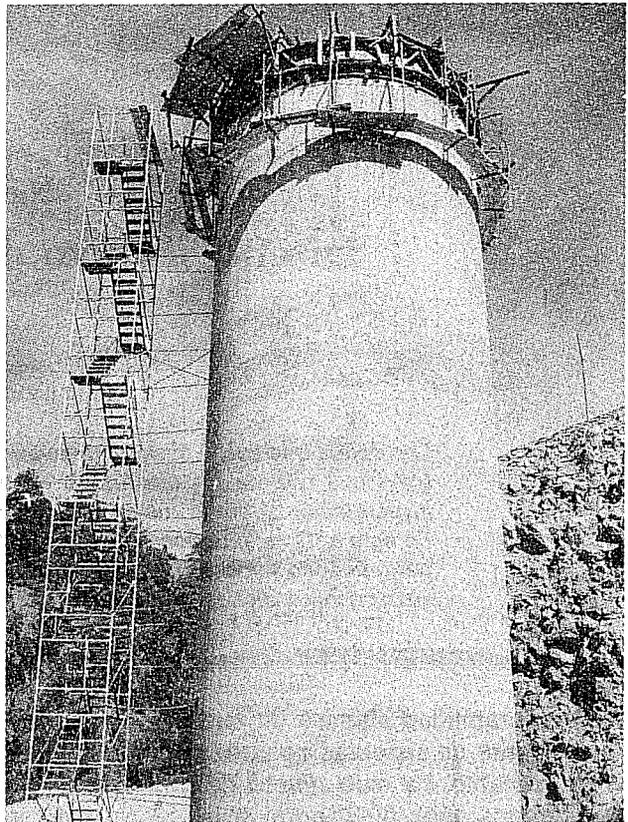
Métodos de análisis

A los ejemplos mencionados es conveniente agregar un breve comentario en relación con los métodos de diseño de las estructuras de concreto, el cual requiere que se realice previamente el cálculo preciso de los estados de esfuerzo-deformación producidos por la respuesta estructural a las cargas estimadas y a sus diferentes combinaciones.

El análisis que determina los estados mencionados se complica por muchos factores, a saber:

- la respuesta no lineal esfuerzo-deformación del concreto.
- la complejidad de formular los mecanismos de falla de varios estados de esfuerzo.
- los efectos dependientes del tiempo, tales como la fluencia plástica y el agrietamiento.

Los métodos de la teoría elástica lineal y de la carga última, aunque adecuados para el diseño ordinario, no son satisfactorios para analizar algunas de las estructuras mencionadas, comunes a los sistemas de abastecimiento y que requieren de un alto coeficiente de seguridad. En estos casos, la aplicación de métodos como el del elemento finito permite representar de manera más adecuada los factores anteriores. El desarrollo de programas de cómputo que realizan estos análisis ha facilitado la formulación de modelos más reales para el concreto, pero hay que tomar en cuenta que si bien el avance en este sentido es enorme, la predicción del comportamiento no lineal sigue siendo muy limitada, dado que los mo-



5. Torre de oscilación 6 (Chilesdo)

delos disponibles para representar dicho comportamiento son inadecuados.

En conclusión, para efectuar un uso adecuado del concreto en las obras modernas debe procurarse una actualización constante que propicie la asimilación real y efectiva de la experiencia en el diseño y la construcción, a fin de capitalizar de manera eficiente una tecnología que evoluciona cada vez más.