



## Estanques de almacenamiento de pulpa Desafíos de diseño y montaje

Patricia Avaria R.  
PERIODISTA CONSTRUCCIÓN MINERA

FOTOS GENTILEZAS AUSENCO CHILE

- » Se trata de dos estanques de hormigón armado (Holding Tanks) de 16 m de diámetro y 17,6 metros de altura, pertenecientes al nuevo sistema de transporte de pulpa de minera Los Bronces.
- » Se realizó un modelo de elementos finitos mediante el programa SAP 2000 versión 14.2.0, que involucra elementos estructurales tales como: mantos de estanque, losa de fundación, losa de compatibilidad superior y cajón distribuidor.
- » El edificio anexo a los estanques está estructurado como dos galpones dilatados entre sí, sobre la base de marcos rígidos de acero en la dirección transversal de cada galpón.

**C**ON EL OBJETIVO de mejorar el funcionamiento del sistema de transporte de pulpa e incrementar el funcionamiento de los procesos productivos, la Compañía Minera Anglo American Sur S.A. (ASUR), en el período 2008-2011, desarrolló la ingeniería de detalles de este sistema que pertenece a minera Los Bronces, ubicada en la región Metropolitana. Para realizar esa tarea, solicitó a la empresa Ausenco Chile el diseño del nuevo minero-ducto (tubería) de  $\varnothing=28$  pulgadas, que consideró una serie de instalaciones entre las que destacan un sistema de

cabeza, que está conformado por dos estanques verticales de hormigón armado (Holding Tanks) de 16 m de diámetro, 17,6 m de altura máxima (capacidad) y 18,6 m de altura total, con un volumen útil por estanque de 3.036 m<sup>3</sup> y un volumen total de 6.072 m<sup>3</sup>, junto con un edificio en estructura de acero, anexo a estos, para proteger el cuadro de válvulas de la intemperie, donde llegan las descargas de los estanques.

Domingo Luli6n, jefe de Disciplina Civil Estructural de Ausenco Chile cuenta que esta estructura se encuentra en una zona compleja, de difi- cil acceso, con un 6rea de em-

plazamiento reducida y a una gran altura geográfica (3.082 msnm), en la que, por un lado, estaba restringido por el corte del talud de la plataforma y por el otro lado por el borde de la ladera con una caída de 200 metros. Fue esta condición de emplazamiento la que predominó en el dimensionamiento de las instalaciones y en el diámetro de los estanques.

A ello, se sumaron las condiciones climáticas muy desfavorables, ya que la temperatura en el lugar, de acuerdo a la época del año, varía desde los  $-19^{\circ}$  a los  $22^{\circ}$  Celsius, con  $1.500 \text{ kgf/m}^2$  de carga de nieve en invierno y donde la velocidad del viento puede alcanzar rápidamente (en ráfagas) los  $130 \text{ km/hora}$ . A continuación detalles técnicos y estructurales considerados en el diseño del sistema de cabeza para el nuevo mineroducto de 28" del proyecto desarrollo en Los Bronces.

### MONTAJE

La estructuración consistió en fundar ambos estanques con unión fija a la losa de fundación de espesor constante igual a  $150 \text{ cm}$  y unirlos entre sí por una losa a nivel de coronamiento de  $25 \text{ cm}$  de espesor, cuyo objetivo es compatibilizar los desplazamientos, para evitar deformaciones relativas que interfieran la operación normal de los sistemas incluidos en la parte superior de los estanques, donde se encontraba una estructura metálica que servía de apoyo a los agitadores de cada estanque y además como plataforma de operación. Se incorporó una sobre losa en el fondo del estanque con forma cónica a solicitud del fabricante de los agitadores.

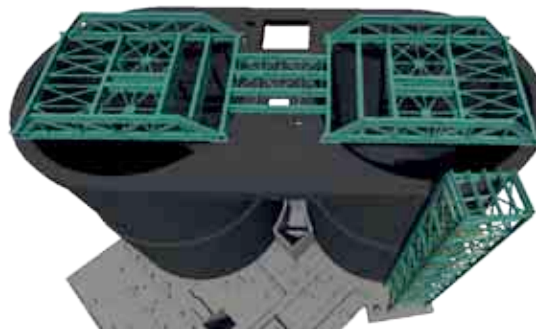
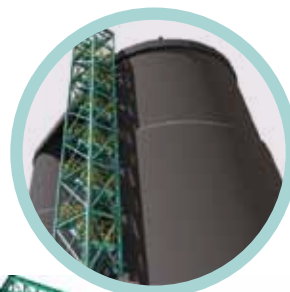
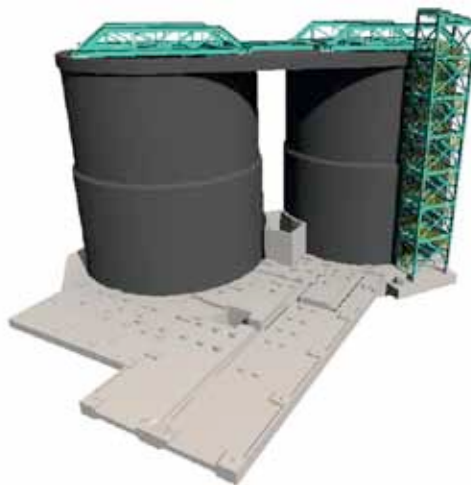
Los mantos (paredes) de los estanques presentan espesor variable en altura, el anillo comienza en la base con un espesor de  $185 \text{ cm}$  disminuyendo en ángulo de  $60^{\circ}$  en una altura de  $175 \text{ cm}$  a un espesor de  $85$ , valor que se mantiene en una altura de  $850 \text{ cm}$  para dar paso finalmente a un espesor de  $55 \text{ cm}$  en los  $900 \text{ cm}$  superiores del estanque.

En cuanto al coronamiento, se proyectó una viga perimetral de  $100 \times 100 \text{ cm}$  que permite conectar el edificio metálico y montar las plataformas de mantenimiento. La estructura soportante de los agitadores está estructurada como dos enrejados tipo "puente" que se apoyan en los mantos de los estanques.

### MODELAMIENTO ESTRUCTURAL PARA CÁLCULO

Se realizó un modelo de elementos finitos mediante el programa SAP 2000 versión 14.2.0, que involucra elementos estructurales tales como: mantos de estanque, losa de fundación, losa de compatibilidad superior y cajón distribuidor.

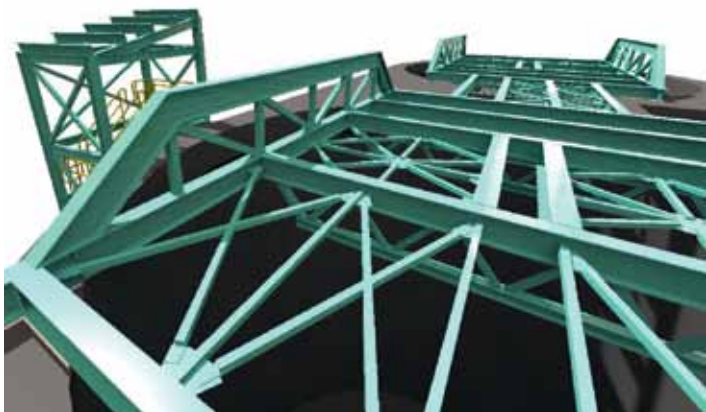
"La modelación se realizó con elementos tipo shells (placas que permiten esfuerzos en los 6 grados de libertad) divididos a conveniencia en secciones de aproximadamente  $50 \times 50 \text{ cm}$ , con lo que se logran captar respuestas sufi-



Se realizó un modelo de elementos finitos mediante el programa SAP 2.000 versión 14.2.0, que involucra elementos estructurales tales como: mantos de estanque, losa de fundación, losa de compatibilidad superior y cajón distribuidor.

Losa de fundaciones modelada por SAP.

La estructuración consistió en fundar ambos estanques con unión fija a la losa de fundación de espesor constante igual a  $150 \text{ cm}$  y unirlos entre sí por una losa a nivel de coronamiento de  $25 \text{ cm}$  de espesor.



## Al coronamiento se proyecta una viga perimetral de 100x100 cm que permite conectar el edificio metálico y montar las plataformas de mantención.

cientes para el nivel de análisis realizado” cuenta el jefe de Disciplina Civil Estructural de Ausenco Chile.

La interacción suelo, estructura que se realizó en función de resortes unilineales en la dirección vertical que se han asignado con una rigidez por unidad de área sobre los elementos que conforman la losa. El valor asignado corresponde al balasto entregado por mecánica de suelos tanto para carga estática como dinámica (35 kgf/cm<sup>3</sup> para carga estática y 45 kgf/cm<sup>3</sup> para carga dinámica).

### DISEÑO SÍSMICO

Para efectos de diseño se consideró zona sísmica dos de acuerdo a NCh2369, lo que derivó una aceleración efectiva máxima de suelo  $A_0 = 0,3 \text{ g}$  (g: aceleración de gravedad). Las fuerzas sísmicas sobre el estanque y el contenido del concentrado dependen de la aceleración espectral máxima y del periodo impulsivo y convectivo del concentrado sobre el estanque.

El ingeniero cuenta que, para la fuerza sísmica del estanque, producto de su peso, se consideró como la masa por la aceleración pseudo espectral aplicada en el centro de masa del estanque. Las fuerzas hidrodinámicas inducidas por el sismo, se determinaron utilizando un sistema equivalente de masas y resortes siguiendo las recomendaciones de la Norma ACI 350.3 Seismic Design Of Liquid-Containing Concrete Structures. Una primera masa representa la masa del modo impulsivo o desplazamiento de cuerpo rígido del estanque, y una segunda corresponde al modo convectivo o modo fundamental de vibración del fluido.

### ESFUERZOS Y SOLICITACIONES DE DISEÑO

De acuerdo a lo informado por Ausenco, las fuerzas de corte y momentos obtenidas del análisis, se distribuyeron según el diagrama de presiones definidos en la norma referida.

Es por ello que los coeficientes de modificación de la respuesta estructural y amortiguamientos utilizados para la



respuesta impulsiva y convectiva del líquido, se obtuvieron del punto 11,8 de la norma Nch2369 (para el modo convectivo de utilizó una respuesta elástica,  $R=1$ , valor que no aparece explícitamente en la norma, pero si se hace mención en el ACI 350.3). Para el caso del manto, se utilizó el coeficiente sísmico máximo dispuesto en tabla 5,7 de la misma norma para un amortiguamiento  $\xi = 0,05$  y factor de modificación de respuesta  $R=3$ , (valores obtenidos de tabla 5,5 y 5,6 respectivamente de la norma). Para el diseño del manto de los estanques, se consideraron los factores sanitarios que aparecen en “Circular Concrete Tanks without Prestressing, PCA” (y ACI 350 particularmente) con el fin de controlar el agrietamiento en estructuras que no contemplan revestimientos para el hormigón. Para ello, se multiplicaron las combinaciones de carga por un factor de 1,3 para el diseño por flexión, 1,65 para tensión directa y 1,3 para corte con estribos de refuerzo (1,0 corte a capacidad), con lo que se obtuvo un diseño más conservador con menos agrietamiento.

Por otro lado, las plataformas que se encuentran en la parte superior de los estanques consisten en enrejados arriostrados en planta para transmitir las cargas horizontales del agitador a los apoyos, los cuales pesaban 21,5 t para el caso estático. Para evitar la concentración de cargas en los apoyos producto del gradiente térmico, se han considerado apoyos deslizantes en uno de los extremos del enrejado. “Están unidos por un enrejado intermedio que sirve de soportación del cajón distribuidor. El enrejado en planta presenta una discontinuidad para permitir el correcto uso de los apoyos deslizantes”, afirma Lulión.



**Para efectos de diseño se consideró zona sísmica de acuerdo a NCh2369, lo que derivó una aceleración efectiva máxima de suelo  $A_0 = 0,3 \text{ g}$  (g: aceleración de gravedad).**



tos estáticos permitieron conseguir finalmente las condiciones de diseño necesarios y suficientes para el cálculo.

Dado que el acrecentamiento de la calidad del hormigón influye circunstancialmente en un aumento en la temperatura del núcleo de este, se solicitaron ensayos de gradiente térmico, para esto se debió coordinar la ejecución de probetas de  $1,5 \times 1,5 \times 1,5 \text{ m}^3$  o  $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$  con termocuplas incorporadas y así registrar las temperaturas en el núcleo y ver el comportamiento de la mezcla en el masivo.

Los estanques de almacenamiento de pulpa están sometidos constantemente a ambientes abrasivos y desgaste continuo, con pH entre 9,5 y 11, “por lo que el contratista debió suministrar un hormigón que cumpla con los requisitos de exigencia a este ambiente y condiciones de operación”, explica Luli3n. Por resistencia se solicit3 un hormig3n calidad H40 (35 Mpa de resistencia cil3ndrica a la compresi3n).



## EDIFICIO ANEXO

El edificio anexo a los estanques est3 estructurado como dos galpones dilatados entre s3 sobre la base de marcos r3gidos de acero en la direcci3n transversal de cada galp3n. La direcci3n longitudinal de cada galp3n se encuentra estructurada en base a pa3os arriostrados. Ambos sistemas estructurales fueron dise3ados para resistir las cargas gravitacionales como tambi3n las solicitaciones eventuales de sismo y viento.

El marco tipo est3 conformado por dos columnas de alma llena y una viga enrejada. La cuerda inferior de la viga enrejada se encuentra arriostrada seg3n las disposiciones de la norma NCh2369, con el objeto de distribuir las cargas por operaci3n del monorriel hacia los marcos adyacentes, as3 como tambi3n distribuir las cargas provenientes de las columnas de viento. La cuerda superior se encuentra arriostrada en los pa3os extremos del galp3n para tomar las cargas de viento y para impedir el volcamiento lateral de dicha cuerda.

La fundaci3n para el edificio est3 estructurada en base a un radier armado de espesor variable para permitir el bombeo del agua hacia la canaleta y de sobrecargas ubicados bajo las columnas del sistema de marcos r3gidos del que est3 conformado el edificio de acero. Este sistema de fundaci3n se encuentra dilatado de la fundaci3n de los Holding Tanks y recibe las cargas transmitidas por la estructura. Adem3s recibe cargas de los soportes de las l3neas y las sobrecargas de operaci3n al interior del edificio.

Es el montaje de los estanques de almacenamiento de pulpa de Los Bronces, una obra que tiene como principal objetivo mejorar la productividad y la producci3n minera. //

## CONSIDERACIONES ESPECIALES Y ENSAYOS

Para el proyecto, se tuvo especial atenci3n en las consideraciones que permiten controlar el agrietamiento, situaci3n que condiciona particularmente los espesores de muro. El m3todo de dise3o es el descrito en el documento Circular Concrete Tanks without Prestressing de la PCA, adaptado con la distribuci3n de fuerzas en placas descritas en el libro Theory of Plates and Shells de S. Timoshenko y S. Woinowsky-Kriegera, lo que finalmente permiti3 obtener un modelo m3s acertado y real. Si bien el c3lculo desarrollado por la PCA es un an3lisis est3tico, se obtuvieron resultados din3micos a partir del modelo, los que sumados a los efec-

**La interacci3n suelo, estructura que se realiz3 en funci3n de resortes unilineales en la direcci3n vertical que se han asignado con una rigidez por unidad de 3rea sobre los elementos que conforman la losa.**