

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LA CUBIERTA DEL TEATRO SINDICAL DE CHUQUICAMATA

ING. SR. SALOMON CHORNIK
PROFESOR DE ESTABILIDAD

ARQ. SR. FRANCISCO AEDO
PROFESOR DE EDIFICACION

1. ANTECEDENTES.

El problema de cubrir grandes superficies libres con el empleo mínimo de material viene preocupando grandemente a arquitectos e ingenieros. Se cita a menudo ejemplos de construcciones realizadas en diversos países en las que la relación espesor a luz de la estructura es inferior a la provista por la naturaleza en la cáscara del huevo.

Sin pretender tales alardes estructurales y simplemente por razones económicas y estéticas propusimos al Arquitecto proyectista del Teatro Sindical, Sr. Alejandro Crestá, al ser requerida nuestra asesoría, cubrir el edificio con una bóveda-cáscara cilíndrica múltiple, obra iniciada en el año 1957.

2. LA ESTRUCTURA.

La superficie cubierta del edificio con la bóveda-cáscara múltiple, no es regular, variando su luz dentro de cada cáscara. La luz media en la primera cáscara limitada por el muro de fachada es de 37 metros y en la cuarta de 23 metros. El espesor en las dos primeras es de 12 cms. y de 10 cms. en las dos últimas. Las flechas de las bóvedas varían igualmente, manteniéndose algo superiores al décimo de la luz, relación recomendada en los textos de la materia. (Ver corte y planta de estructura).

La armadura de las cáscaras, como puede observarse en los gráficos, es doble, previéndose momentos de flexión positivos o negativos según la sección transversal, producidos por

la sobrecarga móvil. La armadura se concentra en sentido longitudinal en las vigas de borde de las cáscaras sometidas a fuerte tracción.

El análisis de una cáscara constituye un problema tridimensional de complicada y laboriosa resolución. Baste decir que conduce a ecuaciones a derivadas parciales de 8º grado. Se ha logrado sistematizar el cálculo mediante el uso de tablas como las contenidas en el Manual N° 31 **Design of Cylindrical Concrete Shell Roofs** publicado en 1952 por la American Society of Civil Engineers.

La cubierta del Teatro Sindical fué calculada primeramente por el procedimiento antes descrito y sus resultados fueron confrontados más tarde con los obtenidos por métodos simplificados basados en la teoría de flexión de la cáscara tratada como viga.

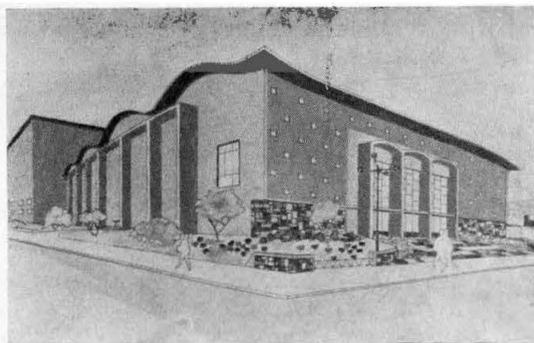
Es de interés señalar que la teoría rigurosa y la simplificada dieron resultados bastante concordantes, lo que era de preveer tratándose de una **bóveda larga** en que la relación radio de la bóveda a luz es inferior a 0,3.

Resultados experimentales obtenidos en modelos han venido posteriormente a dar respaldo a la teoría simplificada. Así el Ingeniero M. I. Baretts ha confrontado resultados teóricos y experimentales obteniendo una admirable concordancia los que ha expuesto en su trabajo **Resultat d'essais et théoric de calcul de voutes autoportants rigides** publicado en **Anales de L'Institute Technique du Batiement et travaux publiques**. 1958.

Nos parece importante recalcar la tendencia actual en el cálculo y diseño de las cáscaras deducida del trabajo del Ingeniero Baretts, empleándose métodos intuitivos relativamente sencillos, previa confrontación con la experiencia en modelos. Una vez más el principio de que la teoría debe proceder a la práctica muestra su validez incuestionable.

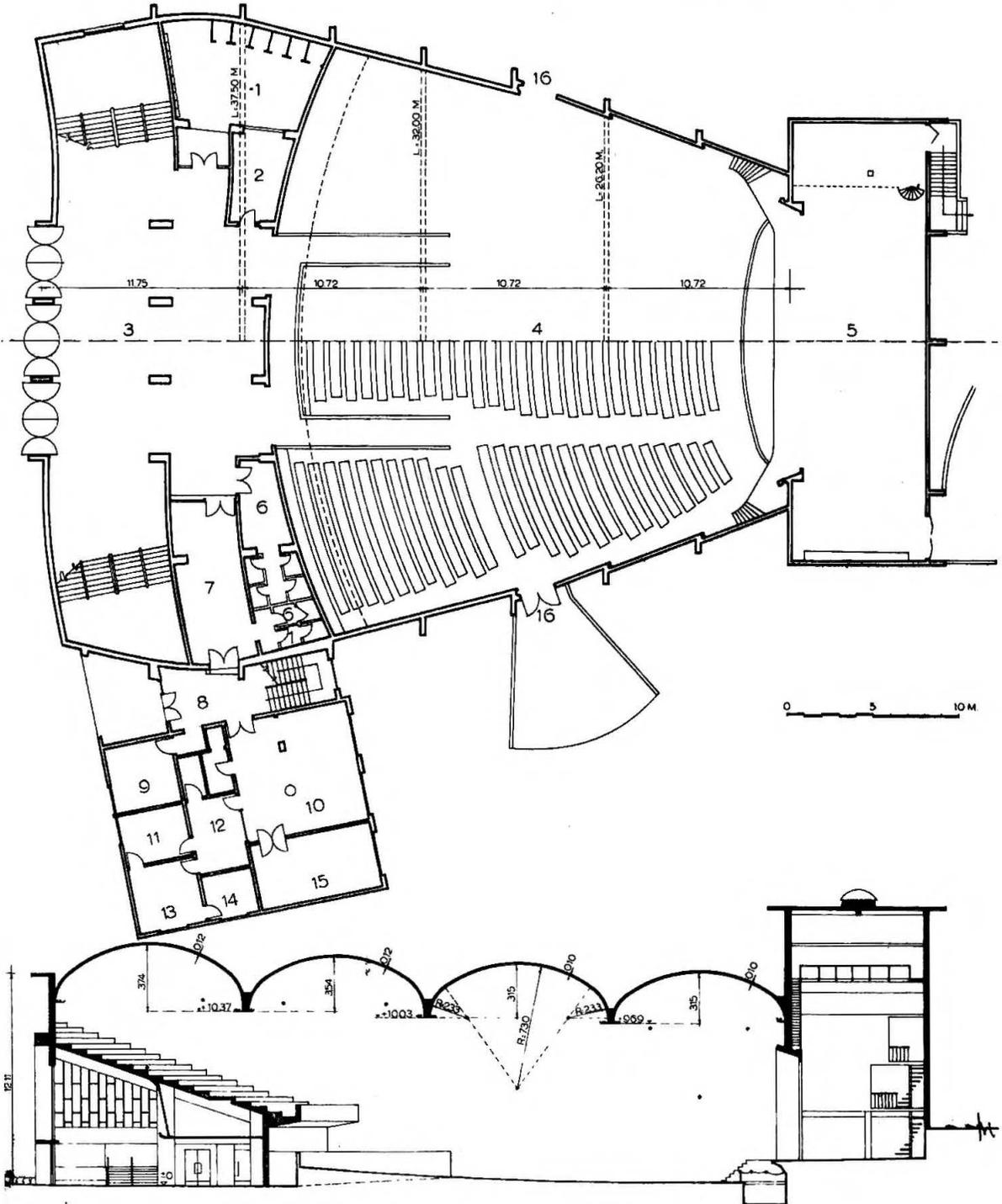
3. CARGAS.

Se consideró en el cálculo de la bóveda cáscara las cargas verticales siguientes:

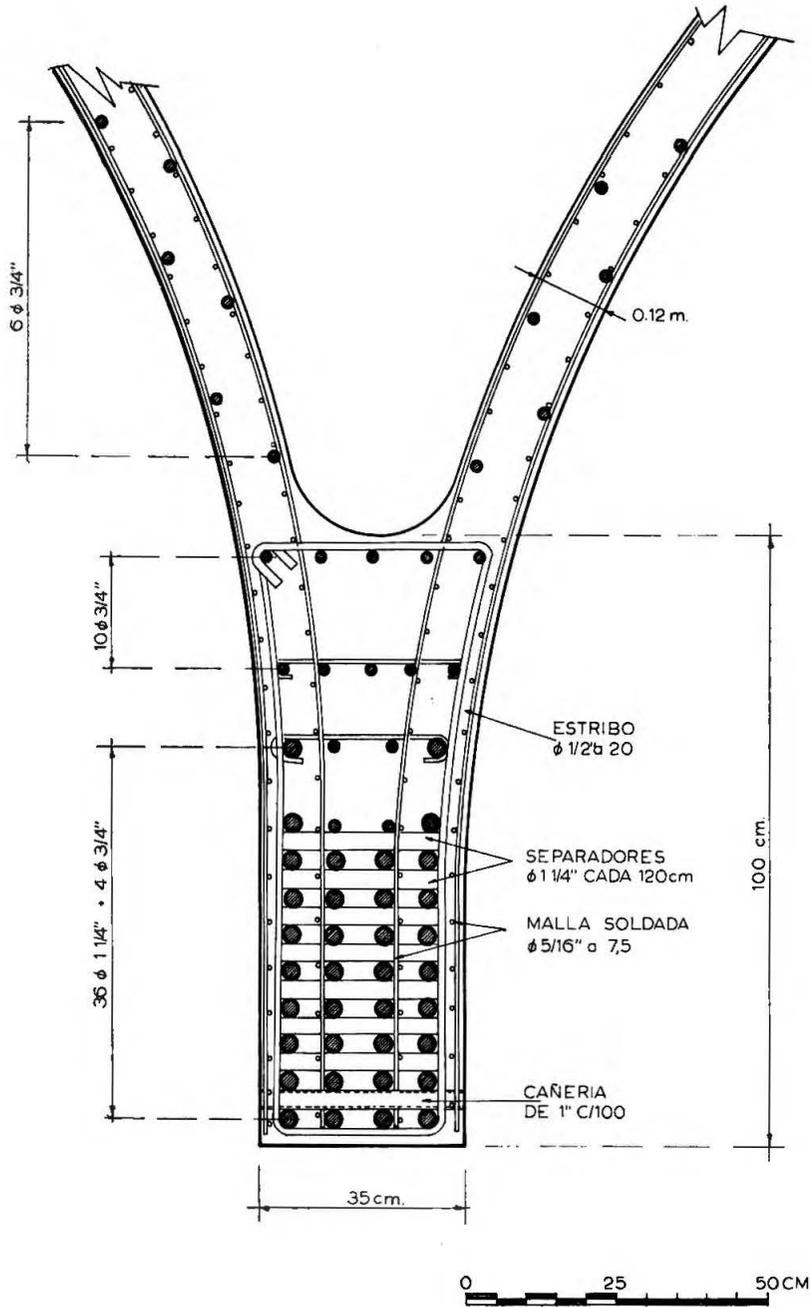


PLANTA:

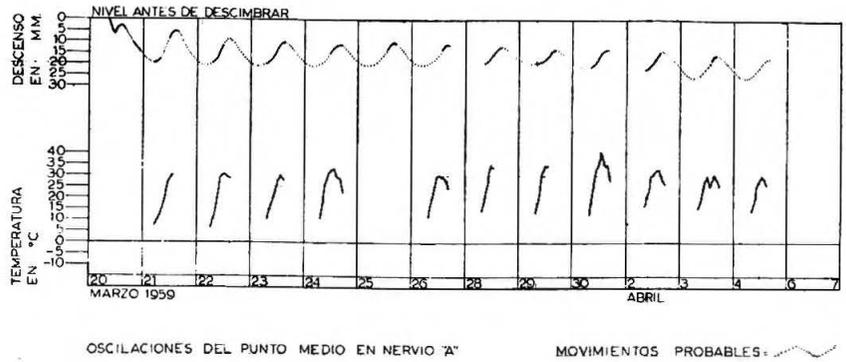
1. TOILETTE HOMBRÉS. 2. ADMINISTRACION. 3. FOYER. 4. PLANTA BAJA. 5. ESCENARIO. 6. TOILETTE MUJERES. 7. FUENTE DE SODA. 8. HALL. 9. DEPORTES. 10. SASTRE. 11. LABORATORIO DENTAL. 12. ESPERA. 13. DENTISTA. 14. PRIVADO. 15. PELUQUERIA. 16. ESCALERA



CORTE



NERVIO A., CORTE



a) Peso propio y revestimientos aislantes por m^2 de desarrollo de la bóveda. ($p = 350 \text{ Kgs}/m^2$).

b) Sobrecarga por m^2 de planta de la bóveda ($q = 100 \text{ Kgs}/m^2$).

En la sobrecarga se incluyó el efecto del viento y otras cargas accidentales.

I. ACCION DE LA TEMPERATURA.

Se previó el efecto de fuertes cambios de temperatura diarios, contemplando en el diseño un revestimiento de Kieselgurg sobre la cáscara que eliminará prácticamente dicho efecto.

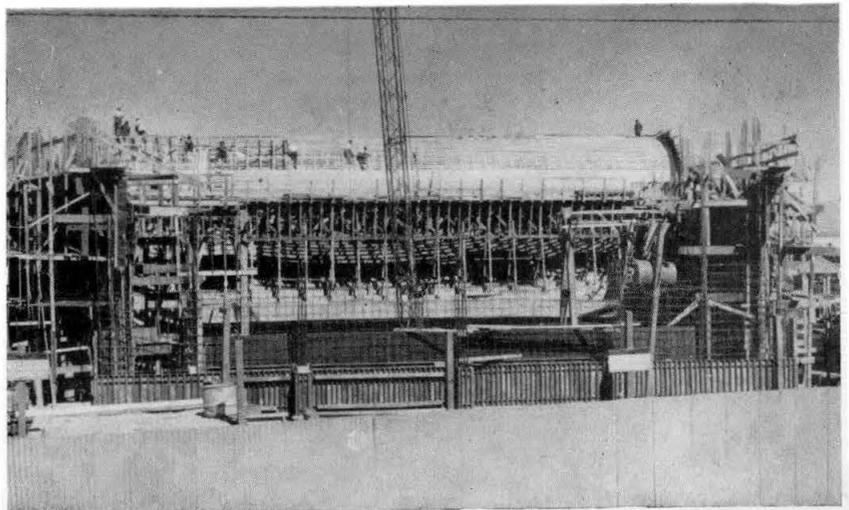
No obstante, pudo ser apreciada la acción de la temperatura durante el control de descimbrado de la cáscara que se realizó previamente a la colocación del revestimiento.

La deformación máxima en el centro del primer nervio de la cáscara de 38 m. de luz,

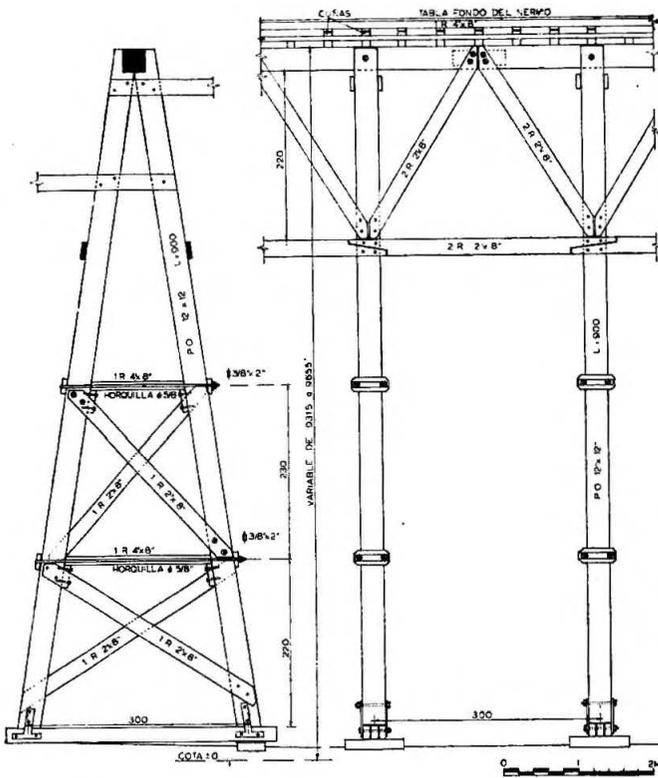
alcanzada a los 15 días a partir del momento del descimbre, fué de 2 cms. En el gráfico se observa la oscilación de la flecha con una amplitud de $\pm 0,5$ cms. correspondiente a una variación diaria de temperatura entre el máximo y mínimos observados de $\sim 25^\circ$. El efecto de la temperatura, por lo tanto, resultó equivalente al causado por una carga que variará sinusoidalmente entre:

$$\pm \frac{p}{4} = \pm \frac{350}{4} = \pm 90 \text{ Kg}/m^2.$$

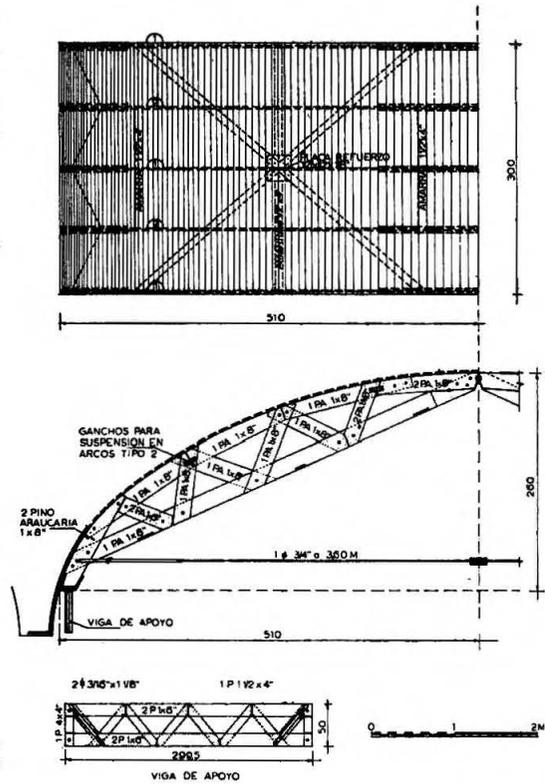
El efecto de la variación de temperatura que constatamos, se explica por el hecho de que el nervio o viga de borde, bien protegido de los cambios exteriores, queda sometido, al enfriarse la bóveda, a esfuerzos de tracción, (la estructura descende) y al subir la temperatura, a esfuerzos de compresión (la estructura asciende). La bóveda misma queda sometida a esfuerzos de signos contrarios a los del nervio, equilibrándose así las fatigas normales.



VISTA DE LOS MOLDAJES



TORRES DE APOYO



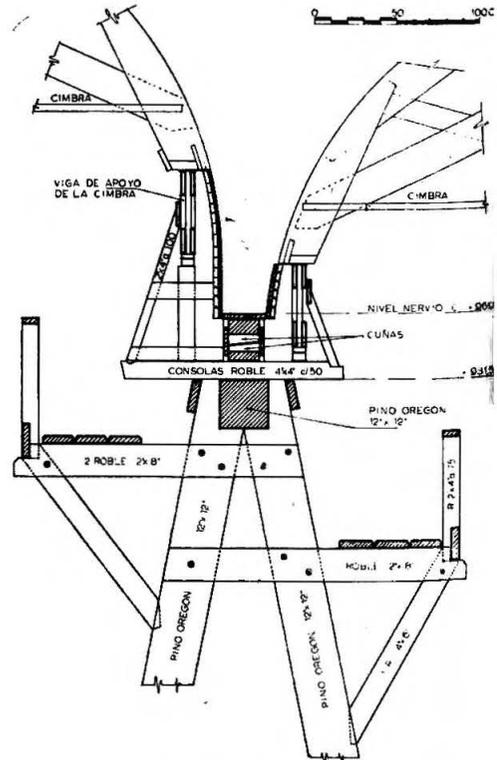
CIMBRA MODULAR

5. ENCOFRADO MOVIL PARA LAS BOVEDAS.

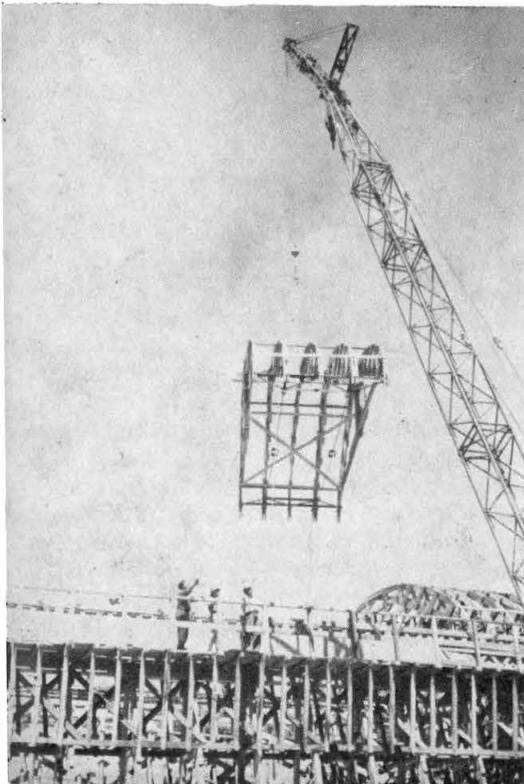
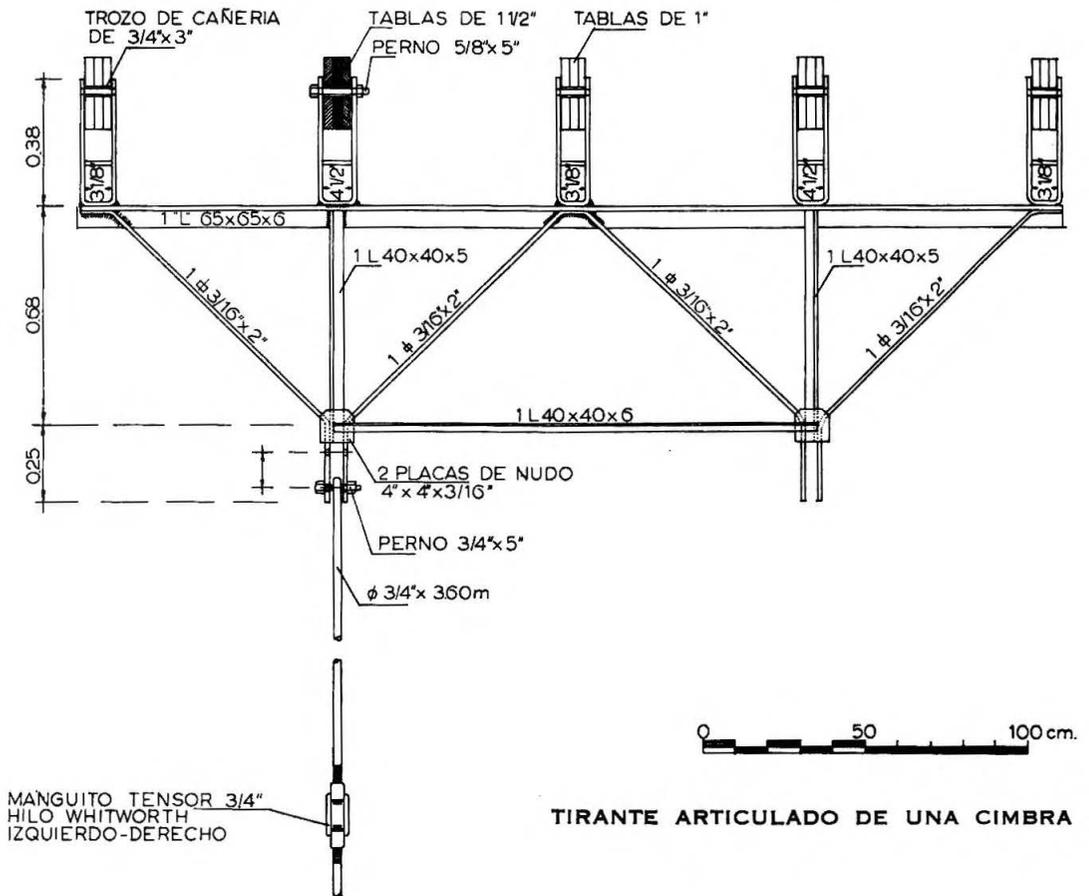
Estudiando el presupuesto de apronte de la Chile Exploration para la realización de un encofrado convencional, nació la idea de aprovechar la gran semejanza de luces de las 4 Bóvedas y realizar un molde desplazable. Los primeros tanteos indicaron claramente que esta solución sería más económica.

Los diferentes niveles de los nervios inferiores (exigencias de arquitectura) y las diferentes secciones de los mismos originados por la variación de las tensiones, hicieron imposible uniformar totalmente el perfil de cada bóveda. (Nótese que esta corresponde a un arco de 3 centros). Se procedió entonces a uniformar sólo aquella parte del arco de mayor desarrollo, dejando los pequeños arcos que enlazan los nervios con el arco mayor, para ejecutar su encofrado simultáneamente con el de los apoyos.

La diferencia de luces (no superior a 12 cm.) habría originado —en estricto rigor— moldes diferentes para cada una de las 4 bóvedas. Consultado el Ingeniero Calculista, estuvo conforme en que la deformación de la curvatura resultante de elegir la bóveda de menos luz y abrirla girando alrededor de la articulación de la clave para adaptarla a las diferencias, no influiría grandemente en el cálculo de estabilidad de la bóveda.



ENCOFRADO DEL NERVO



Se procedió entonces a diseñar el encofrado de un trozo de bóveda de 3,20 m. de largo constituido en módulo.

Básicamente se compone de arcos de 3 articulaciones, ejecutadas en tablas de pino insigre, cubiertos con listones longitudinales, separados en atención a que sobre ellos irían planchas de "ERACLIT" de 25 mm. (El Eracilit directamente en contacto con el hormigón, tiene en general buena adherencia; en este caso la adherencia fué reforzada mediante trozos de alambre en forma de horquillas).

El módulo está constituido por dos partes simétricas y separables; los 5 arcos articulados que constituyen la estructura del módulo, poseen un tirante común, desarmable y ajustable ya que su longitud tendrá que ser variada a medida que el molde o encofrado se desplace de una a otra bóveda. El peso de cada una de las partes no supera los 300 Kgs. (Nótese los ganchos de suspensión en los arcos extremos y las perforaciones previstas en la bóveda para el paso de los cables del aparejo de descimbrado).



6. MANIOBRA.

Establecidas las torres de apoyo, se procedió a levantar los módulos desde el terreno hasta la cota de apoyo, a ubicar las articulaciones de la clave y colocar y ajustar tirantes. Colocada la armadura y ejecutado el hormigonado, se retiraron los moldes una vez que los ensayos de las probetas acusaron un 80% de la resistencia total. Para este objeto, se dispuso el aparejo sobre la bóveda ya endurecida; se pasaron y engancharon los cables de suspensión; se soltaron las cuñas tipo 2, de desencofrado y se procedió a acortar el tirante mediante el manguito tensor central. Esto tuvo el propósito de separar paulatinamente el molde del hormigón, hasta su total liberación. En ese momento, ambas partes del molde pendieron de los cables y fueron descendidos al nivel del terreno para ser usados de inmediato en la próxima bóveda.

7. DESCIMBRADO DE LOS NERVIOS.

Los encofrados de nervios se mantuvieron los 28 días reglamentarios, antes de proceder a retirar las cuñas de descimbramiento.

Esta faena, la más delicada del proceso, si se tiene en cuenta la longitud de 38 mt. de la bóveda mayor, se llevó a cabo de la siguiente manera:

La cara inferior de los nervios transmite una carga de unos 4000 K/ml a una pieza de pino Oregón de sección rectangular*. Esta

* Fué necesario emplear, para los trabajos de mayor responsabilidad, la madera de pino americano del stock de la Chile Exploration. Se trataba de valiosas piezas de sección rectangular y cuadrada y el proyectista se preocupó particularmente de usarlos con el mínimo de daño para dichas piezas.

se apoya directamente sobre las cuñas de descimbrado tipo 1.

Las cuñas fueron colocadas de a pares, cada 0,50 m. A lo largo del nervio, y apoyada en las torres, se dispusieron dos pasarelas de servicio para el tránsito de operarios y control de la operación de descimbrado.

El cálculo preveía un descenso de unos 50 mm. en el nervio mayor. Al ser descimbrado pudo anotarse un descenso de 30 mm. al centro.

Las cuñas se soltaron partiendo del centro hacia los extremos, en forma simétrica y esperando algunos minutos en cada operación.

8. ARMADURAS.

La armadura de las bóvedas cáscaras fué ejecutada con paños de malla soldada constituyendo armadura superior e inferior. Los nervios o refuerzo de borde, sometido a tracciones, fueron armados con barras de 32 y 38 mm.

La longitud de los nervios obligó entonces a empalmar barras. Debido al poco espacio disponible para distribución de barras (ver enfierradura y corte nervio A). Fué desechada la solución de traslape que habría hecho más difícil —además— el hormigonado.

Se hicieron 5 ensayos de tracción en I.D.I.E.M. soldando barras de tope, con refuerzo cónico a 45° y relleno periférico de soldadura al arco.

Ante el hecho de que 2 probetas se rompieron en la soldadura, esta solución fué también desechada. Propusimos usar 2 manguitos abiertos de acero de igual calidad que las barras, eligiendo el espesor C de manera que la sección de ambas fuera equivalente a S y realizando 2 cordones simétricos de soldadura, cuya longitud L fué calculada para una carga de ruptura 30% superior a la supuesta de la barra.

Los ensayos fueron satisfactorios y la solución fué aceptada por los Ingenieros de la Chile Exploration, quienes reemplazaron los manguitos por trozos de perfil L. (Ver nervio A).

9. HORMIGON.

La resistencia pedida de 240 K/cm² a los 28 días, fué fácilmente alcanzada con los áridos

de la zona y una dosificación de 300 Kg. de cemento/m³. No se usaron aditivos y la compactación se llevó a cabo con vibrador de aguja de 10.000 vibraciones/m.

La alta mecanización de Chuquicamata, y la existencia de una planta de dosificación y mezclado de hormigón facilitaron enormemente los trabajos e hicieron posible controlar el material en todos sus detalles, logrando un hormigón de alto grado de uniformidad.

Deseamos estampar nuestro reconocimiento por la colaboración prestada por el Ingeniero Sr. Robert Mac-Donald y el Superintendente de Construcciones Sr. Antonio Tadic, quienes alentaron en todo momento la ejecución de esta estructura novedosa por su concepto y magnitud.

VISTA GENERAL DE LA FAENA.

