

# Problemática y Reparación de la Boveda Central del Depósito de Materias Primas

Fábrica de Portland ANCAP

Ciudad de Minas - República Oriental del Uruguay

## 1. Introducción

Este artículo tiene la finalidad de relatar los antecedentes, construcción, problemática ocurrida, estudios técnicos y proyectos de reparación de la bóveda de referencia. El

estilo intenta ser descriptivo más que riguroso en el aspecto numérico - científico, de forma que sea ampliamente comprensible, pero sin perder la exactitud de los conceptos.

## 2. Antecedentes

### 2.1 Generalidades

La bóveda central del depósito de materias primas, construida en 1955, es del tipo "bóveda cilíndrica atensorada" con directriz circular, (Figs.1 y 2).

Es de bovedilla cerámica con nervios y carpeta superior de hormigón colado en sitio, con espesor total 15 cm. (Fig. 3).

A nivel +17.65 m una ménsula corta apoyada sobre los pilares soporta un puente

grúa de peso propio 40 Ton. y carga útil 8 Ton. aproximadamente.

## 2.2 Problemas suscitados.

En la fig.4 se indican esquemáticamente los esfuerzos que se ejercen sobre los pilares. Por defectos de proyecto y construcción, los pilares sufrieron una desviación de la vertical que aparejó serias dificultades de circulación del puente grúa, incluso con peligro de descarrilamiento (ver fig.5). Dicha desviación se intentó solucionar, lográndose en gran parte, con la construcción de contrafuertes apareados a los pilares del lado exterior, según se muestra en la fig.6. Dicha reparación fue realizada en 1964.

## 2.3 Deformaciones constatadas

A simple vista, aún podían constatarse deformaciones importantes de la cubierta,

debidas probablemente a un pandeo de la misma (ver fig.7).

Indicamos asimismo que en el año 1963 se construyeron 13 nuevos módulos, pero con una solución técnica para la cubierta muy superior a la original. Consistía en viguetas prefabricadas de hormigón pretensado, y arcos invertidos de hormigón. Para ello hubo incluso que demoler la cubierta de 2 de los antiguos módulos, pues según los datos que recogimos, presentaban deformaciones muy importantes (ver figs. 1 y 8).

Superpuesto a lo ya expresado sobre el pandeo de la cubierta, constatamos el problema de la acumulación de capas sucesivas de cemento portland fraguado en estratos, producto de las emanaciones de los hornos, que llegaban en algunas zonas a 40 cm o más, lo que podía llegar a constituir en algunos casos, una sobrecarga no prevista de 400 kg/m<sup>2</sup>.

# 3. Estudio técnico del problema

Temiendo que las deformaciones de la cubierta fueran progresivas y dado el peligro de colapso que ello suponía, se decidió realizar completamente el estudio técnico del problema, evaluar los riesgos actuales y futuros y preparar un proyecto de reparación.

Resumimos a continuación método y resultados de dicho estudio.

## 3.1 Cálculo original

Cálculo de la bóveda de directriz circular con las cargas del proyecto y eventual sobrecarga.

Este cálculo es relativamente sencillo pues hay abundante bibliografía sobre el tema.

### 3.2 Mediciones precisas

Mediciones realizadas por agrimensor de la actual configuración geométrica de la bóveda.

Se midieron varios perfiles transversales, con separación 5 m. entre cada uno, y en base a ello se graficaron los resultados obtenidos. En los perfiles más deformados, en algunos puntos se constataron diferencias con la directriz circular teórica de más de 35 cm.

### 3.3 Cálculo corregido – 1era. fase

Se calcularon cada uno de los perfiles medidos, con los estados peso propio, y peso propio más viento.

Tal cálculo ya no es tan sencillo, pues cada perfil es una curva caprichosa. Se dividió cada curva en varios tramos rectos de modo de obtener una poligonal que se aproximaba mucho a la curva real de cada perfil. El cálculo se realizó por el método óptimo para este tipo de trabajo.

Los resultados obtenidos llamaron mucho la atención, pues indicaban que la cubierta debía haber colapsado, o al menos estar muy cerca de ello. La realidad demostraba lo contrario.

### 3.4 Obtención curvas previas al desencofrado

Luego de pensar detenidamente en esta supuesta paradoja, descubrimos que los cálculos mencionados en 3.3 son erróneos, pues se cargaba la estructura sobre la geometría actual de la cubierta.

En otras palabras, las mediciones realizadas por el agrimensor son de la estructura ya deformada (curva de la elástica), o sea posterior al desencofrado, mientras que para hallar las solicitaciones (esfuerzos) reales en cada sección, debemos cargar la bóveda con la geometría previa al desencofrado.

Tal geometría, que tendría que haber sido circular, no lo fue, como lo demuestran las deformaciones medidas, y las teorías de pandeo de bóvedas.

El problema se tornaba entonces mucho más complejo, pues entonces para cada perfil, debíamos encontrar la curva previa al desencofrado. Se realizó por tanteo y de forma iterativa.

Para cada perfil :

- Se elegía un polígono y se cargaba con el estado peso propio
- Se calculaban solicitaciones en cada sección (Momento, Cortante, Directa)
- Se calculaban desplazamientos en cada sección (Desplazamiento horizontal, vertical, giro)
- Se comparaba con la curva real medida.
- Se elegía un nuevo polígono y se repetían las operaciones, hasta que la curva deformada calculada y la medida coincidieran, con una cota de error aceptable.

Método de cálculo : matrices de transferencia.

### 3.5 Cálculo definitivo

Luego de obtener para cada perfil la curva previa al desencofrado, se calcularon los siguientes estados de carga :

- peso propio

- peso propio mas viento norte
- peso propio mas viento sur
- variación de temperatura sobre bóveda total
- variación de temperatura sobre media bóveda.

### 3.6 Conclusiones

Si bien no existía respecto a las patologías observadas un peligro inminente de colapso, afirmamos que era absolutamente imprescindible realizar una reparación de la cubierta pues seguramente las deformaciones fueran progresivas, tornándose

entonces mucho mas difícil o casi imposible, intentar una reparación en el futuro.

Asimismo, las cargas de impacto que producía el puente grúa podrían aumentar mucho con rieles desbalanceados, con consecuencias imprevisibles.

Por otra parte, si bien existieron errores de construcción (movimiento de los encofrados), existieron también errores de diseño. En efecto, una bóveda de semejante luz, de simple curvatura, hubiese necesitado mayor espesor. En general en estos casos conviene proyectar la bóveda con doble curvatura.

## 4. Proyecto y ejecución de la reparación

La reparación consistió básicamente en la construcción de 25 arcos de hormigón armado atensorados, separados entre sí 2m.

Con esto se logró aumentar el coeficiente de seguridad de la estructura, e impedir el progreso de las deformaciones.

No se intentó volver a posición la bóveda, por considerarse demasiado riesgoso y casi imposible.

Describimos a continuación, en forma esquemática, las distintas etapas de la obra prevista y que luego se llevaron a cabo paso a paso (ver figs. 9 a 13)..

### 4.1 Etapa 1 - Definir emplazamiento de arcos de refuerzo

Se considera el plano central entre cada dos tensores existentes consecutivos. Se

hacen cateos para localizar los nervios principales curvos de la bóveda.

### 4.2 Etapa 2 - Colgar tejido de retención

La finalidad del mismo es impedir la caída de escombros al depósito de materias primas. Se utilizó plastillera con dobladillos en los bordes para sujetarse de barras longitudinales, las que a su vez se cuelgan de los tensores existentes por medio de barras de enganche. Para la operación de enganche se dispuso de uno de los puentes grúa.

### 4.3 Etapa 3 - Demoler fila de bovedillas

Se demuele la fila de bovedillas ubicada en el emplazamiento de un arco de refuerzo.

La demolición llega hasta las zonas macizas de las vigas de borde e incluye el hormigón de los nervios transversales interceptados, pero sin tocar la armadura existente de dichos nervios.

#### 4.4. Etapa 4 – Descarnar armadura de nervios transversales.

Las barras de los nervios transversales existentes, que no fueron afectadas por la demolición de la etapa anterior, deben quedar lo más limpias posibles. Se les quitan las adherencias de hormigón y se rasqueta la superficie lateral con cepillo de alambre duro.

#### 4.5 Etapa 5 – Construir caballetes

La finalidad de los caballetes es mantener en posición las chapas curvas que sirven de fondo al arco de refuerzo. Los caballetes deben soportar el peso de las chapas más el peso del hormigón fresco de los arcos de refuerzo.

#### 4.6 Etapa 6 – Colgar chapas curvas

Las chapas curvas son circulares de dimensiones indicadas en los planos del proyecto. La cara superior se arena para quitar toda traza de óxido, se pinta con adhesivo epóxico, y se siembra con granos de cuarzo, con el fin de lograr una superficie rugosa. Las demás caras se tratan con pintura antióxido.

Las chapas se cuelgan del segundo y del cuarto estribo por medio de alambres. Estos alambres no se disponen verticalmente, sino según los radios de la bóveda, y se trenzan fuertemente con el objeto de apretar la chapa curva contra la estructura existente.

#### 4.7 Etapa 7 - Soldar chapa de unión

La finalidad de la misma es la de empalmar chapas curvas (ver fig.11). Se la suelda a cada chapa por medio de un cordón de soldadura eléctrica.

#### 4.8 Etapa 8 - Colocar armadura logitudinal

Las barras se enhebran a través de los estribos de las chapas curvas y de las chapas de unión.

#### 4.9 Etapa 9 – Colocar pendolones

Se preparan los pendolones con el ojo circular inferior pero sin el gancho superior. Se replantea el emplazamiento de los pendolones de modo que queden alineados con los ya existentes. En la ubicación de los pendolones se perforan las chapas curvas. A través de las perforaciones se enhebran desde abajo los extremos rectos de los pendolones. Se dobla en sitio el gancho superior y se ata a la barra central del arco.

#### 4.10 Etapa 10 – Encofrar arcos de refuerzo.

Las caras descubiertas de los nervios principales curvos se rasquetan con cepillo de alambre duro. Se colocan los encofrados laterales de los arcos. Previo al colado, se aplicará una pasta de adhesivo epóxico en las zonas de contacto, o sea, en las caras descubiertas de los nervios principales y en la armadura descarnada de los nervios transversales.

#### 4.11 Etapa 11 – Hormigonar arcos de refuerzo

El hormigón se coloca vibrado.

El sentido de avance del colado se hace partiendo en forma simétrica desde ambos bordes hacia el centro de la bóveda.

#### 4.12 Etapa 12 – Desencofrar e impermeabilizar

Dos semanas después de fraguado el hormigón de la etapa anterior, se retiran los caballetes y los encofrados laterales. Se construyen los complementos de hormigón y se impermeabiliza con 2 capas de lana de vidrio entre 3 de emulsión asfáltica.

#### 4.13 Etapa 13 – Perforar vigas de borde en ambas fachadas

Se perfora con una barrenadora neumática. La ubicación de la perforación debe coincidir en planta con el eje del arco de refuerzo correspondiente. Para esta operación se puede trabajar desde el interior del depósito, accediendo desde las vigas del puente grúa.

#### 4.14 Etapa 14 – Pegar chapas de apoyo en ambas fachadas

Las chapas se pegan con adhesivo epóxico, previa limpieza del hormigón de la zona de contacto. Tienen la finalidad de transmitir el esfuerzo de los tensores de refuerzo.

#### 4.15 Etapa 15 – Presentar tensor de refuerzo

El tensor se enhebra a través de las chapas de apoyo, perforaciones y pendolones previstos en las etapas anteriores. Será de acero especial para pretensado y dimensionado para soportar una carga de servicio de 10 Toneladas.

Para esta operación se dispondrá de uno de los puentes grúa en servicio.

#### 4.16 Etapa 16 – Anclar tensor en fachada Sur

El anclaje debía ser del tipo Freyssinet, BBRV, CCL o de cualquier otro sistema de pretensado de calidad reconocida. Esta operación se puede ejecutar desde el extrados de la bóveda, tomando las máximas precauciones de seguridad.

#### 4.17 Etapa 17 – Anclar tensor en fachada Norte

Previo al anclaje, el tensor se tensa con un pre-esfuerzo de 3 Toneladas. El anclaje será del mismo sistema de pretensado que el de la fachada Sur. Para esta operación se puede trabajar accediendo desde el techo liviano del túnel existente.

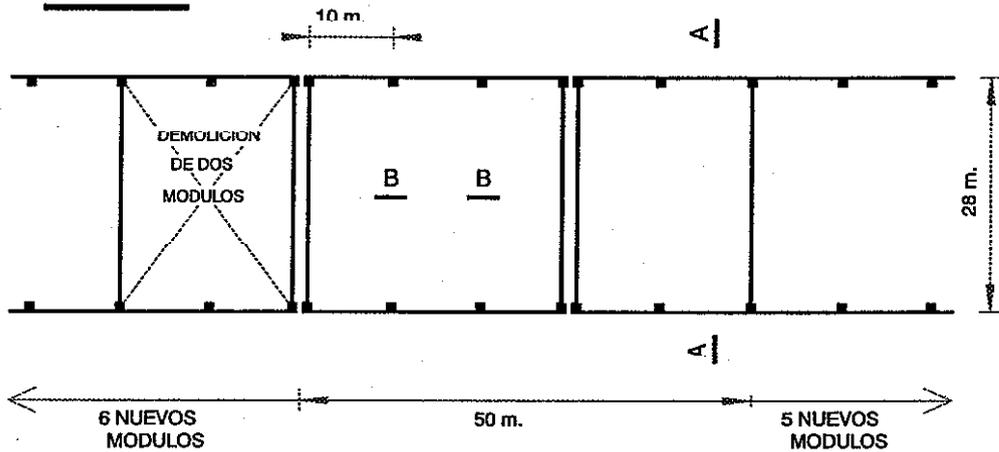
#### 4.18 Etapa 18 – Recubrir anclajes en ambas fachadas

Serán de hormigón. Para la ejecución de los recubrimientos de la fachada Norte se puede acceder desde el techo del túnel existente. Para los recubrimientos de la fachada Sur, se deberán construir andamios especiales para tal fin.

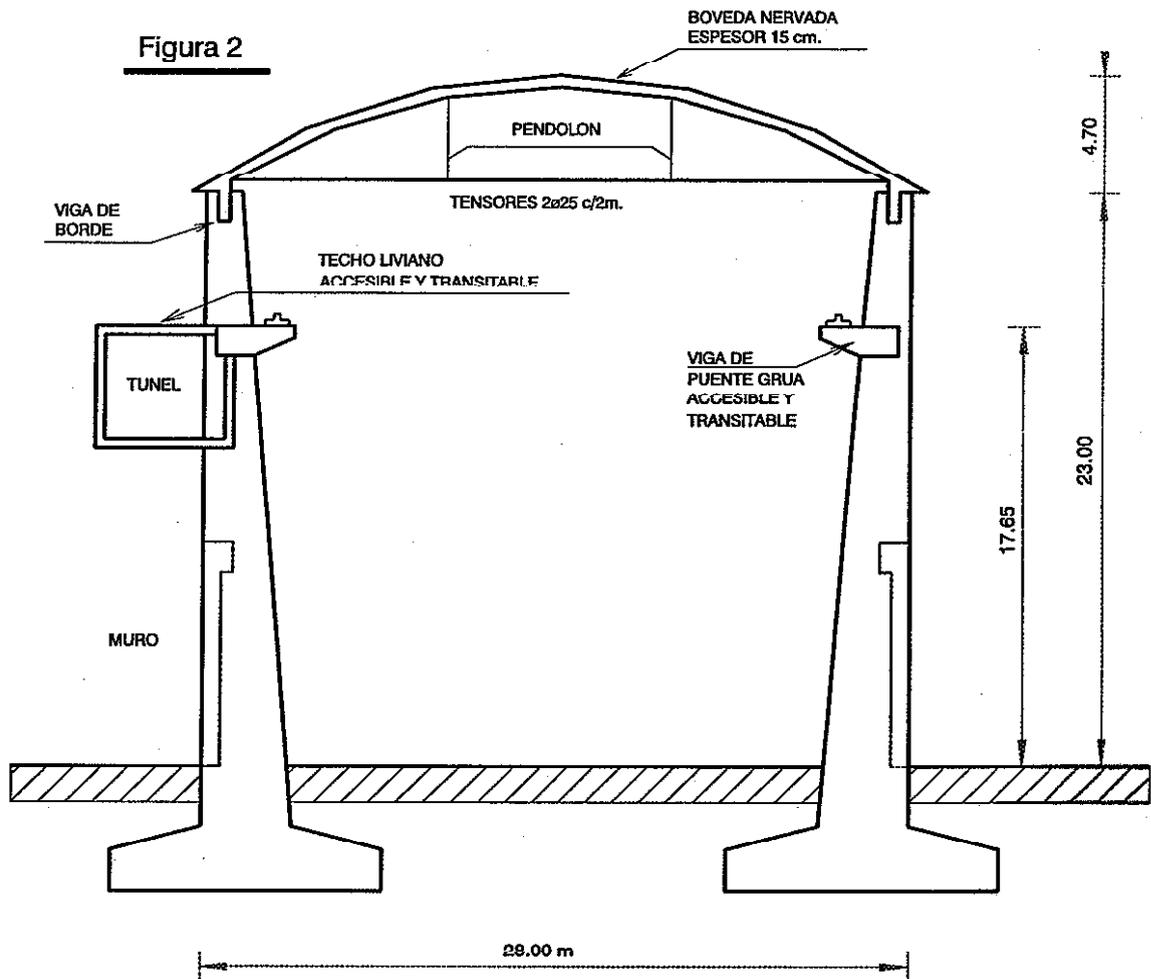
# Sigue a continuación :

A) Figuras 1 a la 13 • B) Fotografías de la obra

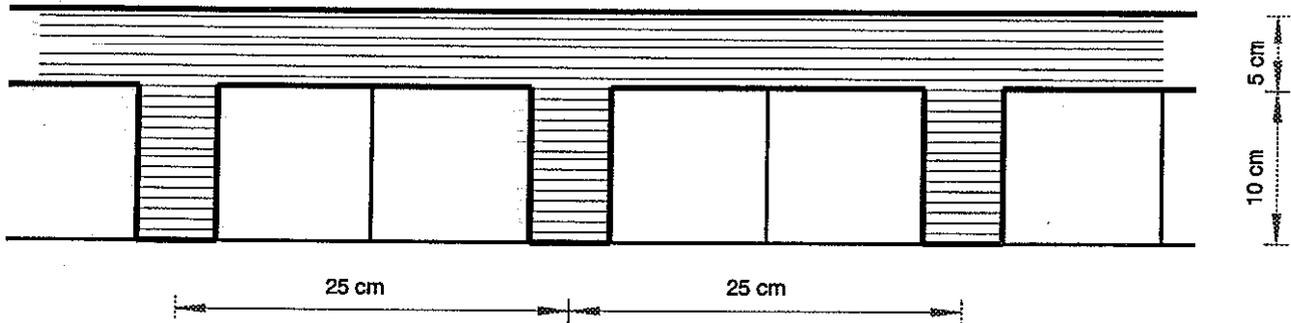
**Figura 1**



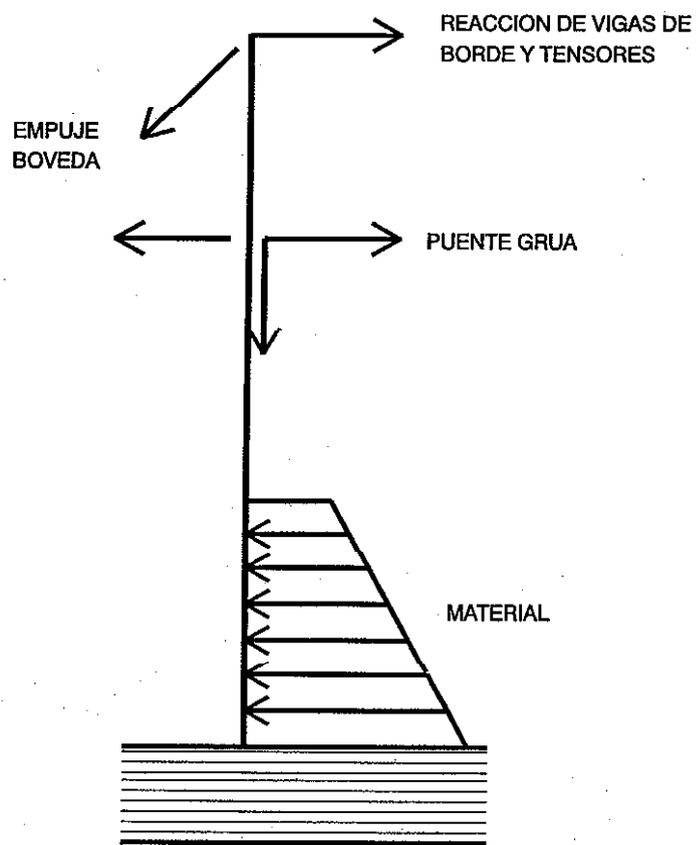
**Figura 2**



**Figura 3**



**Figura 4**



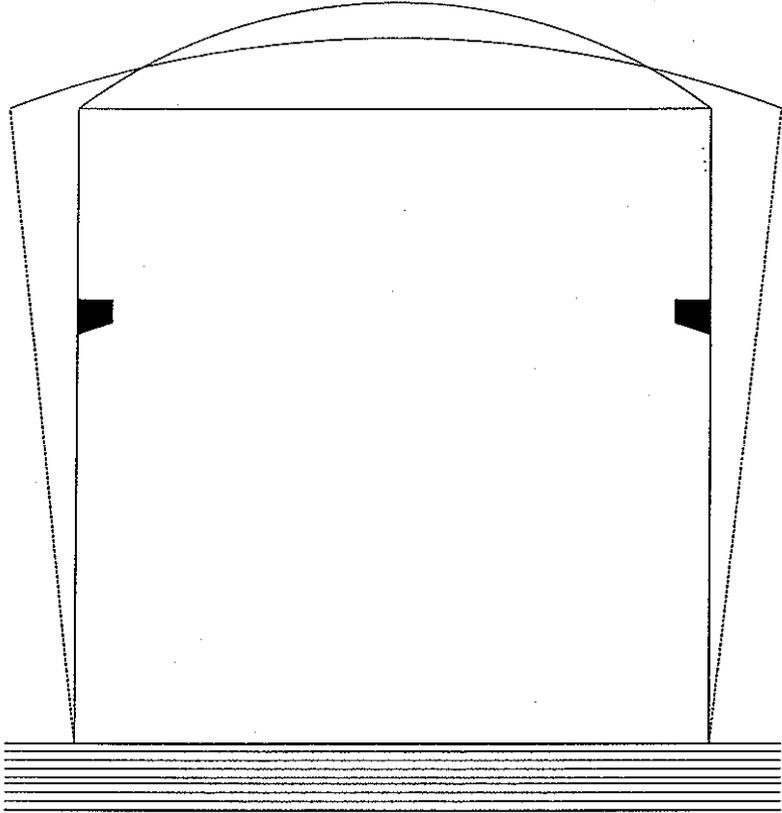


Figura 5

Figura 6

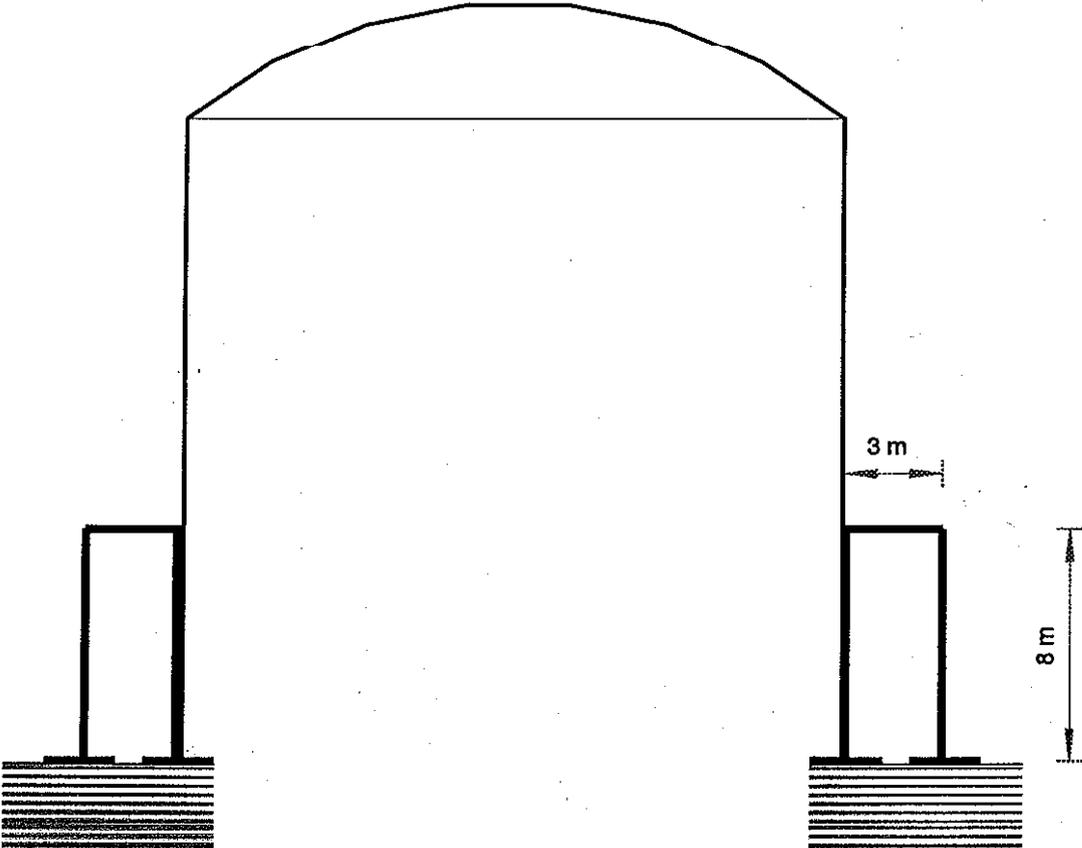


Figura 7

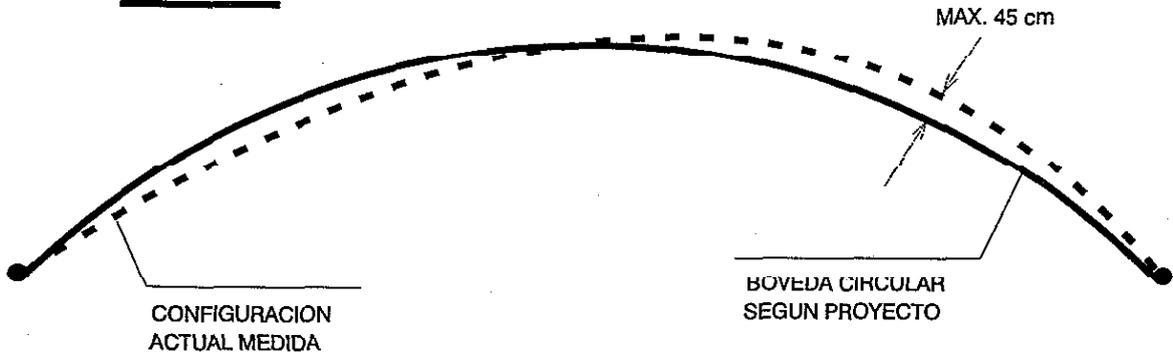


Figura 8

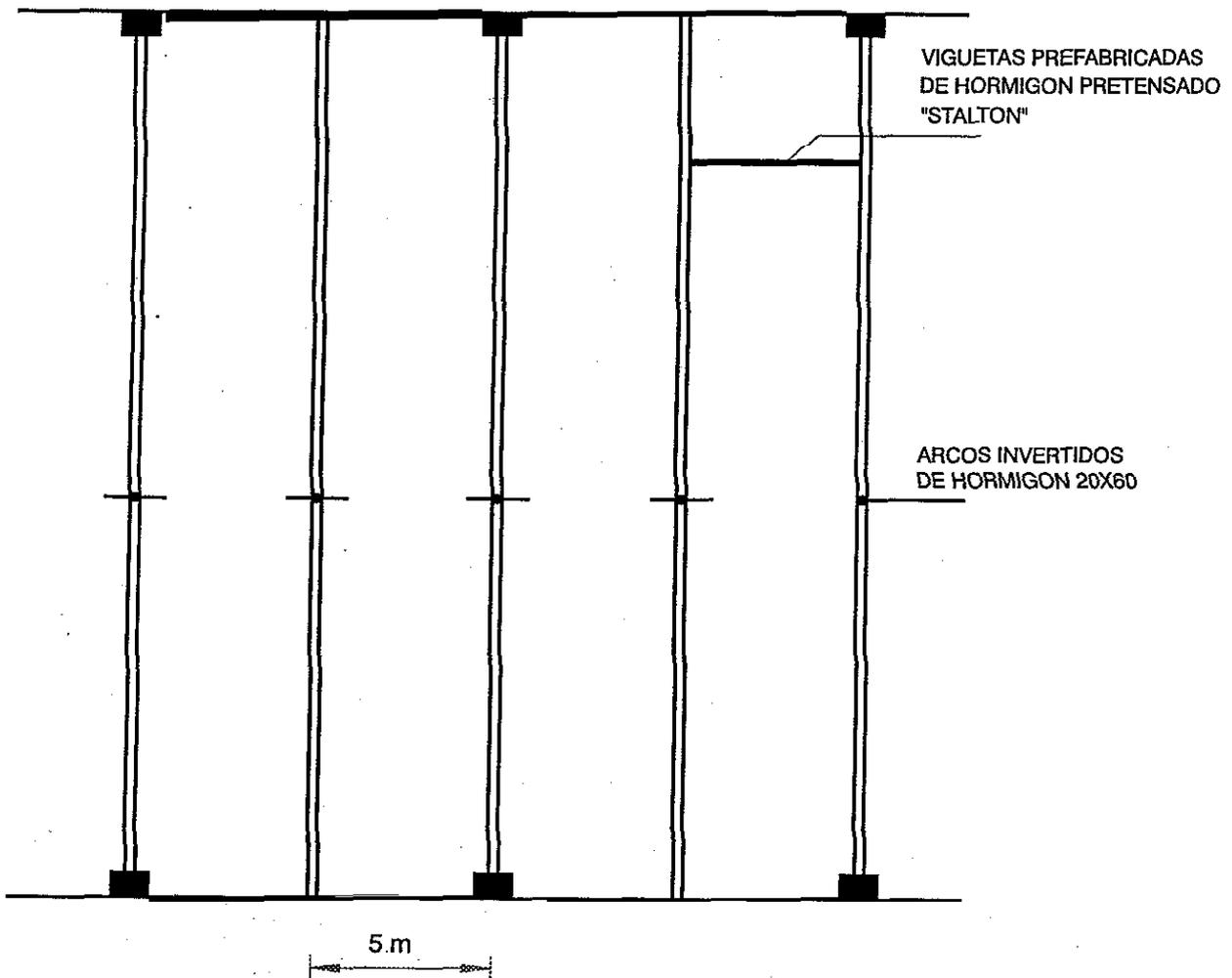


Figura 9

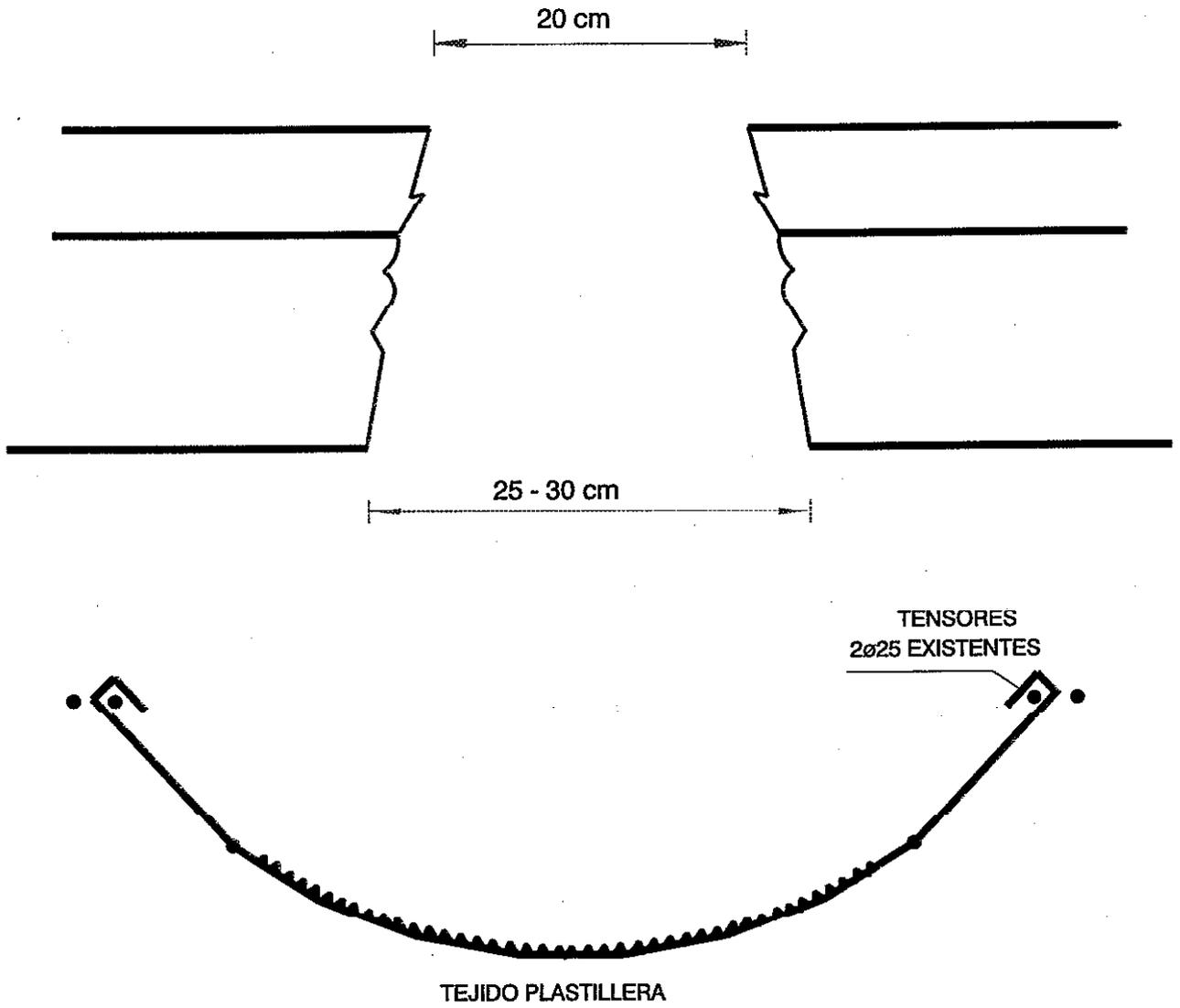


Figura 10

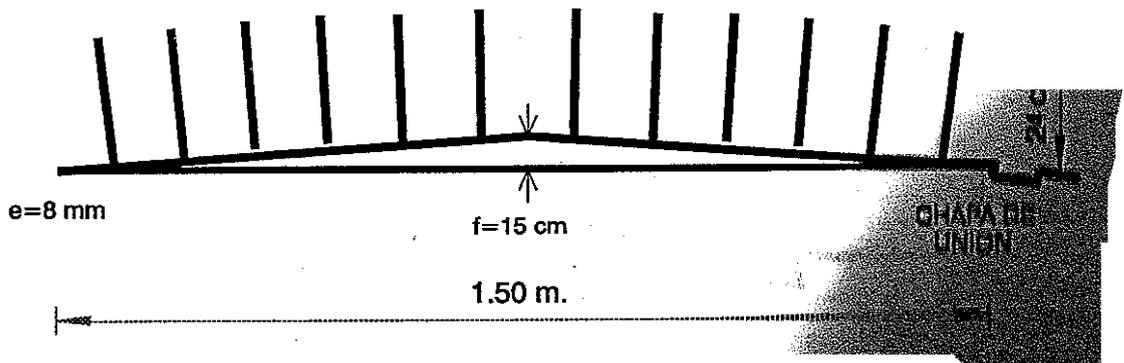


Figura 11

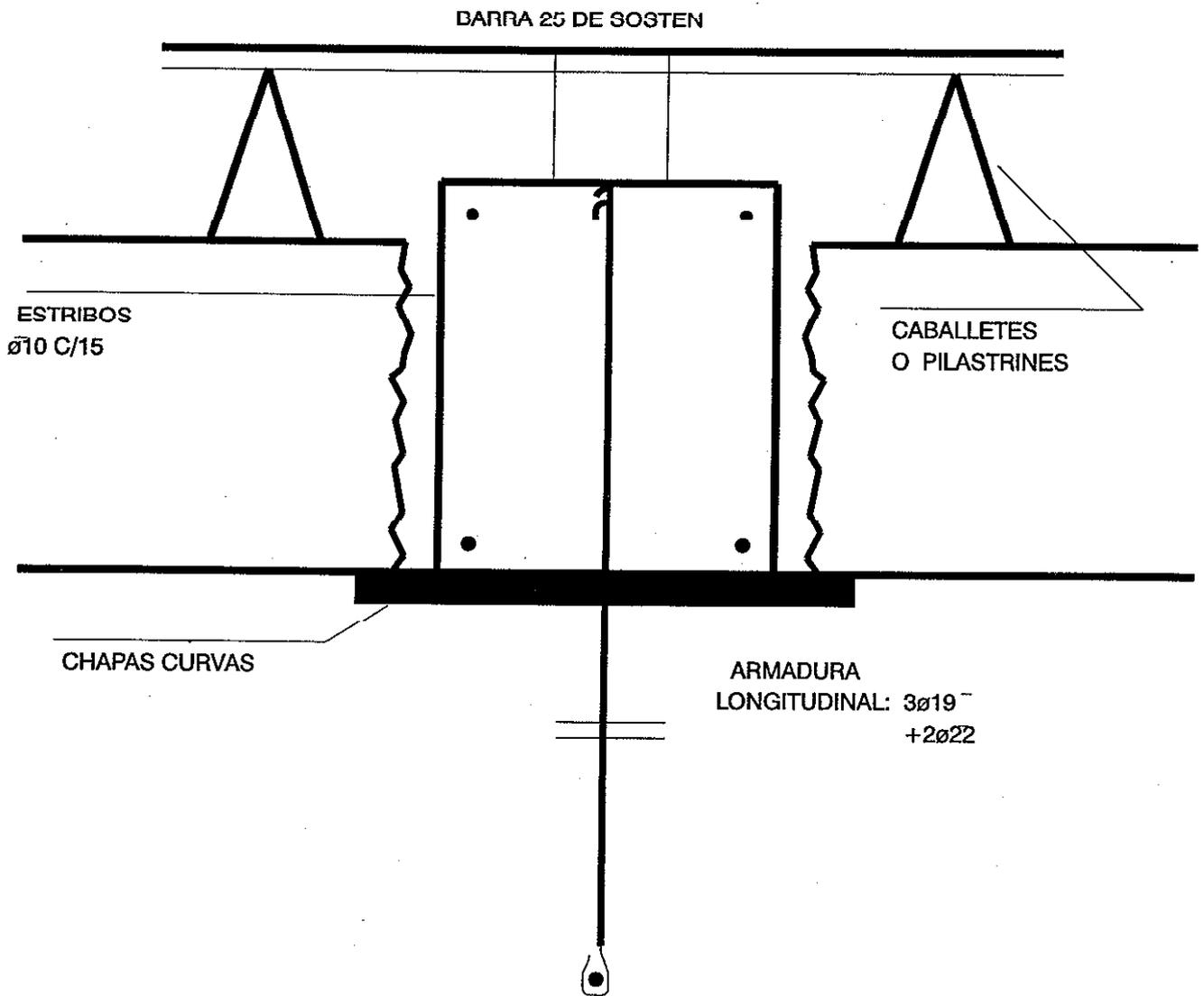


Figura 12

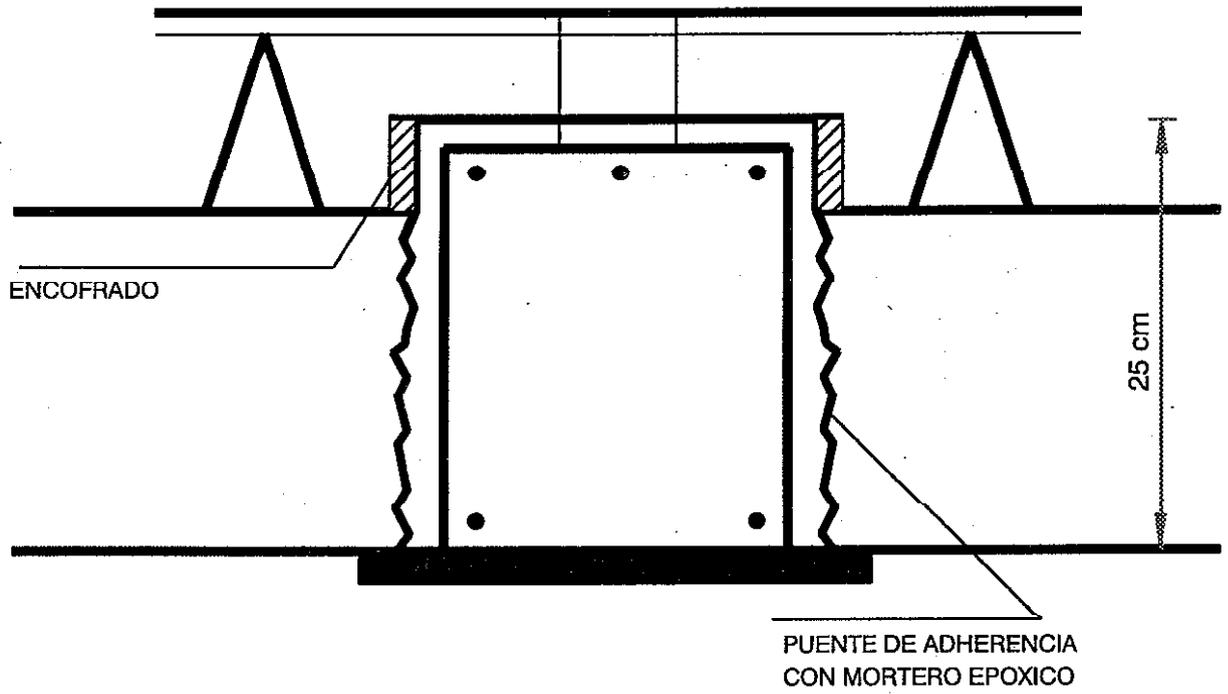


Figura 13

