ASOCIACION TECNICA ESPAÑOLA DEL PRETENSADO
DECLARADA DE UTILIDAD PUBLICA CON FECHA 4-3-77

INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCION EDUARDO TORROJA (C.S.I.C.)

COLEGIO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Silo para clinker, de 50.000 toneladas de capacidad, en Mataporquera (Cantabria)

José Antonio Llombart
Jordi Revoltós
Ingenieros de Caminos
(Estudio de Ingeniería y Proyectos, EIPSA. Madrid)

SEPARATA DE LA REVISTA

HORMIGÓN y acero

nº 216

Segundo trimestre de 2000

APARTADO 19.002 - 28080 MADRID - TEL. Y FAX: 766 07 03

Silo para clinker, de 50.000 toneladas de capacidad, en Mataporquera (Cantabria)

Clinker storage Silo of 50,000t, at Mataporquera (Cantabria)

José Antonio Llombart
Jordi Revoltós
Ingenieros de Caminos

(Estudio de Ingeniería y Proyectos, EIPSA. Madrid)

RESUMEN

Dentro del programa de ampliación de la fábrica de Cementos Alfa, S.A., en Mataporquera, se ha precisado la construcción de un silo para clinker, de 50.000 toneladas de capacidad.

El presente artículo describe las principales características de la estructura, criterios seguidos durante el desarrollo del proyecto y las distintas fases de construcción, que ha sido finalizada en el año 1999 (Figura 1).

La estructura principal está constituida por una lámina cilíndrica de hormigón postesado, apoyada en una base de hormigón armado, mediante placas de neopreno. La cubierta es una cúpula de directriz esférica, formada por una estructura metálica, sobre la que se apoya una lámina de hormigón. La construcción del fuste se ha realizado mediante encofrado deslizante, que ha servido al mismo tiempo para elevar la cúpula metálica hasta su posición definitiva.

SUMMARY

As part of the expansion programme of the factory of Cementos Alfa, S.A., in Mataporquera, it was necessary to build a clinker silo of 50,000 tonnes capacity.

This article describes the main characteristics of the structure, the criteria followed during the carrying out of the project and the different stages of the construction, completed in 1999 (Fig. 1).

The main structure is made up of a post-tensioned concrete cylindrical shell, resting on a base of reinforced concrete using elastomeric pads. The roof is a spherical-shaped dome, made up of a steel structure, on which rests a concrete shell. The wall was constructed using the slipform system, which served at the same time to raise the steel dome to its final position.

1. DESCRIPCIÓN GENERAL (Figuras 2 y 3)

La estructura principal del silo está constituida por un gran recipiente cilíndrico de 38 metros de diámetro interior. La cubierta del silo es una cúpula, en cuya coronación está situada una torreta destinada a albergar instalaciones pertenecientes al sistema de alimentación de clinker. La altura total de la construcción, comprendida entre el nivel del pavimento exterior y la coronación de la torreta, es de 58 metros.

El fuste está constituido por una lámina cilíndrica de hormigón, de 0.36 m de espesor, que queda apoyada, mediante placas de neopreno, sobre una estructura base de hormigón armado, provista de una tolva interior con paredes de forma troncocónica. La citada estructura dispone de un orificio para acceso al interior del silo, de dimensiones 4 x 4 m.

El material ensilado reposa sobre una losa, bajo la cual existen dos galerías de descarga en las que se han montado unas cintas transportadoras. Las dimensiones interiores de las galerías son 3.90 m de ancho por 3.30 m de alto.

La losa de fondo, que cubre las galerías, sirve de soporte a la estructura principal del silo y está cimentada mediante un conjunto de 88 pilotes de 1,50 m de diámetro.

2. CRITERIOS SEGUIDOS EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL

2.1. Paredes del silo (fuste)

La consideración de las altas presiones ejercidas por el material ensilado en

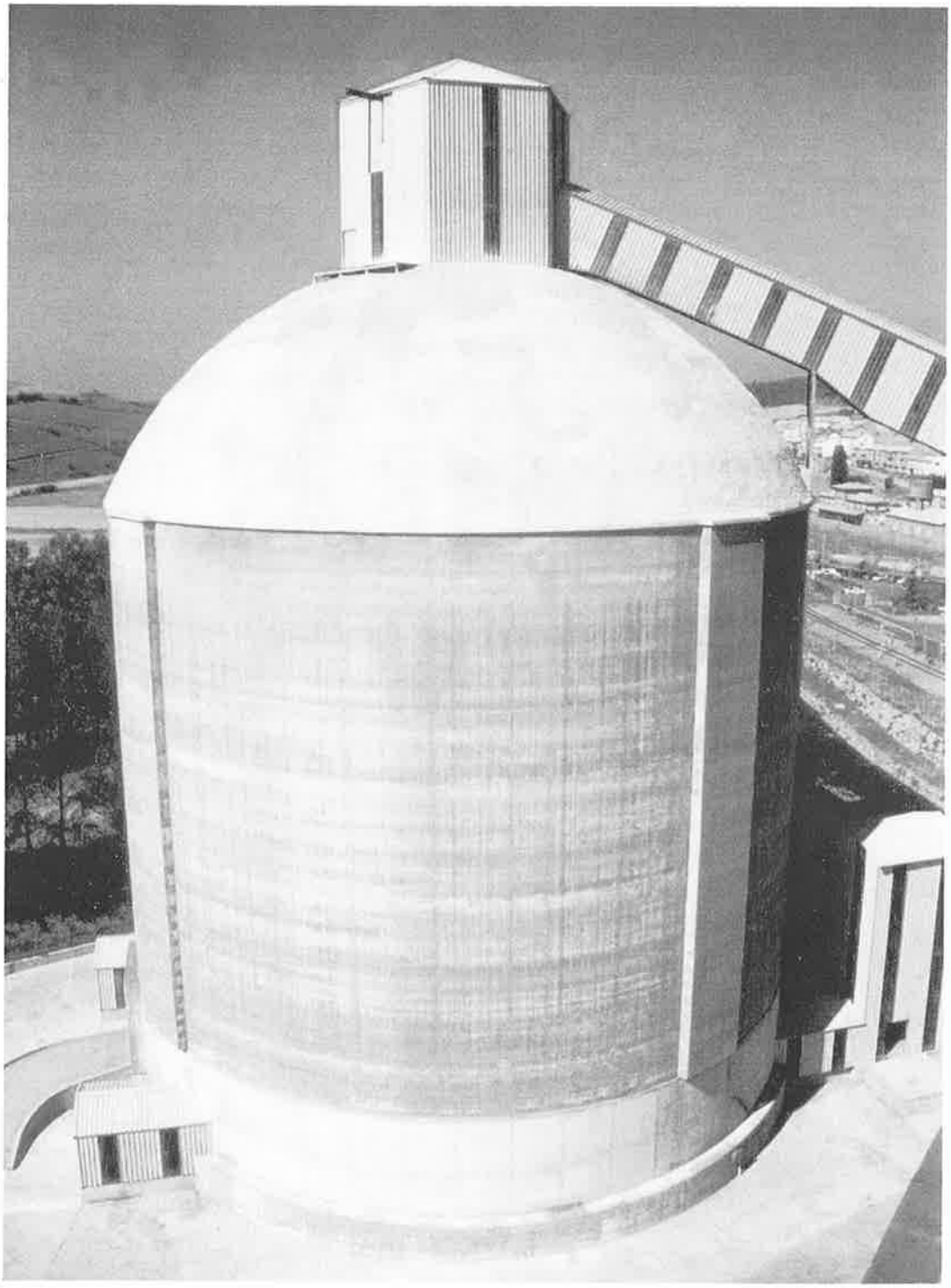


Figura 1. Vista general

la base del fuste, que pueden alcanzar un valor de 210 kN/m^2 con el silo lleno en situación de descarga, ha determinado la conveniencia de adoptar una solución consistente en la construcción de paredes formadas por una lámina cilíndrica, de hormigón postesado, provista de tendones dispuestos con trazado circular.

El fuste del silo se apoya verticalmente sobre una estructura de sustentación, mediante un conjunto de placas de neopreno zunchado (Figura 4). Esta disposición permite el libre giro y movimiento horizontal, en dirección radial, de las paredes en dicha zona.

Este tipo de vinculación resulta más favorable que el que existiría en caso de unión rígida entre la base y paredes. La eficacia del postesado de la lámina cilíndrica es máxima en el caso de existir libertad de movimientos, ya que la totalidad de las fuerzas de compresión se mantienen enteramente en las paredes. Los esfuerzos de tracción debidos al empuje del clinker se neutralizan con la compresión producida por el postesado, sin pérdida alguna a través de la estructura de la base. Por otra parte, una disposición estructural con esquema de empotramiento implicaría la existencia de importantes esfuerzos de flexión, precisamente en la zona en que se requiere la máxima concentración de tendones de pretensado. Debido a la disposición del borde inferior libre, los esfuerzos de flexión son nulos en la base y tan sólo adquieren unos valores de escasa importancia en el resto de la estructura durante las fases de proceso

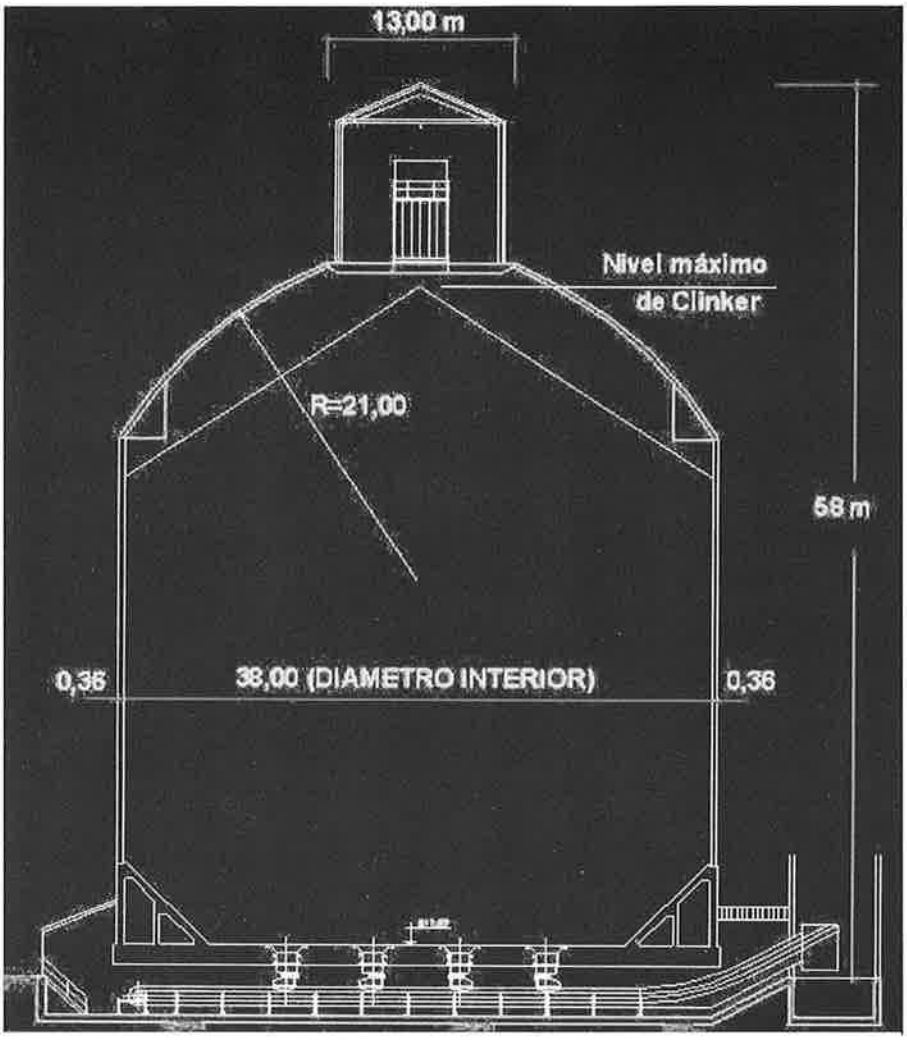


Figura 2. Sección transversal. Dimensiones fundamentales.

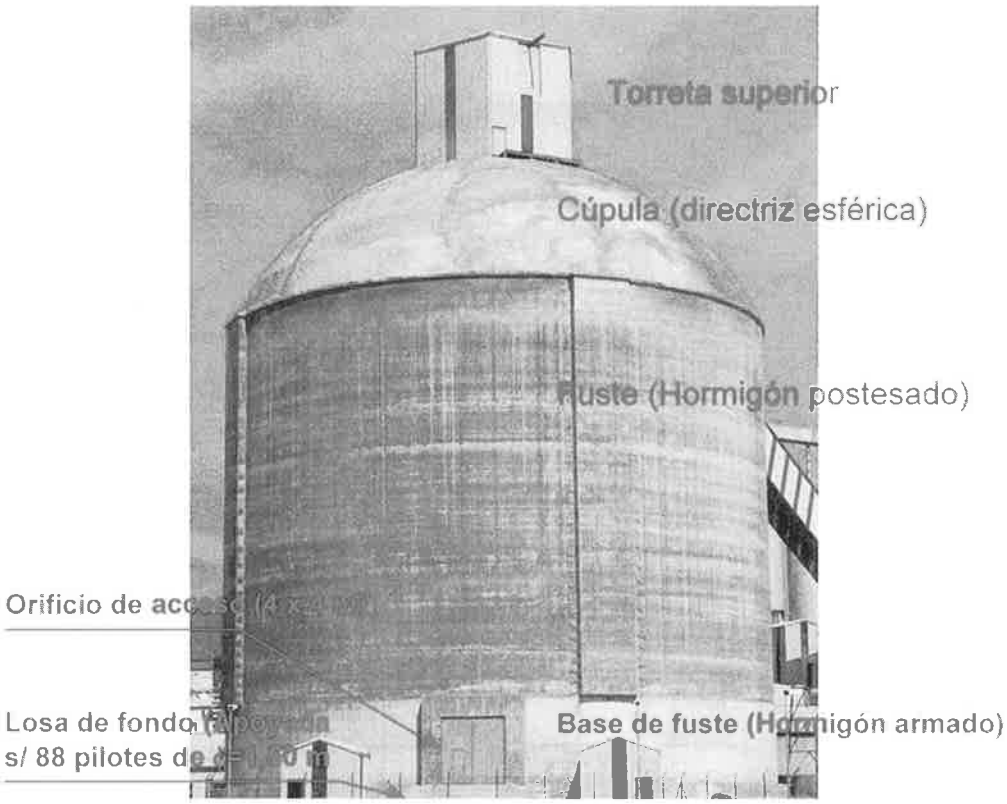


Figura 3. Estructura. Elementos fundamentales.

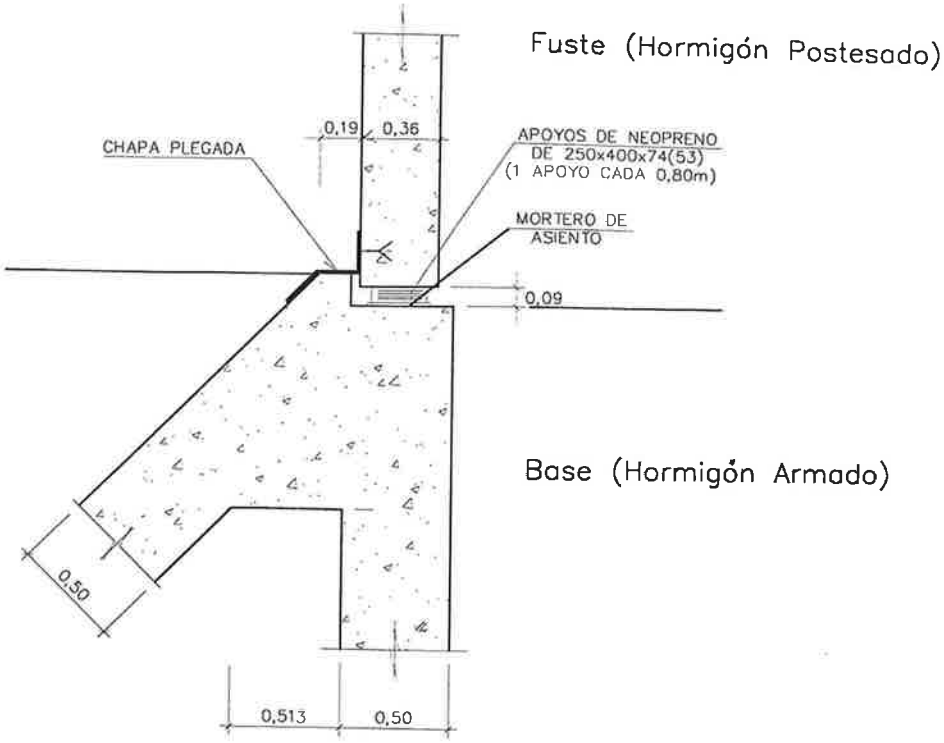


Figura 4. Detalle de apoyo del fuste del silo sobre la base. La chapa plegada constituye un faldón metálico que impide la entrada del material ensilado al espacio existente entre el fuste y la base.

constructivo, llenado parcial o estados de carga asimétrica.

El espesor de la pared del silo, en la zona de carga del material, (0,36 m) ha sido fijado fundamentalmente por motivos constructivos. Si se atendiese solamente a motivos de orden estructural, el espesor podría haber ser considerablemente menor, ya que las fuerzas producidas por el pretensado se oponen a los esfuerzos axiles de tracción originados por la presión sobre las paredes del material ensilado, independientemente del espesor de la pared de hormigón. Durante la fase de diseño estructural se determinó el sistema de construcción, mediante encofrado deslizante y por tal motivo, se estimó conveniente disponer el espacio suficiente para situar las barras de trepa en situación coincidente con el eje de la pared del fuste (Figura 5), a fin de que todas las cargas verticales durante el proceso

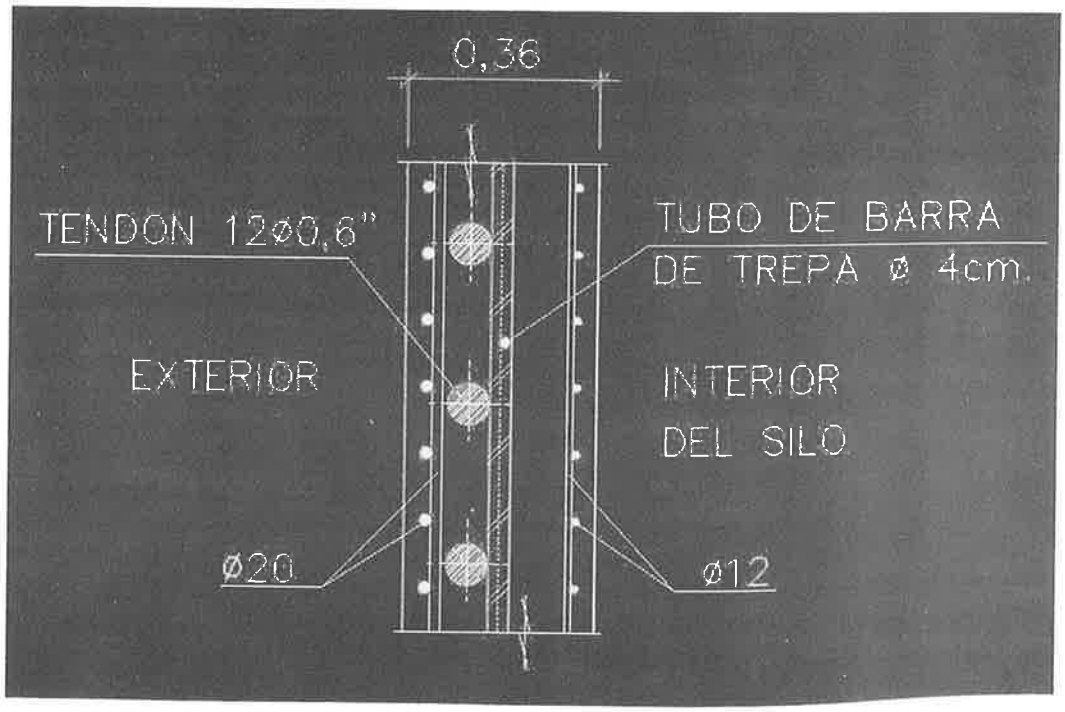


Figura 5. Pared de fuste principal. Sección.

de deslizado estuviesen equilibradas y no existiese tendencia al giro en el conjunto de elementos situados en la zona en que se iba a realizar la puesta en obra del hormigón.

2.2. Pretensado

Tal como se ha mencionado anteriormente, el pretensado tiene por objeto compensar los esfuerzos de tracción en las paredes, motivados por las cargas del material ensilado. En consecuencia, se ha dispuesto una distribución de tendones con separación variable a lo largo de la altura, de tal forma que la intensidad de la fuerza aplicada guarda relación con la ley de empujes calculada, que a su vez, determina el esfuerzo de tracción circunferencial en las paredes del silo.

La Figura 6 muestra un gráfico comparativo entre la ley de esfuerzos de tracción producida por el empuje del material, con el silo totalmente lleno y la ley de compresiones, debida a la acción del pretensado, a tiempo infinito. Ambos efectos están prácticamente compensados entre sí.

Existe, además, otra acción de gran importancia, motivada por el gradiente térmico. La temperatura de entrada del clinker al interior del silo está comprendida entre +150°C y +200°C, existiendo la posibilidad de una temperatura exterior de –25°C, durante el invierno. Teniendo en cuenta una serie de factores, tales como la difusión de temperatura en la masa de clinker, velocidad de llenado, caida de temperatura en la capa de aire situada en contacto con las paredes, etc., la diferencia previsible de temperatura entre las dos caras es de 45°C, siendo este valor el que ha servido para determinar los esfuerzos debidos al gradiente térmico.

El efecto del gradiente térmico, sin embargo, no se ha considerado en el dimensionamiento del pretensado. En la cara exterior, donde se producen las máximas tensiones de tracción debidas al efecto del gradiente térmico, se ha dispuesto una fuerte armadura pasiva formada por 8 por barras de 20 mm de diámetro por metro lineal, en ambas direcciones perpendiculares. Ello significa que, bajo la acción conjunta del empuje del material ensilado y el gradiente de temperatura, el hormigón de la pared del silo responde a un esquema de pretensado parcial, con un adecuado control de la fisuración, teniendo en cuenta el dimensionamiento apropiado de la cuantía de acero pasivo.

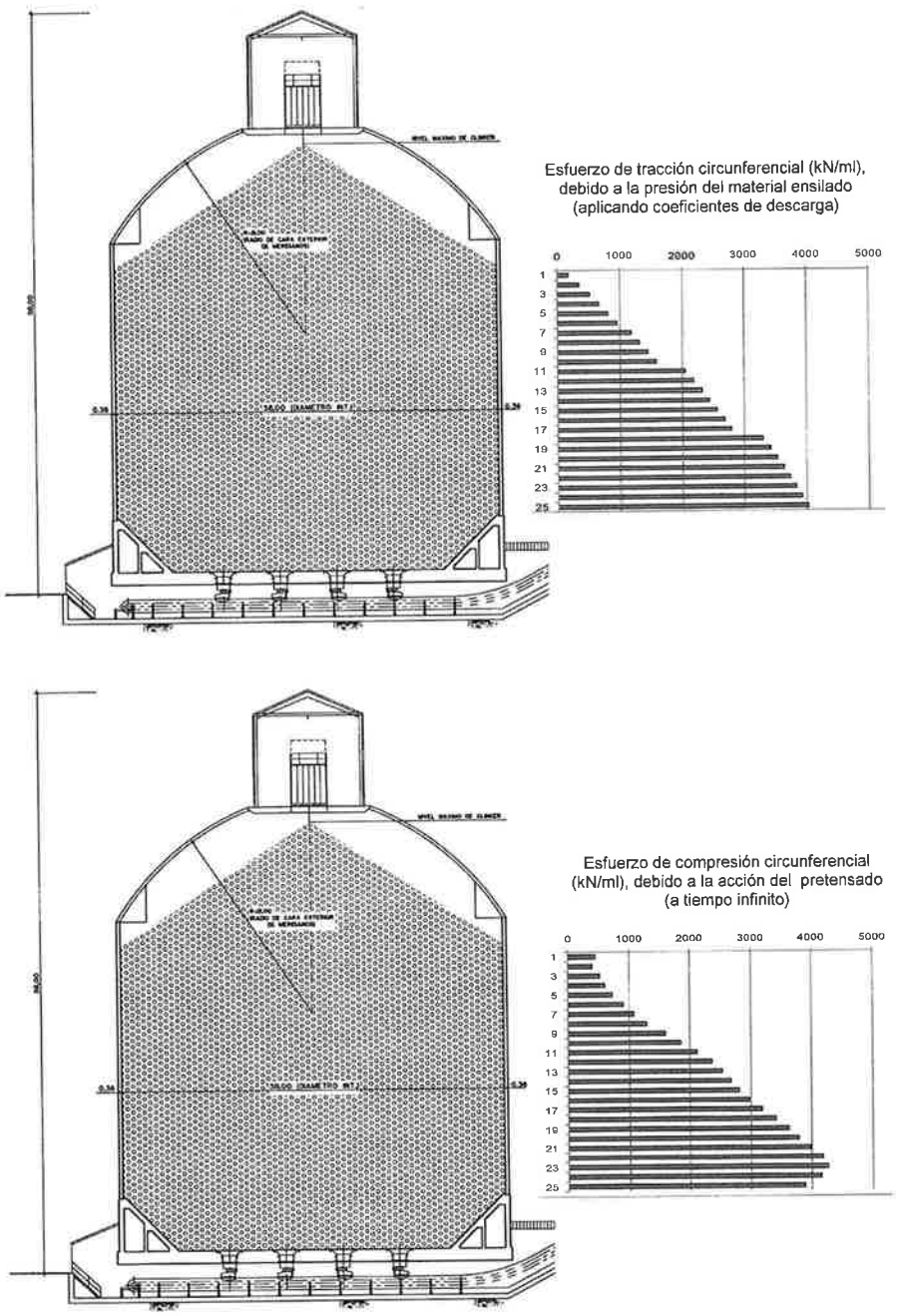


Figura 6. Diagrama de esfuerzo de tracción circunferencial en paredes de silo, producida por el empuje del material con silo totalmente lleno y diagrama de compresión circunferencial, debida a la acción del pretensado.

Un pretensado total (Definido en otro tiempo como Clase I) no debe ser necesariamente requerido en el caso de un silo. En primer lugar, porque las tensiones de compresión que resultarían en la mayor parte de la vida del silo no aportarían ventaja alguna. (El silo sólo estará totalmente lleno en contadas ocasiones y durante la mayor parte del tiempo se encontrará con carga parcial).

En segundo lugar, un régimen de compresión permanente en la totalidad de la pared, con tensiones resultantes más altas que las que existirían con pretensado parcial, motivaría mayores deformaciones por fluencia, pérdidas de pretensado y mayores movimientos en dirección radial.

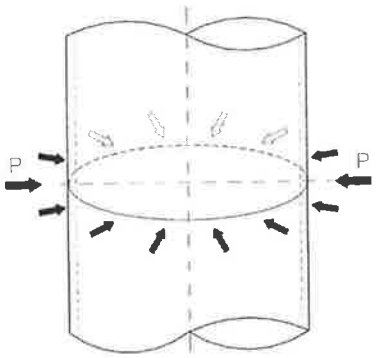
En tercer lugar, se estima conveniente la existencia de una propiedad de ductilidad, habida cuenta de las variaciones de temperatura y la necesidad de que exista capacidad de redistribución. La situación de fisuración controlada en el hormigón se ha considerado beneficiosa para este caso concreto.

Otro efecto, tenido en cuenta en fase de proyecto, ha sido la distribución de esfuerzos motivados por la aplicación de las fuerzas de pretensado en fase de construcción. Para el caso de un silo, resulta importante establecer un apropiado orden en el tesado de cables, de manera que se disminuyan en lo posible los momentos flectores verticales que se producen en las paredes, cada vez que se pone en tensión cada tendón.

La Figura 7 muestra el diagrama teórico de esfuerzos que se produce en una lámina cilíndrica de longitud infinita, sometida a una carga radial puntual, asimilable a la que produce aisladamente un tendón de pretensado, dispuesto en sentido circular.

A partir del punto de aplicación de la carga, la ley de momentos flectores cambia de signo. Ello significa que, en el caso hipotético de que no se realizase el tesado siguiendo un apropiado orden, se sumarían esfuerzos del mismo signo, pudiéndose alcanzar valores acumulados de importancia. Las consecuencias de estos efectos, si bien no afectan a la seguridad global de la estructura, gracias a la capacidad de redistribución del hormigón, sin embargo podrían ser capaces de producir, durante las fases de tesado, una fisuración no deseada en las paredes (fisuras horizontales).

El control y optimización de esfuerzos se ha llevado a cabo en fase de estudio, habiéndose determinando el orden de tesado mediante la aplicación de un programa de ordenador, expresamente elaborado para el diseño de láminas cilíndricas postesadas, que una vez indicado el primer tendón a tesar, elabora el orden más apropiado para minimizar los esfuerzos resultantes. Existen un total de 43 tendones numerados en sentido ascendente. Se consideró conveniente comenzar el tesado por el más alto (Nº 43), con lo que el resultado del cálculo determinó el orden óptimo de tesado, que se indica a continuación:

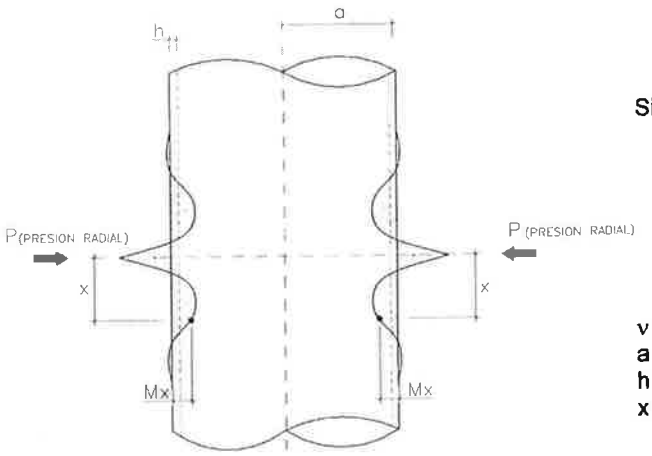


PRESION RADIAL PRODUCIDA POR UN TENDON CIRCULAR

Momento flector producido por el tesado de un tendón, en disposición circular:

$$M_x = \frac{P}{4\beta} e^{-\beta x} (\cos \beta x - \operatorname{sen} \beta x)$$

(P = Fuerza de desviación, en dirección radial)



DISTRIBUCION DEL MOMENTO Mx A LO LARGO DE LA ALTURA DE LAS PAREDES DE LA LAMINA CILINDRICA

Siendo:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \nu^2)}{a^2 \cdot h^2}}$$

ν = Coeficiente de Poisson
a = Radio medio
h = Espesor
x = Distancia desde la posición de la carga hasta la sección en estudio

Figura 7. Diagrama de momentos verticales producidos en una lámina cilíndrica, al aplicar una fuerza radial puntual, uniformemente distribuida en un plano horizontal.

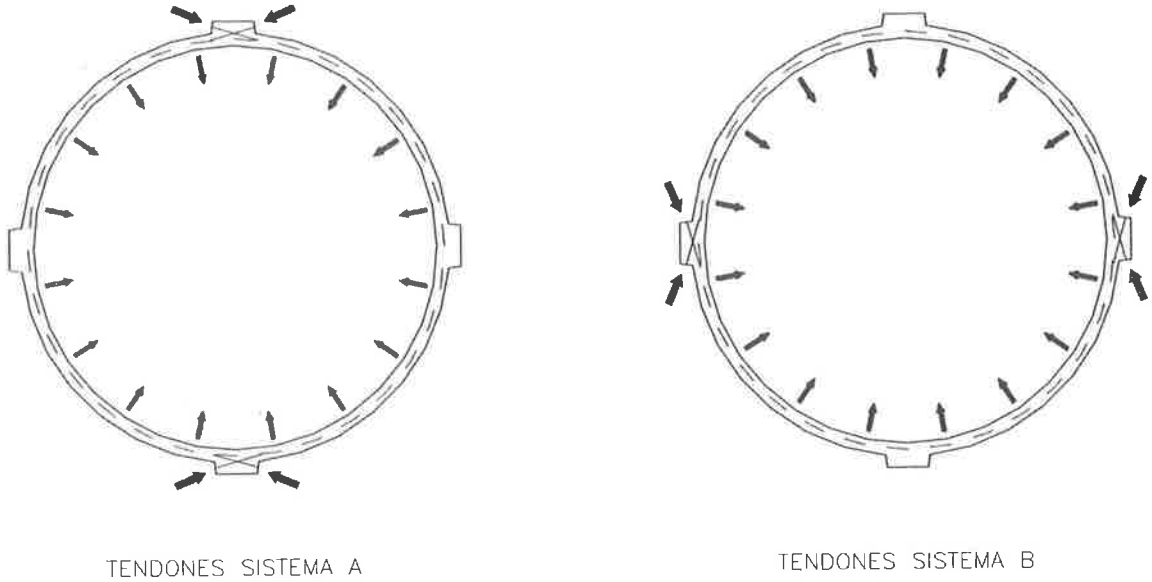


Figura 8. Esquema de disposición de anclajes de tendones.

43-41-38-42-40-34-30-25-19-13-36-28-32-22-39-37-7-16-26-31-35-23-29-33-20-27-11-17-24-2-9-15-4-21-12-18-6-14-1-8-3-10-5

La Figura 8 muestra el esquema de disposición de tendones. Existen dos sistemas (A y B) colocados de forma alternada a lo largo de la altura, con el objeto de compensar entre sí las pérdidas de fuerza debidas al rozamiento. La fuerza de desviación resultante de la aplicación de los dos sistemas es sensiblemente uniforme, evitándose con ello estados de flexión local, debida a falta de simetría radial.

2.3. Base del fuste

En la base del silo existe, a nivel de la plataforma exterior de rodadura de vehículos, un hueco de 4 x 4 metros para acceso al interior del silo de una pala cargadora, para ocasional limpieza y extracción de material.

La necesidad de crear una abertura en la zona donde las solicitaciones debidas al empuje del material ensilado son mayores (Las presiones calculadas alcanzan 210 kN/m^2), precisó en fase de proyecto un estudio encaminado a determinar la solución estructural más adecuada.

Se desechó la idea consistente en disponer una lámina cilíndrica en la totalidad del silo, dotada con un orificio en su base, debido a que hubiese implicado una serie de complicaciones y problemas que no se estimó conveniente asumir. Se realizó, en un principio, un análisis estructural mediante elementos finitos, para determinar el efecto y valorar la importancia de un hueco de las citadas dimensiones en la base de una lámina cilíndrica, apoyada en la solera. La magnitud de los desplazamientos resultantes, así como de los esfuerzos localizados en las inmediaciones del hueco mostraba que tal solución no era conveniente, aún en el caso de reforzar las zonas afectadas por la creación del hueco.

Se adoptó finalmente un esquema que permitió el funcionamiento de la lámina cilíndrica postesada en óptimas condiciones desde el punto de vista estructural, con simetría radial y sin la existencia de perturbaciones debidas a la existencia del hueco. Para ello, se dispuso el apoyo inferior sobre placas de neopreno, a 5 metros de altura sobre la losa de fondo, por encima del hueco de acceso, mediante la creación de una estructura de base de hormigón armado.

La Figura 9 muestra un esquema de la estructura de base, discretizada para un

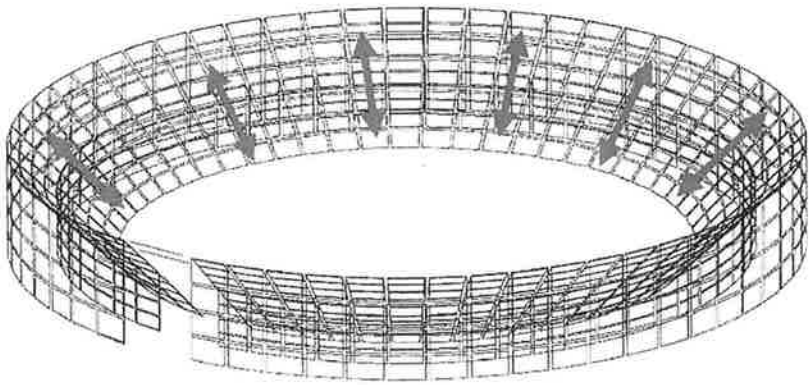


Figura 9. Estructura de base. Modelo utilizado en el análisis por elementos finitos. Las flechas indican la dirección de los esfuerzos de tracción, según la generatriz de la superficie troncocónica.

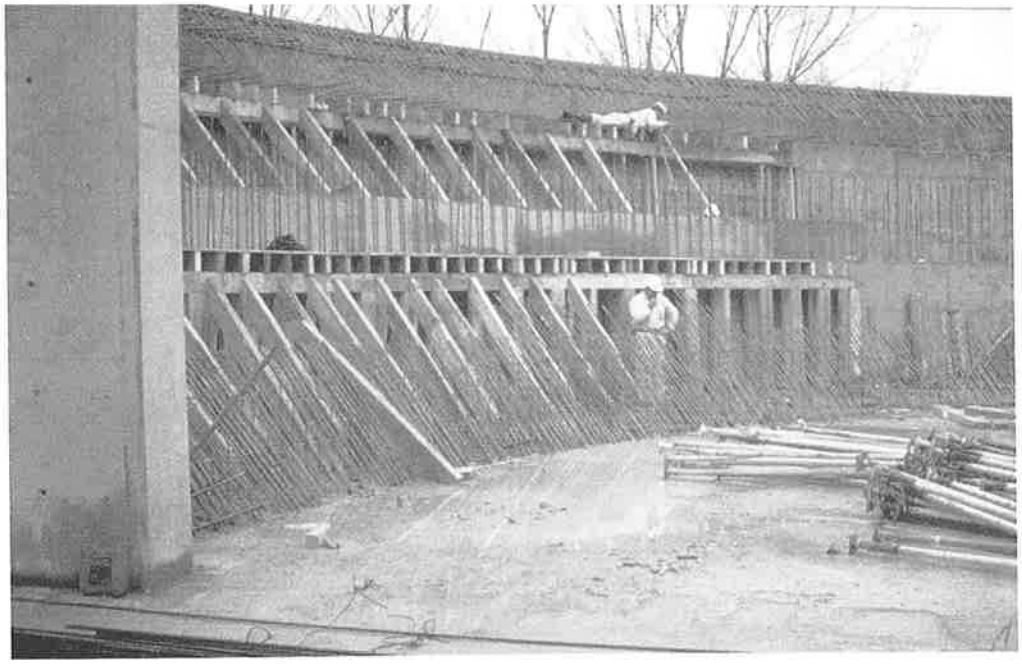


Figura 10. Arranque de armaduras de las paredes troncocónicas, en forma de tolva.

análisis realizado por elementos finitos. La estructura consta de un tabique exterior de forma cilíndrica, en el que se ha practicado el citado hueco de 4 x 4 metros. En el interior del cilindro existe una pared en forma troncocónica, a la manera de una tolva, provista de un apoyo intermedio constituido por un tabique de forma cilíndrica. Todos los tabiques citados están monolíticamente unidos a la losa de fondo. El resultado del análisis estructural ha mostrado que la estructura responde de tal forma que los esfuerzos fundamentales son de tracción en sentido radial, careciendo de importancia los circunferenciales, en dirección perpendicular. En la citada figura se han representado las flechas indicativas de la tracción, que coincide con la generatriz de las paredes troncocónicas, sin que la existencia del hueco ejerza prácticamente influencia alguna en los esfuerzos resultantes. En la Figura 10 puede verse el arranque de las armaduras dispuestas para soportar los citados esfuerzos de tracción, que se transmiten a la losa de fondo, además de la flexión local debida a la presión directa del clinker almacenado.

La Figura 11 muestra una imagen del conjunto formado por la estructura de base en la situación anterior al hormigo-

Figura 11. Estructura de base en construcción, en situación anterior al hormigonado de las paredes de forma troncocónica.

nado de las paredes troncocónicas, en forma de tolva.

2.4. Losa de fondo

El fondo del silo está constituido por una gran losa nervada, de hormigón armado, cuya función estructural consiste en recoger las cargas existentes en la base de la superestructura, incluido el peso propio de la totalidad del material ensilado y transmitirlas al terreno a través de 88 pilotes de 1,50 m. de diámetro, que constituyen la cimentación (Figura 12).

La descarga del clinker se produce por gravedad, a través de ocho orificios existentes en la losa de fondo, debajo de la cual existen dos galerías que alojan sendas cintas transportadoras. La losa de fondo actúa, además, como un elemento puente, que sirve de techo a las citadas galerías.

La Figura 13 muestra un aspecto de la losa de fondo en fase de construcción previa al hormigonado. La armadura está formada por 200 toneladas de acero pasivo. En la construcción de la losa se empleó un total de 2.200 m³ de hormigón, cuya puesta en obra se llevó a cabo de forma ininterrumpida.

2.5. Cúpula

La estructura de cubierta se diseñó teniendo en cuenta una serie de condicionantes previos, que se mencionan a continuación:

- *Forma de la cubierta.* Dado el diámetro interior del silo (38 m), el cono de descarga de clinker tiene una altura de 12 metros, que en situación de máximo llenado conviene alojar en el espacio interior de la cúpula, de tal manera que se limite en lo posible la altura necesaria del fuste de hormigón (Figura 2). En fase de proyecto, se estudiaron dos formas diferentes: a) Tronco de cono y b) cúpula con directriz esférica. Se adoptó finalmente la forma de cúpula por deseo de la Propiedad, que consideró la solución más atractiva y con un aspecto exterior más agradable que el que hubiese proporcionado la forma troncocónica.

- *Material de cobertura.* Tratándose de un silo para una fábrica de cemento, se estimó adecuado que el material de cobertura fuese hormigón, evitando en lo posible el empleo de chapa metálica vista, que se limitó para recubrir la torreta superior y las estructuras de cintas transportadoras. La cobertura de la cúpula está formada por una lámina de hormigón, de 6 cm de espesor, construida sobre chapa metálica grecada, que actúa como encofrado perdido, colaborante con el hormigón. La superficie exterior del hormigón está protegida mediante una capa de material impermeabilizante.

- *Estructura de la cúpula.* Se ha resuelto mediante un entramado metálico, tras considerarse los aspectos favorables derivados de la ligereza, facilidad de montaje y posibilidad de construcción sobre la base y posterior elevación. La estructura metálica en posición definitiva ha servido de soporte de la cobertura, constituida por un cerramiento de chapa sobre el que descansa una lámina de hormigón de 6 centímetros de espesor medio. El hormigón está conectado a la

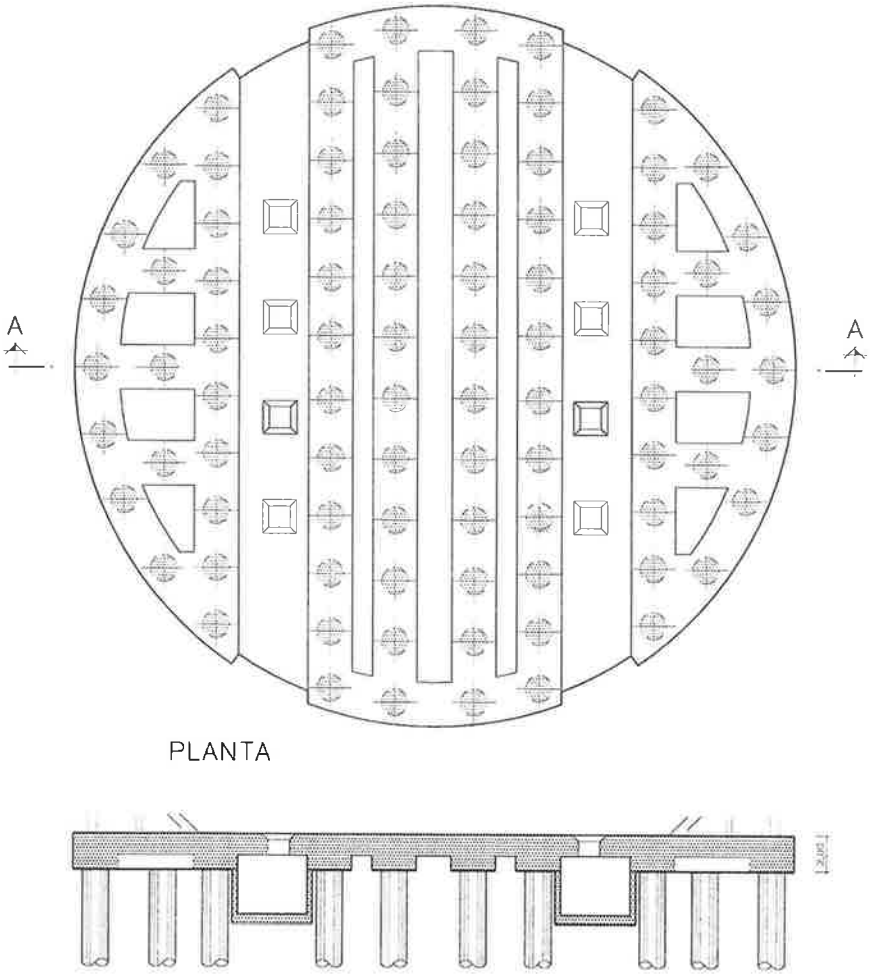


Figura 12. Losa de fondo. Disposición de pilotes y galerías de descarga.

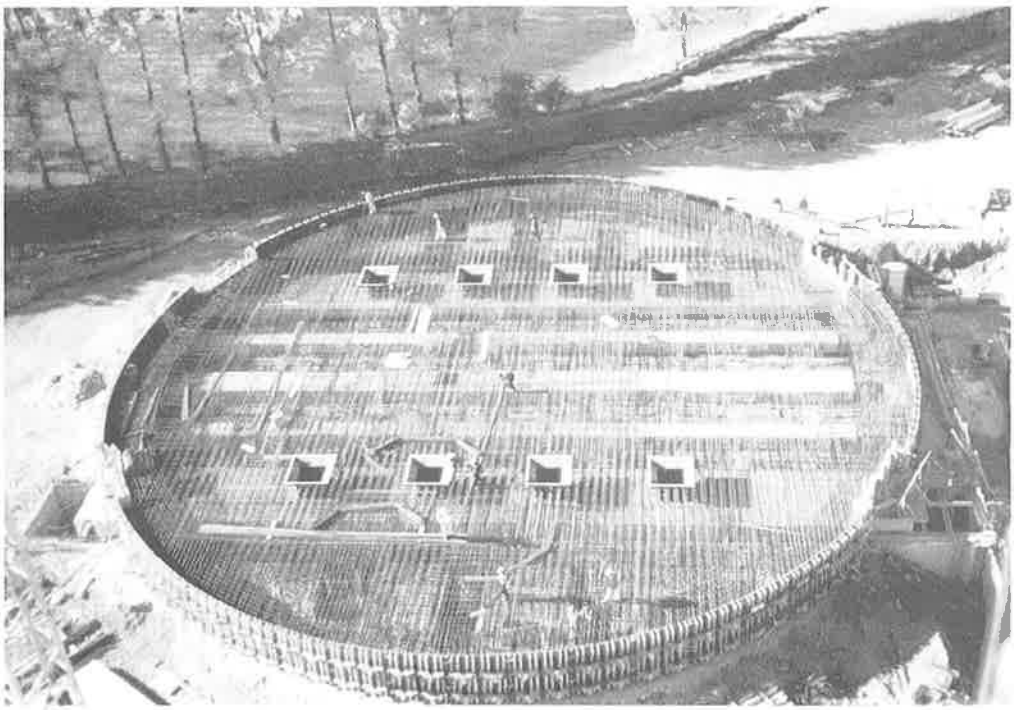


Figura 13. Armadura de la losa de fondo, en situación previa al inicio del hormigonado.

estructura metálica, si bien su contribución estructural no se ha tenido en cuenta a efectos de dimensionamiento. La estructura metálica está capacitada por sí sola para soportar adecuadamente las acciones debidas al peso propio, acciones climáticas, así como las sobrecargas de uso que actúan en la plataforma de coronación, en que se sitúa la torreta superior.

– *Piezas metálicas empleadas en la elaboración de la estructura. Formas adoptadas.* A excepción de los perfiles metálicos empleados en la plataforma horizontal, de 13 m de diámetro, situada en la coronación (Figura 14), todos los restantes elementos metálicos que constituyen la cúpula están formados por piezas tubulares de sección rectangular, que para este caso concreto ofrecen ventajas, tanto funcionales como estructurales, frente a las secciones abiertas propias de los perfiles normales en forma de "doble Te".

El almacenamiento de clinker provoca una atmósfera de polvo de cemento en el interior del silo. En el caso de disponerse perfiles abiertos, se producirían acumulaciones de polvo sobre las alas inferiores, que irían creciendo a lo largo del tiempo como consecuencia del fraguado producido por la existencia de humedades de condensación, constituyendo un relleno de un peso considerable, cuya limpieza no resultaría fácil. Con la disposición de piezas

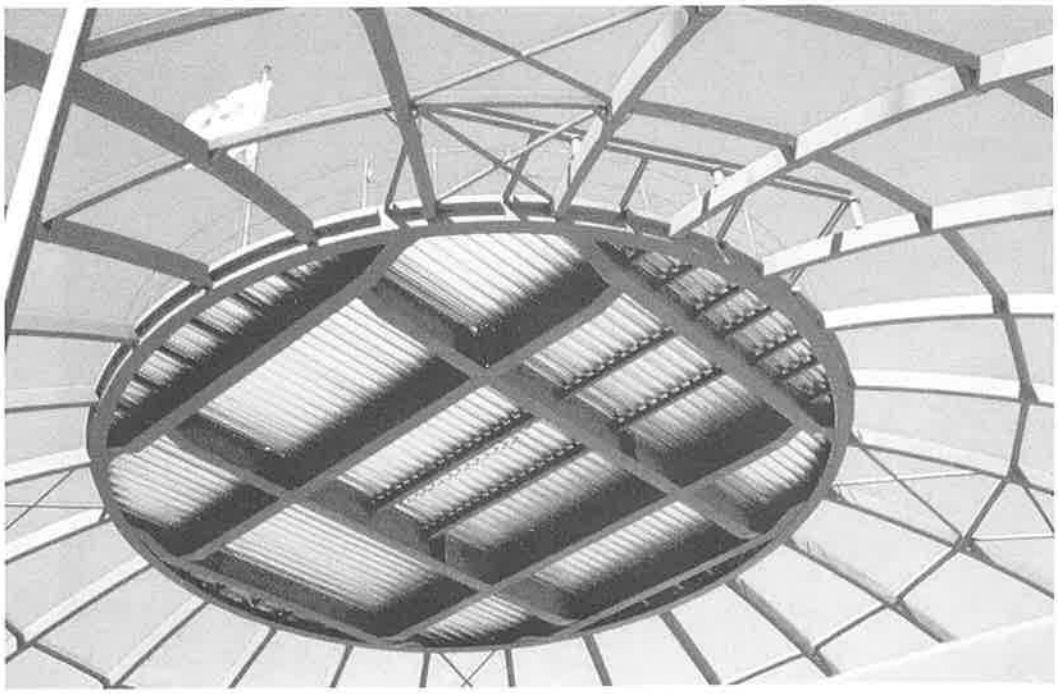


Figura 14. Plataforma horizontal de 13 m de diámetro, situada en la coronación de la cúpula.

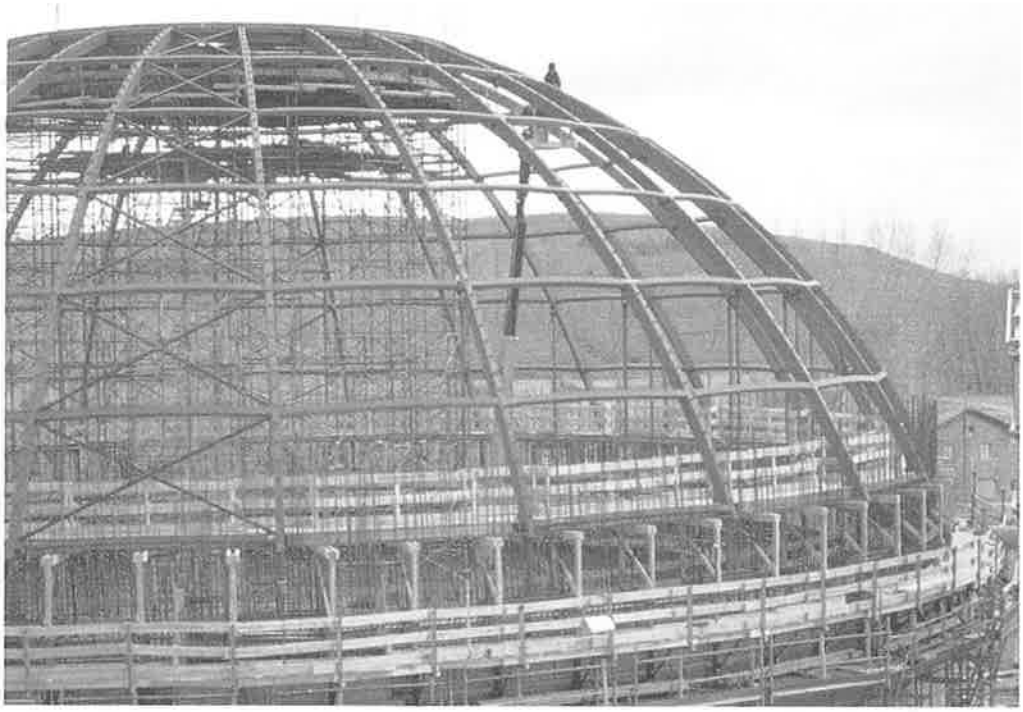


Figura 15. Cúpula metálica. La directriz de cada correa pertenece a un círculo máximo de la superficie teórica de una esfera. Se aprecia a simple vista su forma, que se aparta ostensiblemente de la que correspondería a la de los paralelos (círculos menores), que estarían contenidos en planos horizontales.

con forma tubular se evitan estos inconvenientes.

La estructura metálica de la cúpula, de directriz esférica, está formada por dos familias fundamentales de perfiles: a) Piezas situadas en planos verticales, siguiendo un trazado según los meridianos de la esfera y b) conjunto de correas transversales, cuyo trazado tiene una especial peculiaridad, que requiere una serie de comentarios que se citan a continuación:

Las directrices de las correas transversales no están contenidas en planos horizontales. No son, por tanto, paralelos de la esfera, con trazado según círculos menores. Cada tramo de correa comprendido entre dos meridianos posee una directriz contenida en un círculo máximo, es decir, con su centro coincidente con el de la esfera. En la Figura 15 puede apreciarse el aspecto que ofrecen las correas, cuya directriz está contenida en la superficie teórica de la esfera y sin embargo, su forma se aparta ostensiblemente de la que correspondería a la de los paralelos, contenidos en círculos menores.

Esta peculiar disposición ha aportado una serie de ventajas de tipo constructivo: En primer lugar, la totalidad de las piezas de la cúpula tiene idéntica curvatura. Cada correa está formada por cuatro chapas convenientemente cortadas y montadas para su soldadura sobre unas simples plantillas dispuestas en taller (Figura 16), válidas para el 100% de correas y meridianos. Todas las correas tienen forma idéntica (Figura 17) y tan sólo varía la longitud que se adapta a la distancia existente entre meridianos, en función del nivel de altura en que están situadas.

La unión entre correas y piezas que forman los meridianos se materializa de forma que la chapa superior de ambos perfiles está contenida en un mismo plano tangente, pudiéndose establecer la continuidad, mediante soldadura. Se ha dispuesto, además, continuidad en la chapa inferior de las correas, mediante la adición de unas pletinas suplementarias (Figura 18). La forma en la que se han

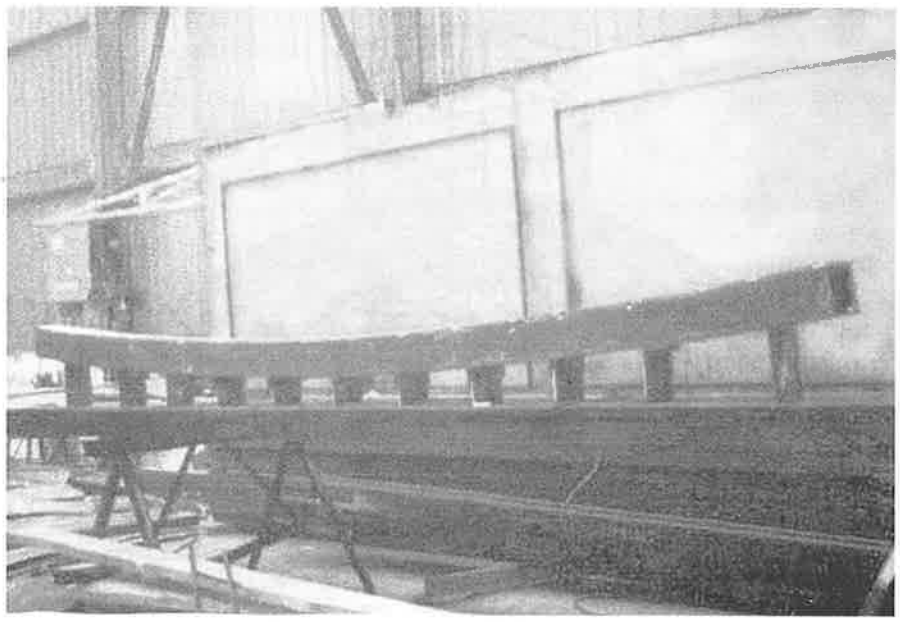


Figura 16. Correa de cubierta, sobre bancada, en taller.

Figura 17. Piezas que constituyen las correas de cubierta, antes de su montaje.

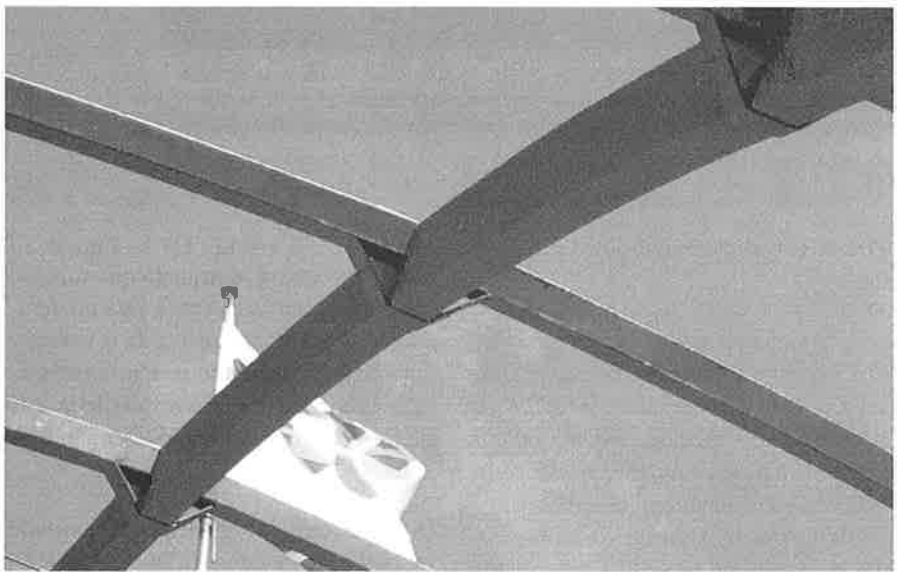


Figura 18. Detalle de unión entre correas y piezas que forman los meridianos.

resuelto los nudos de unión proporciona unas condiciones óptimas de apoyo a la chapa de cobertura de la cubierta, ya que las caras superiores de las piezas que constituyen los meridianos y correas están contenidas en su totalidad en la superficie teórica de la esfera.

Finalmente hay que señalar que la dirección de las cargas procedentes de la cubierta está fuera del plano en que está contenido el círculo máximo que define la directriz de las correas. La forma de las correas, con sección tubular, resulta idónea para soportar los esfuerzos de torsión resultantes.

- *Esquema estructural.* La estructura fundamental de la cúpula está constituida por un conjunto de barras de directriz circular, que forman los meridianos y las correas, tal como se ha descrito anteriormente. En la coronación de la cúpula existe una plataforma situada en un plano horizontal, que sirve de apoyo para un casetón en que se aloja una serie de instalaciones para descarga del clinker. La Figura 19 muestra el esquema en 3-D considerado para el análisis estructural, realizado por el ordenador.

En la base de la cúpula se ha dispuesto un conjunto de barras de trazado recto, contenidas en el plano horizontal, formando un esquema de viga en celosía curva (Figura 20), que tiene una doble función: Por un lado, constituye un refuerzo a la manera de un tirante circular, con desarrollo según una poligonal, en la zona donde los esfuerzos de tracción son máximos. En segundo lugar, la viga curva constituye un anillo de rigidez apropiado para asegurar unas mínimas deformaciones de la base de la cúpula, en dirección radial, en la zona de apoyos durante el proceso de construcción del fuste del silo con encofrado deslizante, que ha servido al mismo tiempo para el izado de la cúpula hasta su posición definitiva.

3. ACCIONES TENIDAS EN CUENTA EN LA VERIFICACIÓN ESTRUCTURAL

Junto con la consideración del peso propio de los elementos estructurales, se han tenido en cuenta las siguientes acciones:

Empuje sobre paredes y fondo del silo del material ensilado, de las siguientes características:

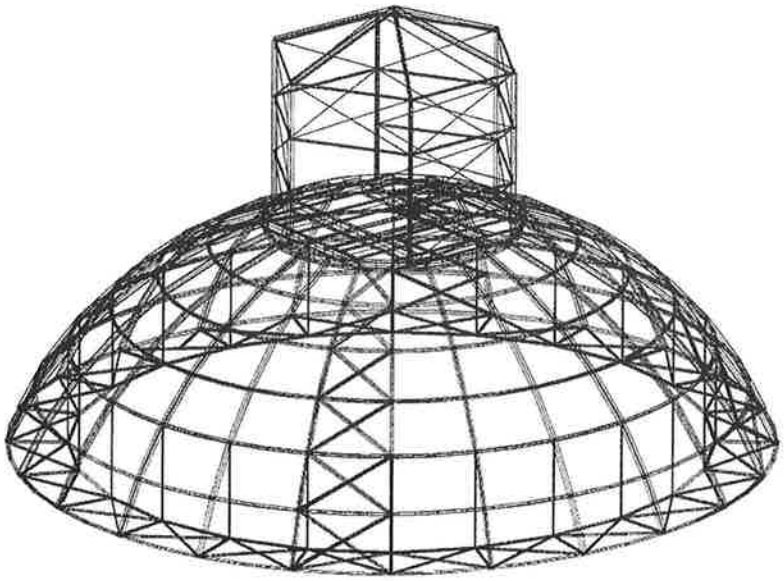


Figura 19. Cúpula metálica. Modelo espacial utilizado para el análisis estructural.

– Densidad del clinker: 1,4

– Ángulo de rozamiento interno: 33 grados sexagesimales.

– Rozamiento entre clinker y paredes de hormigón: Comprendido entre 0,55 y 0,60

Coeficientes de sobrepresión debidos al llenado y vaciado, según Norma ACI 313R. (En la base del silo, el coeficiente a multiplicar por la presión estática teórica, es igual a 1,65).

– Gradiente térmico en estructura de hormigón: 45° C de diferencia real entre ambas caras de las paredes del silo, producida por la entrada de material en el interior a 200° C, en la hipótesis de simultaneidad con una temperatura ambiente exterior de –25° C.

Cubierta. Cargas de uso en la plataforma situada en la coronación de la cúpula:

– Suma total de sobrecargas verticales: 830 kN

– Suma total de sobrecargas horizontales: 240 kN

– Cargas climáticas (Viento y nieve), según Norma NBE.

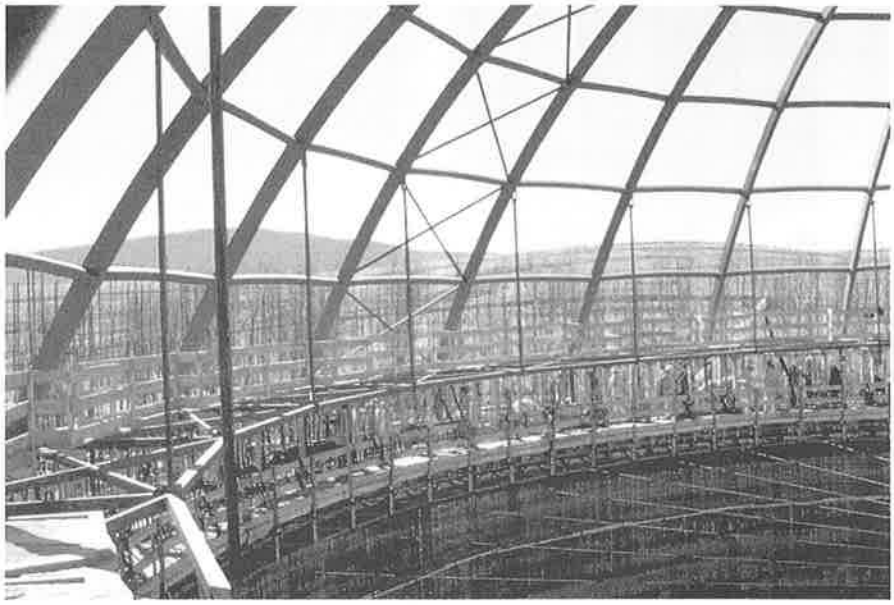


Figura 20. Parte inferior de la cúpula metálica. Puede apreciarse la viga curva compuesta de barras de trazado recto, en el plano horizontal, que constituye el anillo de rigidez frente a desplazamientos en dirección radial.

Figura 21. Montaje, sobre una cimbra apoyada en la losa de fondo, de la plataforma metálica que constituye la coronación de la cúpula de cubierta.

4. CONSTRUCCIÓN

Se indica a continuación el proceso constructivo llevado a cabo, con la enumeración de las fases de obra más representativas:

4.1. Cimentación, formada por 88 pilotes de 1,50 m. de diámetro

4.2. Galerías de descarga de clinker y losa de fondo (Figura 13)

4.3. Base del fuste, de hormigón armado (Figuras 10 y 11)

4.4. Montaje, sobre una cimbra apoyada en la losa de fondo, de la plataforma metálica que constituye la coronación de la cúpula de cubierta (Figura 21).

4.5. Montaje, sobre la coronación de la estructura de hormigón de base del fuste, de los apoyos de neoprene, armaduras activas y pasivas pertenecientes a la parte inferior del fuste y encofrado deslizante (Figura 22).

4.6. Montaje de las piezas metálicas que constituyen los meridianos de la cúpula sobre la estructura perteneciente al encofrado deslizante y unión mediante soldadura con la plataforma metálica apoyada sobre cimbra (Figura 23). Montaje de correas y anillo inferior de rigidez.

4.7. Construcción del fuste del silo, mediante el empleo del encofrado deslizante, que se eleva conjuntamente con la cúpula metálica (Figuras 24, 25 y 26).

4.8. Una vez alcanzada la altura definitiva del fuste, colocación de chapa metálica de cobertura y mallazo para armado de la lámina de hormigón (Figura 27). Montaje del casetón situado en la coronación de la cúpula.

4.9. Construcción de la lámina de hormigón de la cúpula, con gunita (Figura 28). Colocación de impermeabilización sobre la lámina de hormigón.

4.10. Operaciones de pretensado. (Enfilado de tendones, tesado, inyección y sellado de cajetines)

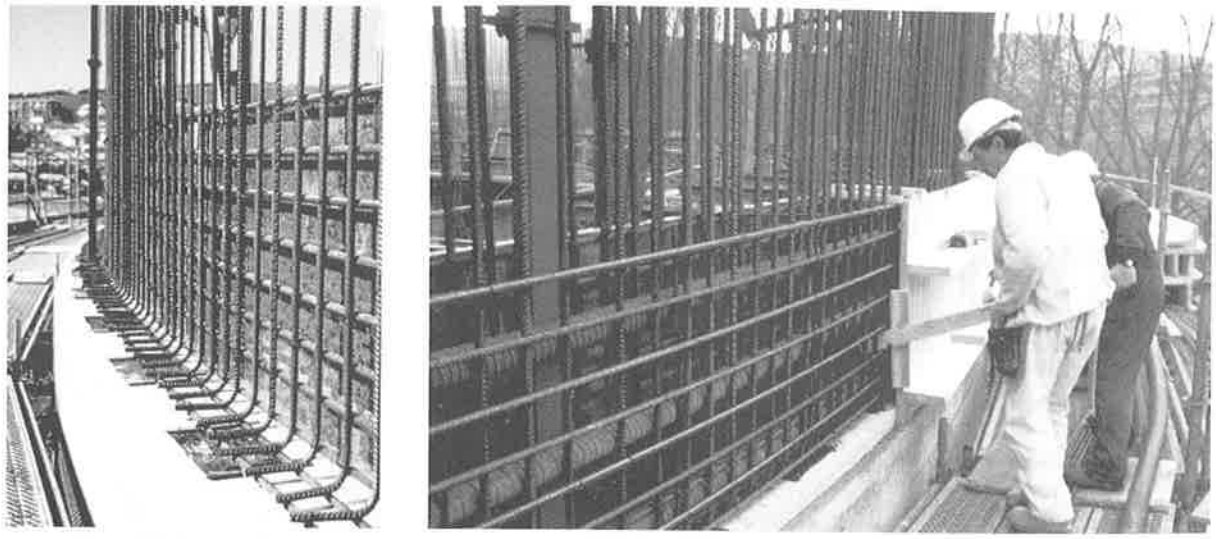


Figura 22. Apoyos de neopreno sobre la esctructura de hormigón de base del fuste, armaduras activas y pasivas pertenecientes a la parte inferior del fuste. Inicio del montaje del encofrado deslizante.

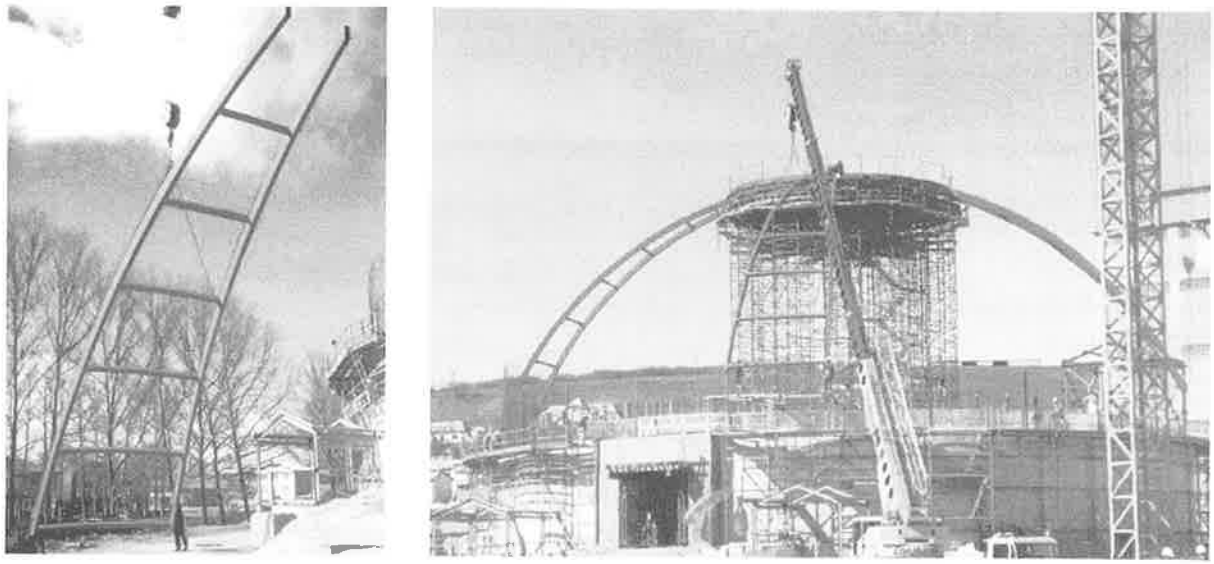


Figura 23. Montaje de las piezas metálicas que constituyen los meridianos de la cúpula sobre la estructura perteneciente al encofrado deslizante y unión, mediante soldadura, con la plataforma metálica apoyada sobre cimbra.

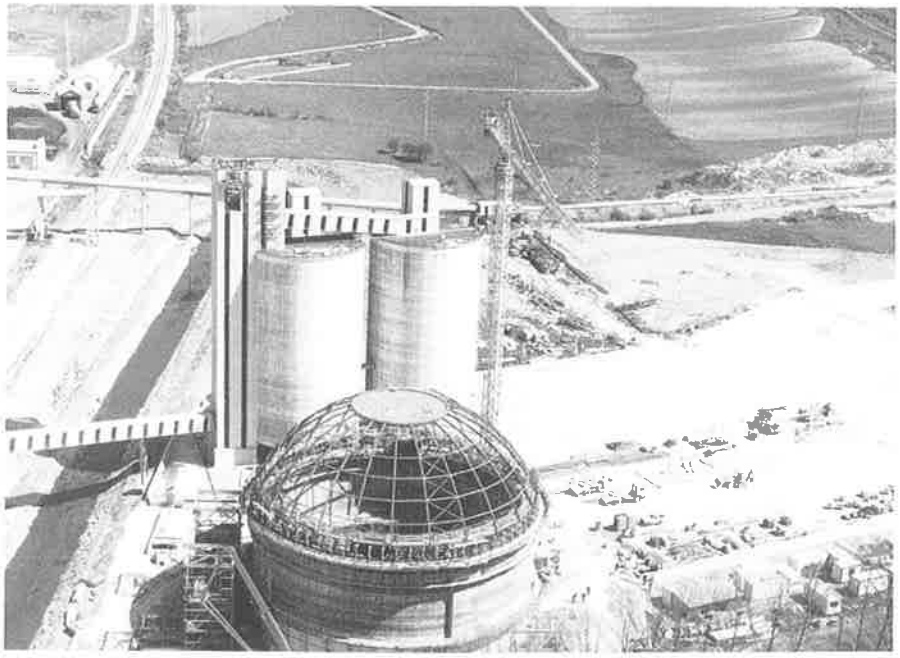


Figura 24. Aspecto general de la obra en el inicio de la construcción del fuste con encofrado deslizante y elevación simultánea de la cúpula metálica.

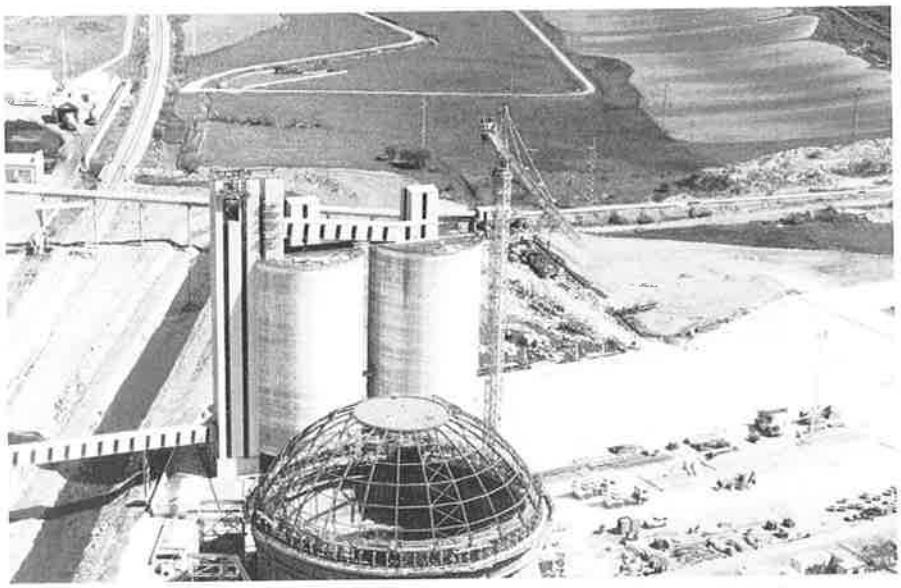


Figura 25. Construcción del fuste del silo, mediante el empleo del encofrado deslizante, que se eleva conjuntamente conla cúpula metálica.

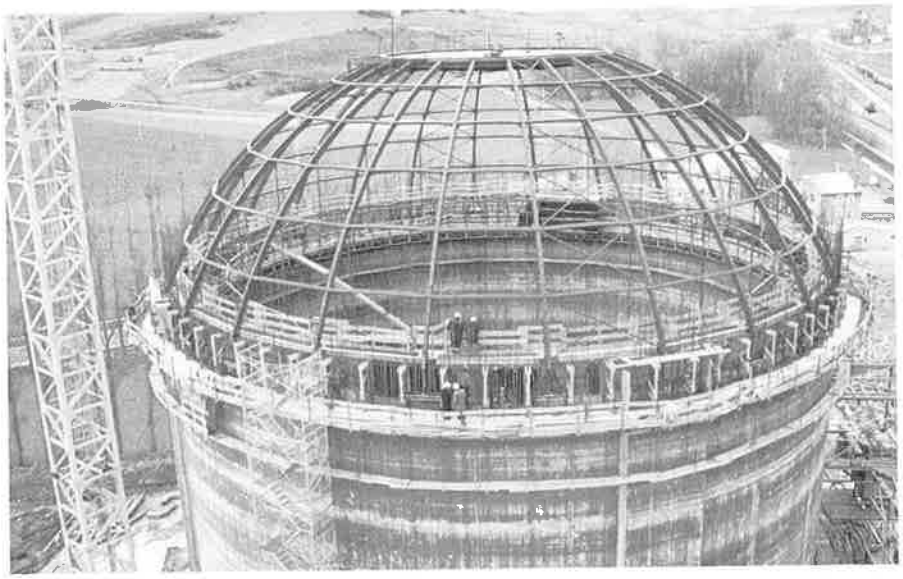


Figura 26. Aspecto de la cúpula, desde el interior del silo, durante el proceso de construcción del fuste con encofrado deslizante y elevación simultánea de la estructura metálica.

4.11. Desmontaje de elementos auxiliares y obras de terminación.

5. DATOS RELATIVOS A LA REALIZACIÓN DEL PROYECTO Y OBRA

– Propiedad: Cementos ALFA, S.A.

– Construcción: FCC (Fomento de Construcciones y Contratas)

– Proyecto de la estructura: EIPSA

– Encofrado deslizante: BYGGING Española

– Pretensado: BBR

– Estructura metálica: Talleres METAVI

– Instalaciones: STHIM Maquinaria

– Terminación de la obra: Año 1999

6. BIBLIOGRAFÍA

ACI 313 (American Concrete Institute). "Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials".

DIN 1055. Part 6. Design loads for buildings: "Loads in silo bins".

J.A. Sindel. "Temperature Differentials in the Wall of a Clinker-Filled Silo". ACI Journal/ January-February 1985.

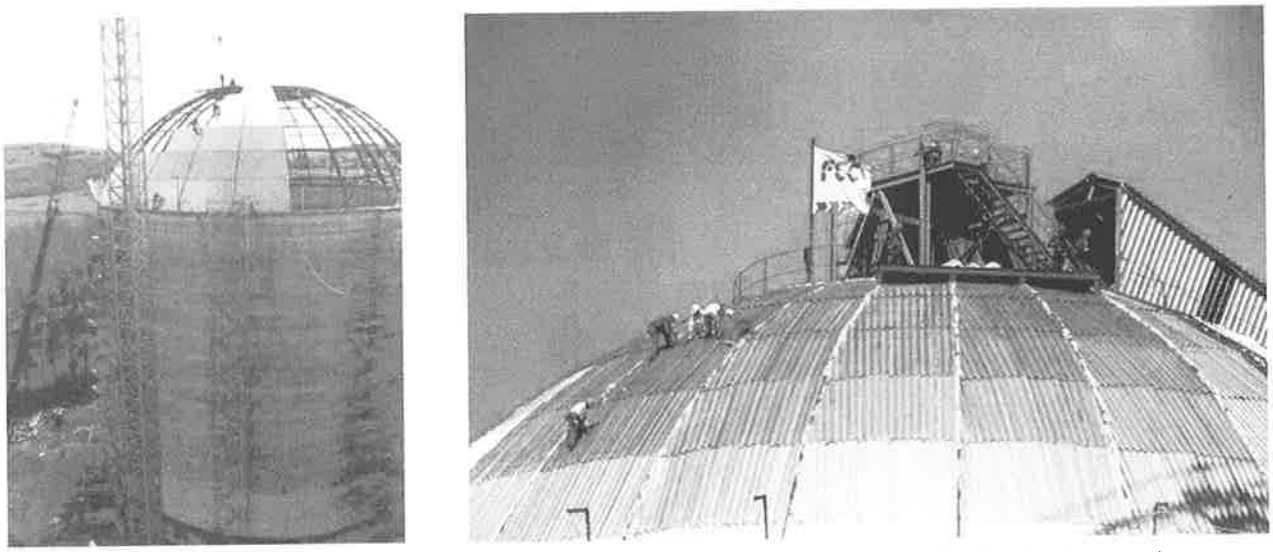


Figura 27. Montaje de chapa metálica de cobertura de la cúpula y mallazo para armado de la lámina de hormigón.

M. y A. Reimbert. "Silos. Teoría y práctica" (Edit. Américalee).

M. y A. Reimbert. "Silos II" (Edit. Américalee).

Sargis Safarian y Ernest Harris. "Design and construction of silos and bunkers". (Van Nostrand Reinhold, New York).

J.A. Llombart y V. Antón. "Depósitos pretensados. Consideraciones sobre el proyecto". Hormigón y Acero Nº 157. (4º Trimestre, 1985).

- S. Timoshenko, S.Woinowsky-Krieger. "Teoría de placas y láminas".

- Leonard R. Creasy. "Prestressed Concrete Cylindrical Tanks" (John Wiley and Sons).

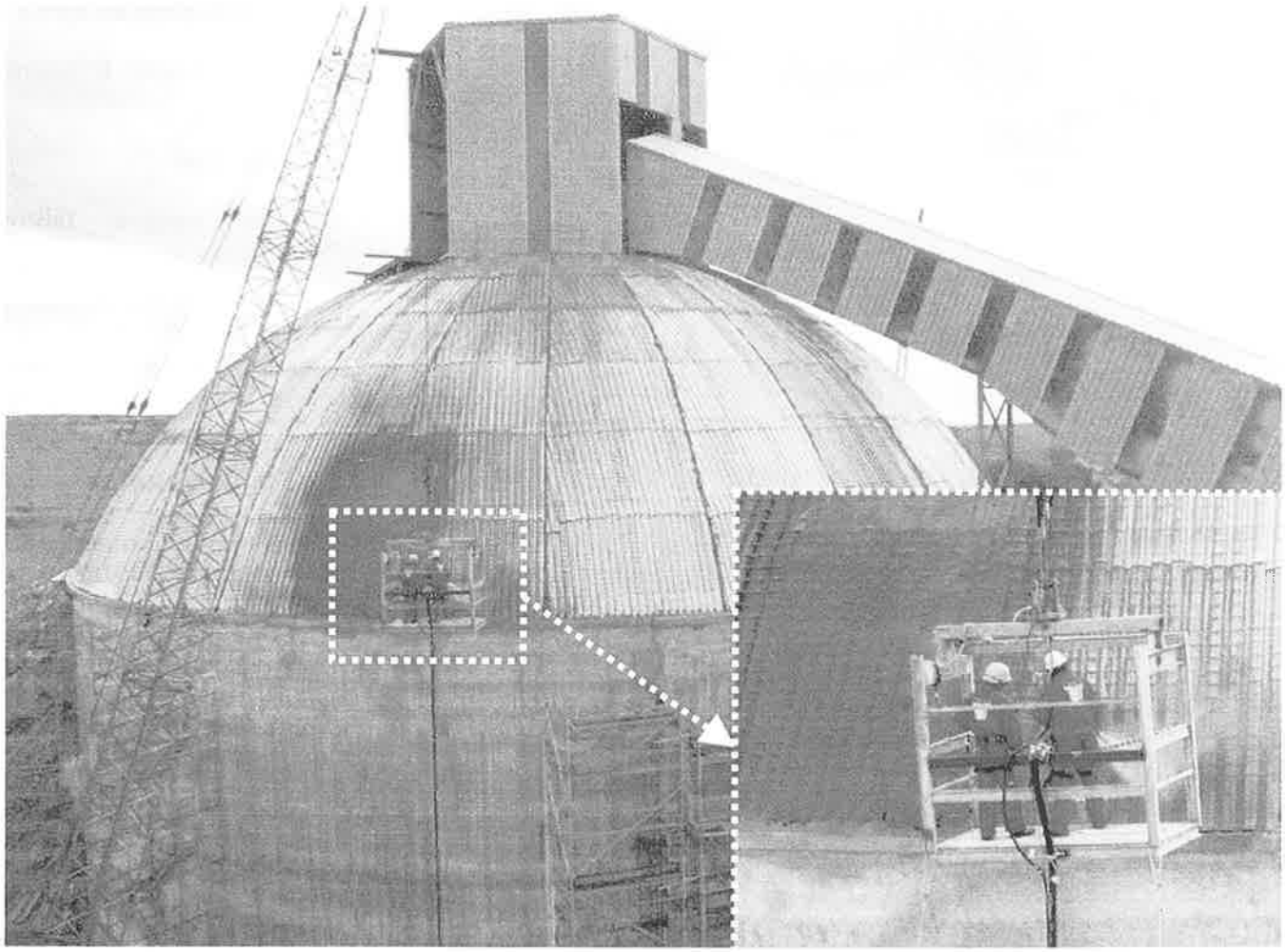


Figura 28. Aplicación de gunita en la cúpula. Espesor medio, 6 cm.