cúpula metálica geodésica en Mariel • Cuba

841-22

Jesús Sáinz Román, Dr. Ingeniero de caminos

SINOPSIS

La cúpula metálica geodésica, que sirve de cubierta al parque de prehomogeneización de una fábrica de cemento realizada en Mariel (Cuba), ha recibido uno de los premios «Sercometal 1979» destinado a las mejores construcciones metálicas.

En este artículo se hace una descripción detallada de la estructura y de los factores que han contribuido a elegir esta solución, así como de las distintas fases de la obra: diseño, fabricación, control y montaje.

Los ensayos se han verificado, a escala real, sobre los nudos que son los elementos clave de la estructura.

Ha sido proyectada por Centunión-Española de Coordinación Técnica y Financiera, S. A. y por Argynsa-Estructuras Metálicas, de Madrid (España), para Desarrollo Industrial de la Habana.

1. ANTECEDENTES

CENTUNION, Española de Coordinación Técnica y Financiera, S. A., está procediendo en Cuba a la instalación de una planta de cemento de 4.400 t/día de Clinker, estando a su cargo tanto el proyecto, como la fabricación de equipos, la supervisión de las obras civiles, montaje y puesta en marcha. La planta está ubicada en Mariel, a 30 km, al oeste de La Habana.

Elemento integrante de esta instalación es el Parque de Prehomogeneización. Dicho parque se encuentra entre la instalación de Trituración Primaria y Molienda de Crudo, y su misión es prehomogeneizar y almacenar los distintos componentes del crudo antes de su molienda fina, con el doble objetivo de procurar una mezcla químicamente lo más uniforme posible, independientemente de las fluctuaciones del material de cantera y garantizar un funcionamiento continuo de la instalación.

El tipo de parque más en boga actualmente y cuyo uso se va generalizando, es el parque circular. En él, el almacenamiento del material se va haciendo por capas superpuestas a lo largo de una corona circular, teniendo el conjunto la forma de una superficie tórica.

La extracción se hace a base de cortar dicha superficie por planos verticales, de manera que cada extracción tome material de todas las capas, lográndose con ello una gran homogeneización.

Para la planta de Mariel ha sido diseñado un parque circular con una capacidad de 52.000 t, lo que por cálculo da un parque de 92 m de diámetro.

El mantenimiento de las constantes del material, independientemente de las condiciones climatológicas, obliga a cubrir dicho parque. El objeto del presente artículo es describir los condicionamientos que ha habido a la hora de decidir la cubierta, las posibilidades que se estudiaron, así como una descripción completa de la solución adoptada en todas sus fases: diseño, fabricación, control y montaje.

2. CONDICIONAMIENTOS Y POSIBILIDADES EN EL DISEÑO DE LA CUBIERTA

Dada la situación geográfica de la zona, la cubierta debe soportar empujes de viento de hasta 190 kilómetros/hora.

Como alternativas en el diseño de la cubierta se estudiaron dos posibilidades:

- Utilización de la columna central de la máquina como soporte de la cúpula.
- Cúpula autoportante, es decir, sin ningún apoyo intermedio.

La primera alternativa obligaba a un desarrollo más lento de los diseños de cúpula y maquinaria, al hacer ambos proyectos interdependientes:

- Para el cálculo del apoyo central de la instalación, era necesario conocer las cargas transmitidas por la cúpula; pero a su vez, para el predimensionado de la cúpula, era necesario conocer la rigidez de la columna central como elemento soportante de la cubierta e integrado en la estructura de la misma.
- Desde un punto de vista estructural parecía más conveniente el independizar las deformaciones de dos estructuras radicalmente diferentes en su concepción y misiones. Concretamente, el orden de magnitud de las deformaciones admisibles en la cúpula, motivados por los efectos de viento, es bastante mayor que las que tomaría la columna central en razón de su trabajo.
- Finalmente, la utilización de la columna central como soporte de la estructura cubierta complicaría el desmontaje de la instalación mecánica en caso necesario (para reparación o reposición), pues sería preciso sustituir la columna central por apeos. Aparte del coste de los mismos en razón de su altura y las cargas a soportar habría de tenerse en cuenta:
 - La necesidad de prever en la cubierta puntos fuertes para ataque de los apeos.
 - La colocación de los mismos se vería dificultada por el material almacenado.

Por todo ello se decidió adoptar para el diseño la segunda alternativa, es decir, la cúpula autoportante.

Otros condicionantes al diseño eran:

- a) El Pliego de Bases del cliente obligaba a una estructura atornillada.
- b) La estructura sería fabricada en España y enviada a Cuba en piezas, de manera que el único trabajo a hacer en la zona de obras sería el montaje con pernos de alta resistencia.
- c) Sería conveniente obtener una cúpula con el menor peso posible compatible con las cargas a soportar, tanto desde un punto de vista económico obvio, como por las ventajas derivadas de un menor flete.

Los condicionantes anteriores aconsejaron como solución estructural la cúpula geodésica esférica reticulada en tres direcciones.

Las directrices de los elementos que forman la red se obtienen por intersección de la esfera con círculos máximos (cúpula geodésica). Con ello, todos los elementos tienen la misma curvatura, lo que simplifica grandemente la fabricación y en consecuencia el costo.

3. PROYECTO

- 3.1 El proyecto ha sido realizado conjuntamente por CENTUNION (1) y ARGYNESA (2), la cual asimismo ha hecho para CENTUNION la fabricación de la estructura.

El elemento tipo integrante de la malla es una celosía formada por perfiles HPE en cabezas, UPN en diagonales y doble angular como montantes.

El nudo como intersección de elementos está formado por un cilindro de acero con espesores variables según los esfuerzos y los correspondientes rigidizadores.

Este nudo es propiedad de CENTUNION y ARGYNESA.

El criterio geométrico de definición de la malla principal ha sido la siguiente: Sobre el conjunto del segmento esférico, que forma la cúpula, se ha tomado la parte comprendida entre dos meridianos que pasan por el polo y cuyo diedro es de 60° . Cada uno de estos meridianos se ha dividido en 5 partes, trazando los círculos máximos que resultan del corte de la esfera con el plano que pasa por el centro y cada dos puntos equivalentes así definidos.

Por los puntos de corte del meridiano contenido en el plano bisector del diedro, antes definido, y los círculos máximos números 2 y 4 de los cinco antes indicados, se trazan planos verticales paralelos a los que inicialmente definían el conjunto de $1/6$ de esfera, obteniendo así una serie de puntos de corte de éstos con los círculos ya definidos. Cada dos puntos de éstos se unen entre sí mediante círculos máximos de la esfera, obteniéndose que en cada nudo acometen 6 barras de círculo máximo. Todas estas barras son, como se ha indicado antes, celosías planas contenidas en el plano meridiano que pasa por cada dos puntos.

Sobre esta malla principal, cuyos elementos tienen una longitud aproximada de 11 m, se dispone un conjunto de correas intermedias que permiten el apoyo de la cobertura, proyectada con chapas galvanizadas plegadas con canales radiales.

Todo el conjunto estructural definido apoya sobre contrafuertes de hormigón armado de sección rectangular, cuya altura sobre el suelo es de 4,80 m. El elemento de unión entre ambos es una placa doble anclada en el hormigón mediante redondos roscados, por lo que se dejarán previstos unos cajetines en el contrafuerte a tal fin.

3.2 Acciones consideradas e hipótesis de cálculo

3.2.1 Acciones

Las acciones que se han tenido en cuenta para el cálculo de la cúpula son las siguientes:

1.^a Carga permanente, que incluye:

Peso propio de la estructura	45 kg/m ² , superficie
Peso propio de la chapa	10 kg/m ² , superficie

Suma 55 kg/m², superficie

2.^a Sobrecarga de uso, que responde en este caso al posible polvo acumulado en cubierta y se estima en 60 kg/m², superficie

3.^a Carga de viento.

Por indicación de la propiedad se siguió la norma cubana (IP-14 A de julio 1971) que para el caso a estudiar especifica:

- Presión media a 10 m sobre el terreno q_{10} : 175 kg/m².
- Coeficiente de sitio expuesto : 1,15.
- Coeficiente de reducción por superficie grande expuesta al viento: 0,73.
(Se ha estimado un rectángulo de igual altura y área que la cúpula, dando un ancho de 64,82 m).
- Coeficiente de forma:
Varía para cada punto según dicha norma en función del ángulo que forma el meridiano que pasa por dicho punto de la base y la dirección del viento γ_n .
- Coeficiente de altura γ_h .
- Dado que la permeabilidad o relación entre las áreas de abertura y superficie total está comprendida entre el 20 y 29 por 100 se toma un coeficiente de presión o succión interior igual a $\pm 0,50$.

Por todo ello la presión a considerar en cada nudo de la malla principal es el resultado de multiplicar la superficie que recoge por la presión:

planta general

$$P_{\omega} = 1,15 \cdot 0,73 \cdot \gamma_h \cdot \gamma_f \cdot 175 = \gamma_{\omega} \cdot 1,75 \text{ kg/m}^2$$

Con independencia se estudió el efecto de la presión o succión afectada del coeficiente 0,50.

4.º Finalmente se considera una variación de temperatura de $\pm 30^{\circ}$.

3.2.2. Coeficientes de ponderación

Según la citada norma cubana los coeficientes de ponderación a elegir son los siguientes:

	ACCIONES	
	Desfavorable	Favorable
Peso propio	1,2	0,9
Polvo	1,4	0
Viento	1,3	0
Temperatura	1,2	0

3.2.3. Hipótesis de Cálculo

En función de las acciones de cálculo indicadas, se han hecho las siguientes hipótesis:

alzado

planta

sector de 30°

- I. Efecto gravitatorio del peso propio, techumbre y sobrecarga de uso con un total como ya se indicó de 115 kg/m^2 de superficie.
- II. Efecto eólico debido a la carga variable $P_w = Y_w 175 \text{ kg/m}^2$. La carga de viento es siempre normal a la superficie.
- III. Evaluación del efecto de succión interior por permeabilidad afectando directamente a la ley de presiones de la cúpula (hipótesis II). Ya que el coeficiente 0,50 de permeabilidad es positivo en unos casos (presión) y negativo en otros (succión), se suma en cada caso al valor absoluto del viento a considerar para cada uno, será:

$$P'_w = (\gamma_w + 0,50) \cdot 175 \text{ kg/m}^2 \text{ si } \gamma > 0$$

$$P'_w = (\gamma_w - 0,50) \cdot 175 \text{ kg/m}^2 \text{ si } \gamma < 0$$

NOTAS:

1. TODOS LOS COMPONENTES DE UNIÓN DE LOS COMPONENTES DE LAS CÉLULAS CON EL TUBO DEBEN DE ESPESOR MÁXIMO 0,7 t.
 2. EL EMPALME DE LOS COMPONENTES SE DISPONDRÁ A 700 mm DEL TUBO DE 450-25.
 3. EL ESTRAÑALAMIENTO DE LOS PERFILES EN LA ZONA DEL NUDO DEBE SER EL NECESARIO PARA REALIZAR ADECUADAMENTE LOS CORRONES DE SOLDADURA.

nudos

celosías

TIPO W
LONGITUD DE LA CUERDA ENTRE Ejes DE NUDOS = 8 431,571
IGUAL LONGITUD DE RECUERDOS ENTRE Ejes DE NUDOS

TIPO K (ASIMETRICA)
LONG. CUERDA = 11 202,484

TIPO M (ASIMETRICA)
LONG. CUERDA = 11 506,348

IV. Para poder tener en cuenta el efecto de presión o succión interior con independencia del resto, se estudia esta hipótesis que corresponde a una presión $P'_w = \pm 0,50 \cdot 175 \text{ kg/m}^2$, que se superpone con la hipótesis II a fin de evaluar la situación más desfavorable entre su combinación y la hipótesis III.

V. Variación térmica de $\pm 30^\circ$.

3.3. Cálculo

3.3.1. Materiales

Las calidades de acero previstas han sido de A-42 b para los cordones de la malla principal y A-37 para el resto. Por ello las tensiones mayoradas no han de rebasar los límites de fluencia respectivos:

$$2.600 \text{ kg/cm}^2 \text{ y } 2.400 \text{ kg/cm}^2,$$

Para las uniones de fuerza de montaje se emplean tornillos AR de calidad 10 T., considerándose en los miembros comprimidos la sección bruta y en los traccionados la neta.

3.3.2. Estructura virtual de cálculo

La estructura principal se ha asimilado a un emparrillado espacial, sustituyendo las barras en celosía por vigas de alma llena de análoga inercia y sección.

3.3.3. Sistema de cálculo

Primeramente, y con el fin de definir las inercias y secciones de las barras, se realizó un cálculo previo como si se tratase de una cúpula de sección constante.

Una vez elegidas las secciones de las barras, se procedió al cálculo del emparrillado espacial por el método de las deformaciones con inversión matricial y, de acuerdo con los resultados obtenidos, se ajustó nuevamente la estructura para su comprobación y cálculo definitivo. En todos los cálculos con ordenador las cargas se situaron en los nudos de la malla principal.

Los cálculos siempre se han referido a media cúpula introduciéndose en los mismos según los casos, las simplificaciones de simetría y antimetría.

La salida del programa de ordenador son los esfuerzos en los nudos de la malla principal:

- Axil.
- Momentos flectores en nudos.

**situación
de extensímetros en el nudo**

— Cortantes en nudos para cada una de las hipótesis.

Con el fin de normalizar la fabricación, se unificaron en grupos las diferentes celosías. Por ello, una vez realizados los cálculos, fue preciso determinar para cada barra las combinaciones de esfuerzos más desfavorables y, seguidamente, determinar para todas las del mismo grupo aquella combinación más desfavorable que iba a condicionar el dimensionado. Dicha determinación fue hecha a través de un nuevo programa de ordenador preparado al efecto, y cuyo dato de salida era el perfil correspondiente a cada una de las barras de las celosías.

4. ENSAYOS

4.1 Objeto

El nudo es el elemento clave de la estructura, y, a diferencia de otros elementos como las celosías, apoyos, etc., el cálculo del mismo por aplicación de la Resistencia de Materiales o Elasticidad encuentran dificultades debido a la complejidad de formas que tiene.

Por ello se consideró imprescindible la realización de un ensayo a escala real (es decir, sobre un nudo de la cúpula), que permitiese conocer el comportamiento del mismo, así como las deformaciones o tensiones correspondientes frente a determinados estados de sollicitación desfavorables y compararlo con el comportamiento teórico deducido de los cálculos. Con ello se añadía un factor de seguridad adicional en la estructura.

4.2 Realización de los ensayos

Los ensayos se realizaron en las instalaciones y laboratorios de ASINEL.

El nudo objeto de ensayo fue uno de los construidos para la cúpula y al mismo se le acoplaron 6 tramos de celosía con una longitud de 4 m, longitud suficiente para poder reproducir en el nudo los esfuerzos transmitidos del mismo modo que se haría realmente en la cúpula.

Al extremo de cada celosía se dispuso un gato hidráulico capaz de transmitir una carga de hasta 20 t.

Esto daba la posibilidad de inducir en el nudo, tanto en tracción como en compresión, un esfuerzo de 80 t, valor por encima de los máximos obtenidos por cálculo.

Para la determinación de las deformaciones y tensiones se dispusieron extensímetros sencillos o dobles en diversos puntos del nudo.

4.3 Ensayos efectuados

Dado que los esfuerzos que llegan al nudo no son totalmente independientes, pues en todo caso debe cumplirse el equilibrio del mismo, las combinaciones de esfuerzos más desfavorables que se hicieron fueron de dos tipos:

- Cargas en extremos de celosías opuestas.
- Cargas en extremos de celosías alternas (carga en distribución estrellada).

Las tensiones en el nudo, medidas a través de los extensímetros, resultan en todas las situaciones de carga claramente inferiores a los valores admisibles.

5. MONTAJE

5.1 Dentro de los términos del Contrato entre CENTUNION y la Propiedad, el montaje de la cúpula sería hecho por esta última con el asesoramiento técnico de CENTUNION.

Este extremo y el hecho de la gran distancia entre el punto de diseño y fabricación y el de montaje obligaba a asegurar —más que en otros casos— el éxito del montaje, tanto desde el punto de vista del sistema empleado como del perfecto encaje de las celosías y los nudos.

Dicho encaje sería necesario que se hiciese sin deformar los elementos, dado que ello introduciría un estado tensional previo a la estructura no previsto en los cálculos.

5.2 Premontaje

Con el fin de obviar las dificultades anteriormente descritas, se procedió a premontar en España la totalidad de la cúpula.

Para ello se consideró dividida la cúpula en seis sectores, proce-

diéndose al premontaje de cada uno de ellos, para, seguidamente, proceder a su numeración, embalaje y envío.

Únicamente se dejaban montadas las celosías y nudos de contacto de un sector con el siguiente, a fin de garantizar la continuidad.

Asimismo, el premontaje sirvió para terminar la fabricación de los nudos.

En efecto, con objeto de evitar las sobretensiones de las celosías, no se terminaron los nudos en el taller, sino que de los mismos se dejó pendiente el ensamble al cilindro de los perfiles de conexión a las celosías, perfiles a los que irían atornilladas éstas.

Para el premontaje, se armó cada celosía atornillando a cada extremo dichos perfiles de conexión y presentando el conjunto contra los nudos.

Acto seguido, en los puntos donde dichas conexiones atacaban al nudo, se procedió a la soldadura.

Finalmente, se desatornillaban las celosías y se procedía al embarque de celosías y nudos previa numeración.

Respecto a la numeración, si bien las celosías equivalentes de cada sector serían intercambiables, se dio una numeración unívoca a cada elemento, de manera que durante el montaje se uniesen los elementos del mismo modo que durante el premontaje. Con ello quedaba anulada cualquier repercusión en el montaje de errores milimétricos de fabricación.

5.3 Montaje

El sistema previsto de montaje, el cual ha dado resultados satisfactorios ha sido:

- Inicialmente, según se indica en los planos adjuntos, se montan en posición horizontal, apoyados provisionalmente sobre castilletes, tres sectores completos —con excepción de las barras que definen el hexágono central y sin inclusión de cabios y correas— situados alternativamente. A continuación se iza dicho hexágono sobre un castillete central, al que se incorpora un plúmín para la manipulación del mismo.

montaje de la cúpula

detalle apoyo arco principal

fases de montaje

1. Preparación y colocación de castilletes; 2. Armado del módulo; 2a. Armado del exágono superior y de la pluma central; 3. Montaje del exágono superior con plúmín; 4. Elevación del módulo y amarre con el exágono; 5. Una vez montados los tres módulos, cerrar los tres huecos pieza a pieza o en secciones triangulares.

planta

- Posteriormente, con la disposición de grúas indicadas en los planos, se abaten los tres sectores sobre la línea de rótulas existentes hasta que se acoplan y sueldan al hexágono central formando un conjunto ya estable. En esta situación se desmonta el castillete central y se completa la malla principal de los tres sectores restantes. En esta fase se precisa disponer algún castillete intermedio para evitar deformaciones excesivas de las vigas principales. Tras el montaje y soldadura de la estructura principal, se procede a la colocación de cables y correas.
- Todas estas fases de montaje han sido meticulosamente calculadas, estimándose los esfuerzos que han de soportar castilletes y grúas y comprobando las tensiones que han de presentarse en la malla principal.
- El tiempo invertido por el Cliente en el montaje de la cúpula ha sido de dos meses.

6. DATOS TECNICOS

Diámetro de la cúpula	92,00 m
Altura desde la cota de empotramiento de contrafuertes	26,00 m
Altura del suelo	30,35 m
Radio de la esfera que pasa por el plano medio	53,69 m
Superficie de la cúpula	8.771,00 m ²
Superficie en planta	6.648,00 m ²
Peso de la estructura	468,00 t

Indices:

Kilogramo de estructura por m ² de superficie de cúpula	53,35
Kilogramo de estructura por m ² en planta	70,40

7. REALIZACIONES SIMILARES

Con igual tecnología que la cúpula descrita se ha diseñado y se encuentra en fase de montaje, en colaboración con ARGYNESA, la cúpula metálica geodésica de 96 m de diámetro para la fábrica de cemento de Hornos Ibéricos en Carboneras (Almería).

Se encuentra en fase de diseño por CENTUNION, una cúpula metálica costillada de 88 m de diámetro, para la fábrica de cemento de Loma-Negra en Catamarca (República Argentina), proyecto y supervisión de montaje adjudicada a CENTUNION en concurso internacional.

résumé

COUPOLE METALLIQUE GEODESIQUE, A MARIEL, CUBA

Jesús Sáinz Román, Dr. Ingénieur des Ponts et Chaussées

La coupole métallique géodésique qui sert de couverture au parc de préhomogénéisation d'une usine de ciment réalisée à Mariel, Cuba, a reçu un des prix «Sercometal 1979» destiné aux meilleurs constructions métalliques.

Cet article fait une description détaillée de la structure et des facteurs qui ont contribué à choisir cette solution ainsi que les diverses phases des travaux: projet, fabrication, contrôle, montage.

Les essais ont été fait, à échelle réelle, sur les noeuds qui sont les éléments clé de la structure.

Cette coupole a été projetée par Centunión-Española de Coordinación Técnica y Financiera, S.A. et par Argynsa-Estructuras Metálicas, de Madrid pour Desarrollo Industrial de la Havane.

summary

METAL GEODESIC DOME, MARIEL - CUBA

Jesús Sáinz Román, Dr. Civil Engineer

One of the 'Sercometal 1979' awards to outstanding metal constructions was accorded to the geodesic dome serving as the roof for the pre-homogenisation yard of a cement plant built in Mariel, Cuba.

This article is a detailed description of the structure and of the factor leading to the selection of this solution, as well as of the various stages of the project: design, fabrication, supervision and assembly.

Tests were made at actual scale on the nodes, key elements of the structure.

The project was developed by Centunión-Española de Coordinación Técnica y Financiera, S.A. and Argynsa-Estructuras Metálicas of Madrid (Spain) for Desarrollo Industrial of Havana.

zusammenfassung

GEODATISCHE METALLKUPPEN IN MARIEL - KUBA

Dr. Jesús Sáinz Román, Hoch- und Tiefbauingenieur

Die geodätische Metallkuppel, die zur Abdeckung der Vorhomogenisierungsparkes einer Zementfabrik in Mariel (Kuba) dient, wurde mit einem der Preise «Sercometal 1979» ausgezeichnet, der den besten Metallbauten verliehen wird.

In diesem Artikel werden die Struktur und die Faktoren, die zur Auswahl dieser Lösung beigetragen haben, sowie die verschiedenen Bauphasen: Entwurf, Herstellung, Kontrolle und Montage beschrieben.

Die Versuche wurden in reeller Form an den Knoten, den Schlüsselementen der Struktur, durchgeführt.

Die Kuppel wurde von der Centunión-Española de Coordinación Técnica y Financiera, S.A. und der Argynsa-Estructuras Metálicas de Madrid (Spanien) für die industrielle Entwicklung in La Habana entworfen.