

# Cúpulas hormigonadas sobre cimbras flexibles infladas (\*)

Por TOMAS RIPA

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

*Se pasa breve revista al enorme desarrollo que ha experimentado la tecnología de las construcciones laminares; la problemática que plantea hoy el proceso constructivo de las láminas de hormigón y los intentos plausibles de reducir tiempo y costos de ejecución apelando, o bien a la prefabricación de elementos, o bien al uso de láminas flexibles, que hinchadas de aire, hacen las veces de cimbras, recuperables para posteriores reutilizaciones; sobre las cuales se hormigona antes o después de la operación de inflado; se describe con detalle el sistema "Binishell"; se pasa revista brevemente a los modernos métodos de cálculo por elementos finitos y se concluye exponiendo las posibilidades de aplicaciones futuras.*

## 1. INTRODUCCION

La bella cúpula de fábrica que cubre la tumba de Agamenón constituye, aun hoy, motivo de atracción y de admiración para el turista que visita Micenas; desde la más remota antigüedad hasta nuestros días se vienen proyectando y construyendo estructuras laminares para cubrir vanos de grandes luces sin apoyos intermedios; al parecer, las cúpulas han sido las primeras manifestaciones del género en la cronología de la civilización; cabría preguntarse si la cúpula de San Pedro en Roma que tiene 45 metros de diámetro y nada menos que 3 metros de espesor, debe calificarse también de estructura laminar; sea como fuere, lo cierto es que podríamos citar bellos ejemplos de cúpulas, de distintas épocas y tecnologías tan distintas, como Santa Sofía en Constantinopla (Siglo V); 30 metros de diámetro); la famosa cúpula de Miguel Angel (siglo XVI); el mercado de Algeciras (1934; con 47 metros de diámetro); el Palacio de los Deportes en Roma (1958, con 130 metros de diámetro); el Palau Blaugrana en Barcelona (1972, con 80 metros de diámetro); el Estadio cubierto de la Universidad de Illinois (1973, con 140 metros de diámetro); etc.

A la maciza y pasada cúpula de fábrica le sucedió la ligera cúpula de hormigón armado, con un extraordinario ahorro en materiales y peso; así la

famosa cúpula de Miguel Angel tiene 3,0 metros de espesor y pesa unos 7.000 kgs/m<sup>2</sup>; mientras que la cúpula del Mercado de Algeciras (E. Torroja) tiene solamente 9 cm. de espesor de hormigón y pesa tan sólo 260 kgs/m<sup>2</sup>; si la cúpula de San Pedro tiene una relación e/D = 1/15 (e = espesor; D = diámetro), la del Mercado Central de Basilea, tiene una relación e/D = 1/705 (e = 8,5 cm; D = 60 m.)

El enorme desarrollo tecnológico de la construcción laminar con estructuras cada vez más imponentes, ya en pleno siglo XX, se debió a los progresos en el campo de la Elasticidad, y a la incesante investigación sobre modelos reducidos en Laboratorio, que permitía sancionar la validez de las teorías y comprobar el grado de exactitud de los resultados del cálculo. El advenimiento del computador electrónico y la aparición de modernos métodos de análisis —entre otros, el de elementos finitos, que más adelante comentaremos— están facilitando hoy al Proyectista la labor de diseño y de comprobación del estado tensional y deformacional en láminas, sin apenas limitaciones en su forma geométrica, en el número, forma y dimensiones de sus aberturas, ni en la tipología de las cargas y acciones que solicitan a la estructura laminar; sin embargo, la construcción de las láminas en general, y las cúpulas, en particular, ha tropezado con un serio inconveniente: el proceso constructivo a base de cimbras y encofrados, convencionales, repercute muy desfavorablemente en el costo del producto final; refiriéndonos a las láminas de hormigón; había que realizar por tanto un esfuerzo

(\*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 31 de marzo de 1981.

imaginativo y creador, desde el punto de vista constructivo para obviar este inconveniente y hacer que la técnica constructiva avanzara al mismo paso que las de diseño y análisis estructural; de ahí, los plausibles intentos de mejorar el sistema constructivo y los costes, apelando a la prefabricación de elementos y reduciendo a su mínima expresión, el volumen de hormigón "in situ", sobre cimbra y encofrado tradicionales; existen notables realizaciones de láminas construidas con elementos prefabricados; otro plausible intento —en el mismo sentido, representa el sistema de utilizar láminas flexibles auxiliares —membranas neumáticas—, a manera de cimbra-encofrado, que se hinchan con aire, aplicando sobre ellas el hormigón y las armaduras, antes de su inflado; después se aplica el aire a reducida presión y la lámina flexible se eleva con el hormigón fresco y la ferralla, hasta alcanzar la forma prefijada; después de que el hormigón ha endurecido suficientemente (de 1 a 3 días, aproximadamente), se procede al desinflado y a la recuperación de la membrana neumática, para su posterior reutilización; también puede inflarse la membrana y después aplicar sobre ella un hormigón proyectado o gunitado. Existen también notables realizaciones con estos sistemas. Más adelante, describiremos con detalle el sistema "Binishell" en la actualidad limitado a cúpulas de hasta 40,0 metros de diámetro, que permitirá al lector darse una idea de las posibilidades del sistema constructivo con cimbras flexibles neumáticas y recuperables.

### 2. MEMBRANAS NEUMATICAS

Se utilizan, no solo como cimbras, sino también como láminas de cubierta en construcciones no permanentes; así para pabellones de exposiciones, naves de almacén, provisionales, etc., también se ha pensado en sus ventajas para construir viviendas, laboratorios y centros de trabajo en la superficie lunar; en la República Federal de Alemania, puede verse desde hace años, una curiosa aplicación de las membranas flexibles neumáticas. Las obras de edificación (hasta 5 a 6 plantas), se envuelven en los meses de otoño-invierno, con gigantescas membranas, que hinchadas de aire a presión constantemente mantenida, protegen a la obra y a los operarios de las inclemencias y rigores del clima; el Constructor evita así la necesidad de interrumpir con excesiva frecuencia los tajos de trabajo, durante los duros meses invernales y permite acortar los plazos totales de la obra; unas grandes esclusas permiten el acceso de los obreros, personal de obra y vehículos de transporte de materiales al interior de la membrana ó viceversa.

Estas membranas son muy flexibles, con espesores de 1 a 2 milímetros escasamente; de materiales perfectamente estancos al aire; generalmente de neopreno reforzado con nylon; o bien de nylon revestido de vinilo; se inflan con aire a baja presión; presión que se mide y registra continuamente, para garantizar su constancia, hasta que llegue el momento del desinflado.

Hace 30 años que Bird hizo la primera aplicación práctica de las membranas neumáticas. En 1942, Neff construyó, al parecer por primera vez, una cúpula de 45 metros de diámetro, utilizando una membrana flexible que infló con aire; colocando después la ferralla y aplicando gunita contra la cimbra neumática. El arquitecto italiano Dante Bini, sustituyó posteriormente la gunita, que resultaba cara, por el hormigón "in situ"; en el conocido sistema "Binishell", se coloca la ferralla y se extiende el hormigón, con aditivos retardadores de fraguado, sobre la membrana extendida sobre el terreno previamente compactado y bien nivelado; después se insufla aire con ventiladores bajo la membrana que se eleva paulatinamente junto con el hormigón fresco y las armaduras hasta alcanzar la forma geométrica preestablecida; para evitar el deslizamiento o escurrimiento del hormigón previamente se le recubre con una membrana externa; que hace las veces de encofrado exterior (cloruro de polivinilo). Ambas membranas flexibles —externa e interna— son correctamente fijadas a la viga circunferencial de cimentación de la cúpula.

### 3. SISTEMA "BINISHELL"

Las sucesivas fases del proceso constructivo, que se describen en los croquis de la Figura 1, son las siguientes:

#### 3.1. Nivelación del terreno

Construcción de la viga perimetral, circular, para la cimentación de la cúpula; esta viga debe soportar las cargas verticales y horizontales (empujes); transmitidos por la cúpula; sirve también para anclar la membrana neumática interna y la membrana externa de cloruro de polivinilo; así como para el anclaje de las barras de armaduras y de los muelles o resortes helicoidales de acero que permiten, como veremos, dar la forma definitiva a la membrana totalmente presurizada, en su estado final. Deben colocarse también los conductos de aducción del aire, por debajo de la viga de cimentación.

# CUPULAS HORMIGONADAS SOBRE CIMBRAS FLEXIBLES INFLADAS

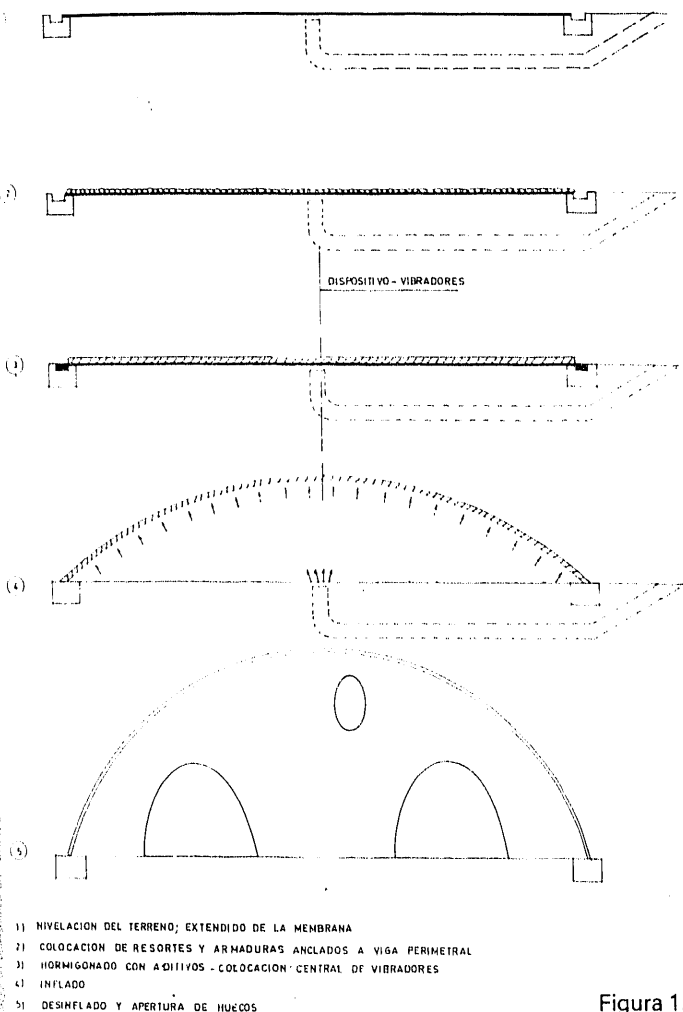


Figura 1.

## 3.2. Ventiladores centrífugos o soplantes en número de 2 a 4 unidades

Se prevén unidades en reserva para el caso de avería de algún ventilador; alimentación eléctrica con grupo electrógeno de reserva, para el caso de corte en el suministro de fluido eléctrico; la presión de hinchado, comprendida entre 300 y 400 milímetros de columna de agua (sobrepresión respecto de la presión atmosférica), se mide con el correspondiente manómetro y se controla mediante un registro continuo.

## 3.3. Extendido y fijación de la membrana flexible (neopreno reforzado con nylon de 1 a 2 milímetros de espesor)

Su borde se fija a un tubo rígido anclado debidamente en la viga de cimentación.

## 3.4. Ferralla

Los trozos de barras, convenientemente solapados, se introducen por el interior de resortes ó muelles helicoidales de acero, que formando una malla, se anclan asimismo a la viga de cimentación; al inflarse la membrana, los resortes se alargan paulatinamente al aumentar el paso de la hélice, adaptando su desarrollo al de la membrana; las barras de acero consecutivas, deslizan una sobre otra, a lo largo de sus zonas de libre solape; la longitud de solape disminuye, por tanto, paulatinamente desde un máximo, al principio del inflado, hasta un mínimo, cuando la membrana alcanza su posición final, a plena presurización.

La colocación de la ferralla exige 15 operarios durante 16 horas de trabajo, tratándose de una cúpula de 36 metros de diámetro.

## 3.5. Puesta en obra del hormigón

Se trata de hormigón que normalmente puede hoy colocarse con bomba (hormigonado neumático); el hormigón se fabrica con aditivos plastificantes para mejorar su trabajabilidad y sobre todo con aditivos retardadores del proceso de fraguado; cuyos efectos duran unas 8 horas desde el inicio de la operación de hormigonado; para una cúpula de 36 a 40 m. de diámetro puede contarse con 2 o 3 horas para la colocación y extendido del hormigón; 1 hora aproximadamente para el inflado de la membrana y 1 hora, más o menos, para el vibrado del hormigón; en todo caso, el vibrado debe realizarse antes del inicio del fraguado.

## 3.6. Membrana exterior

Sirve de encofrado externo para contener el hormigón fresco durante la operación del inflado y elevación de la membrana neumática y para contener el hormigón también durante las operaciones posteriores del vibrado; también protege al hormigón de la acción directa de la intemperie, evitando la evaporación del agua necesaria para las reacciones de fraguado y primer endurecimiento.

## 3.7. Vibrado

Antes de inflar la membrana, se coloca un sistema especial de vibración sujeto a un eje central, fijado a las armaduras; la vibración procede helicoidalmente sobre la membrana externa, una

vez que la membrana ha alcanzado el estado final a plena presurización.

### 3.8. Inflado

El aire impulsado por los ventiladores soplantes, a baja presión (300 a 400 mm. de c.a.), penetra por tuberías de gran diámetro, bajo la membrana flexible, que se eleva paulatinamente y con ella el hormigón fresco y la ferralla encima.

### 3.9. Desinflado (o descimbrado)

Después del vibrado (1 hora aproximadamente), la presión del aire se mantiene a un nivel constante, midiéndola con manómetro y con registro continuo; así hasta que el hormigón haya endurecido suficientemente; según las condiciones climáticas ambientales y el tamaño de la cúpula, puede tardarse de 1 a 3 días hasta descimbrar.

Para una cúpula de 36 m. de diámetro se procede al descimbrado, cuando el hormigón tiene una resistencia de 100 kg/cm<sup>2</sup>, por lo menos. Se retira primero la membrana externa y se inspecciona la superficie del hormigón para repasar con mortero eventuales defectos o irregularidades superficiales; el desinflado se practica gradualmente en unos 30 a 60 minutos hasta reducir la presión a cero; la membrana neumática puede entonces recuperarse, revisándola y reparándola, en caso necesario, para ulteriores aplicaciones.

### 3.10. Apertura de huecos

Los huecos de paso (puertas) y los de iluminación y ventilación (ventanas), cualquiera que sea su forma y tamaño, se replantean sobre la cúpula, marcándolos, de acuerdo con los planos constructivos y de detalle; después se corta el hormigón, incluso los hierros de armadura, con martillos perforadores, y generalmente con sierras circulares de discos de carborundun.

### 3.11. Aislamiento térmico

Para evitar un adverso gradiente térmico a través del espesor del hormigón, que motivaría fuertes tensiones adicionales, se aplica lo antes posible un aislamiento térmico externo; generalmente, extendiendo una capa de poliuretano rígido de 20 milímetros de espesor; (en caso necesario; por ejemplo, en auditoriums de música; salas de espectáculos, etc, se suele aplicar asimismo un aislamiento acústico interior para evitar fenómenos de resonancia y reverberación del sonido).

Digamos por último, que cada cúpula construida puede someterse, si se quiere, a una prueba de carga — como se hace con los puentes y otras estructuras — antes de entregarla al servicio; para ello, se puede utilizar con facilidad el mismo equipo de ventiladores y conductos, aspirando aire; se crea así una depresión interna ó una sobre-presión externa, que actúa radialmente; esto es, en sentido normal a la superficie media de la lámina; se determina por cálculo previamente la "presión (o sobrepresión) de prueba" que produce efectos equivalentes a los que producirá la aplicación de las cargas y sobrecargas de servicio (acción de la nieve, etc); cuando los esfuerzos axiales y momentos flectores según los meridianos son prácticamente concordantes, se tiene determinada la "presión de prueba" radial a aplicar (o bien un 85 % de la misma); se puede medir la flecha y corrimientos en la cúspide y puntos característicos de la cúpula; instalando "strain-gauges" o dispositivos similares, puede medirse las deformaciones en diversos puntos de la estructura y de ahí, deducirse su estado tensional; los valores medidos deberán ser cotejados con los valores obtenidos mediante el análisis y cálculo estructural; tanto la carga como la descarga deberá practicarse por sucesivos escalones; en cada uno de ellos, se anotan las lecturas de los instrumentos de medición; conviene observar las flechas o corrimientos remanentes o no recuperables, después de descargada la estructura, para enjuiciar su comportamiento desde el punto de vista de la elasticidad; en cualquier caso, como es obvio, las influencias térmicas y de soleamiento durante la realización de la prueba deben tenerse muy en cuenta para corregir oportunamente los valores medidos de corrimientos y deformaciones.

## 4. ANALISIS ESTRUCTURAL

Las láminas flexibles neumáticas que tienen solo de 1 a 2 mm. de espesor, se calculan en el "estado membrana"; admiten, en efecto, solo esfuerzos en el plano tangente a la superficie media de la lámina y precisamente esfuerzos de tracción; el análisis estructural deberá por tanto asegurarnos de que, en cualquier punto de la membrana neumática, hay siempre tracciones residuales, aun en las hipótesis pésimas de sollicitación; se trata por tanto, de crear un estado previo de tensiones de tracción, mediante la presión del aire insuflado, tal que la posterior actuación de las sobrecargas y acciones de servicio, en ningún punto de la lámina, puedan provocar fenómenos de inestabilidad ó de pandeo, al entrar la lámina en compresión; es más, debe

## CUPULAS HORMIGONADAS SOBRE CIMBRAS FLEXIBLES INFLADAS

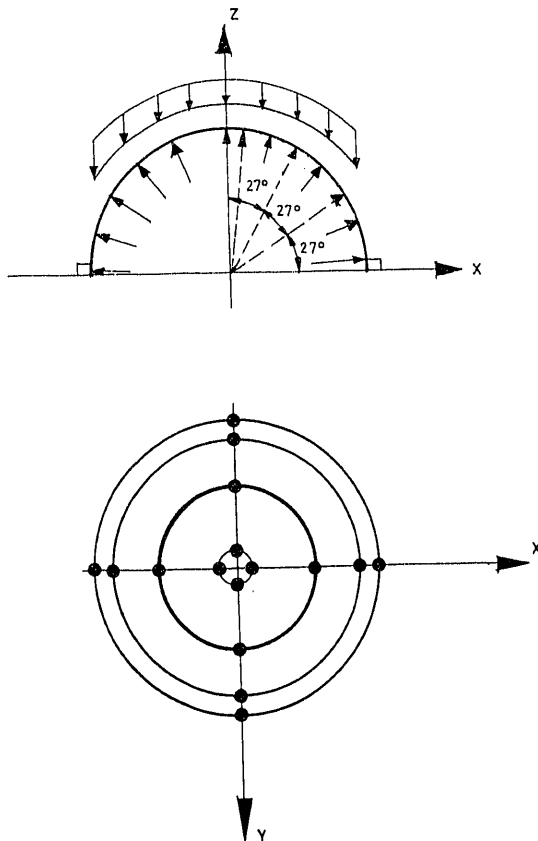
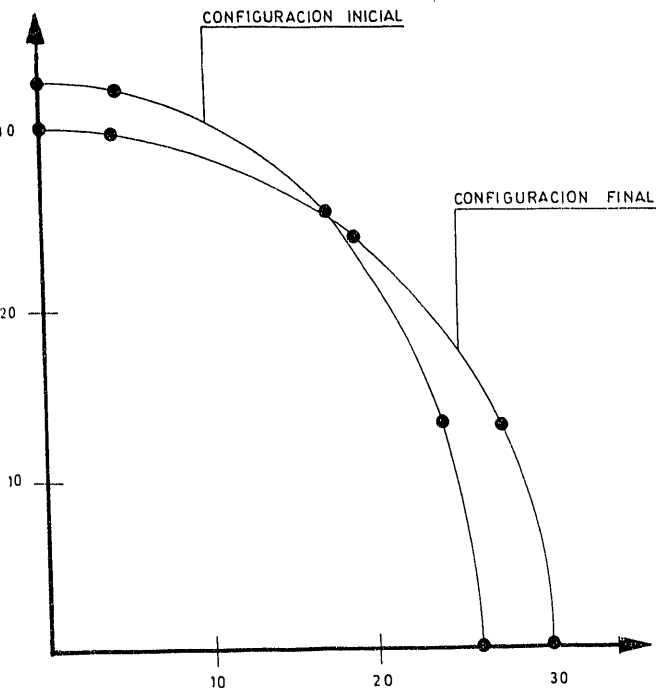


Figura 2.

mantenerse una "reserva de tracciones", que garanticen el debido coeficiente de seguridad. Al cargar la membrana, los corrimientos que experimenta no son despreciables; especialmente durante las fases de inflado; se parte por tanto, de un comportamiento no lineal de la membrana.

El análisis estructural tiene por objeto determinar la configuración final de la membrana neumática, al final de la presurización, a partir de su configuración y condiciones al inicio de la misma o viceversa; durante las fases de servicio, el estado tensional, como hemos dicho, será exclusivamente un estado de tracciones en cualquier punto de la membrana; si ésta se utiliza como cimbra flexible, y se hormigona o gunita, después del inflado, interesa conocer la configuración, a plena presurización, que lleve la cimbra al estado final de "hormigonado acabado", previamente establecido, de acuerdo con las condiciones estáticas de lámina de hormigón, teniendo presente los fenómenos diferidos de deformación del hormigón (fluencia bajo carga) y que la forma geométrica, correctamente conseguida de la lámina de hormigón, es importante frente a eventuales problemas de pandeo. En la figura 2, se representa esquemáticamente la deformación de una cimbra inflada semiesférica, bajo las cargas del hormigón fresco.

En un trabajo de Ching-Tsang-Li y John W. Leonard en el "Journal of the engineering mechanics division" (A.S.C.E.), se informa sobre un método de análisis, aplicando un modelo de elementos finitos a una membrana neumática de configuración o contornos cualesquiera, y bajo la hipótesis de comportamiento no lineal de la membrana. Los elementos propuestos son cuadriláteros curvilíneos con los puntos nodales situados en la superficie media de la lámina. Un proceso de "incrementos finitos", permite pasar por sucesivas posiciones espaciales de la membrana durante las fases de hinchado; conocidas las coordenadas nodales en una posición cualquiera (i) y determinados los incrementos (componentes de corrimientos) de las mismas, se determinan las coordenadas relativas a la posición (i + 1); así como las tensiones correspondientes (ver Figura 3); el cálculo se basa en el teorema de los trabajos virtuales; la presión interior actúa normalmente a la superficie de la membrana en todo momento y en cualquier posición durante el proceso de su deformación.

Una vez inflada, la membrana resulta mucho más rígida; la actuación de las cargas de servicio, origina, por esto, corrimientos "infinitesimales"; sin embargo, en el caso de utilizarse como cimbra hemos visto cómo interesa lograr la forma correcta, previamente establecida, para la lámina de hormigón; en estos casos, puede aplicarse el mismo método por "incrementos finitos", partiendo de la configuración geométrica y estado tensional de la lámina, al final del hinchado; bajo las cargas del

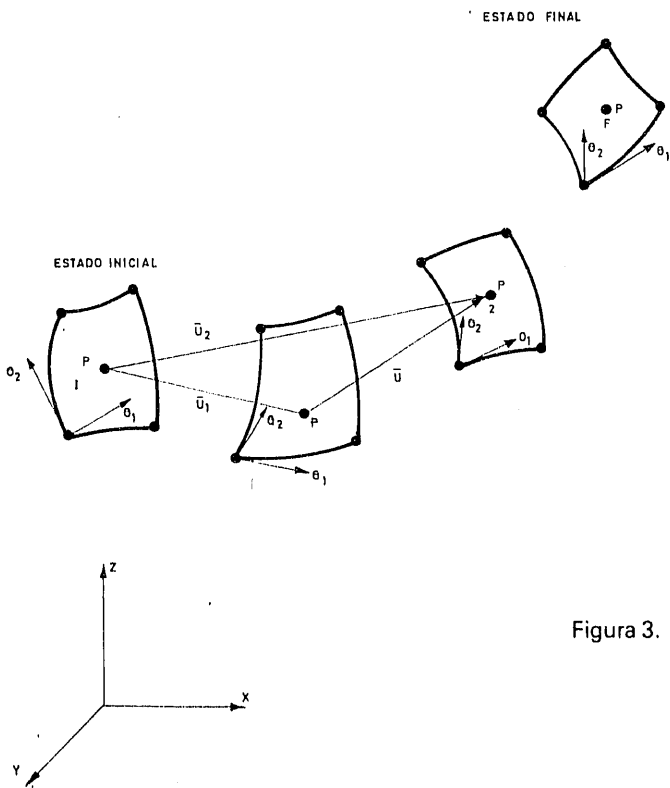


Figura 3.

hormigón o gunita, la membrana neumática deberá alcanzar el estado final que deseamos.

5. POSIBLES APLICACIONES FUTURAS

En la figura 4, se esquematiza el caso de una nave (almacén, hangar, etc.), de planta rectangular; sobre esta se construye una lámina de hormigón,

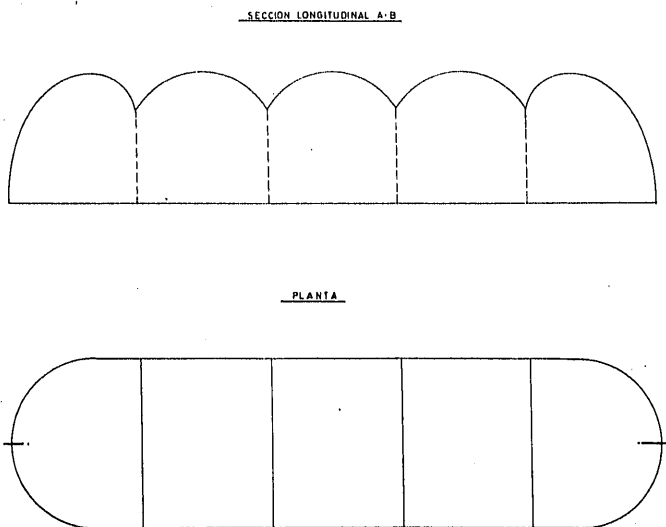


Figura 4

lobulada, con doble curvatura; y terminada en sendos casquetes esféricos por ambos extremos; se comprende que, durante las fases de inflado, la membrana de neopreno está sometida a tracciones exclusivamente en todo punto; los lóbulos se materializan mediante "cinturones" de mayor rigidez que limitan la deformación y configuración de la lámina; caben configuraciones geométricas diversas siempre con la condición de evitar cualquier punto con curvatura desfavorable desde el punto de vista del pandeo; es un campo abierto a la investigación; las dimensiones de la lámina, si se hormigona antes de insuflar el aire, pueden aumentarse disponiendo medios más potentes de puesta en obra del hormigón (varios equipos de bombeo neumático, por ejemplo); siempre con retardadores de fraguado; puede pensarse en combatir la fisuración por retracción si se desinfla parcialmente la membrana neumática, para que la lámina de hormigón entre en compresión, cuando el hormigón tiene todavía capacidad de fraguado residual para cerrar sus propias fisuras; la maniobra es sin duda delicada pero no inviable. Cuando la aplicación mecanizada de productos adherentes, como las resinas epoxy, sea técnicas y económicamente satisfactoria, puede pensarse en resolver el problema preocupante de la fisuración por retracción y contracción térmica, hormigonando elementos de gran superficie sin interrupción del tajo de hormigonado (juntas de trabajo y contracción), dejando por tanto, que el hormigón se agriete y procediendo después a la reparación de las fisuras mediante los citados productos adherentes. Las cimbras infladas pueden pensarse, en principio, como soporte provisional de piezas prefabricadas (montaje de estructura metálica, elementos o dovelas de hormigón prefabricado); de momento, las imaginamos para montar una estructura previa, autoportante, sobre la cual se terminaría ya de montar u hormigonar la estructura final.

Las investigaciones en este campo, pueden dar satisfactoria respuesta técnico-económica, al problema constructivo de la ejecución de estructuras en arco (puentes, grandes naves).

Membranas de caucho sintético, hinchadas de aire, se han utilizado ya como azudes y también como ataguías provisionales; anclándolas al fondo del río; también se han utilizado como encofrado recuperable para el hormigonado de revestimientos de galerías y conducciones de sección circular; también como vainas para la deformación de huecos cilíndricos de aligeramiento en losas; al desinflarlas, las vainas, se recuperan para ulteriores utilizations.