

FUNDACIÓN



**ESTRUCTURAS NEUMÁTICAS EN
INGENIERÍA CIVIL.**

Ing. Rogelio Reyes Rosales

Edición especial

CUADERNOS FICA

M É X I C O
2 0 0 0

Consejo Directivo de la Fundación ICA.

Presidente.

Ing. Bernardo Quintana.

Vicepresidentes.

Dr. Francisco Barnés de Castro

Dr. Daniel Resendiz Núñez

Dr. Julio Rubio Oca

Ing. Luis Zárate Rocha

Director Ejecutivo.

Ing. Fernando O. Luna Rojas

Cuerpos Colegiados de los Programas Operativos.

Comité de Becas.

Dr. Juan Casillas García de León

Dr. Sergio Gallegos Cazares

Ing. Miguel Angel Parra Mena

Comité de Premios.

Dr. Luis Esteva Maraboto

Ing. Antonio González Fajardo

Ing. Gregorio Farías Longoria

Comité de Publicaciones.

Dr. Oscar González Cuevas

Dr. Horacio Ramírez de Alba

M. en I. Gabriel Moreno Pecero

Ing. Santiago Martínez Hernández

Ing. Gilberto García Santamaría González

Comité de Investigación.

Dr. José Luis Fernández Zayas

Dr. Bonifacio Peña Pardo

Dr. Ramón Padilla Mora

Dr. Roberto Meli Piralla

ISSN 1405-387X

FUNDACIÓN



**ESTRUCTURAS NEUMÁTICAS EN
INGENIERÍA CIVIL.**

Ing. Rogelio Reyes Rosales

Edición especial

CUADERNOS FICA

M É X I C O
2 0 0 0

© Derechos Reservados 2000
Fundación ICA, A.C.

Av. del Parque No. 91
Colonia Nápoles
C.P. 03810 México, D.F.

Tel. 5669 3985, 5272 9991, 5272 9915
Ext. 4000-4001
Fax. 4083

e-mail: lunaf@fundacion-ica.org.mx
<http://www.fundacion-ica.org.mx>

ISBN 968-7508 74-4
ISSN 1405-387X
Impreso en México.

ING. ROGELIO REYES ROSALES

Nació en la ciudad de México, realizó sus estudios como Ingeniero Civil en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México. Desde los inicios de su carrera se involucra laboralmente en el área de la construcción, área en la que ha permanecido desde entonces.

En 1997 se interesó por un sistema de cimbrado a base de una membrana impermeable que se estabiliza por medio de un fluido a presión. A partir de entonces, llevó a cabo una recopilación de la escasa bibliografía sobre el tema, misma que le permitió participar como expositor en el seminario de estudiantes dentro del XIX Congreso Nacional de Ingeniería Civil, organizado por el Colegio de Ingenieros Civiles de México, en Sanfandila, Querétaro.

En 1998, después de un convenio entre Fundación ICA y la Universidad Nacional, ingresa como prestador de servicio social a Fundación ICA, donde continua investigando sobre el tema a través de un proyecto de investigación denominado " Estructuras Neumáticas ".

Simultáneamente, realizó una estancia en los trabajos de revestimiento de túnel en la lumbrera 8 del interceptor oriente del drenaje profundo de la ciudad de México.

Finalmente, después de la investigación documental y las experiencias adquiridas, este mismo tema lo presenta como tesis para obtener la licenciatura en Ingeniería Civil.

INTRODUCCION

Las estructuras neumáticas son todas aquellas estructuras cuya forma y estabilidad están determinadas por la presión de algún fluido. Algunos de los antecedentes más importantes de las estructuras neumáticas son los globos aerostáticos, dirigibles, e incluso el neumático. Este tipo de estructuras incursionan en el campo de la técnica constructiva cuando aparecen recintos temporales a base de aire presurizado, es decir, casas de campaña, almacenes y todo tipo de albergues inflables, cuya ventaja sobre otros sistemas constructivos radica en la gran rapidez de montaje y portabilidad. No obstante, que la primera patente sobre este tipo de estructuras esta registrada en 1917, por el ingeniero ingles Frederic William Lanchester, no es sino años más tarde, después de su muerte, cuando hay aplicaciones formales de su idea. Lanchester padeció entonces de la incomprensión de los arquitectos e ingenieros de su época, acostumbrados a trabajar con los sistemas constructivos tradicionales, rígidos y macizos. Sin embargo, la idea de poder utilizar estructuras de membrana sostenidas neumáticamente prevaleció en la mente de ingenieros y arquitectos, ejemplo de ello lo fue el arquitecto alemán Frei Otto, uno de los mayores impulsores de estructuras neumáticas, quien tuvo la fortuna de contar con el apoyo de una de las fábricas más importantes de carpas de Europa, lo que le permitió llevar a la práctica varios de sus proyectos, no sin atravesar múltiples dificultades para convencer a sus clientes y autoridades para la construcción de las mismas.

El desarrollo inminente de este tipo de estructuras dio paso al primer Coloquio Internacional de Estructuras Neumáticas celebrado en Stuttgart, Alemania, en 1967. A partir de entonces se realizaron una serie de encuentros internacionales donde se presentaron ideas innovadoras aplicadas principalmente a la arquitectura, pero la ingeniería civil no quedó exenta de las aplicaciones de estas estructuras neumáticas y se presentaron alternativas interesantes en cimbras, puentes, represas, edificaciones, etc.

Ejemplo de lo anterior, es el caso de las "cimbras neumáticas" que han sido utilizadas principalmente en la construcción de cúpulas de concreto y que son, en términos generales, semiesferas inflables a base de un material flexible e impermeable que sirven como molde para el concreto. Como cualquier inquietud emprendida por el hombre, los primeros intentos de usar "globos semiesféricos" como cimbra tuvieron dificultades técnicas que impidieron utilizar inmediatamente este método de construcción. Sin embargo, la idea fue explorada nuevamente años después, de tal forma, que hoy existen un buen número de empresas que explotan comercialmente la "cimbra neumática" en la construcción de cúpulas, y que ha sido aplicada incluso en nuestro país.

Actualmente, las estructuras neumáticas van más allá de lo convencional, al proponerlas como elemento estructural en ingeniería, o como sistema de aterrizaje en una misión espacial. Hay quienes incluso las considera como pilares de la futura ingeniería civil en el espacio.

OBJETIVOS

Al desarrollar el presente trabajo, se establecieron los siguientes objetivos:

- **Mostrar un panorama general del uso de las estructuras neumáticas**
- **Plantear los conceptos básicos que rigen a las estructuras neumáticas.**
- **Presentar algunas aplicaciones y posibilidades, que tienen las estructuras neumáticas en la ingeniería civil.**
- **Establecer una alternativa de cimbra neumática que pueda utilizarse en diferentes usos, en particular en el revestimiento de túneles.**

CONTENIDO.

1.- ANTECEDENTES

1.1.- La construcción neumática en la Arquitectura.	1
1.1.1.- Estructuras soportadas por aire.	1
1.1.2.- Estructuras a base de elementos presurizados.	5
1.2.- Otros usos de las Estructuras Neumáticas.	8
1.2.1.- Aplicaciones militares.	8
1.2.2.- Aplicaciones espaciales	12
1.3.- La membrana de la Estructura Neumática.	14
1.3.1.- Circunstancias históricas.	14
1.3.2.- Aspectos básicos de algunos polímeros.	16
1.3.3.- Características de la membrana.	18

2.- ANÁLISIS BÁSICO DE UNA ESTRUCTURA NEUMÁTICA.

2.1.- Comportamiento de la membrana.	24
--------------------------------------	----

3.- ESTRUCTURAS NEUMÁTICAS EN LA INGENIERÍA CIVIL

3.1.- Cimbras neumáticas en la construcción de cúpulas de concreto.	31
3.1.1.- Método Binishell.	32
3.1.2.- Método Turner y otros.	37
3.2.- Otros usos de cimbras neumáticas.	44
3.3.- Aplicaciones y proyectos diversos.	53
3.3.1.- Diques y puentes.	53
3.3.2.- Edificaciones de varios niveles.	60

4.- CASO PRACTICO: PROPUESTA DE CIMBRA NEUMÁTICA EN TÚNELES

4.1.- Generalidades.	64
4.2.- Revestimiento en túneles.	65
4.3.- Análisis básico de una cimbra neumática para un túnel de sección circular de 5 metros de diámetro.	73

CONCLUSIONES.	81
---------------	----

REFERENCIAS.	82
--------------	----

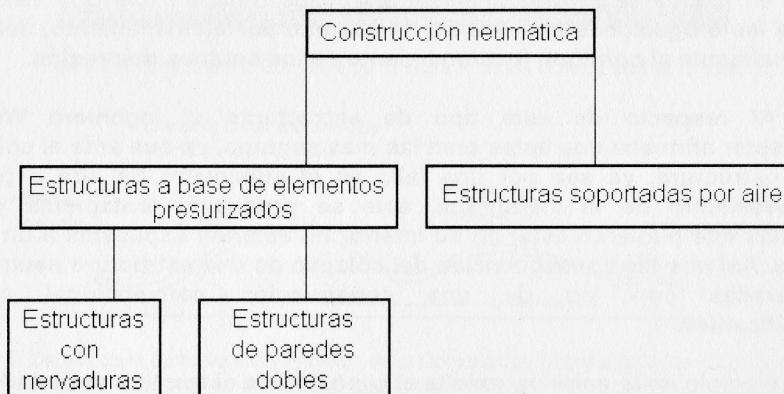
ANEXO: Direcciones de fabricantes de Estructuras Neumáticas.	85
--	----

CAPITULO 1. ANTECEDENTES

1.1 La construcción neumática en la Arquitectura.

El hombre a lo largo de su historia, siempre se ha valido de materiales rígidos como la roca o madera para conseguir la estabilidad de las estructuras, resultando frecuentemente una relación resistencia y peso propio desfavorables. Ejemplo de lo anterior, son las cúpulas de la antigüedad, construidas con grandes espesores en muros para conseguir un buen comportamiento de la estructura. Actualmente, el empleo del concreto armado ha conseguido reducir los espesores y ampliar los claros, sin embargo, el peso propio sigue siendo un factor determinante en la estabilidad de las cúpulas de concreto. Esta característica se invierte completamente en las estructuras inflables o neumáticas, cuyo peso propio y rigidez de sus materiales son casi despreciables, a tal grado que son necesarias anclarlas para que el viento no las arrastre. Estas estructuras livianas tienen un peso de 1 a 2 kg/m² en relación con la superficie de suelo cubierta. Desde la década de los sesenta este tipo de estructuras se ha convertido en un método ideal de exposiciones, además de servir como almacenes, pabellones deportivos cubiertos y como recintos provisionales de todo tipo.

En la arquitectura la construcción neumática se puede clasificar en forma general de la siguiente manera:



1.1.1 Estructuras soportadas por aire

La estructura soportada por aire es aquella que consiste en una membrana soportada por una presión que es ligeramente superior a la atmosférica.

Este pequeño incremento de presión respecto a la atmosférica, que varía de 0.0015 a 0.0025 kg/cm², es continuamente suministrada por un compresor o ventilador, ya que existen pérdidas de aire debidas a los accesos que hay en la misma. Al entrar en una estructura neumática, esta pequeña diferencia de presión no se nota ni molesta, aunque la persona sea sensible. A diferencia de otras estructuras, la estructura soportada por aire no induce esfuerzos de compresión a la cimentación, si no que más bien la cimentación trabaja como un anclaje (fig.1).

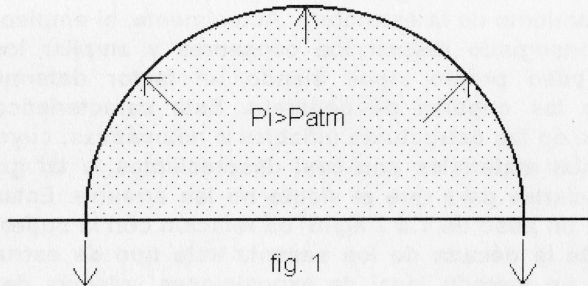


Figura 1. La estructura soportada por aire se caracteriza por tener un "ambiente presurizado". Esta presión interior induce tensiones a la membrana que se transmiten a la cimentación, lo que implica que esta " actúe" como un anclaje.

Es de importancia señalar que para la evaluación de los costos de construcción de una estructura neumática de este tipo, no solo hay que tomar en cuenta la inversión inicial, sino que también hay que tener en cuenta las erogaciones que habrán de hacerse por mantenimiento, debidas principalmente al continuo funcionamiento de los equipos de presión.

Al respecto de este tipo de estructuras el ingeniero William Lanchester afirmaba que éstas eran las más seguras, ya que ante el colapso de la estructura, ya sea por una falla en el suministro de aire o por el desgarramiento de la membrana, éste se produciría lentamente y las personas que pudieran estar en su interior no estarían expuestas a un gran peligro. Así que las consecuencias del colapso de una estructura neumática comparadas con las de una construcción convencional serían insignificantes.

Como ejemplo de lo anterior, resalta el caso de una estructura soportada por aire que se diseñó para la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos durante la década de los sesenta. Dicha comisión requería una estructura portátil, segura y económica; ante la necesidad de realizar una gira por varios países. La opción elegida fue una estructura soportada por aire de 90 metros de longitud, ancho máximo de 38 metros y una altura no mayor de 15 metros (fig. 2). La estructura consistió de dos formas cupulares

a base de dos membranas de nilón revestidas de vinilo, entre las cuales había una cámara de aire de 1.2 metros.

Esta cámara fue dividida en ocho compartimientos con la finalidad de asegurar la estabilidad de la estructura, ya que ante un accidente en alguno de los compartimientos no afectaría la estabilidad del conjunto. Otra ventaja de dicha cámara es que proporcionó un aislamiento térmico adecuado (fig. 3).

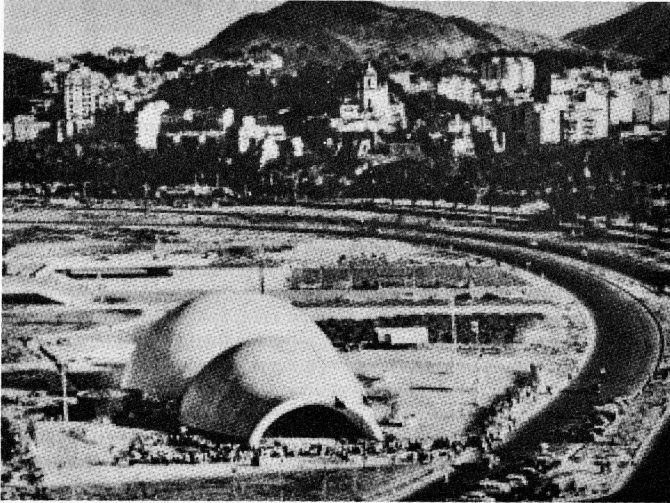


Figura 2. Pabellón de la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos.

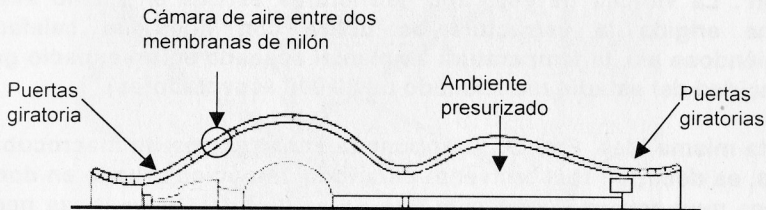


Figura 3. Detalle de la Estructura del Pabellón de la Comisión de Energía Atómica de los E.U. Las puertas giratorias colocadas en ambos extremos de la estructura servían de esclusa para el aire

Con un equipo de trece personas la estructura era erigida en un periodo de tres a cuatro días, además de que solo se requería de 30 minutos para inflar la estructura. Lo anterior representó un ahorro de tiempo de erección de más del 50% del que se hubiera tomado con cualquier otro tipo de estructura convencional (fig. 4).

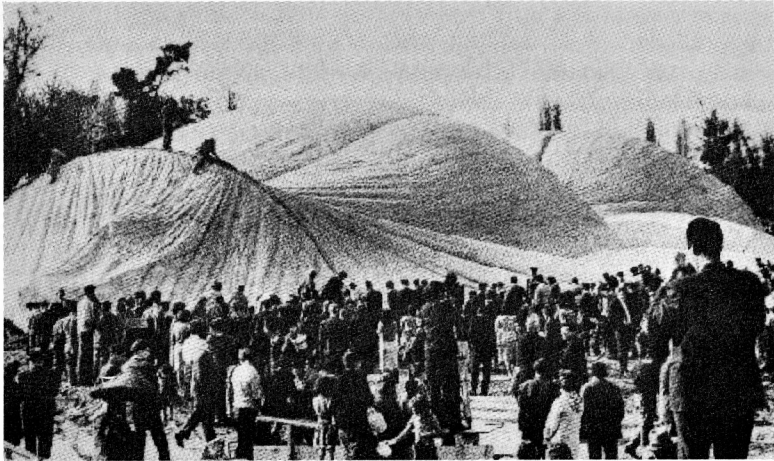


Figura 4. Erección del pabellón de la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos.

Este pabellón tenía espacio para alojar lo siguiente: un auditorio con capacidad para 300 personas sentadas, zonas de lecturas, laboratorio, y un reactor experimental atómico. Todo lo anterior se albergaba en una estructura que no pesaba más de 30 toneladas y cuyo volumen total, incluyendo los compresores, era inferior a los 150 m³.

Más recientemente las estructuras soportadas por aire también han sido colocadas en estadios deportivos, tal es el caso del "Silver Dome", en Michigan E.U., en donde la superficie cubierta por esta estructura es de 39200 m². La ventaja de este tipo de estructuras es que el mismo aire que mantiene erigida la estructura se utiliza con fines de calefacción, manteniéndose así, la temperatura ambiental deseada en un espacio grande (la capacidad del estadio mencionado de 80 000 espectadores).⁽¹⁾

Con esta misma idea, Frei Otto propone la construcción de macrocubiertas urbanas, es decir, un recubrimiento para todo un núcleo urbano en donde el clima sea muy severo. Como este tipo de estructuras neumáticas necesita de un continuo suministro de aire, entonces cualquier tipo de actividad podría ser albergada bajo esta macrocubierta y por supuesto, en condiciones climáticas ideales. Lo anterior también dio paso a que se pensaran en grandes invernaderos, ubicados en extensas zonas de tierra donde el clima natural suele ser hostil a cultivos aprovechables por el hombre; en donde la fuente de energía para el control climatológico estaría basado a la energía nuclear.

⁽¹⁾ Vid. Koerner Robert. Construction and Geotechnical engineering using synthetic fabrics. p. 217

1.1.2 Estructuras a base de elementos presurizados

Las “estructuras a base de elementos presurizados”, son aquellas, que a diferencia de las estructuras soportadas por aire, no tienen un “ambiente” presurizado. Dentro de este tipo de construcción están las estructuras con nervaduras, que consisten esencialmente de tubos presurizados que forman una estructura que sostienen a su vez una membrana a tensión (fig. 5, 6 y 7).

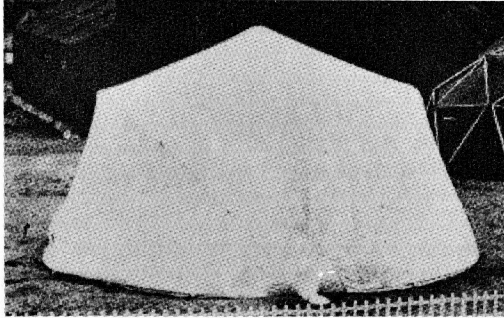


Figura 5. Estructura Frankenstein de 10 metros de diámetro, con nervaduras inflables a una presión de 0.7 kg/cm^2 . Esta estructura es usada en el Ártico.

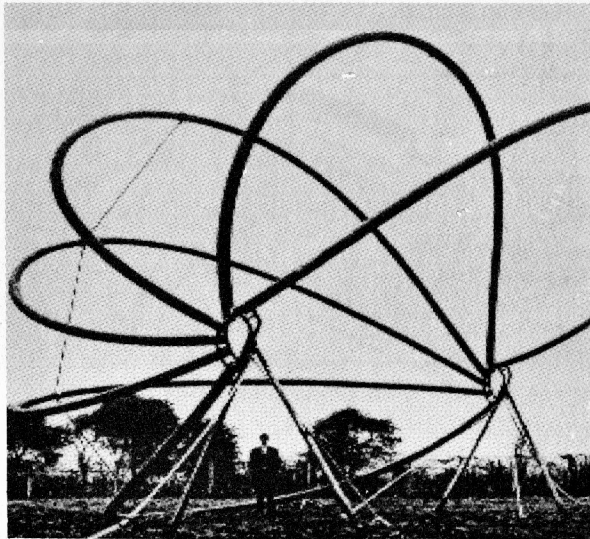


Figura 6. Mecanismo de erección de un albergue neumático a base de tubos presurizados.

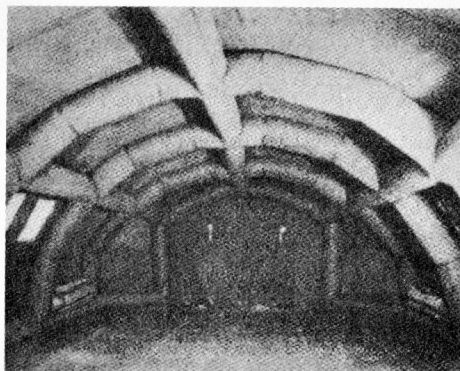


Figura 7. Estructura soportada por nervaduras a baja presión (0.14 kg/cm²).

En esta misma categoría se encuentra la estructura de pared doble, que como su nombre lo indica, consiste en dos membranas unidas por hilos transversales que confinan al aire bajo presión (fig. 8 y 9).

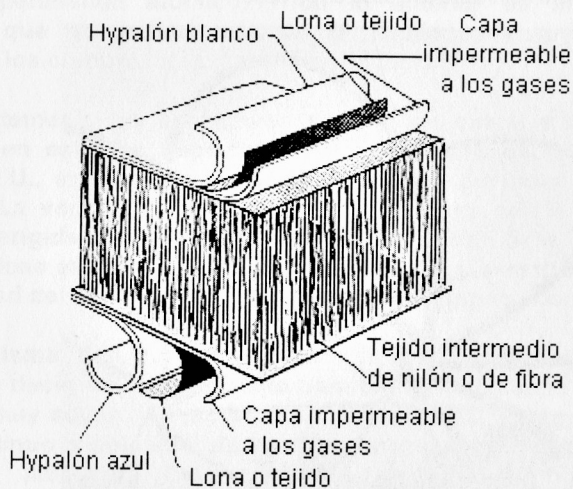


Figura 8. Sistema de doble pared, tipo "Airmat".

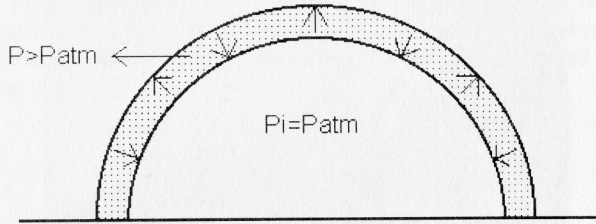


Figura 9. En la construcción neumática de doble pared no existe un ambiente presurizado

En el caso de las estructuras de doble pared, es recomendable que el espacio entre las membranas principales sea dividido en compartimentos individuales, con la finalidad de proporcionar una mayor seguridad y evitar así, el colapso total de la estructura (fig. 10 y 11).

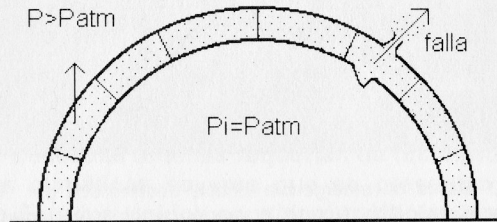


Figura 10.

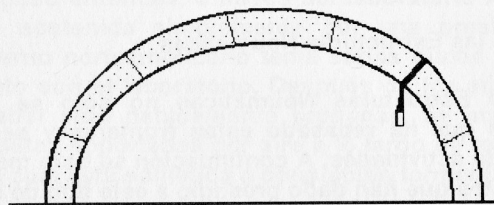


Figura 11.

Un ejemplo de una estructura neumática de doble pared es la salida de emergencia inflable desarrollada por Goodyear Aerospace Corporation, que requiere para su estabilidad una presión entre 0.2 y 0.8 kg/cm² (fig. 12).

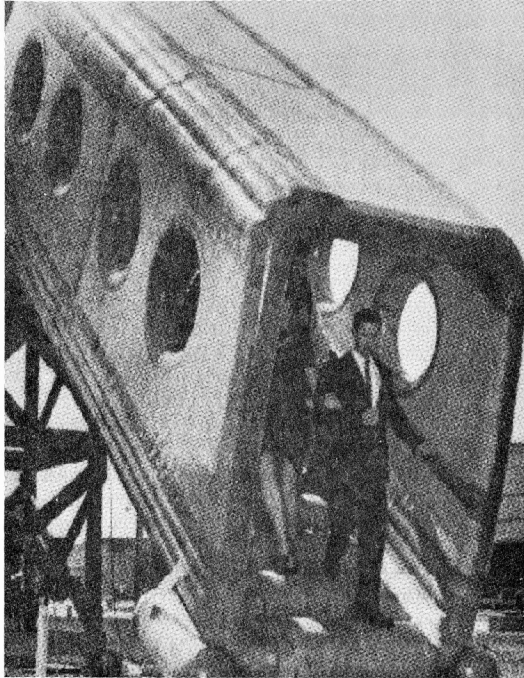


Figura 12. Salida de emergencia inflable desarrollada por Goodyear Aerospace Corporation. Nótese la sección rectangular lograda a base del sistema de "doble pared".

1.2 Otros usos de las Estructuras Neumáticas

La aplicación de Estructuras Neumáticas no sólo se ha limitado a la arquitectura, sino que ha rebasado estas fronteras y se ha aplicado con éxito a todo tipo de actividades. A continuación se hará mención de algunos casos trascendentes que han dado prestigio a este tipo de estructuras.

1.2.1 Aplicaciones Militares

La milicia no podía pasar por alto las ventajas que ofrece una estructura neumática, de hecho es uno de los campos donde ha recibido mayor impulso. Ejemplo de lo anterior son los equipos prácticos de salvamento, que han tenido gran desarrollo, gracias a la necesidad de salvar vidas humanas ante la destrucción de transporte aéreo o naval. Nos referimos por supuesto, a todos los artefactos de salvamento inflables que brindan un servicio rápido a partir de un volumen reducido y ligero.

El ejemplo más notable es el bote salvavidas inflable que ha sido altamente perfeccionado, de tal forma que hoy día es un elemento común e indispensable en los sistemas de emergencia de cualquier transporte naval en el mundo (fig. 13).



Figura 13. El bote salvavidas inflable es un elemento práctico y de gran confiabilidad.

En 1946 se dio la primera aplicación de las ideas del ingeniero Lanchester que datan, como se mencionó anteriormente, de 1917. En la década de los cuarenta, los Estados Unidos habían desarrollado unas grandes antenas de radar para proteger sus fronteras del norte de una posible invasión. Sin embargo, estas delicadas antenas requerían de una apropiada protección de las condiciones climáticas severas que se presentan en esta región. El gobierno de los Estados Unidos consideró múltiples opciones, no obstante, la mayor limitante que se presentaba era que la protección elegida debía permitir satisfactoriamente el paso de las ondas de radar. El ingeniero Walter Bird propuso entonces, a través del laboratorio Aeronáutico Cornell, una membrana sostenida simplemente por una presión de aire, y aún cuando el gobierno norteamericano tenía serias dudas sobre la propuesta, firmó un contrato con el laboratorio. Después de los años que siguieron al diseño y de haber sido debidamente probadas, se instalaron más de un centenar de cúpulas soportadas por aire a lo largo de toda la frontera norte, de aquél país la cual está sometida a constantes tormentas de nieve.

Obviamente las cúpulas soportadas por aire fueron sometidas a rigurosas pruebas, entre ellas destacan las realizadas en los laboratorios de túneles de viento, donde se analizaron las tensiones inducidas a la membrana por las cargas de viento. Como resultado de tales pruebas, las cúpulas de 15 metros de diámetro fueron construidas de materiales capaces de resistir vientos de hasta 240 k.p.h.; dichos materiales fueron membranas a base de fibras artificiales como el nylon o el terylene, que fueron revestidas con polímeros como el vinilo, neopreno o hypalón (fig. 14).

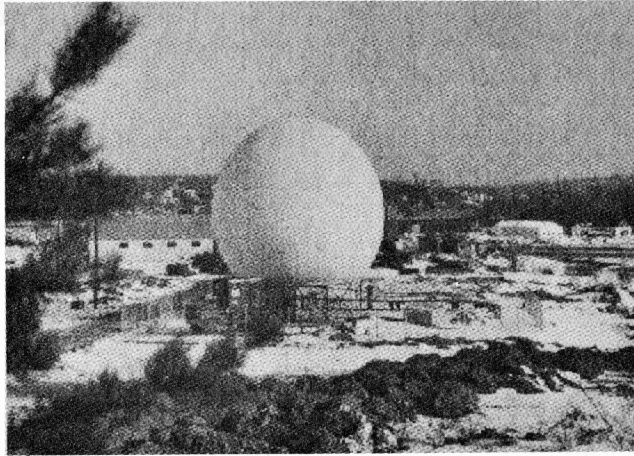


Figura 14. Cúpulas soportadas por aire con una presión interior de 0.007 kg/cm^2 .

Esta aplicación se extendió a radares con uso en telecomunicaciones, y precisamente en este campo, se construyó una de las cúpulas soportadas por aire más grandes del mundo. Dicha estructura de 64 metros de diámetro y 49 metros de altura; es la que protege a la antena de radar de Andover, Maine, E.U. (fig. 15).

La colocación de este tipo de cúpulas normalmente se realiza antes de la instalación de la antena de radar, no obstante, la empresa alemana Krupp desarrolló un procedimiento para instalar cúpulas en antenas existentes; en este caso, la membrana es plegada de manera predeterminada y colocada con una grúa en una estructura auxiliar colocada de antemano en la antena, posteriormente se sujeta en los puntos de anclaje y se infla (fig. 16).

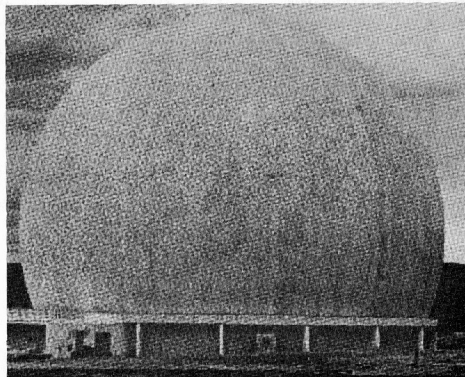


Figura 15. La cúpula más grande soportada por aire para radar se encuentra en Andover, Maine, E.U.

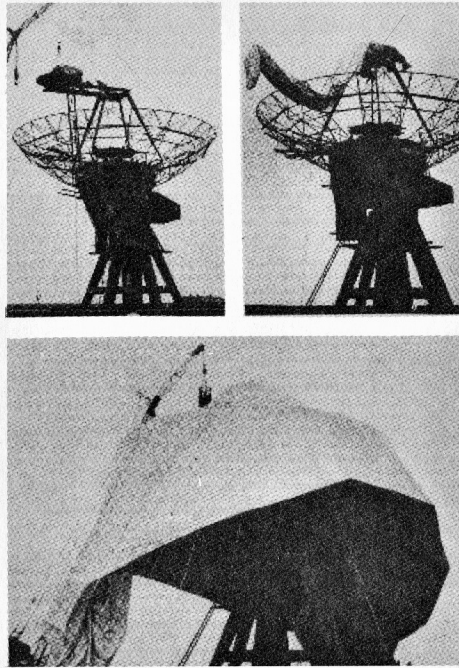


Figura 16. Procedimiento de colocación de una cúpula de radar soportada por aire desarrollado por la empresa alemana Krupp.

Por otro lado, otra aplicación muy ingeniosa de elementos inflables ocurrió durante la segunda guerra mundial, al construir tanques inflables para engañar al enemigo (fig.17).

Lo anterior demuestra que este tipo de elementos pueden tener usos tan variados, que la única limitante es la imaginación del diseñador.

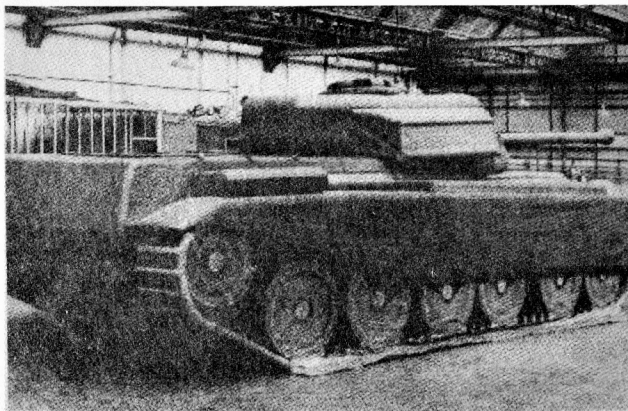


Figura 17. Tanque inflable "Centuri3n", utilizado por el ej3rcito brit3nico para engañar al enemigo.

1.2.2 Aplicaciones espaciales

En el a3o de 1960 los Estados Unidos lanzaron el cohete "Delta 1", que contenía en su cono delantero una c3psula de 70 cm de di3metro, una vez en 3rbita, esta c3psula liber3 un globo, que al inflarse, gener3 una estructura de 30 metros de di3metro. Esta estructura era el primer sat3lite pasivo de comunicaciones mundiales: el "Echo I", construido con una pel3cula de 0.127 mm de grosor y superficie cubierta con una capa vaporizada de aluminio. El tama3o de dicha estructura fue necesario para reflejar las ondas de radio, adem3s contenía una mezcla de 3cido benzoico y antraquinona, que desprendía continuamente un gas que lo mantenía completamente inflado (fig. 18).

El 3xito del "Echo I" fue tal, que no tard3 en lanzarse el "Echo II", y asimismo el "Echo A-12", este 3ltimo de 41 metros de di3metro (fig. 19),

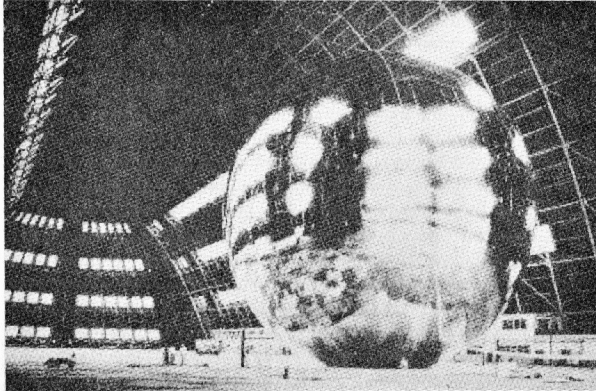


Figura 18. Primer satélite pasivo de comunicaciones, "Echo I".

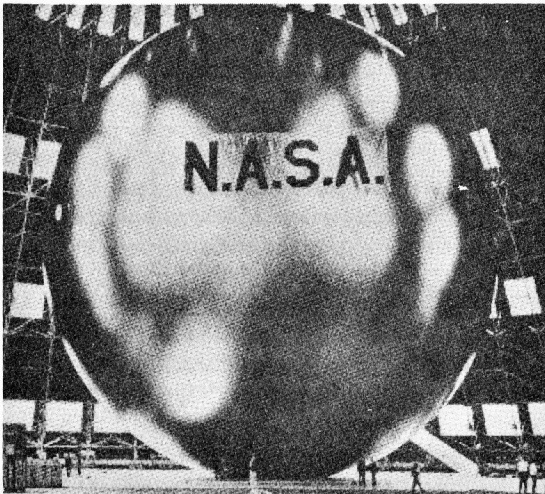


Figura 19. Satélite pasivo de comunicaciones, "Echo A-12".

El uso de estructuras neumáticas en cuestiones espaciales no es el resultado de una casualidad, ya que estas presentan atributos como: eficiencia estructural, facilidad de erección, portabilidad y resistencia. Este tipo de estructuras son objeto de intensas investigaciones a cargo de la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (N.A.S.A.), que incluso las propone como refugios lunares (fig. 20).

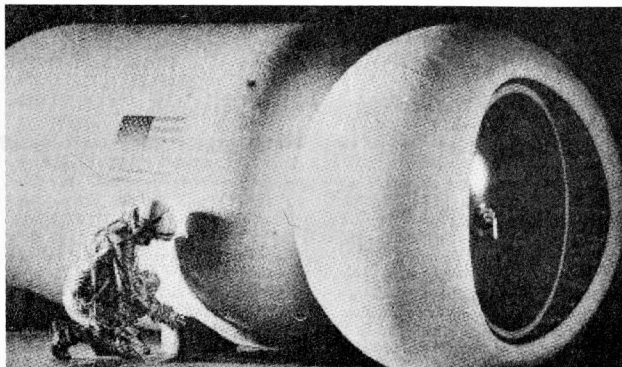


Figura 20. Refugio lunar "Stem" a base de una estructura Neumática.

Tal es el caso del refugio lunar "STEM" desarrollado por la Goodyear Aerospace Corporation a petición de la NASA. Este consta de un albergue cilíndrico de 4 metros de longitud y 2.1 metros de diámetro. La ventaja del sistema inflable STEM consiste en que puede transportarse a la superficie lunar en un pequeño paquete e inflarse de manera inmediata mediante oxígeno comprimido; además de que sus paredes exteriores son altamente resistentes a los meteoritos, radiación térmica y a temperaturas extremas. Aunque estos refugios lunares no se han llevado a la práctica, sí son el comienzo de una larga etapa de investigación, en la que seguramente, las estructuras neumáticas tienen un futuro prometedor.

1.3 La membrana de la Estructura Neumática

Las membranas empleadas en estructuras neumáticas como medio impermeable están elaboradas a base de materiales sintéticos, como los plásticos o polímeros. La elección de un material en particular de esta familia, depende de un gran número de criterios que pueden variar según sea la función y el tiempo de duración previsto para la estructura; para ello, resulta conveniente un conocimiento básico sobre las características de los diferentes tipos de materiales disponibles.

1.3.1 Circunstancias históricas

En 1664, Robert Hooke escribió lo siguiente:

"Muchas veces he pensado que seguramente existe un camino para averiguar como hacer un compuesto artificial y pegajoso que se parezca mucho a esa secreción con la que el gusano de seda teje su capullo".

Tuvieron que pasar, desde entonces, casi 200 años para que surgiera la industria de los plásticos. Esto ocurrió en la segunda gran exposición de 1862 al presentarse un nuevo material denominado Parkesina.

El inglés Alexander Parkes, inventor de dicho material, alteró el proceso de fabricación de la nitrocelulosa, dando como resultado un material "moldeable". El jurado de la exposición describió a la parkesina como: "El producto de una mezcla de cloroformo y aceite de ricino que produce una sustancia dura como el cuerno, pero tan flexible como el cuero, y capaz de ser vaciada, estampada, pintada, teñida o tallada..."; y aunque esta no tuvo éxito comercial en su momento, pocos años más tarde, en 1869, el norteamericano John Wesley Hyatt fabricó bolas de billar con nitrocelulosa, adjudicándose a la vez, un premio de \$ 10 000 dólares que habían ofrecido los fabricantes de bolas de billar como consecuencia de la escasez de marfil.

Wesley había utilizado entonces como disolvente de la nitrocelulosa al alcanfor, obteniendo así un nuevo producto denominado celuloide. De esta forma, el éxito del celuloide motivó la búsqueda de otros materiales que resultasen igualmente rentables.

Numerosos materiales que son comunes en el mundo actual, se descubrieron mucho antes de la gran exposición de 1862: el estireno, la melamina, el cloruro de vinilo y el poliéster. Sin embargo, los inventores de estos materiales no supieron apreciar las posibilidades comerciales de sus materiales y ninguno de ellos fue explotado realmente hasta bien entrado el siglo XX. El desconocimiento del mecanismo de la polimerización fue la causa de la aplicación tardía de los monómeros básicos, además de la aplicación del "pick and mix", que consistía en elegir unos productos químicos para combinarlos y ver que ocurría.

La obtención del poliestireno ilustra la situación anterior. El estireno, monómero, se descubrió en 1830 y el poliestireno, polímero, en 1845, pero la producción a nivel industrial se dio hasta un poco antes de la segunda guerra mundial.

Después de la guerra, la tendencia era descubrir un nuevo material y después investigar sus aplicaciones. Pero ahora, en la mayoría de los casos, sucede el proceso inverso: primero se definen las propiedades deseadas y después se obtiene un producto que las tenga. Lo anterior es a consecuencia del gran desarrollo de la industria de los plásticos.

1.3.2 Aspectos básicos de algunos polímeros

Los polímeros son sustancias artificiales que se basan en general, en materiales orgánicos cuyo elemento básico es el carbono. Este tipo de materiales se caracterizan por presentar una consistencia plástica en una u otra etapa de su fabricación, etapa en la cual se puede moldear su forma aplicando diversas técnicas. Los polímeros están formados a base de una cadena larga de monómeros, los cuales a su vez, son grupos simples de átomos que forman la cadena.

Un compuesto como el polietileno consta de un gran número de estas cadenas, que son fuertes entre sí mismas, pero que no mantienen uniones fuertes con cadenas adyacentes. Lo que quiere decir que las cadenas pueden deslizarse unas sobre otras y que cuando esto ocurre el material cambia de forma. Al fenómeno anterior se le conoce como fluencia, por ejemplo, si a un trozo de polietileno se le aplica una carga, las cadenas se moverán unas respecto a otras, pero cuando se elimina la carga puede ocurrir que las cadenas no recuperen exactamente sus posiciones relativas originales. Si se aplica calor, las cadenas se desplazan con mayor facilidad, de tal forma que se puede moldear el material para darle una forma nueva, además de recuperarse y reutilizarse con relativa facilidad, gracias a su capacidad para ablandarse y endurecerse repetidamente.

A los plásticos con las características anteriores se les denomina "termoplásticos" y algunos de estos son:

1. *Polietileno de baja densidad.* Es un material tenaz e impermeable que resiste la acción de una amplia gama de corrosivos químicos. Su temperatura máxima de trabajo es de 70 °C. Es incoloro y translúcido, pero se le pueden incorporar pigmentos para darle una gama prácticamente ilimitada de colores. Normalmente se le moldea por extrusión o por inyección.
2. *Polietileno de alta densidad.* Es una forma cristalina del polietileno, con una resistencia y rigidez de tres a cuatro veces mayor. Su punto de reblandecimiento es de 40°C o más. Se le moldea por los mismos procesos que al polietileno de baja densidad.
3. *Polipropileno.* Es el plástico más ligero que se conoce, presenta una superficie más dura que el polietileno de alta densidad y se reblandece a unos 30 °C, pero muestra una rigidez apreciable a temperaturas inferiores. El polipropileno se puede someter a los mismos tratamientos que el polietileno y se emplea mucho en el moldeo por inyección.

4. **Cloruro de polivinilo o P.V.C.** Es quizá el más versátil y de los más baratos de los materiales plásticos. Su flexibilidad varía desde la del caucho a la rigidez total, según la cantidad de plastificante que se añade; siendo los plastificantes sustancias que, añadidas a los materiales termoplásticos, actúan como lubricantes entre sus cadenas moleculares. El p.v.c. es combustible en todos sus tipos y tiende a descomponerse al calentarlo. Reblandece a los 75 °C. Se sintetizan de forma especial compuestos de p.v.c. para una gama extraordinariamente amplia de aplicaciones, compuestos que se emplean en la extrusión, el moldeo por insuflación (particularmente para inflar botellas), la conformación al vacío, el moldeo por inyección, el calandrado y en el vaciado rotativo.
5. **Poliestireno.** Es un material duro y quebradizo, Al estirarlo se obtiene una película tenaz que se usa en paquetería. También es posible expandirlo para obtener forespán o extruirlo para fabricar foam celular.
6. **Poliamida o nylon.** Usado sobre todo en forma de fibra, el nylon es tenaz, forma tejidos resistentes y presenta un bajo coeficiente de fricción. Puede usarse a temperaturas más altas que la mayoría de los termoplásticos y es moldeable en piezas dimensionalmente estables. Por lo general se usa en la extrusión y la inyección.
7. **Polimida.** Se trata de una familia especializada de materiales que pueden usarse entre los 150 y los 400°C. Insoluble en todos los disolventes conocidos e infusible, es moldeable aplicando cualquier técnica convencional. Es un producto caro que suele usarse en la tecnología espacial.
8. **Tereftalato de polietileno.** Sé extruye directamente en forma de fibra, película o cinta; tiene aspecto cristalino y un punto de fusión muy alto. En forma de película, mediante el calor, es posible provocar en su interior tensiones bidireccionales, que suelen ser útiles en aplicaciones como pieles de tambor y envoltorio de alimentos. Estas películas pueden someterse a tratamientos posteriores que generan una resistencia y una estabilidad grandísimas. Se usa en globos meteorológicos y cuando es metalizado, en los globos de sonda estratosféricos.

El refuerzo de los termoplásticos o de cualquier material plástico da lugar a un aumento de la rigidez, resistencia al choque y a la elasticidad; además de contribuir al control de las variaciones térmicas del material.

Por otro lado están los plásticos "termoestables", que se comportan como materiales rígidos a cualquier temperatura, sin llegar a la que destruye el material, y que por lo tanto ya no pueden ablandarse de nuevo por calentamiento.

También se pueden obtener foams o espumas a partir de polímeros, cuya principal característica es su capacidad aislante. Algunos de ellos presentan altos valores en la relación resistencia / peso y son impermeables al vapor. Los principales foams o espumas usados en la construcción son los de poliuretano y poliestireno, que se emplean como aislantes térmicos y acústicos.

Por último, es importante señalar que muchos de estos materiales plásticos no son baratos, sin embargo, su uso se reafirma casi a diario, por lo que su futuro como material básico en cualquier campo es prometedor.

1.3.3 Características de la membrana

Es importante señalar que existe una gran similitud entre las membranas utilizadas en estructuras neumáticas y las geomembranas utilizadas en la geotecnia. Ambas se fabrican a partir de materiales sintéticos y son impermeables a líquidos y gases. Para ejemplificar lo anterior, podemos mencionar el caso en donde ambas han servido como cimbras. Por el lado de las estructuras neumáticas esta la "cimbra neumática" utilizada con gran éxito en la construcción de cúpulas de concreto, y que consiste, en términos generales, en una semiesfera inflable a base de una membrana impermeable. Asimismo, por el lado de las geomembranas, están las "cimbras flexibles" o bolsacreto, como se le conoce comercialmente en nuestro país, y que son, en términos simples, "bolsas" que confinan al concreto, y que ha sido utilizada como cimbra para colar bajo el agua grandes "bloques" de concreto o de mortero, utilizando para ello, la arena de la playa, cemento tipo 1 con puzolana y agua de mar. Es necesario recalcar que ambos casos han sido aplicados en diferentes lugares del mundo, como ejemplo del uso de la "cimbra flexible", está el caso de la termoeléctrica Campeche II, en donde sólo en 100 días, se construyeron 4 rompeolas a mediados de la década de los setenta; asimismo, también se han usado en el revestimiento de estructuras que se encuentran dañadas por el contacto permanente del agua. (fig. 21)

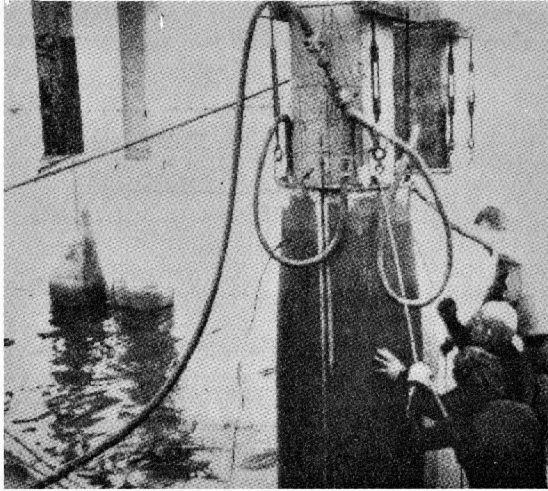


Figura 21. Cimbra "flexible" a base de materiales sintéticos.

Otro ejemplo de analogía entre ambos tipos de membrana, lo constituye la manera en como se confeccionan para dar una *forma* requerida. Por un lado, tenemos a las geomembranas utilizadas como cimbras "dobles", conocida comercialmente como *Colchacreto Mortarmat*, en donde a base de doble tela interconectada y entrelazada se puede controlar la forma y espesor de la cimbra; y por el lado de las estructuras neumáticas se tiene a la construcción de *doble pared* que utiliza el mismo principio, y que ha sido mencionado en el subcapítulo de estructuras a base de elementos presurizados.

Así que cuando se trata de la membrana empleada en estructuras neumáticas, no estaremos muy lejos de lo que ocurre con las geomembranas.

Las membranas se producen en diferentes espesores a partir del proceso de extrusión o bien a partir del proceso de calandreo (fig. 22). Con el objeto de mejorar su resistencia las membranas se refuerzan con "mallas tejidas".

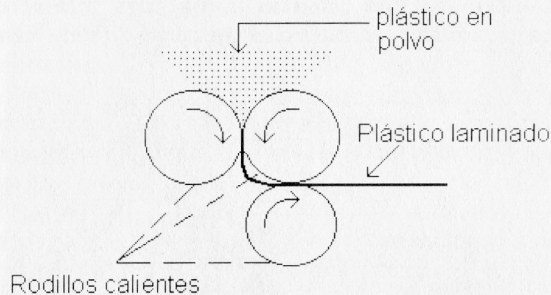


Figura 22. Proceso de calandreo.

Para este tipo de membranas se han realizado pruebas sobre toda clase de materiales y por supuesto, los requerimientos por satisfacer las características de resistencia a la tensión, durabilidad y flexibilidad, han restringido la cantidad de materiales apropiados. Se han empleado para ello materiales isotrópicos y anisotrópicos, resultando estos últimos los más empleados (los materiales isotrópicos muestran la misma resistencia y capacidad de elongación en todas sus direcciones mientras que los anisotrópicos la tienen en direcciones específicas).

Los materiales isotrópicos más adecuados para estructuras neumáticas son las *películas plásticas* producidas a partir de PVC, polietileno, poliéster, poliamida, polipropileno o cauchos sintéticos como el polisobutileno y cloropreno. Este tipo de materiales muestra una tendencia constante a la elongación bajo cargas constantes, de tal manera que sólo mantiene su forma por un periodo de tiempo si se les somete a cargas relativamente bajas. Cuando se han construido estructuras neumáticas grandes con este tipo de material, se ha restringido la estructura con un cableado externo.

Entre los materiales anisotrópicos más adecuados son aquellos que son construidos a base de tejidos sintéticos, como el poliamidico de nylon y los poliéstericos de terilene y dacrón, que llevan una capa, en una o en ambas caras de vinilo, butilo, neopreno, hipalón o de cualquier otro elastómero plastificado.

Por otro lado, es bien conocida la elevada relación resistencia-peso de los tejidos sintéticos e indudablemente, las fibras de poliéster se consideran al respecto como las mejores.

Las telas tejidas son formas superficiales anisotrópicas con dos direcciones principales de tejido, generalmente en ángulo recto, pero siempre es posible algún desplazamiento angular entre los hilos. En el proceso textil los hilos se alargan más marcadamente en la dirección de la urdimbre (conjunto de

hilos paralelos entre los que pasa la trama para formar una tela), por lo tanto, ésta tiene una menor elasticidad en comparación con la de la trama. (fig. 23)

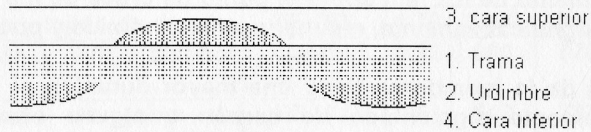


Figura 23. Sección de una membrana sintética reforzada. En la tela de refuerzo, formada por 1 y 2, la urdimbre se tensa más que la trama lo que implica que esta tenga una menor elasticidad

Una característica importante del tejido sintético, es que ante la existencia de esfuerzos y por la composición del tejido, hace que este ceda un poco y permite que las tensiones sean distribuidas en una zona y no concentradas en un punto.

Es difícil determinar con precisión la capacidad a la tensión de una membrana reforzada con tejido, ya que diferentes parámetros como la forma de construcción y la homogeneidad de los materiales empleados, alteran el resultado.

La resistencia a la tensión de membranas reforzadas con tejido se determina mediante pruebas de tensión axial y con muestras de 5 cm de ancho y una longitud de 30 cm a una velocidad de 30 cm/min de acuerdo con la norma DIN 53354; por lo que la capacidad a la tensión está dada por lo general en kg/50 mm de ancho. No obstante, también existen las pruebas de tensión biaxial, de acuerdo con la norma DIN 53859, en donde se somete a la membrana a tensiones producidas por algún fluido, dándose la presión de rotura en kg/cm².

La resistencia a la tensión de las membranas reforzadas con tejido dependen del número de hilos por cm, en denier del hilo y del tipo de tejido. (Se denomina denier o "den" al peso de un tramo de hilo de 9000 m de largo expresado en gramos).

Para tensiones de mayor magnitud, como las originadas en represas o diques neumáticos, se han empleado más las telas poliamidas (nylon, perlon, dederon). Sin embargo, las fibras de poliéster tienen una mayor estabilidad dimensional debido a su baja elongación.

Es común que las estructuras neumáticas sometidas a presiones internas altas requieran por lo regular valores superiores a 1000 Kg/50 mm ancho, y espesores de varios milímetros.

En lo que se refiere a los elastómeros, los productos de PVC son los más populares usados en el revestimiento de los tejidos debido a su bajo costo pero también de su versatilidad. Generalmente se estipula que debe haber un recubrimiento de 0.2 mm sobre el punto de cruce de los hilos, ya que de excederlo significativamente, resultaría antieconómico y poco práctico.

El refuerzo de la membrana tiene una mayor duración si el revestimiento está fuertemente pigmentado de carbón o alguna otra sustancia. No obstante, los elastómeros más caros como el neopreno, el butilo y los compuestos Du-Pont como el hypalón y el vitón, son los que presentan propiedades superiores a la intemperie.

El neopreno y el butil, ambos compuestos de hule sintético han sido utilizados con éxito en botes salvavidas inflables en los cuales han demostrado sus cualidades de resistir a los ácidos, a los aceites y al calor.

Asimismo, la putrefacción debida al moho o bacterias no aparece en los revestimientos sintéticos o en las membranas de tejido sintético.

En lo que se refiere a los métodos de unión de las membranas usadas en estructuras neumáticas, se aplican comúnmente tres métodos de ensamblaje: el de soldadura a alta frecuencia o unión por el calor, el encolado y el cosido. El método elegido dependerá del material empleado y de las consideraciones de carácter económico.

Las juntas cosidas son mucho más baratas, pero resultan menos eficaces si se considera la resistencia del material y su tiempo de servicio. La unión cosida es aproximadamente el 75% de las que ofrecen las soldadas o encoladas, además, deben emplearse hilos resistentes a los rayos ultravioleta, como los de dracón o terylene, y el cosido debe ser complementado con una capa de algún elastómero.

Cuando en el revestimiento se emplean materiales de superior calidad, como las membranas de neopreno, hypalón y butilo, la soldadura es desaconsejable, y por consiguiente, deberá recurrirse al encolado o al cosido.

En la siguiente tabla, se muestran algunas de las características importantes de las membranas más comunes empleadas en estructuras neumáticas.

Tabla 1.- Materiales comunes empleados en estructuras neumáticas ⁽²⁾

Material	A	B	C	D	E
Capa de hypalón y tejido de dacrón	EE.UU.	1.78	2380	910	910
Capa de hypalón y tejido alcohol polivinilo	Japón	0.92	980	770	720
Dracón con capa de goma de silicona	EE.UU.	0.51	540	270	270
Capa de vinilo y tejido de poliester	Suecia	0.8	950	490	410
Capa de vinilo y tejido de poliester	Inglaterra	0.51	540	180	115
Capa de vinilo y tejido de nilón	EE.UU.	0.66	610	360	305
Capa de vinilo y tejido de poliamida	Suecia	0.6	700	300	260

A : País de fabricación

B : Espesor en mm

C : Peso en g/m²

D : Resistencia longitudinal en kg/5 cm ancho

E : Resistencia transversal en Kg/5 cm ancho

La membrana con tejido de nilón o terylene y con revestimiento de vinilo, puede tener una vida de servicio de 5 a 10 años, aunque varias estructuras han estado en uso durante más de 10 años. No obstante, ante el avance impresionante de la tecnología de materiales en el campo las membranas sintéticas, no sería extraño que su vida útil se pueda incrementar notablemente.

⁽²⁾ DENT N. Roger. Arquitectura neumática, 1 ed. Editorial Blume, Barcelona, España. p. 95.

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS BÁSICO DE UNA ESTRUCTURA NEUMÁTICA

2.1 Comportamiento de la Membrana

Las estructuras neumáticas constan de una membrana flexible que solo es capaz de resistir tensiones. Si se le tensa mediante presiones diferenciales de un gas o fluido surge una forma neumática (del griego *pneuma*, soplo de aire). La membrana tensada neumáticamente es capaz de resistir fuerzas exteriores, por lo que al ejercer esta capacidad, el medio por el cual se provoca la tensión se vuelve un medio soportante y por ende en elemento estructural. Dicho de otra manera, el elemento estructural es una *diferencia* de presión creada normalmente por la presurización de un gas.

Por otro lado, la construcción neumática es una técnica de reciente desarrollo comparado con cualquier otra técnica de construcción convencional, de tal forma que aún existen complicaciones para su total comprensión. Por ejemplo, la teoría de la elasticidad lineal que es aplicable para las estructuras y los materiales más convencionales, no es válida para estructuras neumáticas, según expusieron Oden y Kubitzka en el coloquio neumático de Stuttgart:

“El comportamiento de las estructuras neumáticas inflables es inherentemente no lineal; tales estructuras adquieren a menudo su capacidad primaria para soportar las cargas después de experimentar unas deformaciones que, incluso bajo pequeñas presiones, pueden ser tan considerables que no permitan reconocer su forma original no deformada. No son raras las tensiones considerablemente mayores que la unidad y en tales casos, no es aplicable la ley de Hooke. Además los materiales empleados en la construcción de las estructuras neumáticas son a menudo anisótropos y no linealmente elásticos, y para complicar más la cuestión, las direcciones y la magnitud de las cargas aplicadas cambian con la deformación. Para subrayar este punto basta con citar los estudios experimentales sobre las estructuras neumáticas, en los cuales se advierten discrepancias del orden del 400% cuando las tensiones medidas se comparan con las que predicen las teorías lineales convencionales”.

El cálculo numérico involucrado en la resolución de las ecuaciones no lineales es generalmente grande, por lo que el análisis de una estructura neumática puede ser manejado mediante programas de computadora. Sin

embargo, los simples métodos analíticos o incluso el análisis de modelos han demostrado su efectividad para proceder al diseño ⁽³⁾. Por ejemplo, si se emplean membranas marcadas con una cuadrícula, es fácil medir la configuración exacta de la forma inflada y determinar la magnitud de las compresiones y tensiones sobre la superficie de las membranas; además, de que se puede estudiar el tipo de tensiones engendradas en la membrana para las diferentes condiciones de carga.

En nuestro caso analizaremos las formas neumáticas más comunes, como son la esférica y la cilíndrica, para las cuales, existen expresiones sencillas que permiten calcular las tensiones inducidas a la membrana. Estas expresiones se han determinado con modelos a base de películas de jabón, las cuales han resultado una analogía apropiada para el estudio de las estructuras neumáticas. Todos los modelos producidos con pompas de jabón se consideran, desde el punto de vista de su superficie, como formas neumáticas "ideales". Estos modelos determinan siempre el área más pequeña y el volumen más grande posible, dentro de las condiciones de borde o frontera que se establecen en la base de la estructura estudiada. Lo anterior es debido a la fluidez de su película, ya que cada forma se instala siempre donde hay tensiones iguales de membrana (fig. 24), es decir, donde todos los puntos de la superficie se someten a tensiones iguales; resultando con ello, una optimización de la forma en relación con el uso de materiales, al conseguirse un modelo sin "plegamientos".

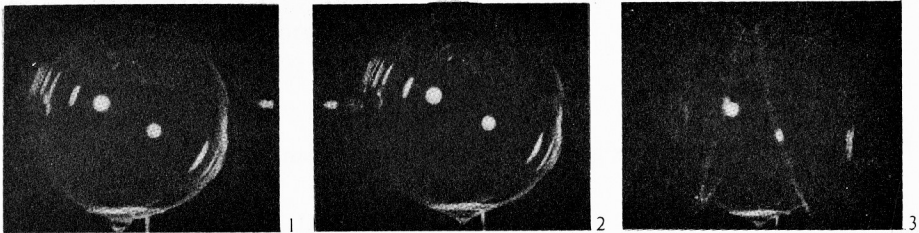


Figura 24. Prueba realizada en Inglaterra por el Real Establecimiento de Desarrollo Aeronáutico, en donde después de haber disparado una bala a través de una burbuja de jabón, esta se rompe uniforme y simétricamente, demostrando que existía una igualdad de tensiones en su superficie. (En 1 la bala ingresa a la burbuja por la derecha, en 2 la bala sale y en 3 la burbuja se rompe)

⁽³⁾ Vid. Herzog, Thomas; Pneumatic Structures, p. 164.

La ecuación que define las relaciones de una membrana bajo la carga de una presión interna es:

$$P_1 = (T_1/R_1 + T_2/R_2) \quad (4)$$

(fig. 25) donde:

T_1 : tensión en la membrana sobre el radio menor de curvatura.

T_2 : tensión en la membrana sobre el radio mayor de curvatura.

P_1 : presión interna.

R_1 : radio menor de curvatura de la superficie.

R_2 : radio mayor de curvatura de la superficie.

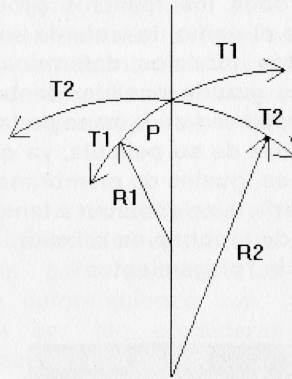


Figura 25.

Por lo que se refiere a las estructuras de forma cúpular o esférica:

$$R_1 = R_2 = R \text{ y } T_1 = T_2 = T$$

por lo que las tensiones en la membrana están determinadas por la siguiente expresión:

$$T = P_1 R / 2 \dots \dots \dots (1)$$

⁽⁴⁾ Herzog, Thomas; Pneumatic Structures, Crosby Lockwood Staples, London. 1976. p. 8

Y en el caso de la forma cilíndrica, donde solo hay un radio de curvatura:

$$T = P_1 \cdot R \quad \dots\dots\dots (2)$$

Si consideramos las tensiones generadas en las membranas de dos cúpulas (T_1 y T_2), que están sometidas a una presión interna igual ($P_1 = P_2$), pero el radio de curvatura de la segunda es el doble de la primera ($R_2 = 2R_1$) tenemos que:

$$P_1 = 2T_1 / R_1 \quad \text{y} \quad P_2 = 2T_2 / R_2$$

igualando las presiones P_1 y P_2

$$2T_1 / R_1 = 2T_2 / R_2$$

y como $R_2 = 2R_1$, sustituyendo en b o c, por ejemplo

$$2T_1 / R_1 = 2T_2 / 2R_1$$

simplificando términos se obtiene:

$$2T_1 = T_2$$

De lo anterior se deduce que si se consideran dos cúpulas que cubran áreas iguales y están sometidas a igual presión, pero cuyo radio de curvatura sea en una el doble que en la otra, las tensiones a las que se encuentra sometida la membrana con mayor radio de curvatura serán dos veces superiores a las tensiones de la otra (fig. 26). En términos más generales, si tenemos dos elementos, ya sean esféricos o cilíndricos, uno de mayor dimensión que el otro, a una misma presión interna, la membrana del elemento mayor estará sujeta a mayor tensiones.

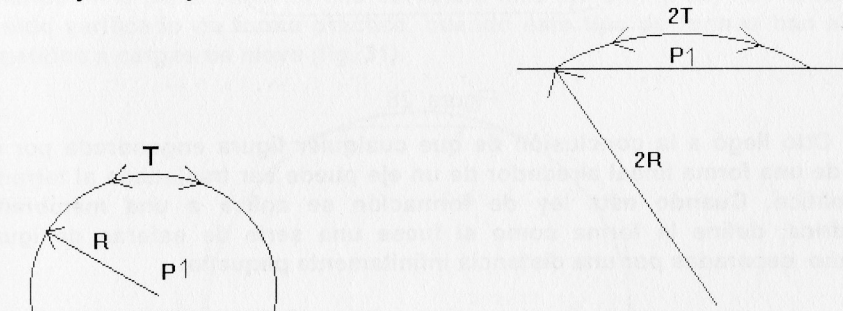


Figura 26.

A diferencia de lo que ocurre con las formas esféricas, donde las tensiones son las mismas en cualquier punto y dirección de su superficie, las formas cilíndricas presentan tensiones longitudinales que dependen de las

condiciones de los extremos del cilindro. Por ejemplo, si se eligen los mismos radios de curvatura, tanto para la superficie cilíndrica como para los segmentos esféricos utilizados para terminar sus extremos, entonces las tensiones longitudinales del cilindro (1 en fig. 27), tendrán el mismo valor de las tensiones que presenta el extremo esférico (2 y 3 en fig. 27), donde $T = P \cdot R / 2$. Sin embargo, las tensiones transversales o circunferenciales serán dos veces superiores a las tensiones anteriores (ver 4 en fig. 27), donde $T = P \cdot R$.

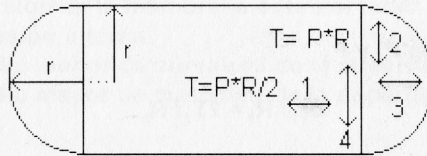


Figura 27.

Por otro lado, si se desea que las tensiones tiendan a tener el mismo valor en cualquier punto de la superficie del cilindro, será entonces necesario que el radio de los extremos esféricos sea dos veces superior al valor del radio del cilindro (fig. 28). Lo anterior se puede verificar "igualando" las tensiones de las fórmulas (1) y (2).

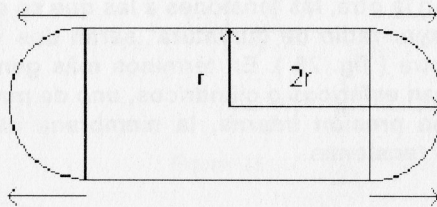


Figura 28.

Frey Otto llegó a la conclusión de que cualquier figura engendrada por el giro de una forma lineal alrededor de un eje puede ser trasladada al terreno neumático. Cuando esta ley de formación se aplica a una membrana cilíndrica, define la forma como si fuese una serie de esferas de igual tamaño separadas por una distancia infinitamente pequeña.

Ahora, el comportamiento de una estructura neumática bajo la acción de una carga externa, se puede ilustrar de manera práctica, analizando una forma semicilíndrica. Si consideramos a dicha forma con una membrana cuyo material tiene una carga de peso propio despreciable y una carga de intensidad "W", la carga total a través de la membrana, en un punto, es dada por:

$$P = P_1 - P_g \quad \dots\dots\dots (a)$$

donde,

$$P_g = W \cdot \cos \theta \quad b$$

sustituyendo (a) en (b):

$$P = P_1 - W \cdot \cos \theta$$

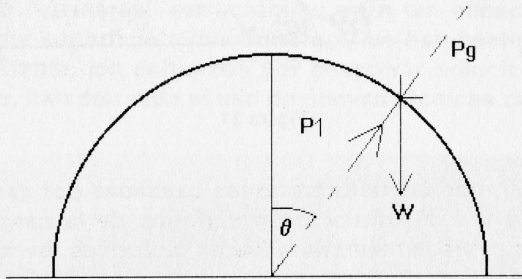


Figura 29.

De la expresión anterior, se deduce que la influencia de una carga de intensidad "W" es mayor en el plano horizontal y descende gradualmente hasta cero conforme se acerca al plano vertical; además, ante la existencia de una carga externa, las tensiones en la membrana se reducen. Por consiguiente, la estructura perderá la regularidad de su forma cilíndrica, tomando en la parte superior una curvatura más plana (fig. 30) . Lo anterior ha sido verificado de forma práctica, cuando este tipo de formas han sido sometidos a cargas de nieve (fig. 31).

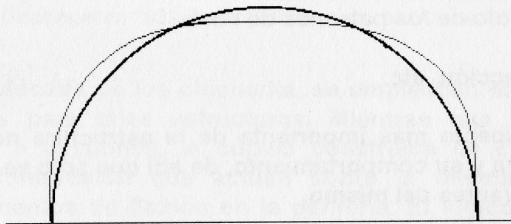


Figura 30.

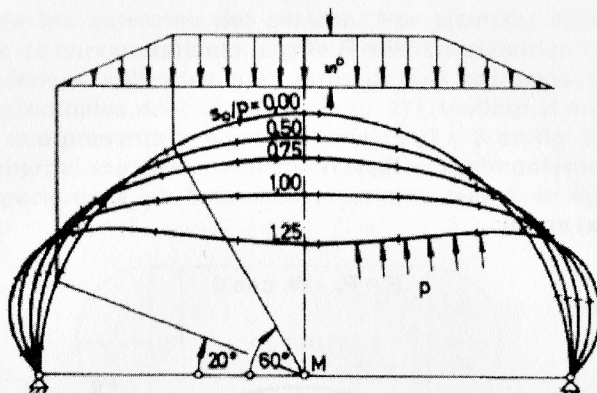


Figura 31.

Podemos concluir, que las deformaciones causadas por cargas externas se deben en parte a una distribución no uniforme de la carga, ya que si las cargas actuantes sobre la membrana fueran uniformes, bastaría entonces de una presión interior igual para poder soportarlas. Una solución a estas deformaciones es el incremento de la presión interna de la estructura, sin embargo, esto implica una membrana con mayor resistencia a la tensión, cuyo costo se eleva notablemente.

Es conveniente señalar que existen otros aspectos importantes en el análisis de una estructura neumática, como por ejemplo:

- El diseño y selección de la geometría más adecuada.
- Pruebas de seguridad de carga
- Selección y cálculo de los patrones de corte
- Manufactura, erección, etc.

No obstante, el aspecto más importante de la estructura neumática sigue siendo la membrana y su comportamiento, de ahí que sólo se mencionen los aspectos más relevantes del mismo.

CAPITULO 3. ESTRUCTURAS NEUMÁTICAS EN LA INGENIERÍA CIVIL

3.1 Cimbras neumáticas en la construcción de cúpulas de concreto

Las “cáscaras” estructurales de concreto reforzado, como los domos, son formas que bajo un diseño adecuado tienen un comportamiento estructural eficiente, al ofrecer entre otras cosas, máxima estabilidad, volumen interior máximo y un uso mínimo de materiales (fig. 32). Una estructura rectangular convencional requeriría de dos veces la cantidad de concreto y hasta cuatro veces la cantidad de acero de refuerzo que podría requerir una estructura similar pero de forma esférica. Sin embargo, las mismas características que hacen que estas “cáscaras” estructurales sean tan eficaces, capa delgada de concreto y una superficie curva continua, las han hecho caras y difíciles de usar. No obstante, los esfuerzos por encontrar soluciones adecuadas a estos problemas, han derivado el uso de nuevas técnicas constructivas.

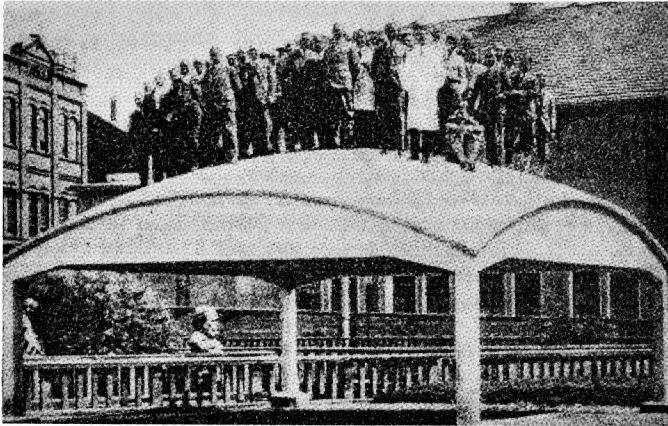


Figura 32. “Cáscara” experimental desarrollada por Dischinger en 1939, el espesor de la cáscara fue de 1.5 cm.

Al empezar la década de los cincuenta, se empleaban membranas inflables como modelos para tales estructuras. Mientras que la membrana está sometida sólo a tensiones, la cúpula construida de concreto tiene sólo esfuerzos a compresión que actúan sobre la misma, junto con unos pequeños momentos de flexión en la periferia. El lógico desarrollo de ello era el empleo de una membrana inflable que sirviera de cimbra para el concreto.

En el año de 1942 el ingeniero norteamericano Wallace Neff, empezó a experimentar con los globos neumáticos, empleándolos como cimbra para

la construcción de cúpulas de concreto. Aunque demostró que de esta forma podían construirse estructuras muy baratas, tropezó con dificultades técnicas que impidieron utilizar inmediatamente este método de construcción. En esa época el ingeniero Neff esparcía concreto sobre las cúpulas soportadas por aire que se hallaban bajo una presión entre 0.005 y 0.02 kg/cm², sin embargo, esta no fue suficiente para impedir la excesiva deformación causada por el peso del concreto, causa del agrietamiento del mismo, y además no era posible mantener una presión interna constante durante las fluctuaciones de temperatura. El uso de presiones suficientemente elevadas que impidieran la deformación y el consiguiente agrietamiento habría significado unas cimentaciones mayores y más costosas, por lo cual Neff intentó limitar la deformación de la estructura usando anillos de acero de refuerzo. No obstante, las investigaciones de Neff no descubrieron una solución viable de esas dificultades, por lo que transcurrieron dos décadas sin que la idea fuera explorada nuevamente. Posteriormente, el Dr. Dante Bini y el Arq. Haim Heifetz, explotaron comercialmente esta forma de construcción durante la década de los sesenta. El método del Arq. Haim Heifetz usaba entonces presiones "altas" de 0.1 kg/cm².

Actualmente, esta técnica de "cimbrado" para la construcción de cúpulas de concreto es empleada en diferentes lugares del mundo.



Figura 33. Casas Tipo "Iglú" hechas mediante una cimbra soportada por aire.

3.1.1 Método Binishell

En 1960 Dante Bini, arquitecto italiano, alcanzó los primeros éxitos sobre el uso de una cimbra soportada por aire en la construcción de domos de concreto. Su idea consistió, de manera general, en colocar a "nivel de piso" todo el acero y concreto requerido, que después erigió a través de la presurización de la cimbra, logrando con ello la formación y construcción del domo. Con esta técnica, logró reducir la mayor parte de las dificultades

constructivas; además de disminuir los altos costos de construcción. Desde entonces se han construido más de 1 500 domos alrededor del mundo utilizando esta técnica.

A continuación se muestra la secuencia de operaciones del método Binishell, que emplea como cimbra de contacto una membrana de neopreno reforzada con nylon o de PVC, flexible e impermeable al aire anclada en una cimentación periférica.

1. Al construir la cimentación periférica de concreto reforzado, se incorpora en ella un tubo de PVC que formará un “anillo” que permitirá sujetar la membrana de neopreno (fig.34).

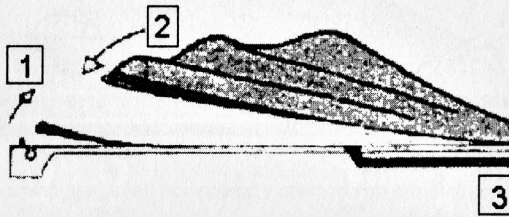


Figura 34. (1) Retiro del tubo de PVC de la cimentación, (2) colocación de la membrana de neopreno, (3) ducto para suministrar el aire.

2. Sobre la membrana se colocan refuerzos de acero en “espiral”, que se estiran y sujetan debidamente en la periferia de la cimentación (estos refuerzos “elásticos”, semejantes a un resorte, permitirán garantizar la forma de la estructura). Después se introducen, a través de estos últimos, las “varillas” de acero de refuerzo convencionales (fig. 35).

Enseguida el concreto se coloca con un espesor uniforme sobre la superficie ya preparada, y posteriormente ésta es cubierta por otra membrana *plástica* mucho más delgada, la cual tendrá la función de contener al concreto durante la erección (dicha membrana es usualmente de PVC). Por último, se instala un equipo de vibración fijado al centro de la membrana para proceder entonces al “inflado” de la cimbra (fig. 36).

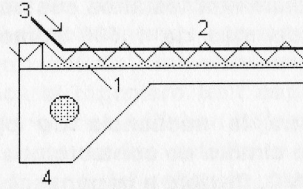


Figura 35. Colocación de materiales antes del "vaciado" del concreto. (1) Membrana de neopreno reforzada con nylon, (2) acero en "espiral", (3) introducción de "varilla" de refuerzo a través del acero en espiral, (4) cimentación.

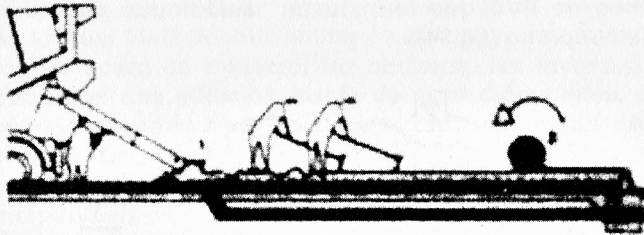


Figura 36. Distribución uniforme de concreto y colocación de la membrana exterior de PVC.

3. La entrada de aire se conduce por tuberías colocadas por debajo de la cimentación y conectada a una estación de compresores de aire que suministra una presión de entre 0.02 y 0.06 kg / cm^2 (200 y 600 kg / m^2), suficiente para levantar la masa de concreto y acero, en su posición final (fig. 37). Como la estructura se erige despacio, adquiriendo su forma, los "espirales" se estiran y las varillas se deslizan dentro de ellos alargándose mientras toman su posición final en la estructura.

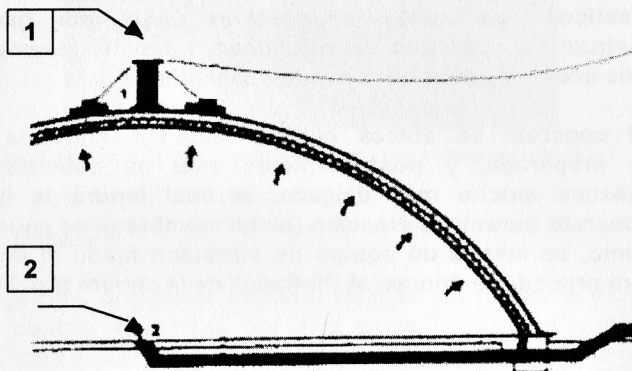


Figura 37. Erección del concreto y acero. (1) El equipo de vibración permanece en la parte superior del domo, (2) salida gradual de aire a presión.

4. Una vez que se ha llegado a la forma final, el concreto es vibrado a través de unos "tranvías" especiales sobre los cuales se montan vibradores eléctricos, que a su vez se atan por cables hacia una "bobina" que se encuentra apoyada en la "cima" del domo. Este dispositivo es conectado por un cable a una fuente de poder, para posteriormente, deslizar los tranvías alrededor de la periferia del domo mediante cables, donde a la vez descienden gracias a la bobina que desenvuelve el cable que los sujeta, y de esta manera, la superficie entera es cruzada por los vibradores.

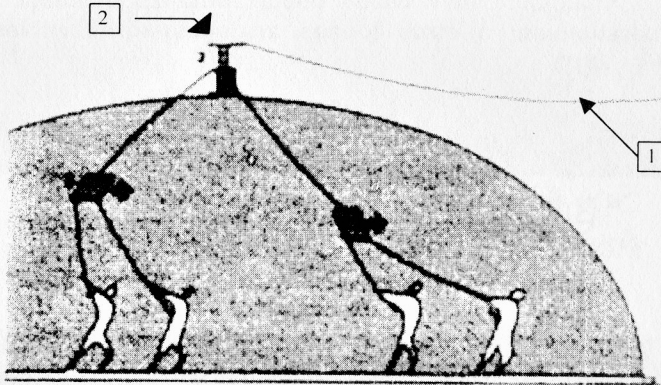


Figura 38. Vibrado del concreto. (1) Alimentación eléctrica del sistema de vibrado, (2) "bobina" que desenvuelve el cable que sujeta a los vibradores eléctricos.

5. Cuando el concreto ha logrado su capacidad autoportante, entre las 8 y 48 horas posteriores al "colado", la membrana externa de PVC se retira y después se disminuye la presión interior, logrando con ello, el "descimbrado" de la estructura. Enseguida se realiza el primer acceso cortando el concreto con una sierra, para retirar posteriormente, la membrana interior. Es conveniente señalar que el concreto no requiere de ningún "curado" especial, ya que desde que se encierra el concreto entre las membranas impermeables no existe una pérdida de agua.

Finalmente, las membranas y todos los demás dispositivos pueden ser usados en la construcción de un nuevo domo.

Este tipo de construcciones se han aplicado a diversos usos como: almacenes, oficinas, viviendas, centros deportivos, etc., con una variedad de tamaños que no rebasan los 36 metros de diámetro, aunque teóricamente se pueden construir de diámetros más grandes.

Una propiedad de los domos normales es que mientras la cantidad de concreto y acero requerido por unidad de área cubierta es casi una constante conforme se aumenta el diámetro, el concreto y el acero por unidad de volumen confinado por la estructura o domo disminuye significativamente conforme aumenta el diámetro. Por consiguiente, estas estructuras son particularmente eficaces para encerrar volúmenes más grandes.

La forma normalmente más usada hasta ahora es el elipsoide, pero la esférica, paraboloides, u otras formas análogas son factibles con este sistema (Fig. 39)

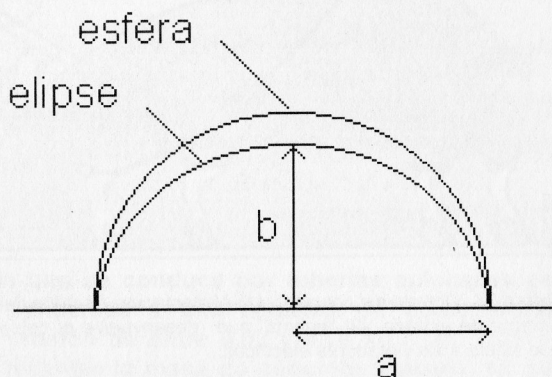


Figura 39.

Domos con condiciones de carga normales, construidos por el método Binishell tiene un espesor de concreto en promedio de 4 a 7 cm. En domos con cargas de diseño especiales, donde se requiere un mayor espesor de concreto, se puede aumentar el espesor de la "cáscara" al colocar una malla del acero por encima de la superficie de un domo recién construido y colocar concreto lanzado hasta alcanzar el espesor requerido.

Un ejemplo interesante de aplicación de esta técnica constructiva lo constituye el sistema de almacenamiento de grano desarrollado por Howe International Limited, Canadá. Este sistema que ha sido utilizado con éxito en países como Iraq y la India, consta de domos de concreto que rebasan las 200 000 ton de capacidad de almacenamiento⁽⁵⁾ (fig. 40 y 41).

⁽⁵⁾ American Concrete Institute. Concrete International. Publicación periódica. Enero 1986, p.51

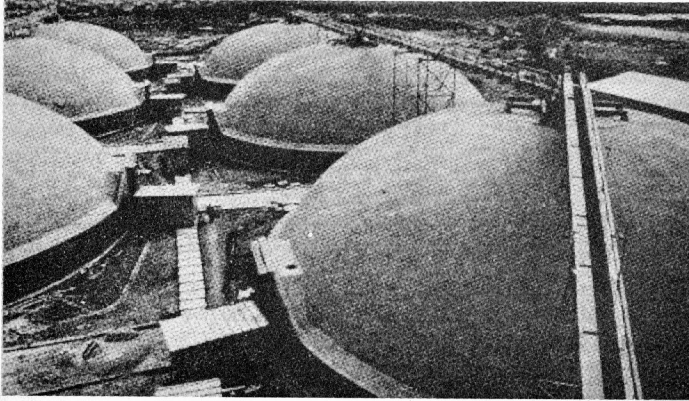


Figura 40. Estructuras de almacenamiento construidas en la India mediante la técnica Binishell.

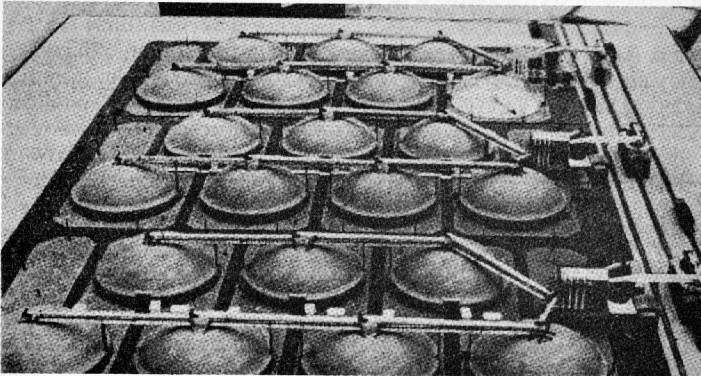


Figura 41. Modelo del sistema de almacenamiento desarrollado por Howe International Limited, a base de domos Binishell.

3.1.2 Método Turner y otros

En 1966, Lloyd Turner patentó el “domo de espuma” bajo el código número 3277219 U.S. Patent. Mismo que cambio posteriormente a la No. RE28,689. Este método constructivo de cúpulas de concreto se basa en rigidizar la forma neumática con espuma de poliuretano antes de colocar concreto y acero.

Hay que resaltar que la espuma poliuretano, el acero de refuerzo y el concreto lanzado se colocan en el interior de la cimbra, es decir, no están sobre la cimbra, lo que implica que trabajadores y maquinaria están en un ambiente presurizado. Hacerlo de esta forma tiene la ventaja de que cualquiera que sea el clima, los trabajos pueden continuar. La espuma de poliuretano tiene dos funciones, una es garantizar la forma adquirida por el elemento inflable y otra es servir como superficie para recibir el concreto lanzado. La presión en el interior de la cimbra esta ligeramente por arriba de la atmosférica, de tal suerte que se necesita la espuma para darle mayor rigidez. La diferencia entre el método binishell y el turner, es que el primero no necesita espuma de poliuretano, y que emplea en consecuencia, una mayor presión interna que le proporciona rigidez a la cimbra. Sin embargo, el método turner puede ser utilizado para domos con diámetros grandes, de hasta 61 metros, mientras que el binishell se emplea para diámetros más pequeños, de hasta 36 metros.

La mayor desventaja que presenta este método es el costo de la espuma de poliuretano, cuando el domo es pequeño o mediano, este método resulta muy competitivo; pero en domos grandes, la gran cantidad de espuma requerida encarece demasiado a la estructura.

La secuencia del método Turner en términos generales es la siguiente:

1. Construcción de la cimentación del Domo.
2. Colocación de una membrana de p.v.c. que se fija a la cimentación.
3. Inflado de la estructura neumática.
4. Se aplica a la cimbra neumática espuma de poliuretano que se rigidiza en forma instantánea.
5. Colocación de acero de refuerzo.
6. Colocación del concreto lanzado por capas.

Existen otros métodos muy parecidos al Turner, donde la cáscara se puede pretensar, postensar, o sustituir al acero de refuerzo por fibras sintéticas, pero en esencia, se sigue utilizando una membrana inflable que sirve de cimbra.

Esta técnica de "cimbra neumática" con espuma de poliuretano, fue aplicada en nuestro país en 1990 para un domo de almacenamiento de cemento.

Ante la necesidad de abatir el costo del flete y exportar cemento por vía marítima al estado de California en los Estados Unidos, la empresa Cementos Portland Nacional, S. A. de C. V., modificó sus instalaciones en el puerto de Guaymas, Sonora, con el fin de almacenar a granel el cemento proveniente de su planta de Hermosillo.

Para tal propósito, decidió construir un domo de almacenamiento con capacidad de 30,000 toneladas. Dicho domo, de 38.4 metros de diámetro y 30.7 metros de altura, fue construido por ICA⁽⁶⁾ (Ingenieros Civiles Asociados) mediante una cimbra neumática rigidizada con espuma de poliuretano (fig. 42). Con esa nueva capacidad de almacenamiento y las obras electromecánicas correspondientes, se permitió incrementar la capacidad de carga de 250 ton/h a 600 ton/h.

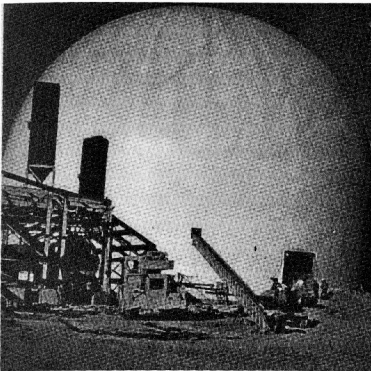
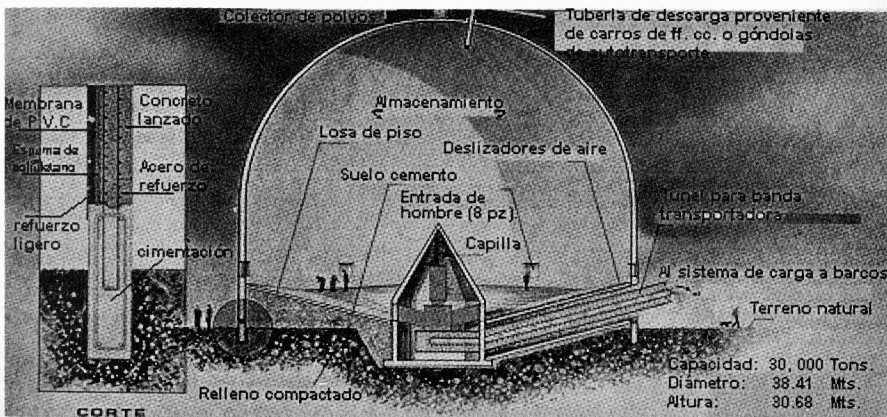


Figura 42. Sección del domo construido por ICA en Guaymas, Sonora, mediante cimbra neumática y espuma de poliuretano.



⁽⁶⁾ GRUPO ICA. Revista No. 67. 1990

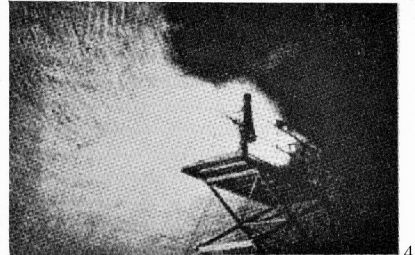
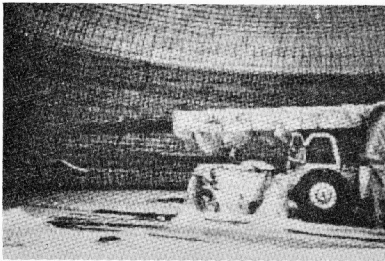
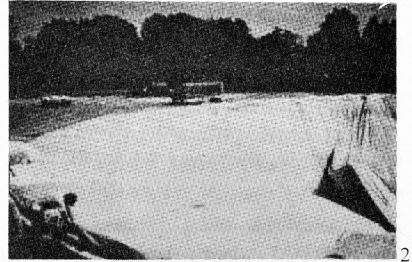
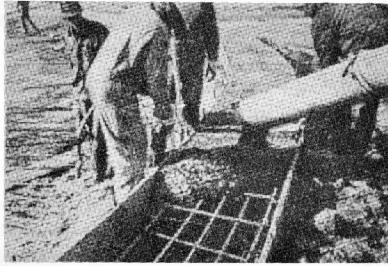


Figura 43. Secuencia usada por la empresa Monolithic Structures, en la construcción de un domo mediante cimbra neumática y espuma de poliuretano. 1.- Construcción de un "anillo" perimetral de tensión y una losa base (Cimentación). 2.- Colocación e inflado de la cimbra neumática. 3.- Rociado de una capa de espuma en el interior de la estructura neumática y sujeción del acero de refuerzo en ella. 4.- Colocación de concreto lanzado sobre la espuma y el acero de refuerzo.

Otro método diferente utilizado por el ingeniero Horral Harrington, que se basa en el método inicial de Neff, es aquel donde el concreto se coloca por el exterior y el acero de refuerzo es pretensado y postensado.

Después de haber inflado la cimbra neumática, se colocan una serie de cables "meridionales" que van de abajo hacia arriba de la forma erigida (fig.44). Estos cables radiales son colocados para controlar la forma final y proveer un refuerzo pretensado. Después de haber colocado estos cables y todo el acero restante (fig. 45), se aumenta la presión interior de la cimbra neumática. ⁽⁷⁾

⁽⁷⁾ American Concrete Institute. Concrete International. Publicación periódica. Enero 1986, p.65

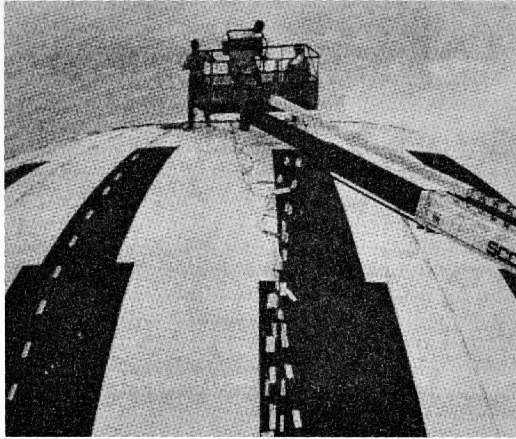


Figura 44. Colocación de cables meridionales en una cimbra neumática en Northampton, Inglaterra.



Figura 45. Fotografía desde el interior de la cimbra neumática. Los trabajadores colocan el acero de refuerzo perimetral.

Sin la “red” de cables radiales, la presión interior máxima tendría un valor de aproximadamente 61 kg/m^2 ($.0061 \text{ kg/cm}^2$), y con los cables, la presión interior se puede incrementar a 142.7 kg/m^2 (0.014 kg/cm^2). De esta manera, se permite una mayor rigidez en la cimbra, lo cual permite poder aplicar el concreto lanzado y aplicar los aproximadamente $2\,268 \text{ kg}$. de pretensado a los cables meridionales (fig.46).

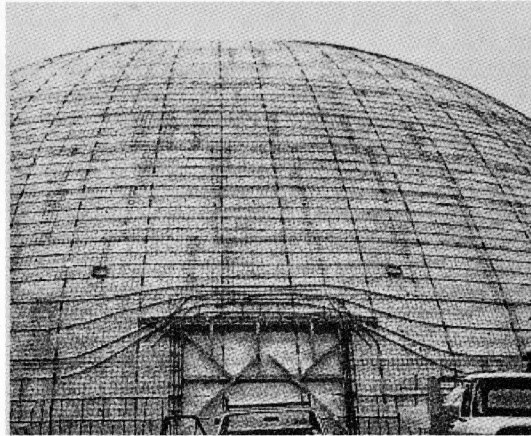


Figura 46. Con todos los refuerzos en su lugar, se procede con la colocación de concreto lanzado.

A todo el acero y cables, se les incorporan unos “separadores” plásticos, que permiten una separación de aproximadamente 3.8 cm sobre la superficie de la cimbra neumática. Los separadores también sirven como indicadores del espesor colocado de concreto lanzado. Cuando se cubren estos “separadores” completamente, el espesor de concreto lanzado es de aproximadamente 9 cm. Antes de que se coloque el concreto lanzado, los “tendones” para el postensado se instalan alrededor de la circunferencia de la cáscara.

Cada cable o “tendón” cubre 180 grados alrededor de la cáscara y después de que el concreto es colocado y curado, se tensan por unos bordes abiertos en la cáscara. Para asegurar el desarrollo completo de las fuerzas de postensado, se tensan ambos extremos con un valor aproximado de 2268 kg cada uno. El sistema de postensado mantiene los esfuerzos de compresión en el concreto, eliminando así, el agrietamiento por tensión causado por la presión interior debida al almacenamiento de algún material. Estas estructuras de almacenamiento construidas con este método, cuestan alrededor de 160 a 215 USD por m² de área cubierta y de 17.65 a 21.2 USD por m³ de espacio de almacenamiento.⁽⁸⁾

⁽⁸⁾ Ibid. p. 66. Enero 1986.

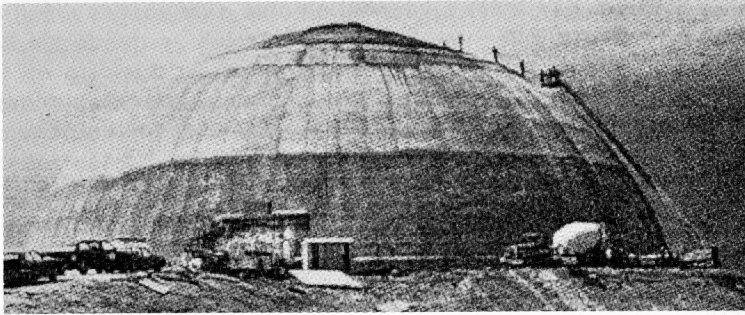


Figura 47. Domo de 57 metros de diámetro y 24 de altura, construido en Hinton, Alberta, Canadá, por HP Domes.

Un último ejemplo sobresaliente sobre la construcción de cúpulas a base de una cimbra neumática lo constituyen los refugios temporales desarrollados por la empresa Alemana Bayer. Estos refugios, utilizados en casos de emergencia, se pueden erigir con gran rapidez y son ligeros, lo que implica que su transporte sea fácil. Los refugios temporales se construyen a base de un molde inflable que recibe espuma de poliuretano que se rigidiza al instante (fig.48 y 49).



Figura 48

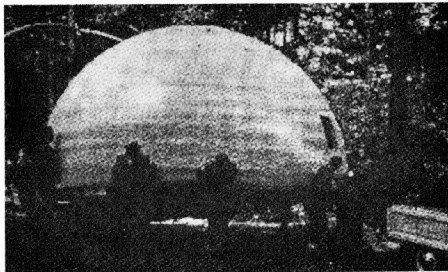


Figura 49.

Este tipo de refugios son útiles en zonas remotas o de acceso difícil, donde a consecuencia de desastres naturales, la población se queda sin hogar y las vías de comunicación se dañan, situación por la cual, no es posible hacer llegar con rapidez materiales para refugios temporales convencionales. Este tipo de elementos han sido utilizados en países como Perú y Turquía.

3.2 Otros usos de cimbras neumáticas

La meta de todo sistema soportado por aire o cimbra neumática, ha sido colocar concreto en una forma geoméricamente eficiente para reducir los costos de la construcción. La cimbra neumática empleada en la construcción de cúpulas de concreto, no es el único caso donde se utiliza este tipo de cimbra para la construcción de una estructura de concreto reforzado. La cimbra neumática va más allá del domo, ya que se pueden usar para construir puentes en arco, tubos de concreto, líneas de alcantarillado, o cualquier forma de sección cilíndrica.

Un constructor considera muchos factores para seleccionar un sistema de cimbrado. Éstos incluyen el costo inicial de la cimbra, el número de veces que se puede usar, la adaptabilidad de la cimbra para otros proyectos, la labor que se requiere para preparar, fijar, limpiar, transportar, y almacenar la cimbra, así como cualquier otra ventaja incorporada en la cimbra. Pero el argumento más importante sigue siendo la economía. Para una cimbra neumática se deben incorporar todo los factores mencionados anteriormente, de tal manera, que el factor costo-eficiencia sea aceptable y se pueda competir con los métodos tradicionales.

Un sistema constructivo interesante al respecto, es manejado por la compañía norteamericana Concepts in Concrete, Inc., que maneja cimbras neumáticas cilíndricas que son ajustables y reusables para crear formas en arco o estructuras encorvadas, logrando con ello, aprovechar las ventajas estructurales de una forma en arco mediante un proceso constructivo simple, que permite en consecuencia, la reducción de costos.

En este caso, las cimbras neumáticas tienen gran versatilidad para adquirir diferentes tamaños. La misma cimbra cilíndrica puede ser usada para construir una "cáscara" de 4.9 m de diámetro hasta una de 0.9 m, lo anterior se logra simplemente ajustando unas correas longitudinales que restringen la forma cilíndrica.

La construcción de la cáscara empieza con la colocación de una superficie plana como base y las cimentaciones. Cilíndrica y cerrada en los extremos,

la membrana de la cimbra neumática se infla y se restringe por correas del acero flexibles espaciadas a intervalos regulares (fig.50).

Se puede ajustar la longitud de estas correas para controlar el tamaño y forma del arco por crear. Las correas se enganchan en horquillas formadas por varillas del # 3 que se empotran en el suelo y a su vez en la tabla, o incrustadas en secciones cortas directamente en la tabla. El Acero de refuerzo se apoya en "separadores" por encima de las correas exteriores longitudinales que controlan la forma. Entonces se encorvan las varillas verticales por encima de la forma inflada proporcionando así el refuerzo del concreto (fig.51).

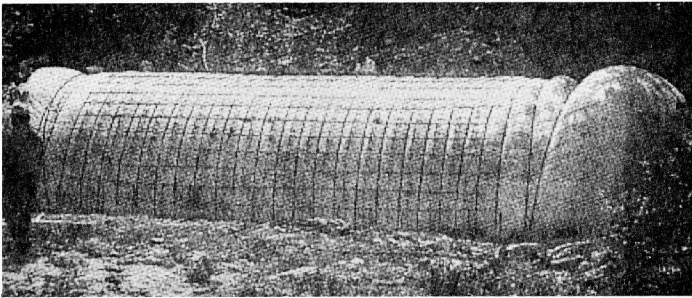


Figura 50. Cimbra neumática cilíndrica restringida por "correas" de acero

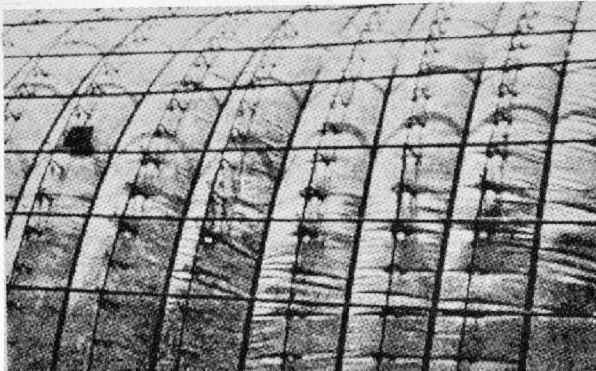


Figura 51. Detalle del acero de refuerzo y de las "correas" que restringen la cimbra neumática.

Una vez que el acero de refuerzo está en su lugar, se ajusta la presión interna de la forma y se aplica una capa de concreto lanzado de varias pulgadas. Cuando se ha desarrollado la capacidad autosoportante del concreto, se "desinfla" la cimbra y se retira, terminando con una colocación de impermeabilizante en el interior o exterior de la superficie del concreto.

Las cimbras neumáticas pueden ser usadas individualmente o en combinación, y pueden tener de 40 a 50 usos en diferentes proyectos, no se requiere de una forma predeterminada y se pueden transportar fácilmente en una camioneta.

Las "correas" que restringen la cimbra tienen dos funciones, la primera es garantizar la geometría deseada de la estructura y la segunda es permitir incrementar la presión interior de la misma. Esto último se logra al desarrollarse un radio de curvatura más pequeño en la membrana entre cada intervalo de las "correas", es decir, al reducir el radio de curvatura en la superficie de la membrana se pueden usar presiones más altas. La presión interior empleada en este método constructivo oscila entre los 500 y 635 Kg/m².

Este tipo de cimbra neumática "ajustable" la cual esta cerrada en sus extremos y con una geometría no determinada se puede usar como un módulo de gran versatilidad. Colocando las formas cilíndricas paralelas una a otra, "colando" arcos parciales, y usando columnas de acero que sirven de apoyo para los arcos formados, se pueden juntar varios de estos arcos para abarcar claros más grandes (fig. 52 y 53). Este proceso constructivo sería útil para almacenes, obras residenciales o estructuras bajo tierra.

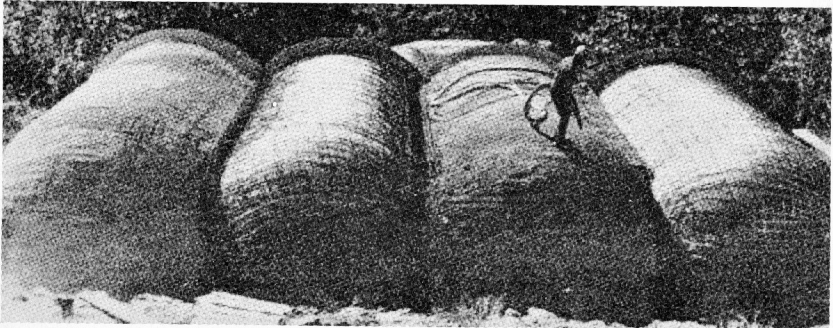


Figura 52. Las cimbras cilíndricas paralelas pueden formar arcos para abarcar claros más amplios.

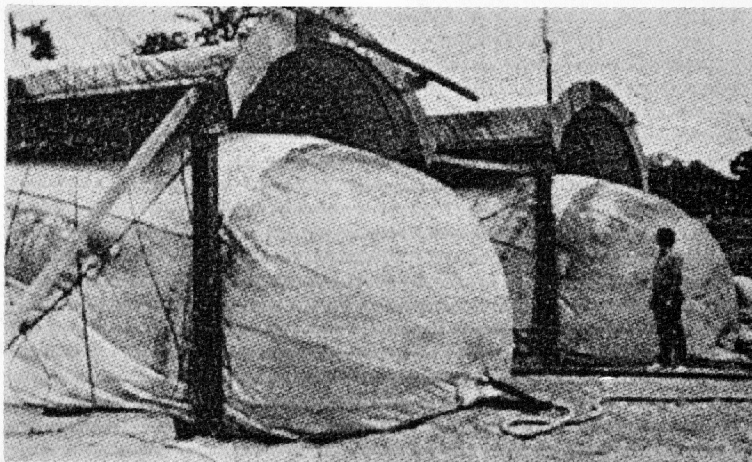


Figura 53. "Descimbrado" de arcos formados por cimbras neumáticas cilíndricas.

Si se encierran ambos extremos de la forma, la cáscara en forma de "barril" también se puede usar como un recipiente de agua o tanque del almacenamiento. Los silos se pueden construir si colocamos verticalmente las cimbras cilíndricas, y los puentes arqueados pueden ser hechos con los cilindros neumáticos en forma horizontal. Asimismo, se pueden usar los cilindros neumáticos para formar alcantarillas continuas o todo tipo de estructuras de desagüe.

Las cimbras neumáticas pueden ser muchos más versátiles *in situ* que una estructura rectangular convencional. Por ejemplo, en un proyecto en Tulsa, Oklahoma, E.U., donde se requirieron varios puentes arqueados, el proyectista escogió el sistema neumático por su rapidez y bajo costo. Se cimentaron los puentes en piedra sólida y sólo tomó seis horas para inflar la forma, colocar todo el acero de refuerzo y concreto lanzado. En algunos casos se requirieron arcos dobles para abarcar el claro correspondiente o en otros, diferentes elevaciones, pero todos se construyeron con la misma cimbra (fig. 54 y 55). Los costos de un puente de arco de 180°, con un claro de 6.7 m, altura de 2.1 m y 2.6 m de ancho requirió de 800 USD. ⁽⁹⁾

⁽⁹⁾ Ibid. p. 60. ENERO 1986

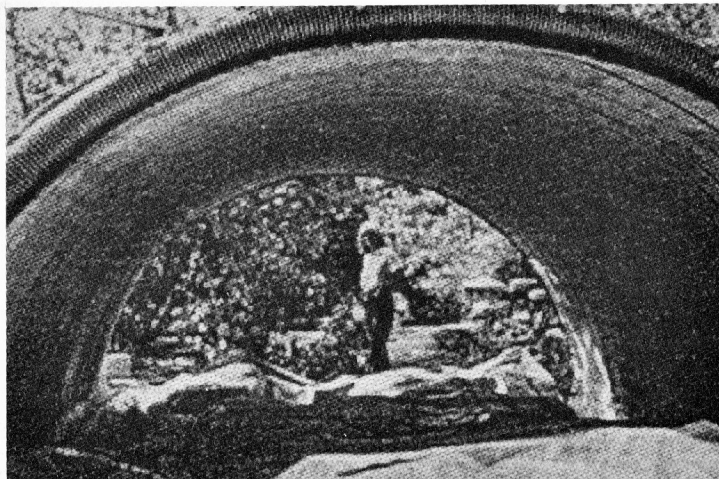


Figura 54. Aspecto interior de un arco terminado después de haber "descimbrado" la estructura.

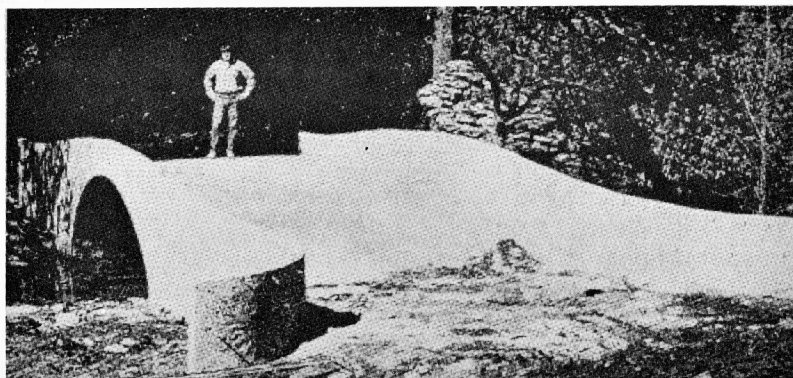


Figura 55. Puente terminado a partir de un arco de 5.5 m de ancho, 1.2 m de alto por 6.1 m de largo.

Otra perspectiva de las cimbras neumáticas, es que pueden ser usadas para elementos prefabricados, es decir, se podrían construir "tubos" prefabricados de desagüe con una inversión mínima porque el método requiere menos labor, y posee además el rasgo de ajustabilidad.

En un proyecto donde se demanda el uso de una estructura prefabricada, pero la transportación representa una importante erogación, o el tamaño más grande dicta un "izamiento de la estructura", una prefabricación *in situ*

puede ser una solución. La empresa de los prefabricados podría transportar fácilmente las formas inflables, de tal manera, que una estructura grande, como un paso a desnivel, se podría construir inflando la cimbra y “colar” inmediatamente. Esta aplicación de cimbras neumáticas sería conveniente para los sitios remotos.

En el caso de la construcción de estructuras de drenaje mediante la cimbra neumática cilíndrica, se utilizaría una losa armada que serviría como cimentación y plantilla del conducto, y se restringiría la forma inflada cilíndrica mediante las correas para darle las dimensiones deseadas para posteriormente colocar el acero de refuerzo por encima de la forma, posteriormente se aplicarían 15 centímetros de concreto lanzado. De esta forma se crea una sección en arco de concreto reforzado que forma el conducto.

No obstante, la idea de construir conductos cilíndricos mediante una cimbra neumática ya ha sido empleado por la firma Alemana Noe- Shaltechnik⁽¹⁰⁾, para la producción in situ de conductos de concreto, que es bastante económico para ser empleados en tubos de gran sección (fig. 56).



Figura 56. Construcción de ductos *in situ* utilizando una cimbra neumática.

⁽¹⁰⁾ Herzog Thomas, op. cit. p. 185.

Un concepto análogo al anterior, es el desarrollado por R. L. Nicholls, catedrático en Ingeniería Civil de la Universidad de Delaware, quien propone la construcción de conductos de concreto, y grandes depósitos de almacenamiento, mediante elementos inflables⁽¹¹⁾.

En lo que respecta a la construcción de los mismos, el profesor Nicholls propone los siguientes elementos (fig. 57):

1. Membrana reforzada de polipropileno, tanto exterior como al interior de la sección a construir.
2. Sellos formados por los bordes de la misma membrana.
3. Elemento inflable o cimbra inflable de polietileno con espesor de 0.254 mm.
4. Concreto.
5. Barra de acero o PVC.
6. Anclas.

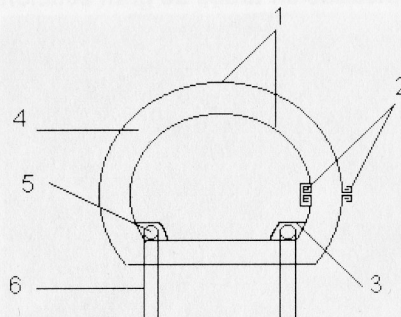


Figura 57

Para realizar el inflado, se puede emplear un ventilador con motor de un 1/3 de HP o cualquier otro dispositivo que proporcione una presión de 0.015 kg/cm², como puede ser un compresor de aire común, sin embargo, se debe tener en cuenta que no se tiene que exceder la capacidad a la tensión de la membrana, por lo que resulta aconsejable valores máximos de presión de 2 kg/cm².

Es importante señalar que la membrana de polipropileno tiene una resistencia adecuada a la degradación, en especial a los valores extremos de ph, de 13, que produce la hidratación del cemento.

⁽¹¹⁾ Nicholls, R. L., "Inflated concrete pipes and bulk storage containers" Bulletin, International Association For Shell and Spatial Structures, No. 76, Abril 1982, p. 55-62.

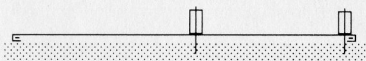
El peso de este tipo de membrana puede oscilar entre 0.05 a 0.3 kg/m², lo que hace accesible su manejo manual.

El proceso constructivo propuesto por el profesor Nicholls es el siguiente:

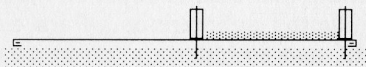
1. Hacer la nivelación del suelo correspondiente y colocar la membrana exterior, teniendo preparados los extremos de la membrana para su posterior unión.



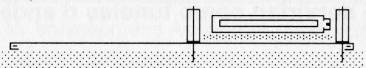
2. Colocar "fronteras" de madera, sujetándose los extremos de éstas al suelo.



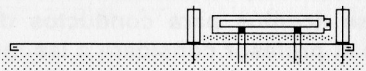
3. Poner una capa de concreto entre las fronteras, si el volumen de concreto es grande se puede utilizar un aditivo "retardante" en el mismo.



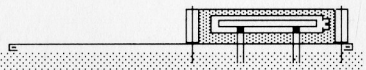
4. Acomodar la membrana interior y la cimbra neumática. La cimbra se coloca en el interior de la membrana.



5. Instalar barras horizontales y anclas, en caso de requerir una plantilla del conducto plana. Las barras se insertarán entre la membrana interior y la cimbra neumática.



6. Colocar la capa superior de concreto.



7. Quitar las *fronteras* de madera y cubrir con la membrana exterior restante, la superficie del concreto recién colocado; asimismo, realizar la unión de los extremos de la membrana. Si se requiere, se puede realizar un *vibrado* exterior.



8. El inflado de la membrana puede ser con aire o agua.



Por último, bastará con el desinflado de la cimbra para poder “descimbrar” el ducto elaborado. De manera análoga al procedimiento constructivo anterior, el profesor Nicholls también ensaya, en modelos a pequeña escala, la construcción de conductos submarinos. Para este caso, él utiliza una mezcla seca de concreto, que se hidrata a través de pequeñas aberturas en la membrana exterior. Una vez húmeda la mezcla, se procede al inflado de la cimbra usando agua para mantener al conducto sumergido. Esta técnica se podría usar, según Nicholls, en la construcción de grandes estructuras cilíndricas marinas que servirían como túneles o andenes.

El profesor Nicholls compara en un análisis de costos, a diferentes tipos de conductos con su técnica propuesta. En dicho análisis y solo por mencionar algunos casos, su técnica constructiva permite un ahorro aproximado de 28 % en conductos de 0.90 m de diámetro si lo comparamos con un conducto similar de asbesto-cemento. Asimismo, para un conducto o tubo de 1.8 m de diámetro de concreto reforzado, el ahorro es de 40%. Para todos los casos, el ahorro se acentúa para conductos de mayor diámetro. Es importante señalar que el profesor considera a las membranas utilizadas en su técnica constructiva, como refuerzos a tensión del concreto. Aunque el profesor Nicholls no presenta un análisis de cargas o métodos de diseño, su propuesta es, por sí misma, una alternativa muy atractiva.

3.3 Aplicaciones y proyectos diversos

3.3.1 Diques y puentes

Una de las aplicaciones más importantes de las estructuras neumáticas en la ingeniería civil son los diques “inflables”. Esta estructura, que fue comercializada por la empresa “Firestone” en 1957, consta básicamente de un cilindro neumático que puede llenarse de aire o agua para contener las aguas. Los primeros diques fabricados por firestone tenían 1.5 m de altura y 40 m de largo, actualmente la altura puede ser de más de 7 m y la longitud mayor de 600 metros, aunque pueden unirse varias unidades entre sí para formar mayores longitudes (fig. 58 y 59).

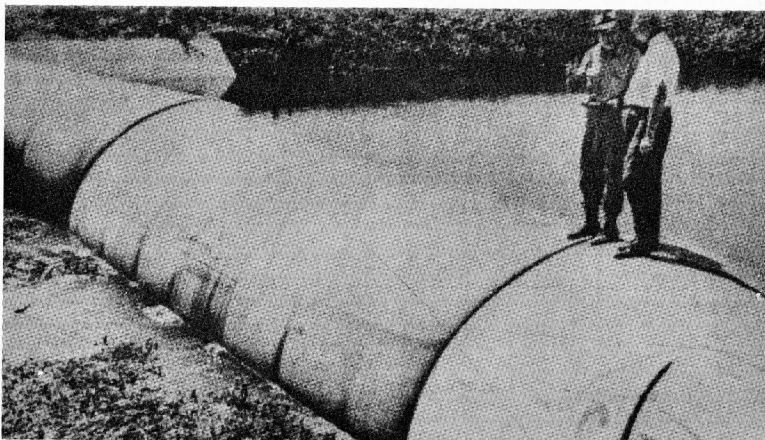


Figura 58 Fabridam, diseño: N.M. Imberson and Associates, fabricación: Firestone Coated Fabrics Company.

La membrana del cilindro está construida a base de un tejido de poliamida revestida de neopreno, que se fija por medio de tornillos sobre una base de concreto reforzado previamente construida (fig. 60). Posteriormente se llena de agua o aire, aunque también se ha empleado con éxito el uso de un sistema mixto (fig. 61).



Figura 59. Aplicando regularmente una capa nueva de hypalon al exterior de la membrana se puede obtener un periodo de vida útil de alrededor de 20 años.

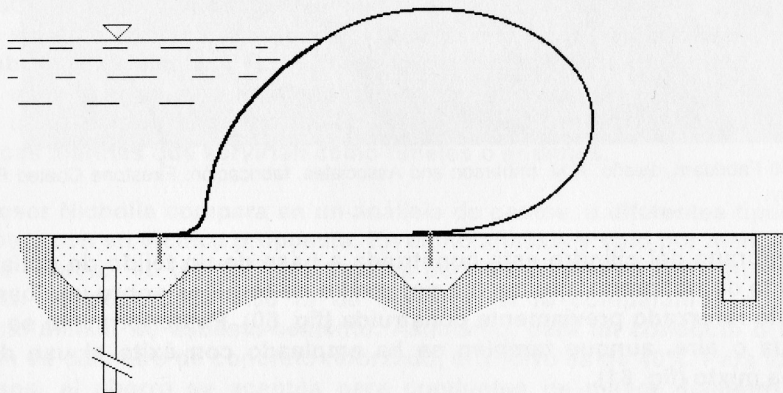


Figura 60. Anclaje de la estructura neumática cilíndrica en una base de concreto reforzado.

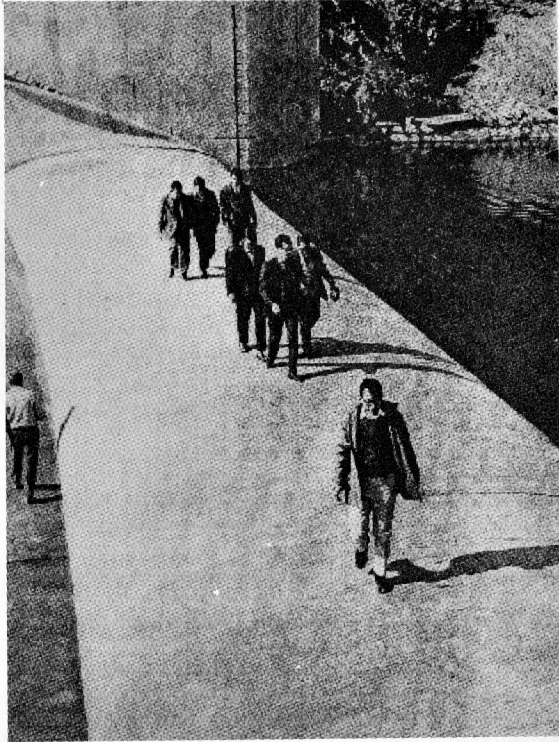


Figura 61. "Fabridam" en el río Taiipo de Hong Kong, fabricada en nylon revestido de neopreno e hypalon. Esta estructura, parcialmente llena de agua, controla la corriente del río, y cuando el nivel de las aguas "baja" se puede caminar por su superficie.

La altura de la estructura neumática, sobre el nivel del agua, puede controlarse simplemente aumentando o disminuyendo la cantidad de fluido dentro de la estructura. Además, el medio interno de soporte puede ser vaciado por completo en unos pocos minutos y la membrana descansará entonces, totalmente aplanada, sobre la base del concreto.

Una modalidad de este tipo de elementos, pero más pequeños, son usados para el control de flujo en alcantarillas y son fabricados también por Firestone (fig. 62).

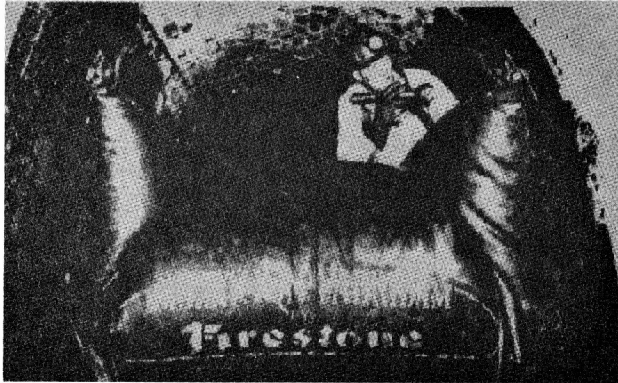


Figura 62

La principal ventaja de los diques inflables o “fabridams” es su rapidez de reacción frente a los diferentes niveles que puede tener una corriente fluvial, característica que no se puede lograr con una estructura convencional. Actualmente este tipo de elementos son usados en los E.U. para el control de inundaciones.

Puentes

Otra propuesta de aplicación de estructuras neumáticas cilíndricas, es en la construcción de un puente peatonal “flotante”. Dicho concepto fue presentado en el Simposium internacional de neumática de Delft en 1972, y consta básicamente de un cilindro inflable de aproximadamente tres metros de diámetro que flota sobre un cuerpo de agua. Este cilindro, debidamente sujetado en ambos extremos, permite el ingreso de personas a su interior mediante esclusas que se encuentran en los extremos del mismo. La gente puede entonces, “cruzar” el cuerpo de agua por su propio pie (fig. 63 y 64).

Este tipo de elementos pueden ser útiles en áreas afectadas por inundaciones, donde la población sería evacuada de forma rápida y masiva.



Figura 63. Interior del puente peatonal "flotante".

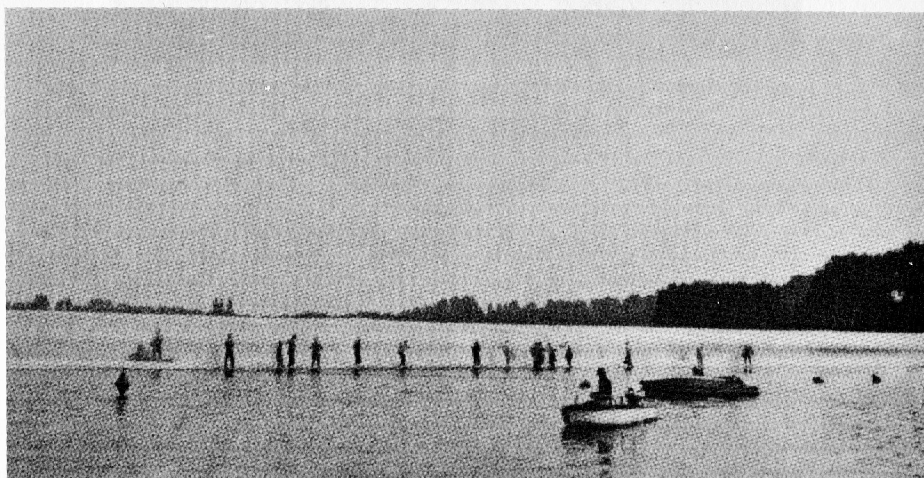


Figura 64. aspecto general del cilindro neumático que sirve de puente.

Un concepto muy parecido al anterior, es una idea presentada por Frei Otto en su primera obra sobre estructuras neumáticas y que se refiere a un puente carretero flotante formado con un cilindro dividido en dos partes (fig. 65 y 66), en donde la parte superior sirve como ventilación y la segunda se utiliza para albergar al agua que sirve de lastre, el cilindro es estabilizado neumáticamente.

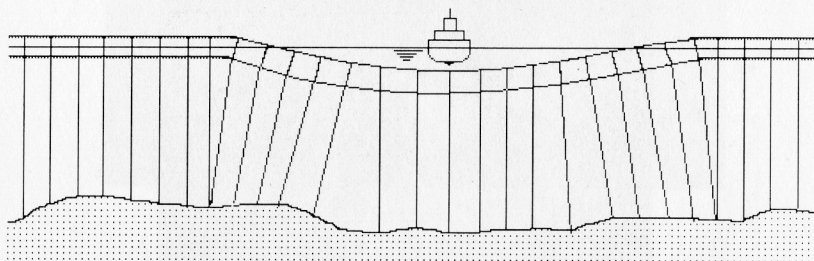


Figura 65.

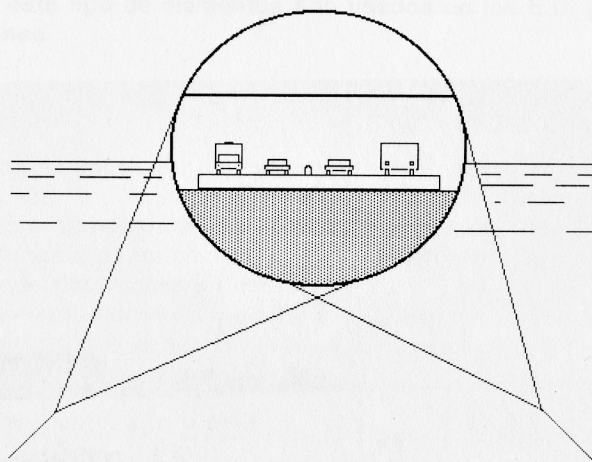


Figura 66.

Otro caso de puente "inflable" lo constituye un puente desarrollado en Inglaterra con fines militares, y aunque el claro del mismo es pequeño, de 5 metros, su mayor atributo es su portabilidad, cualidad que muy pocos de los restantes tipos estructurales ofrecen (fig. 67, 68 y 69).



Figura 67. Puente "inflable" de alta presión interna y peso propio de 350 kg.

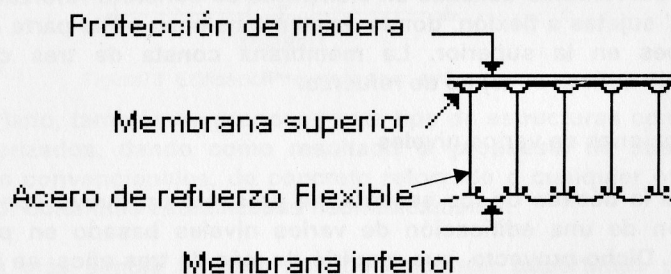


Figura 68. Sección básica del puente. Nótese que existen refuerzos a tensión en la parte inferior.

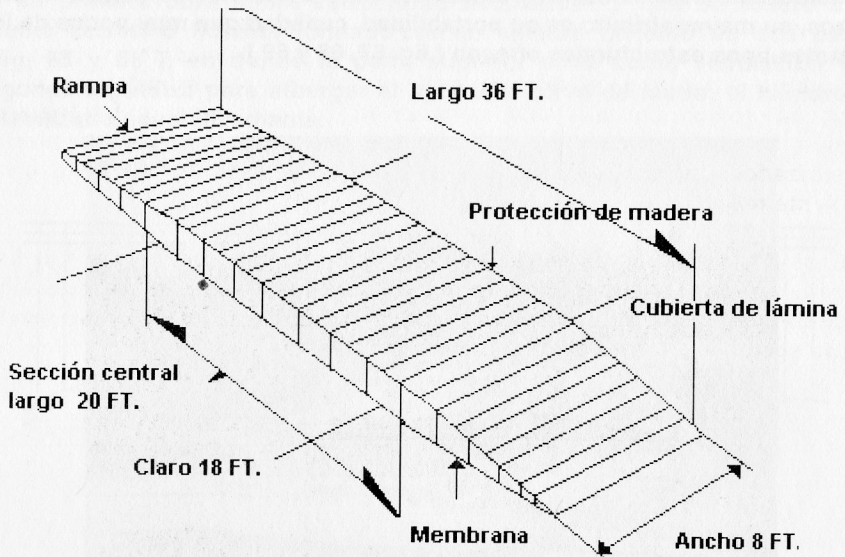


Figura 69. Puente diseñado y fabricado por la milicia inglesa (1965).

La sección central y las dos rampas se dividen a lo largo de su longitud en cámaras individuales que a la vez son reforzadas con cables de acero en las zonas de tensión. La posición del refuerzo a tensión es similar a la colocación del refuerzo utilizado en elementos de concreto reforzado, como las "trabes" sujetas a flexión, donde existen tensiones en la parte inferior y compresiones en la superior. La membrana consta de tres capas de neopreno que cubren el tejido de refuerzo.⁽¹²⁾

3.3.2 Edificaciones de varios niveles

A finales de la década de los sesenta, se presentó un nuevo concepto de construcción de una edificación de varios niveles basado en principios neumáticos. Dicho proyecto, que requirió de más de tres años, se investigó en la sección de ciencia arquitectónica de la Universidad de Sydney, Australia.

⁽¹²⁾ Herzog Thomas. op. cit. p. 61

Los resultados de esta investigación formaron parte de una tesis de doctorado y de varias publicaciones técnicas,⁽¹³⁾ que tratan básicamente de "edificios neumáticos" rodeados por una membrana delgada, flexible o rígida que actúa como un recipiente estructural. Básicamente podemos describir a este tipo de edificación como un cilindro presurizado, que sujeta a los entresijos por su parte superior mediante cables que trabajan a tensión, lo que implica a su vez, que sus ocupantes estén en ambientes presurizados. La concepción de este tipo de estructuras se basa en la siguiente reflexión:

Si $1 \text{ psi} = 703 \text{ kg/m}^2$, y considerando que la cantidad anterior se aproxima a la carga de diseño de una losa normal de una edificación, es lógico asumir entonces, que por cada libra por pulgada cuadrada de presión interna, se puede sostener una losa (fig. 70).

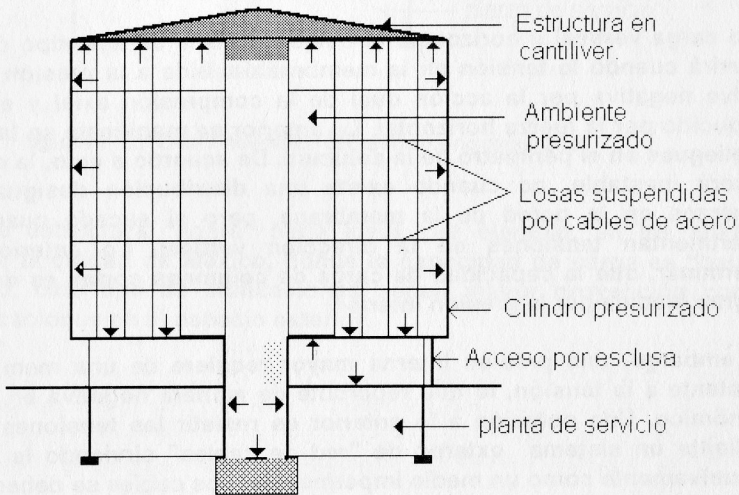


Figura70. Edificación neumática con ambiente presurizado.

Por otro lado, también se proponen este tipo de estructuras con ambientes no presurizados, dando como resultado la propuesta de sustituir a las columnas convencionales, de concreto reforzado o cualquier otro material rígido, por columnas estabilizadas neumáticamente.

La forma más simple de este tipo de columnas soportadas por aire, es similar a un tubo de plástico flexible sellado por ambos extremos por secciones circulares y presurizado internamente.

⁽¹³⁾ Pohl, Jens G. and Cowan H.J., Multi-Storey Air-Supported Building Construction, *Structures Report*, Department of Architectural Science, University of Sydney Australia 1972.

Similar a un conducto a presión, la columna resultante experimenta tensiones sobre toda la superficie curva. Si se aumenta la presión interior continuamente y los discos del sellado son suficientemente resistentes, eventualmente el muro de la columna estallará como resultado de una falla a tensión. Naturalmente, en su estado inflado la columna de la membrana es capaz de soportar cargas verticales aplicadas al extremo superior o suspendidas de la misma internamente.

La propuesta de columnas de membrana presurizada a la construcción de edificaciones de varios niveles requirió de un conocimiento convincente de los mecanismos de falla. Lo anterior requirió de miles de pruebas realizadas a este tipo de elementos presurizados, encontrándose que para columnas cortas, la capacidad de carga de dichos elementos es directamente proporcional a la presión interna, espesor de la membrana y elasticidad del material.

Bajo carga vertical y horizontal, el estado de falla de este tipo de columna ocurrirá cuando la tensión en la membrana debida a la presión interior se vuelve negativa por la acción dual de la compresión axial y el momento producido por la fuerza horizontal. Lo anterior se manifiesta en la formación de pliegues en el perímetro de la columna. De acuerdo a esto, la columna se volverá inestable, no cuando exista una distribución desigual de los esfuerzos en la pared de la membrana, pero si sucede cuando no se experimentan tensiones en la dirección vertical. Lo anterior permitió determinar, que la capacidad de carga de columnas cortas es determinada en gran medida por la presión interior.

Sin embargo, una presión interna mayor requiere de una membrana más resistente a la tensión, lo que repercute de manera negativa en el aspecto económico. Una solución a lo anterior es resistir las tensiones inducidas mediante un sistema externo de "red de cables" sirviendo la membrana exclusivamente como un medio impermeable. Los cables se deben inclinar a un ángulo óptimo, simétricamente con respecto a un eje vertical para contrarrestar de manera más efectiva las cargas horizontales inducidas por la acción del viento o sismo. Bajo estas circunstancias, la resistencia a tensión requerida por el material de la membrana descenderá substancialmente, dejando un rango mucho más amplio de materiales plásticos como posibles alternativas.

Se proponen varios diseños, uno de ellos consiste en una edificación que tiene en el centro de la misma un cilindro presurizado, como estructura principal, y en la parte superior una estructura en cantiliver que se encarga de sostener las losas mediante cables de acero (fig. 71).

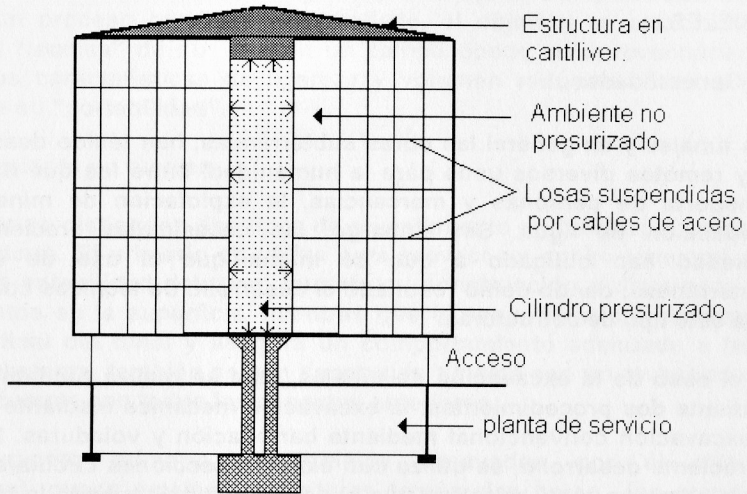


figura 71. Edificación neumática con ambiente no presurizado.

Este tipo de estructura "ligera" sería ideal, por ejemplo, en los suelos arcillosos de la ciudad de México, donde la capacidad de carga es "baja". Sin embargo, este tipo de edificaciones tienen mayor proyección como futuras edificaciones en el espacio exterior.

CAPITULO IV. CASO PRÁCTICO: PROPUESTA DE CIMBRA NEUMÁTICA EN TÚNELES

4.1 Generalidades

Los túneles y en general las obras subterráneas, han tenido desde tiempos muy remotos diversos usos para la humanidad, entre los que destacan: el transporte de personas y mercancías, la explotación de minerales y la conducción de agua. Sin embargo, las necesidades crecientes de la sociedad han obligado a que se intensifique el uso de estructuras subterráneas, dando como resultado el desarrollo de técnicas constructivas para este tipo de estructuras.

En el caso de la excavación de túneles, este se realiza fundamentalmente mediante dos procedimientos: la excavación mecánica mediante escudos y la excavación convencional mediante barrenación y voladuras. El primero, de reciente desarrollo, se utiliza con éxito en secciones circulares tanto en suelo como en roca, mientras que el segundo, sigue siendo la técnica más utilizada debido a que se pueden construir secciones más amplias y de diferente geometría. Independientemente de la técnica de excavación del túnel, este tipo de estructuras requieren por lo general de un revestimiento de concreto *in situ*, lo que implica el uso de cimbras adecuadas a las condiciones de trabajo.

Los diferentes tipos de túneles requieren características de cimbrado particulares, sin embargo, todos tienen una característica particular: acceso restringido y un espacio de trabajo reducido. El acceso restringido y el espacio limitado de trabajo son factores importantes en el diseño de cimbras para obras subterráneas. Por lo tanto, el diseñador debe proporcionar un rehuso máximo, movilidad y volumen mínimo, de acuerdo con los procedimientos específicos de la colocación del concreto.

De manera inmediata, se puede vislumbrar que una "cimbra neumática" podría ser una alternativa adecuada a tales características, sin embargo, no se tienen noticias de su empleo en este campo de la ingeniería civil, a pesar de que tal idea ha sido sugerida por diversas personalidades involucradas con las estructuras neumáticas. Lo anterior puede deberse al desarrollo incipiente de este tipo de cimbra, que todavía está restringida a la construcción de unas cuantas estructuras, o a que simplemente esta "nueva cimbra" no es viable para este tipo de trabajo.

Por lo anterior, y en base a las reglas básicas de diseño de estructuras neumáticas, se analizará en este capítulo la posibilidad de uso de una cimbra neumática en túneles; y aunque este análisis sólo contempla el

aspecto "neumático" de la cimbra y no otros aspectos importantes como costos o un proceso constructivo detallado, el objetivo es establecer la posibilidad "técnica" de su uso en un campo donde se aprovecharían al máximo sus características de ligereza y volumen reducido, o en pocas palabras de su "portabilidad".

4.2 Revestimiento en túneles

Actualmente se distinguen dos tipos de revestimiento en túneles, el primario y el secundario. El primario se utiliza para proveer un apoyo temporal que garantice la estabilidad del túnel durante su construcción y disminuya los asentamientos en la superficie, mientras que el secundario proporciona la geometría final del túnel y asegura un comportamiento adecuado a largo plazo. No obstante, también se han construido túneles con un revestimiento único que cumple con todos los aspectos anteriores.

El revestimiento primario, en túneles excavados por el método convencional, puede emplear estructuras temporales como los arcos de acero con retaque de madera, el concreto lanzado, o un sistema mixto; mientras que en el caso de la excavación mediante escudo, se emplean dovelas prefabricadas. Por otro lado, el revestimiento secundario, en ambos métodos de excavación, consta generalmente de una capa final de concreto reforzado; siendo en esta etapa el uso indispensable de cimbras para el concreto.

Los túneles normalmente son de sección circular o en herradura, dependiendo de su función y tipo de suelo en el que se construyan. Independientemente de la sección que se tenga, su geometría se divide normalmente en "invert" o "cubeta" y secciones en arco, tal como se muestra en la figura 72; la sección del arco a veces es dividida en secciones de muro laterales los cuales se revisten separadamente de la parte superior del arco. Obviamente las secciones en arco son las que representan mayor dificultad, en especial la de la clave, ya que no es sencillo lograr un concreto denso en esa posición; por lo anterior, la sección circular representa una de las geometrías más complicadas para su revestimiento.

La mayor parte de las cimbras empleadas en revestimientos secundarios de túneles se han desarrollado a través de los años por unos cuantos diseñadores de cimbra y compañías que se especializan en la construcción de los mismos. La investigación acumulada y experiencia de estas empresas los han habilitado para producir modelos básicos de cimbrado que resultan rápidamente adaptables a la mayoría de los requisitos específicos de cada trabajo. En la actualidad, las cimbras empleadas en túneles son verdaderas "máquinas de cimbrado" que permiten grandes rendimientos con su empleo.

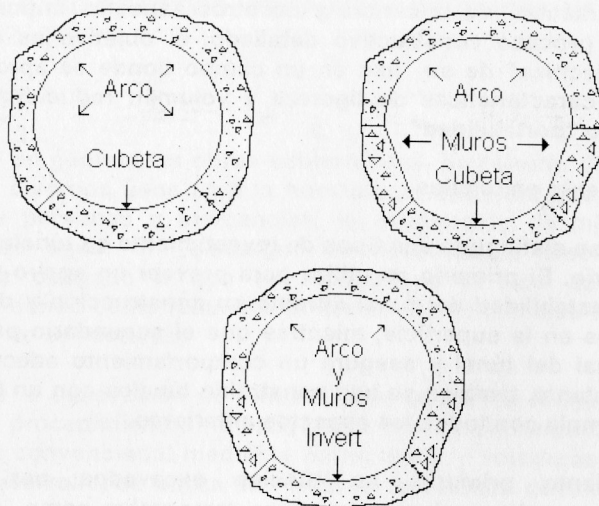


Figura 72. Típicas secciones de túnel, en herradura y circular, nótese las divisiones de "colado". El orden de colado usual es 1.- cubeta, 2.- muros, y 3.- arco. Muros y arco pueden ser "colados" simultáneamente, asimismo, la sección circular puede ser "colada" en su totalidad.

En México, la obra del drenaje profundo del Distrito Federal, representa un claro ejemplo de la construcción de túneles donde se han empleado varios sistemas de revestimiento definitivo. Dos de ellos, ilustran de manera general el desarrollo alcanzado por las cimbras mecánicas en túneles. Estos sistemas de colado empleados en el revestimiento definitivo de los interceptores central y oriente, y del emisor son:

- a) Colado "en tramos" empleando cimbra deslizante abatible.
- b) Colado continuo con cimbra telescópica.

El colado "en tramos" es un sistema que consta básicamente de una estructura denominada transportador y de una cimbra deslizante abatible. El transportador de 8 ton de peso y 26.6 metros de longitud, se apoya mediante unos soportes en sus extremos, lo cual le permite realizar su única función: permitir el "corrimiento" de la cimbra abatible a un nuevo tramo de colado (fig. 73).

Por otro lado, la cimbra se fija mediante unos tramos tubulares metálicos denominados "piernas," que se apoyan en la pared del túnel y que están dispuestas en el contorno de la cimbra. De esta manera, se impide que existan desplazamientos laterales, o que "flote" por la acción del concreto vertido bajo el invert.

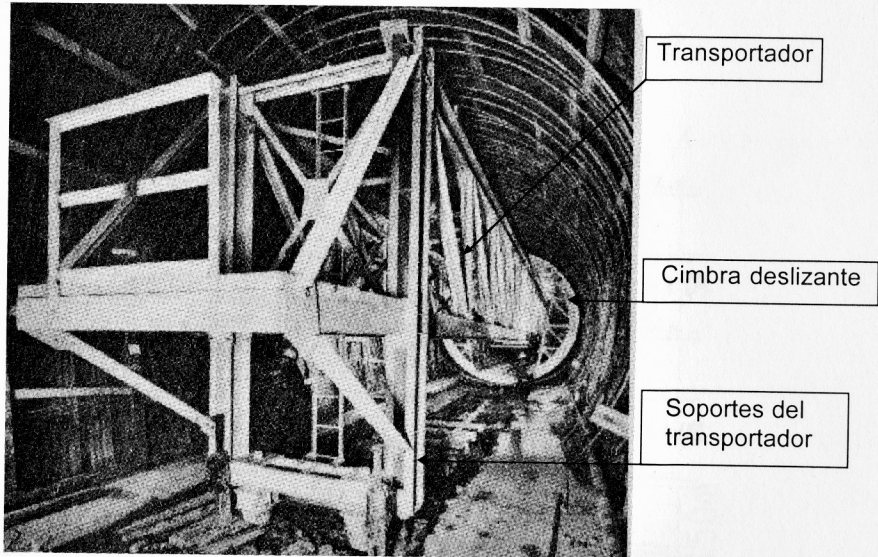


Figura 73. Sistema de colado en tramos con cimbra deslizante.⁽¹⁴⁾

Antes de comenzar con el colado, se coloca una frontera de madera que sirve para delimitar la zona por revestir, posteriormente, se introduce la tubería de colado por la parte superior de la cimbra para suministrar el concreto, así pues, conforme avanza el colado esta tubería se va retrayendo. Una vez terminado el colado se recuperan las piernas y después de ocho horas, se afloja la tornillería que fija las partes de la cimbra. La cimbra consta de dos paneles que forman el invert, otros dos que forman las secciones laterales, y un último que forma la clave; la cimbra así dispuesta, permite su “abatimiento” para que se pueda “correr” hacia un nuevo tramo a través del transportador, gracias a la acción de un malacate eléctrico.

Al llegar a un nuevo tramo de colado y después de la fijación de la cimbra mediante las “piernas”, se puede deslizar el transportador, para poder lograrlo, se tienen en el frente del mismo un sistema de vías y ruedas, y por la parte posterior, unas ruedas de neopreno que transitarán por la superficie nueva del concreto; de esta manera, se concluye con un ciclo del sistema de colado “en tramos”.

⁽¹⁴⁾ Lasso, Ricardo. “Actualidades de construcción 1971-72”, Offset publicitario, México 1973. p.41

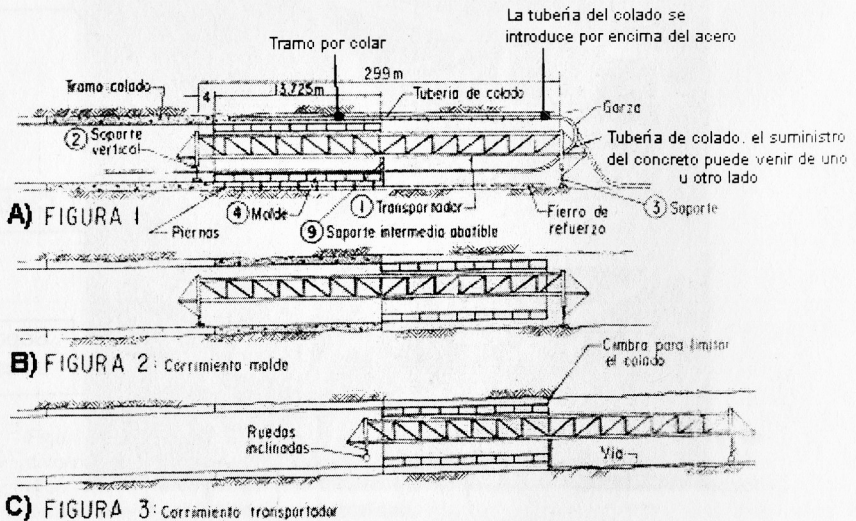


Figura 74. Ciclo de colado en tramos con cimbra deslizante. En A) el sistema esta listo para el colado, en B) una vez fraguado el concreto, se abate la cimbra y se desplaza hacia el siguiente tramo; y por último en C) después de fijar la cimbra con las "piernas" se desplaza el transportador.

La cimbra telescópica para una sección circular consta generalmente de 5 partes: dos inferiores que forman el "invert" (1 de fig. 75), articulados entre sí para poder plegarse; otros dos laterales y uno superior, también articulados entre sí, que forman la parte restante de la sección circular del túnel (2 de fig. 75). Las cinco partes mencionadas forman una sección de 7.32 metros de longitud, y a su vez, varias de estas secciones forman la longitud total de la cimbra. En este caso, son nueve secciones que forman la longitud total, obteniéndose por lo tanto, una cimbra de 65.8 metros de largo.

Las secciones telescópicas que forman la cimbra son colocadas y transportadas mediante una unidad electromecánica denominada "carro transportador".

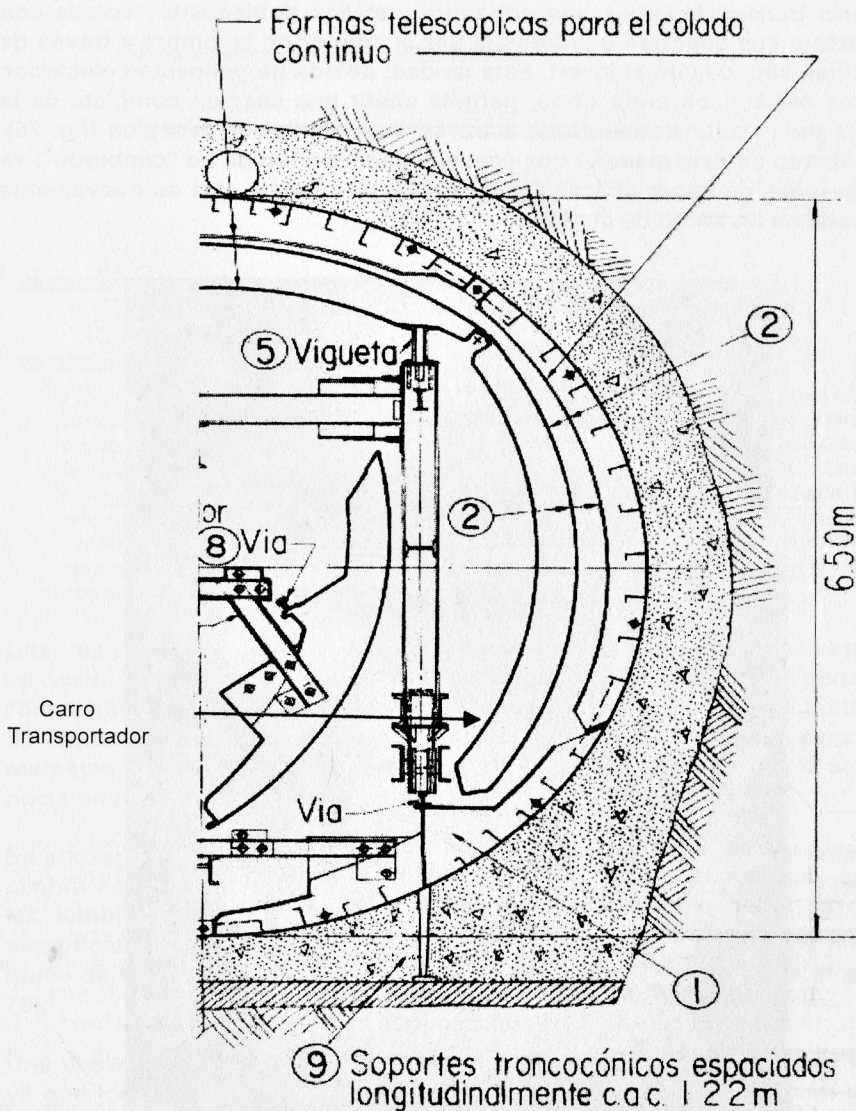


Figura 75. Semisección de Cimbra Telescópica para una sección circular de túnel de 6.5 m de diámetro.

Se muestran las partes cuando están plegadas y cuando sirven de molde de la sección circular.

El carro transportador es una armadura metálica doblemente “volada con respecto a sus soportes que transita por el interior de la cimbra a través de unas vías situadas en el invert. Esta unidad, dotada de polipastos eléctricos y gatos hidráulicos entre otros, permite abatir una sección completa de la cimbra para poder transportarla a través de la cimbra telescópica (fig. 76), permitiendo de esta manera, una secuencia ininterumpida de “cimbrado”, ya que después de haber utilizado una sección de cimbra, esta es nuevamente colocada en un tramo de cimbrado (fig. 77).

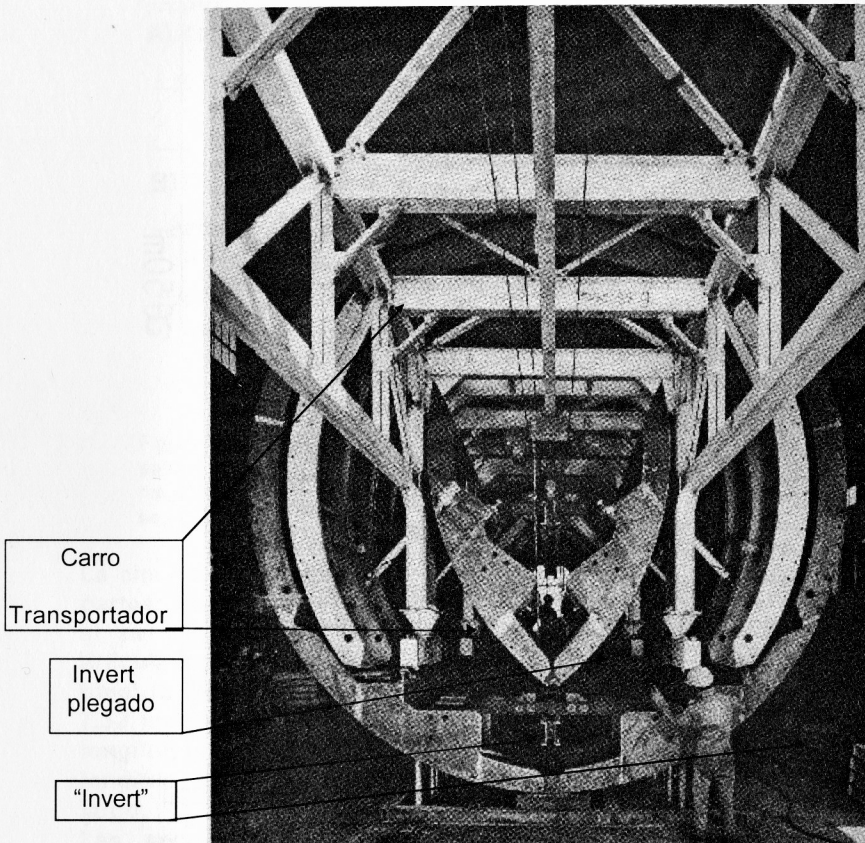


Figura 76. Cimbra Telescópica empleada en el revestimiento definitivo del Emisor Central del Drenaje de la ciudad de México.

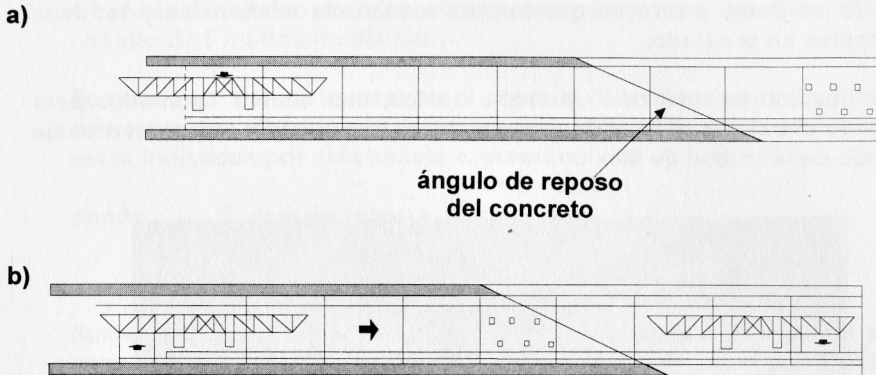


Figura 77. Secuencia del movimiento de las secciones del molde. En a) se pliegan las partes laterales y de la clave de la sección 1, posteriormente en b) el carro transportador avanza a la siguiente sección con la finalidad de poder retirar el invert de la misma sección. Después de haber desmantelado la primera sección, el carro transportador avanza con esa sección completa hacia un nuevo tramo de colado y realiza la colocación de la sección comenzando por el invert. Finalmente, al quedar instalada la sección transportada, el carro transportador regresa al fondo del molde para retirar la sección 2 y seguir repitiendo ininterrumpidamente la operación, a fin de que el colado sea efectivamente continuo.

Una vez iniciado el colado, que prosigue ininterrumpidamente, el concreto colocado en la primera sección necesitará de ocho horas para poder ser “descimbrado”, además de otras dos horas para poder retirarse e instalarse en un nuevo tramo, es decir, mientras el colado continua en las secciones restantes, se permite el fraguado del concreto y el transporte de la sección hacia un nuevo tramo, permitiendo con ello, un colado continuo.

En el caso del drenaje profundo, después de finalizar las tareas de colado, la cimbra es desmantelada en su totalidad para poder ser retirada a través de las lumbreras de acceso mediante grúas debidamente instaladas en la superficie. Resulta obvio que este tipo de maniobra requiere de muchas horas de trabajo, y en consecuencia, de una erogación importante. (fig. 78 y 79).

Una desventaja de la cimbra telescópica se debe precisamente a su costo, ya que los túneles construidos no siempre tienen la misma sección ni son de gran longitud, lo que ocasiona el no amortizar completamente la inversión inicial de dicha cimbra.

Otra desventaja en este sistema de cimbrado aparece cuando el tramo por revestir presenta cierta curvatura, ya que los rieles por donde se desplaza el carro de transporte no quedan colineales y entonces las ruedas no pueden

pasar de un tramo a otro, lo que implica maniobras adicionales y retrasos importantes en el colado.

A continuación se analizará de forma básica, una cimbra neumática para secciones circulares, tomando como ejemplo una sección típica del drenaje profundo de la ciudad de México.

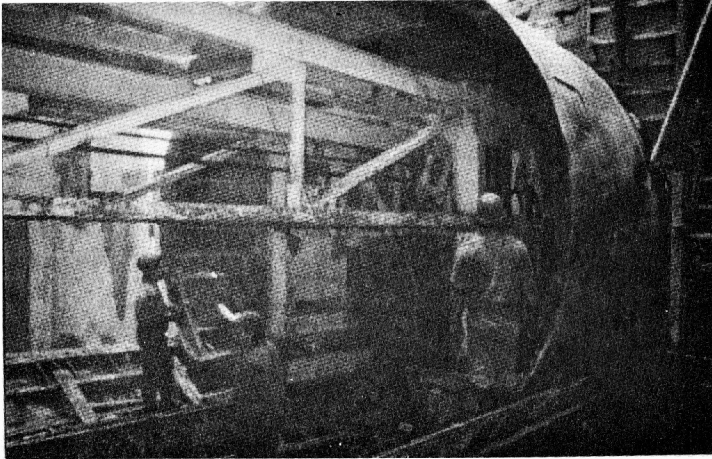


Figura 78. Cimbra telescópica al término del revestimiento definitivo. Con la llegada de la cimbra a la lumbrera se procede a su desmantelamiento.

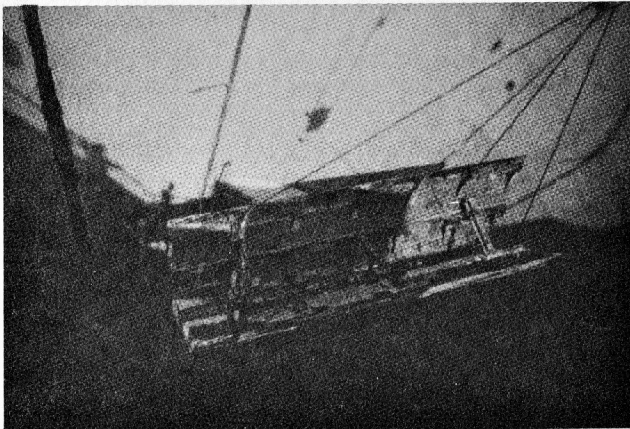


Figura 79. "Salida" del invert de una sección de la cimbra telescópica a través de una lumbrera al término del revestimiento definitivo.

4.3 Análisis básico de una cimbra neumática para un túnel de sección circular de 5 metros de diámetro.

Tomando en cuenta lo visto en el capítulo II, las tensiones de la membrana de una forma cilíndrica bajo la carga superficial de la presión interna sólo están indicadas por esta simple expresión:

$$T = P * R$$

donde: P: presión interna
 R: radio;
 T: tensión en la membrana

Sin embargo, en el caso de una cimbra neumática, "P" será la diferencia entre una presión interna y una externa, donde la primera es debida a un fluido que tensa la membrana y la segunda al peso del concreto, es decir:

$$P = P_i - P_c$$

donde,
 P_i : presión interna debida a un fluido
 P_c: presión externa debida al peso del concreto

Ahora, para estimar la presión del concreto que estará actuando en una sección circular, análoga a una sección típica del túnel del drenaje profundo, de 5 metros de diámetro, se debe tener en cuenta que cuando el concreto se vacía en la cimbra, se produce una presión perpendicular a ésta que es proporcional al peso volumétrico y a la profundidad del concreto en estado líquido (criterio hidrostático). Sin embargo, conforme pasa el tiempo y fragua el concreto, se desarrolla su capacidad autosoportante cambiando su estado de líquido a sólido, lo que implica una reducción en la presión ejercida sobre la cimbra. De ahí que la velocidad con que se deposite el concreto y su temperatura influyan en la presión inicial (ver tabla anexa), por lo que el punto de presión máxima se irá elevando por la cimbra a la misma velocidad con que se llenan las formas.

Tabla 2. Presión del concreto sobre cimbras verticales (kg / m²).⁽¹⁵⁾

Velocidad de colado (m / h)	Temperatura del concreto			
	30°C	25°C	20°C	15°C
0.50	1580	1700	1790	1940
1.00	2450	2680	2950	3470
1.50	3290	3630	3950	4390
2.00	3980	4590	5010	5600
2.50	5160	5730	6290	7100

⁽¹⁵⁾ DÍAZ I. Luis Armando. Curso de edificación, Editorial. trillas, México 1995. p 174

En este caso, la longitud del tramo por revestir determina en gran parte la velocidad de colado, de tal manera que si se tiene un tramo "corto," este será más rápido de colar que uno largo, lo que implica, que en el primero se tengan mayores presiones de concreto que en el segundo. Por otro lado, también existen otras condiciones que pueden incrementar la presión del concreto sobre la cimbra, tales como, la vibración, el revenimiento, la temperatura ambiente, el procedimiento de colado, etc., parámetros difíciles de determinar, por lo que es imposible determinar la presión exacta que se ejercerá sobre la cimbra.

Por lo anterior, ingenieros alemanes realizaron pruebas para estimar con más precisión las presiones ejercidas por el concreto en cimbras cilíndricas horizontales. Estas pruebas realizadas en una cimbra de 10 metros de largo y 3.4 metros de diámetro, demostraron que en condiciones normales, las presiones ejercidas en la cimbra son menores a las calculadas como una presión hidrostática. Sin embargo, al utilizar aditivos "fluidificantes" para el bombeo del concreto, las presiones ejercidas en la cimbra se aproximan a las calculadas mediante el criterio en cuestión⁽¹⁶⁾

Considerando lo anterior, se utilizará el criterio hidrostático para el cálculo de las presiones del concreto sobre la cimbra neumática, considerando para ello un peso volumétrico del concreto de 2400 kg/m^3 . Para analizar lo anterior, se tomarán en cuenta los intervalos mostrados en la fig. 80.

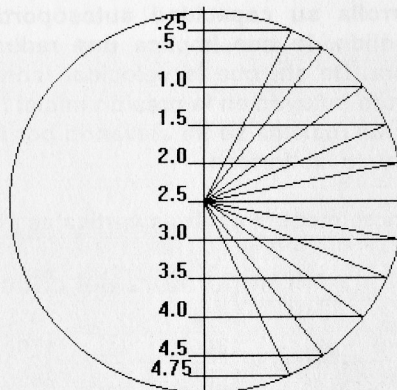


Figura 80.

⁽¹⁶⁾ Vid. "Schalungsdruck Beim Betonieren," by Otto Graf and Ferdinand Kaufmann, published in Berlín 1960, by Wilhelm Ernest and Son.

En base en las consideraciones hechas anteriormente, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla No. 3. Presiones del concreto y tensiones generadas en la membrana de la cimbra neumática en diferentes secciones

h (m)	$P_c = h * \gamma$ (kg./m ²)	Pi (kg/m ²)	$P = P_i - P_c$ (kg/m ²)	$T = P * R$ (kg/m)
0.25	600	13000	12400	31000
0.50	1200	13000	11800	29500
1.00	2400	13000	10600	26500
1.50	3600	13000	9400	23500
2.00	4800	13000	8200	20500
2.50	6000	13000	7000	17500
3.00	7200	13000	5800	14500
3.50	8400	13000	4600	11500
4.00	9600	13000	3400	8500
4.50	10800	13000	2200	5500
4.75	11400	13000	1600	4000
5.00	12000	13000	1000	2500

Obsérvese que la presión máxima estimada por el concreto es de 12 ton/m² y que se consideró una presión interna de 13 ton/m². Lo anterior concuerda con la presión máxima de diseño que se empleo para la cimbra telescópica del emisor central, siendo esta de 12.2 ton/m².⁽¹⁷⁾

De lo anterior, es conveniente resaltar que la membrana de la cimbra neumática se ve "beneficiada" con la acción de una presión externa, ya que ante esta, disminuyen las tensiones inducidas en la misma. No obstante, al desarrollarse la capacidad autosoportante del concreto, disminuye la presión externa y aumentan las tensiones en la membrana de la cimbra, es decir, contrariamente con lo que sucede con las cimbras convencionales, la condición más desfavorable de una cimbra neumática es cuando no existe la presión externa del concreto. De ahí que el método Binishell en la construcción de cúpulas de concreto, visto en el capítulo III, aproveche esta situación y vierta el concreto en la cimbra antes de "inflarla".

Ahora, para calcular la tensión máxima que se presentará en la membrana, se tomará en cuenta la diferencia de presiones máxima que se presenta en la cimbra, que es precisamente la que presenta cuando no existe una presión externa, por lo tanto:

⁽¹⁷⁾ Secretaría de Obras y Servicios. Departamento del Distrito Federal. "Memoria de las obras del drenaje profundo del Distrito Federal". Talleres gráficos de la nación 1975, fig. 36.

$$T_{\text{máx}} = P_{\text{máx}} * R = 13000 * 2.5 = 32500 \text{ kg/m, o sea } 1625 \text{ kg/50 mm.}$$

Es decir, se necesita una membrana de 5 cm de ancho que tenga capacidad a la tensión de 1.625 ton. La resistencia a la tensión de las membranas reforzadas con tejido se determina mediante pruebas de tensión axial y con muestras de 5 cm. de ancho y una longitud de 30 cm. a una velocidad de 30 cm/min. de acuerdo con la norma DIN 53354; por lo que la capacidad a la tensión está dada por lo general en kg/50 mm. de ancho.

Una alternativa de uso son las fibras sintéticas, como es el poliéster que suele emplearse como eslingas y cuya capacidad es del orden de 2000 kg/50 mm a 3000 kg/50 mm, dichas fibras tienen un espesor aproximado de 1 cm.

Lo anterior hace suponer que podríamos emplear tales fibras para la elaboración de una cimbra neumática con las características geométricas de este caso, ya que es un material comúnmente empleado en estructuras neumáticas.

Por otro lado, una variable importante en el uso de una cimbra neumática son las variaciones de temperatura, debidas entre otras cosas al calor de hidratación del concreto. Las fluctuaciones de temperatura afectan el volumen del aire contenido en la membrana y por consiguiente la presión en la misma, aunque estas variaciones de presión y volumen, no son tan notorias para estructuras sometidas a elevadas presiones, si lo son para aquellas que están sometidas a presiones bajas.

En este caso se emplea una presión elevada, por lo que no se ve afectada de manera importante la presión interna de la misma. No obstante, estas variaciones de temperatura también afectan a las características mecánicas de la membrana, ya que ante un incremento de temperatura, la elongación de la membrana crece y la resistencia decrece, reaccionando también en forma inversa con el frío.

Por lo anterior, se realizaron monitoreos del calor de hidratación del concreto, durante un revestimiento del túnel del drenaje profundo. Los resultados del monitoreo se muestran a continuación (fig. 81).

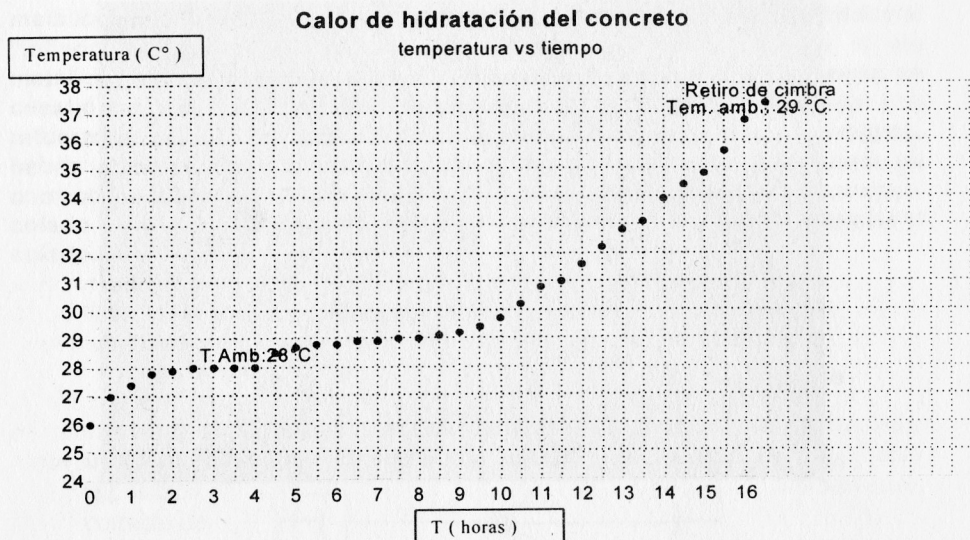


Figura 81. Resultados de las mediciones de temperatura en el concreto del revestimiento definitivo del drenaje profundo del D.F., tramo del interceptor oriente entre las lumbreras 8 y 8c.

Los monitoreos de temperatura en el concreto se realizaron gracias al apoyo de la empresa Ingenieros Civiles Asociados (ICA)

Las características del monitoreo fueron:

Temperatura del concreto en la bomba: 24 °C.

Temperatura ambiente dentro del túnel: 28 °C.

Espesor de concreto: 25 cm, f'c= 250 kg/cm², cemento tipo V y revenimiento de 18 cm.

El material necesario para la medición de temperatura en concreto fue:

Termómetro digital marca Fluke modelo 51 y termopares tipo "J" (3/16)* 10 cm con punta expuesta (fig. 78).

Un termopar es una punta sensora, que consiste en, un circuito formado por dos hilos de aleaciones de metales diferentes, unidos en uno de sus extremos que envía una señal de milivoltaje a un instrumento (lector digital). Bajo este principio, es como se puede medir la temperatura, si se une a aparatos electrónicos, controladores, indicadores o registradores.

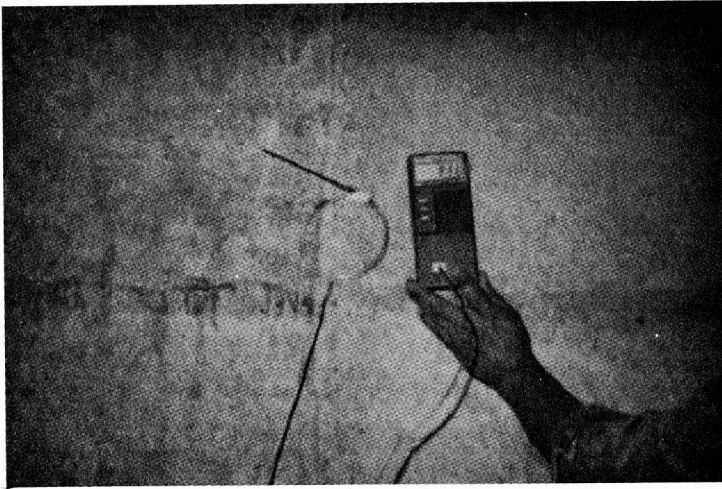


Figura 82. En la imagen se muestran dos termopares y el termómetro digital utilizado; mientras que uno de los termopares se muestra en su totalidad, el otro permanece en el interior del concreto. En este caso, después de varios días, todavía se registraba una temperatura de 31.1°C en el concreto.

De los resultados del monitoreo, podemos observar que en el momento del retiro de la cimbra, la temperatura del concreto no excede los 40 °C, sin embargo, si se utilizara algún aditivo “acelerante” la temperatura podría alcanzar valores mucho mayores.

En todos los casos, se puede establecer que temperaturas de -25°C a 70°C son normales para telas sintéticas revestidas y dentro de este rango, la influencia de la temperatura sobre el comportamiento de la resistencia y elongación es bajo. Se estima además, que el periodo de trabajo de estas membranas de poliéster con revestimiento de p.v.c, es alrededor de 10000 horas y con elongaciones máximas de 20 % bajo temperaturas de más de 50°C.

Por último se propone, de manera general, una forma posible de manejo de una cimbra neumática en túneles, misma que se basa en el sistema de revestimiento “por tramos” que se vio con anterioridad, donde la cimbra se desliza hacia un frente nuevo de colado con la ayuda de un “transportador”

La idea simplemente consiste en sustituir la cimbra utilizada en este sistema por una neumática, y sustituir al “transportador” por un eje cilíndrico

metálico. En este caso, la acción de cimbrado y descimbrado se reduce al “inflado” o “desinflado” de la cimbra neumática, mientras que el eje metálico, provisto de soportes verticales como los vistos en el sistema en cuestión, sería el medio de transporte de la cimbra, además de contar con refuerzos flexibles radiales que garantizarían la forma cilíndrica, así mismo, habría unas restricciones rígidas como las “piernas” que garantizaría su correcta colocación, ya que se evitaría cualquier desplazamiento durante el colado (fig. 83 y 84). De esta manera, la cimbra quedaría lista para iniciar el colado.

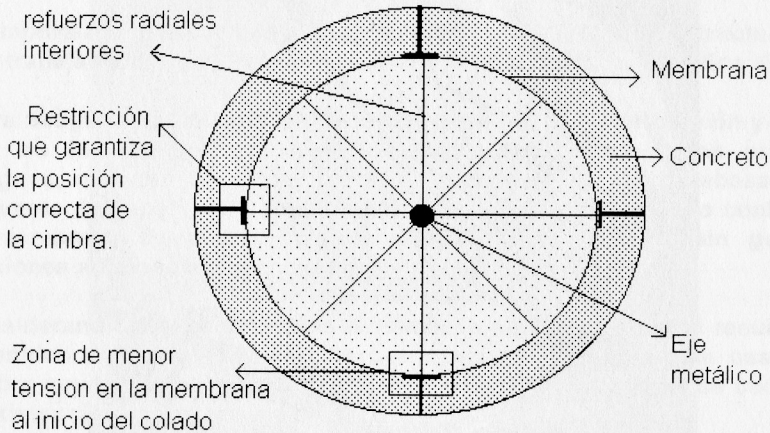


Figura 83. sección de la cimbra neumática propuesta

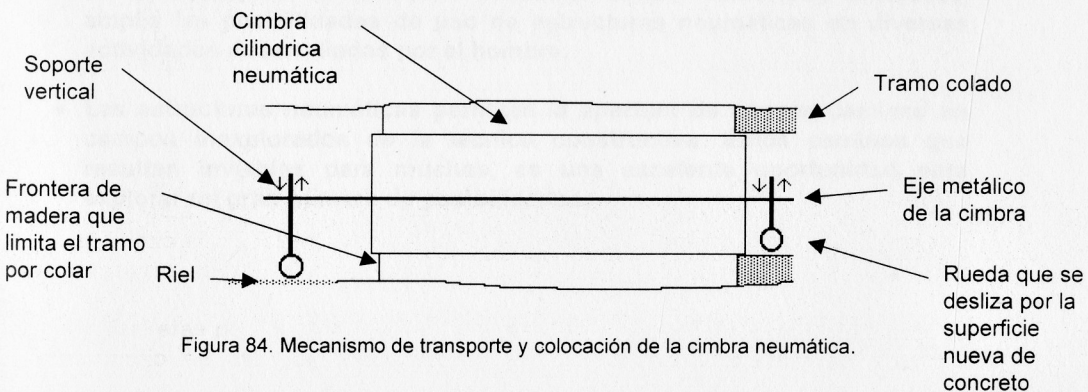


Figura 84. Mecanismo de transporte y colocación de la cimbra neumática.

Finalmente, se infiere que la propuesta de una cimbra neumática en túneles puede ser viable, y que incluso podría ser utilizada en túneles falsos, canales, obras de drenaje, etc. (ver fig. 85); y aunque este sistema difícilmente podría competir con los sistemas de cimbrado actuales podría ser una alternativa expedita donde los sistemas convencionales sean poco prácticos.

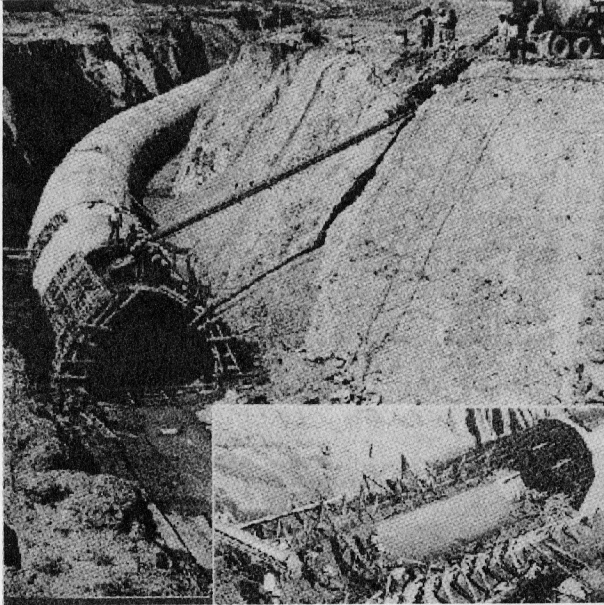


Figura 85. El empleo de una cimbra neumática también permite obtener una superficie lisa, aspecto conveniente en obras de conducción hidráulica.

CONCLUSIONES

Después de haber visto los usos que se les puede dar a estas estructuras neumáticas y haber hecho un cálculo básico de algunos parámetros en un caso real de revestimiento, se concluye lo siguiente:

- Las estructuras neumáticas pueden instalarse o desmantelarse con rapidez, son portátiles y ligeras.
- Es importante recalcar que la particularidad de este tipo de estructuras es que trabajan siempre a tensión mediante la membrana que confina al aire.
- Para asegurar lo anterior, se debe suministrar suficiente presión y evitar que las fuerzas que actúan sobre este tipo de estructuras originen pliegues, que son manifestaciones de compresiones, sin rebasar, por supuesto, la capacidad a tensión del material; aunque estando confinada la membrana se puede incrementar la presión interna sin generar tensiones adicionales a la misma.
- Considerando los antecedentes de cimbras neumáticas, y los resultados obtenidos del análisis hecho, sugieren que la posibilidad de usar una cimbra neumática en túneles puede ser viable. Por otro lado, se confirma la existencia de membranas plásticas para tal uso.
- También es importante señalar que las membranas sintéticas han aumentado su capacidad a la tensión en los últimos años, es decir, hace 25 años no existían membranas comerciales con las capacidades a la tensión que requiere el caso práctico propuesto.
- En consecuencia el desarrollo constante de las membranas sintéticas, amplía las posibilidades de uso de estructuras neumáticas en diversas actividades desarrolladas por el hombre.
- Las estructuras neumáticas permiten la apertura de nuevos caminos en campos inexplorados de la técnica constructiva. Estos caminos que resultan inviables para muchos, es una excelente oportunidad para explorar un gran número de posibilidades

REFERENCIAS

Dent, N., Roger; *Arquitectura neumática*, Blume, Barcelona, España, 1975.

Herzog, Thomas; *Pneumatic Structures*, Crosby Lockwood Staples, London. 1976.

Pohl, Jens G. and Cowan H.J., *Multi-Storey Air-Supported Building Construction, Structures Report*, Department of Architectural Science, University of Sydney Australia 1972.

Briston, J.H., *Plastics Films*, Edit. George Godwin in association with the plastics and Rubber Institute.

Davies, R.M., *Plastics in Building Construction*, Edit. Chemical publishing

Koerner Robert, *Construction and Geotechnical Engineering Using Synthetic Fabrics*
A Wiley - Interscience publication, New York 1980.

Fibre Reinforced Materials: Design and Engineering Applications, Institution of Civil Engineers, London 1977

Schlaich, J., and Sobek, W.: *Suitable Shell Shapes*. Concrete international, January 1986.

Sobek, W.: *Concrete Shells Constructed on Pneumatic Formwork*.
Proceedings of the IASS- Symposium on Membrane Structures and Space Frames in Osaka, Japan. Elsevier, Amsterdam 1986.

Otto, Frei. *Tensile Structures*. Vol. 1 M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1967

Walter, W. Bird. "Air Structures Span Space in Building Revolution". Rubber World, 1972, 1, and 1972, 2.

Arthur, Quarmby. "Materiales plásticos y Arquitectura Experimental", de. Blume, España.

Canvas Products Association International, Air Structures Division. "Minimum Performance Standard for Single-wall Air-Supported Structures", March, 1971

Justus Dahinden. *Urban Structures For the Future*. London and New York, 1971

Haim Heifetz. "Development in inflatable forms" Build International (Barking), jan.-feb. 1970.

Cedric Price, Frank Newby and others. *Air Structures*. London, 1971.

Frei Otto, *Structures*. London, 1972.

P. R. Smith and Jens G. Pohl. "Pneumatic Construction Applied to Multi-Storey Buildings". *Progressive Architecture* (New York), 1970, 9.

Wilson, Arnold, and South, David, "Concrete Domes for Industrial Buildings, Water Tanks, and Houses Constructed Using Balloons," IASS World Congress on Non-Typical Structures, Buenos Aires, Nov. 1982.

"Instant Dome, Binishell, is concrete Bubble," *Engineering News-Record*, V.178, May 25, 1967, p. 74.

Leonard, J.W., "Use of Pressurized Membranes as a Low Cost Erection Scheme for Concrete Structures," Proceedings, 2nd International Symposium on Lower Cost Housing, University of Missouri- Rolla, Apr. 1972.

Nicholls, R. L., "Design, Construction, and Cost of Inflated Fabric-Reinforced Concrete Shells," *Bulletin, International Association For Shell and Spatial Structures*, V. 23, No. 80, Dec 1982, p. 17-28.

Nicholls, R. L., "Inflated concrete pipes and bulk storage containers" *Bulletin, International Association For Shell and Spatial Structures*, No. 76, Abril 1982, p. 55-62.

Tamez, González Enrique. "Diseño Geotécnico de Túneles", TGC Geotecnia, México D.F., 1997.

Díaz Infante de la Mora, Luis Armando. "Curso de edificación", trillas, México 1995

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, AC., "Cimbras", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, AC., México, 1992

Neville Adam M., "Tecnología del Concreto", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C, México, 1992

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C, "Compactación del Concreto", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C, México, 1990

Secretaría de obras y servicios. Departamento del Distrito Federal. "Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal". talleres gráficos de la nación 1975

Bernd, Kröplin and Rosemarie Wagner, "Pneumatic Tube-Structures Some Examples", bulletin, International Association For Shell and Spatial Structures, V. 36, No. 118, 1995, p. 67-72.

Lasso, Ricardo. "Actualidades de construcción 1971-72", Offset publicitario, México 1973.

ANEXO

DIRECCIONES DE FABRICANTES DE ESTRUCTURAS NEUMÁTICAS:

Air Cruisers Co., Hwy. 34, Wall Township, New Jersey 07719 USA.

TEL: 908-681-3527 FAX: 908-681-9163

Sales: L. J. Perdoni

Product: Aircraft Evacuation Equipment, Inflatable Survival Equipment, life Rafts, etc.

Air Structures American Technologies., 211 S. Ridge St., Rye Brook, New York 10573-3413 USA.

TEL: 914-937-4500 FAX: 914-937-6331

Sales: Jan Ligas

Product: Air Supported Structures for all Recreation and industrial Applications

Air Structures Inc., 4920 Raley Blvd., Sacramento, California 95838-1719 USA.

TEL: 916-567-3600 FAX: 916-567-3663

Sales: S. Bielski

Product: Air Supported Structures for all Recreation and Water Storage Tanks

Birdair, Inc 65 Lawrence Bell Dr., Buffalo New York 14221-7075 USA.

TEL: 716-633-9500 FAX: 716-633-9850

Sales: Patricia Nowicki

Product: Air Supported Structures and Construction Enterprise of tension Membrane Roof Structures.

Noe - Schaltechnik Georg Meyer-Keller GmbH+Co,

Kuntzestrasse 72, 73079 Sü en, Alemania

giro: sistemas de encofrado

tel: (07162) 131

telefax (07162) 13288

telex 7 27 228

Autoflug GmbH & Co.

Industriestrasse 1, 25462 Relligen, Alemania

giro: Chalecos, balsas inflables etc.

tel: (04101) 307312

telefax (04101) 307316

Stromeyer Hallen GmbH
Fritz-Reichle-RingII
78315 Radolfzell, Alemania
tel: (07732) 9961-0
telefax (07732) 996155

Fundación ICA es una Asociación Civil Constituida conforme a las leyes mexicanas el 26 de octubre de 1986, como se hace constar en la escritura pública número 21,127 pasada ante la fe del Lic. Eduardo Flores Castro Altamirano, Notario Público número 33 de Distrito Federal, inscrita en el Registro Público de la Propiedad en la sección de Personas Morales Civiles bajo folio 12,847. A fin de adecuar a las disposiciones legales vigentes los estatutos sociales, estos fueron modificados el 17 de octubre de 1994, como se hace constar en la escritura pública número 52,025 pasada ante la fe del Lic. Jorge A. Domínguez Martínez, Notario Público número 140 del Distrito Federal.

Fundación ICA es una institución científica y tecnológica inscrita en el Registro Nacional de Instituciones Científicas y Tecnológicas del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, con el número 99/213 del 13 de agosto de 1999.

Fundación ICA. Cuadernos FICA
Editor: Fernando O. Luna Rojas
Av. del Parque 91 Colonia Nápoles 03810 México, DF.
Periodicidad bimestral

Certificado de Reserva de Derechos de Autor de la SEP:

04 – 1999 – 031718492500 – 102

Certificado de Licitud de Título de la Secretaría de Gobernación:

10745

Certificado de Licitud de la Secretaria de Gobernación:

7428

Esta edición de “Estructuras neumáticas en ingeniería civil”, de Rogelio Reyes Rosales se terminó en junio del 2000, se imprimieron dos mil ejemplares, cada ejemplar consta de 86 páginas, fue impreso en Lago Garda # 100 bis Colonia Anahuac, CP. 11320, México DF. La edición estuvo al cuidado de Fernando O. Luna Rojas, Catalina Rodríguez A., y Maribel Cruz Cruz.

Comités del programa de becas de licenciatura en Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería de la UNAM.

- M.C. Gerardo Ferrando Bravo
- M. I. Gabriel Moreno Pecero
- M. C. Salvador Landeros Ayala
- M. I. Gilberto Sotelo Ávila
- Ing. José Gaya Prado
- Ing. Enrique César Valdés
- Ing. Enrique Jiménez Espríu

Facultad de Ingeniería de la UAEM.

- M.I. Ángel Albiter Rodriguez
- M.I. Raúl Vera Nogueel
- Ing. Merced Torres Sánchez
- Dr. Horacio Ramírez de Alba

División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la UAM Azcapozalco.

- M.C. Eduardo Campero Littlewood
- Dr. Amador Terán Gilmore
- Ing. Luis Antonio Rocha Chiu
- Ing. Dante Alcántara García
- Ing. Darío Guaycochea Guglielmi

Facultad de Ingeniería de la UAQuerétaro.

- M. I. José de Jesús Hernández Espino
- Ing. Gerardo René Serrano Gutiérrez
- Ing. Jorge Martínez Carrillo

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Zacatenco, IPN.

- M. C. Pino Durán Escamilla
- Ing. Felipe Marquez Quintero
- Ing. Jorge Heinen Treviño
- Arq. Rogelio Uriza Salgado

Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNHgo.

- Ing. Ernesto A. Nuñez Aguilar
- Ing. David Hernández Hueramo
- Ing. José Muñoz Chávez
- Ing. Daniel Durand Flores

Facultad de Química de la UNAM.

- Dr. Enrique Bazúa Rueda
- I.Q. Mayo Martinez Kahn
- I.Q. Federico Galdeano Bienzobas
- I.Q. Leticia Lozano Ríos
- Q. Pilar Montagut Alvarado

Misión

Contribuir al fortalecimiento científico y tecnológico de la ingeniería mediante el impulso a la investigación, a la preparación de técnicos de alto nivel y al desarrollo tecnológico de México.

**Av. del Parque 91 Col. Nápoles
03810 México, D.F.
5272 9991, 5272 9915
extensiones 4000, 4001 y 4002
extensión – fax 4083
<http://www.fundacion-ica.org.mx>
[email:lunaf@fundacion-ica.org.mx](mailto:lunaf@fundacion-ica.org.mx)
[email:salazarg@ica.com.mx](mailto:salazarg@ica.com.mx)**