

MINIMIZACION DE LA FISURACION EN RECIPIENTES PARA FLUIDOS, MEDIANTE TECNICAS NUMERICAS

Néstor F. Ortega, Sandra I. Robles
Departamento de Ingeniería. Universidad Nacional del Sur
Av. Alem 1252, 8000 Bahía Blanca, Argentina
e-mail: nfortega@criba.edu.ar

RESUMEN

Este trabajo esta orientado al diseño de formas, en función de la mecánica estructural. En particular, se analizará un tanque para agua construido en hormigón armado, en el que, con el fin de minimizar las fisuras para asegurar la impermeabilidad de las paredes y fondo del recipiente, se minimizaron las tracciones y dos parámetros, la Flexión Volumétrica Estructural, que consideran las tensiones producidas por los Momentos Flectores y la Deformación Volumétrica Estructural, que tiene en cuenta las deformaciones registradas en toda la lámina.

Es inevitable que aparezcan fisuras, producidas por los fenómenos reológicos que sufre el hormigón, pero si la lámina posee un comportamiento mecánico donde predominan las compresiones, estas fisuras tenderán a cerrarse y su propagación será mucho más limitada.

ABSTRACT

This paper is related with the design of geometrical configurations, as a function of the Structural Mechanics. In particular, will be analysed a concrete water tank, in which, with the aim of minimizing the appearance of cracks on the surface of the walls and bottom of the recipient, were minimised the tensile stresses and two parameters, the Structural Volumetric Flexure, that takes into count the stresses produced by bending moments, and the Structural Volumetric Displacement, that takes into count all the displacements produced in the shell.

Unfortunately, cracks resulting from the rheological phenomena occurring in concrete are unavoidable, but if the shell has a mechanical behaviour where compression stresses are prevailing, these cracks shall be tend to close and their extension shall be more limited.

INTRODUCCIÓN

En el diseño de estructuras laminares siempre se trata de adoptar geometrías que posean un comportamiento membranal o lo más próximo posible al mismo. En particular, en el caso de los depósitos de hormigón que contienen fluidos esto es muy recomendable, debido a que, por la aparición de tracciones producidas por esfuerzos axiales o flexiones pueden aparecer fisuras que harían que el depósito pierda su estanqueidad y estas filtraciones afectarían a la durabilidad y estética de la estructura afectada.

En este trabajo se presenta la aplicación de una técnica de optimización, en la que se comparan distintas geometrías, con el fin de minimizar las flexiones y/o deformaciones que se presentan en la estructura analizada. Esta técnica ha sido presentada anteriormente [2],[6], en este caso se analizará una de las obras más destacadas del Ing. Eduardo Torroja, la cuba hiperbólica de Fedala, (Figs. 1y2), construida en Marruecos en el año 1956, con una capacidad de 3500 m³ [7][8].

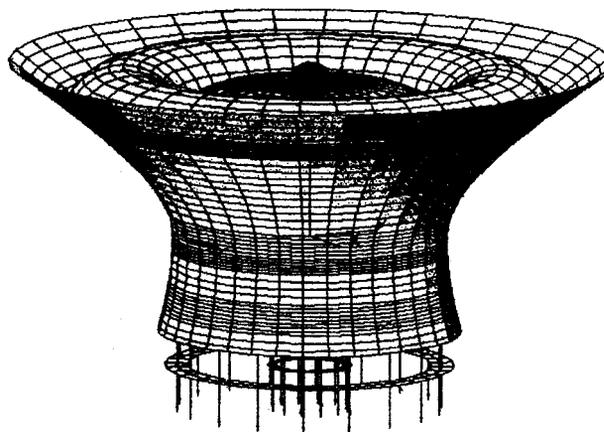


Figura 1: Vista general de la cuba hiperbólica de Fedala.

Eduardo Torroja había elegido esta geometría a los efectos de minimizar la posibilidad de pérdidas de agua, tanto en la pared lateral como en el fondo del depósito. El interés por estudiar este tipo de láminas se debe a que con hiperboloides de una hoja no solo se pueden construir depósitos de agua, sino también torres de enfriamiento de grandes dimensiones y cubiertas [1].

En estos análisis se realizaron algunas simplificaciones respecto de la obra original, al considerar una sección equivalente de hormigón, en las bóvedas tóricas, no realizando el análisis como una sección mixta, compuesta por hormigón y los ladrillos empleados como encofrado perdido, y al no incluirse los esfuerzos producidos por las armaduras pretensadas que se colocaron en la dirección de las generatrices rectas del hiperboloide, cuyo efecto podría superponerse a los determinados en este trabajo; como es de imaginarse la inclusión del pretensado hubiese servido para minimizar las tracciones que aparecen; en este trabajo se pretende poner de manifiesto los efectos mecánicos producidos al adoptar una determinada forma, sin perturbarla por la acción de un pretensado.

PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

En este trabajo se presenta la optimización de la geometría del hiperboloide externo del depósito de agua de la Fig. 2. Para ello, se han elegido distintos hiperboloides, comenzando con el diseñado por E. Torroja y luego otros con distintas relaciones de f/L . En total fueron analizados cinco modelos, con relaciones de f/L de: 0 (cono), 0.05, 0.07, 0.12 (Modelo de Torroja) y 0.16. En la Fig. 3 se muestran las curvas generatrices de los distintos hiperboloides y del cono, en el plano ZX, correspondientes a cada una de las relaciones f/L consideradas.

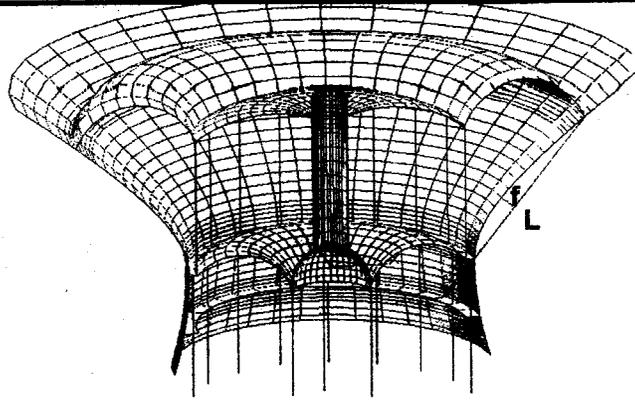


Figura 2: Corte transversal del modelo analizado

Con el objeto de minimizar las flexiones en la estructura, se define un parámetro que llamaremos “*Flexión Volumétrica*” (FV), que se obtiene como la sumatoria del producto del valor absoluto de la diferencia de tensiones superficiales en un punto dado ($\Delta\sigma_i$), por el área sobre el que se extiende esta variación de tensiones (S_i), multiplicado por el espesor de la estructura en dicho área (esp_i).

$$FV = \sum_{i=1}^n |\Delta\sigma_i| \times S_i \times esp_i \quad (1)$$

En el caso de estar analizando una lámina, que posea un régimen de tensiones membranales las Flexiones Volumétricas serán nulas; por ello, se debe tratar que la estructura que se diseñe, tenga el menor valor posible de las Flexiones Volumétricas.

Cabe acotar que con el objeto de optimizar el diseño de estructuras, en general planas, otros autores ya han definido parámetros similares al determinado anteriormente [3] [4].

Las tensiones que se producen en ambas caras de la estructura se analizaron empleando las Tensiones Principales Mínimas y las Máximas. En función de los requerimientos estructurales que se presenten en cada caso, se puede elegir cual de estas variaciones de tensiones conviene minimizar. En este caso como se desea reducir las tracciones se deben analizar las Tensiones Principales Máximas

El Método de los Elementos Finitos fue el empleado para hallar, en forma discreta, las Tensiones Principales, que multiplicadas por el producto del área de influencia por el espesor de la lámina en ese punto, da la Flexión Volumétrica. Cabe acotar que a medida que se reducen las dimensiones de esta retícula, más preciso será el análisis.

Una lámina se define inequívocamente mediante la geometría de su superficie media y el espesor que posee en cada uno de sus puntos. Por este motivo, las técnicas que colaboran en el diseño de formas, determinan la geometría de la superficie media.

Otro parámetro a minimizar es el “*Desplazamiento Volumétrico*” (DV), cuya forma de calcular es análoga a la de las Flexiones Volumétricas, pero en este caso se halla como la sumatoria del producto del desplazamiento de cada punto i (δ_i), multiplicado por el volumen de influencia del mismo ($S_i \times esp_i$), según la siguiente expresión:

$$DV = \sum_{i=1}^n \delta_i \times S_i \times esp_i \quad (2)$$

Es importante destacar, que en estructuras con espesor constante, y con el fin de simplificar el análisis, las tensiones y desplazamientos en cada punto, podrían multiplicarse solamente por su área de influencia.

Para determinar el valor de los esfuerzos y deformaciones, se adoptó como estado de carga, el peso propio más una sobrecarga producida por la presión hidráulica, aplicada sobre la superficie. El análisis se efectuó con un software de cálculo basado en el Método de los Elementos Finitos, comercialmente conocido como Algor12 [5], habiendo realizado un análisis lineal de tensiones, con mallas de elementos de 3 y 4 lados rectos. En el modelado de las láminas se consideró como material hormigón homogéneo e isotrópico con las siguientes propiedades: $E= 2.07 \text{ E}+10 \text{ N/m}^2$, $\mu= 0.15$, $\rho= 2400 \text{ Kg/m}^3$.

DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL HIPERBOLOIDE

Con la finalidad de determinar la geometría del hiperboloide de una hoja, (materializado por la pared exterior del tanque), que presente mejor comportamiento mecánico, se calcularon y analizaron los parámetros: Flexiones Volumétricas Máximas, Flexiones Volumétricas Mínimas, Desplazamientos Volumétricos y Tensiones de Tracción sobre la cara interior (cara en contacto con el fluido), correspondientes a cuatro hiperboloides con diferentes relaciones f/L (Fig. 3). Además, con el objeto de tener un valor de referencia, se realizaron los cálculos para el caso de una geometría cónica, debido a que esta superficie también es reglada, guarda una cierta similitud con el paraboloide adoptado y su uso es frecuente en tanques.

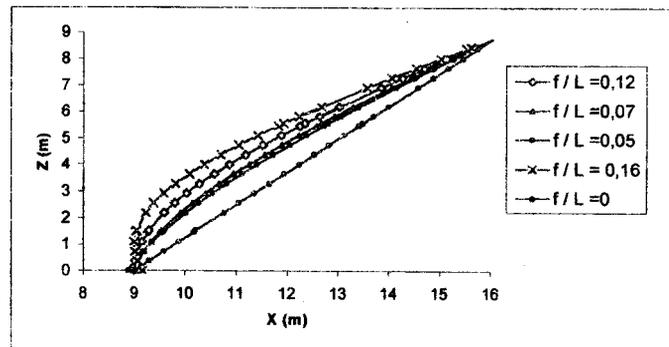


Figura 3: Curvas generatrices de los distintos hiperboloides y cono modelados

A consecuencia de la cantidad de variables que posee este problema, se hace mención a las principales consideraciones realizadas para efectuar el análisis: el volumen de agua contenido en el tanque se consideró constante (3500 m^3), adoptándose un nivel máximo de líquido, distinto para cada forma analizada; la geometría y los espesores del fondo, cubierta y cuerpo central del tanque no se modificaron, así como tampoco los espesores de la pared exterior del tanque representada por el hiperboloide de una hoja.

A continuación se exponen los resultados derivados del análisis de cada uno de los parámetros.

En la Fig. 4, se observa la variación de las Flexiones Volumétricas, empleando las Tensiones Principales Máximas y las Mínimas, en función de cada relación f/L considerada. Para el caso de las Flexiones Volumétricas Máximas, el mínimo se encuentra aproximadamente para una relación f/L entre 0.10 y 0.11, mientras que las Flexiones Volumétricas Mínimas presentan una variación de tipo lineal, en el intervalo considerado. Se debe hacer notar que para el mayor valor de la relación f/L graficado, los valores de ambos parámetros FV_{max} y FV_{min} son semejantes a los obtenidos para el caso de geometría cónica, al que se consideró con una relación $f/L = 0$, y sus valores están representados en todos los casos sobre el eje de abscisas.

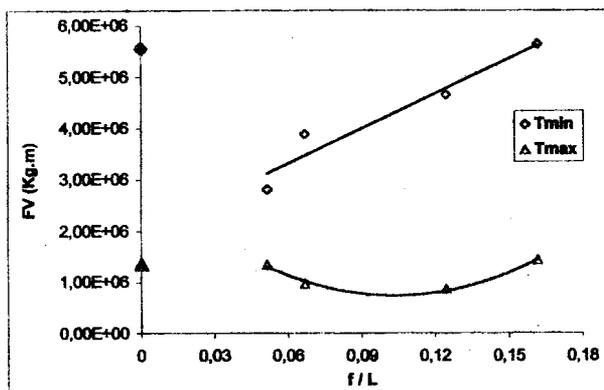


Figura 4: Flexiones Volumétricas Máximas y Mínimas del Hiperboloide

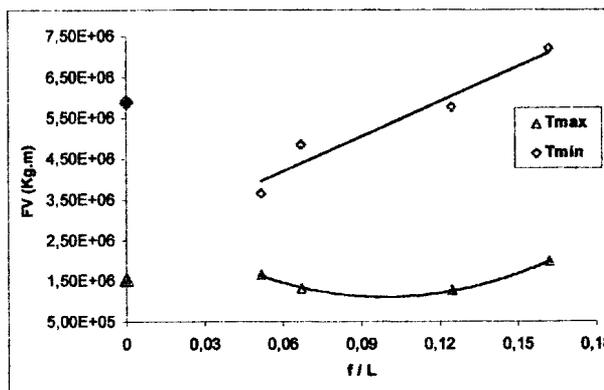


Figura 5: Flexiones Volumétricas Máximas y Mínimas de la Estructura Mojada

En la Fig. 5, se muestran las Flexiones Volumétricas Máximas y Mínimas obtenidas teniendo en cuenta las contribuciones de todas las partes componentes del tanque en contacto con el líquido, conjunto que denominaremos "Estructura Mojada", es decir considerando el fondo del recipiente, cuerpo central e hiperboloide.

Comparando las Figs. 4 y 5 se ve claramente que ambas presentan un mínimo, para las FV_{max} , en aproximadamente $f/L = 0.10$.

Cabe acotar que no se incluyó en el análisis de las Flexiones y Deformaciones Volumétricas al resto de la estructura (tapa del recipiente, zonas del cuerpo central e hiperboloide secos e hiperboloide inferior) debido a que tienen poca influencia en los parámetros antes mencionados.

Optimización de las Tensiones de Tracción

Con el fin de limitar la aparición de fisuras en la superficie, producidas por los esfuerzos de tracción, lo cual es perjudicial desde el punto de vista de la durabilidad de la estructura y además, para reducir la posibilidad de filtración de líquidos (en el caso de los depósitos). Desgraciadamente, es inevitable que aparezcan fisuras producidas por los fenómenos reológicos que sufre el hormigón, pero si la lámina posee un comportamiento mecánico donde predominan las compresiones, estas fisuras tenderán a cerrarse y su propagación será mucho más limitada. Por este motivo se minimizaron las tracciones. Debido a que los datos fueron obtenidos de una malla que no es regular y que el espesor de la lámina es variable, el parámetro minimizado se obtuvo como la sumatoria del producto de las tracciones en la cara interior por su volumen de influencia. Las tensiones de tracción empleadas, como es de suponer, fueron obtenidas de las Tensiones Principales Máximas.

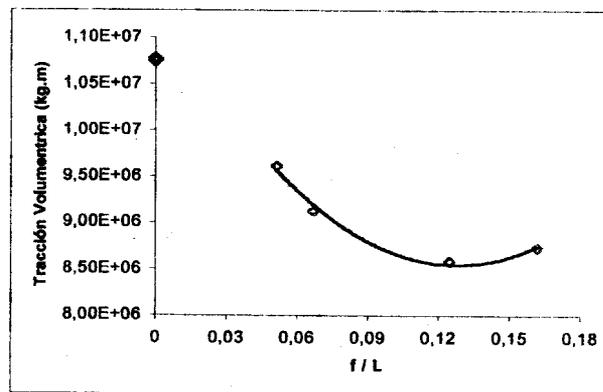


Figura 6: Tracciones sobre cara interior del Hiperboloide en función de f/L

En la Fig. 6 se observa que el mínimo está en aproximadamente $f/L = 0,12$.

Una forma alternativa de cuantificar las tensiones de tracción es considerar para el cálculo anteriormente descrito, solo aquellas que exceden la tensión admisible a la tracción del hormigón, que como sabemos es bastante reducida.

Cabe acotar que también se podrían optimizar las tensiones de compresión, pero no se consideró conveniente realizarlo debido a que el hiperboloide posee curvatura negativa, motivo por el cual no es tan importante el pandeo como en las láminas de curvatura positiva.

Optimización de los Desplazamientos Volumétricos

Los Desplazamientos Volumétricos dan una idea general sobre los desplazamientos o corrimientos en toda la estructura, brindando un panorama más amplio, que cuando solo se considerasen los desplazamientos máximos. Por este motivo se los utilizará para realizar la confrontación entre las distintas estructuras, con el objeto de elegir la más conveniente, desde el punto de vista de la mecánica estructural.

En este punto se han verificado los desplazamientos del hiperboloide y de la Estructura Mojada, variando la relación f/L entre un mínimo igual a 0,05 y un máximo de 0,16.

En la Fig. 7 se muestran los Desplazamientos Volumétricos del hiperboloide, donde se observa que posee un mínimo en el intervalo de f/L , al igual que en los casos anteriores, entre 0.10 y 0.11. Por su parte, en la misma figura se aprecian los desplazamientos de la Estructura Mojada, la cual posee una variación similar, con valores superiores y con un mínimo que coincide con el anterior.

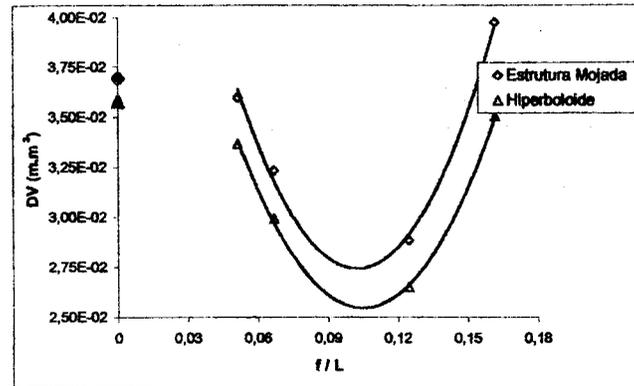


Figura 7: Desplazamientos Volumétricos del Hiperboloide y de la Estructura Mojada

De la observación de la figura se aprecia que para la mayor relación de f/L , el valor del Desplazamiento Volumétrico supera al correspondiente al caso de la geometría cónica.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

- Analizando las Flexiones Volumétricas (Fig. 4 y 5) se observa que la relación f/L óptima esta entre 0.10 y 0.11. A este mismo resultado también se arriba minimizando los Desplazamientos Volumétricos (Fig. 7); mientras que con la minimización de las tracciones (Fig. 6), se puede ver que existe un corrimiento del valor mínimo hacia un valor de $f/L = 0.12$. En función de lo expresado anteriormente se aprecia que la geometría óptima estaría dentro del intervalo:

$$0.10 \leq \frac{f}{L} \leq 0.12$$

- Del análisis de las Figs. 4 y 5 se observa que las Flexiones Volumétricas para $f/L = 0.16$ son iguales o superiores a las de cono ($f/L = 0$). En la Fig. 7 se aprecia que los Desplazamientos Volumétricos del tanque con un hiperboloide tal que $f/L = 0.16$ son similares o superiores a los del tanque con cono. No obstante en la Fig. 6 se ve que existen mayores tracciones en la cara interior del cono que en hiperboloide, con $f/L = 0.16$; por este motivo, en el caso que se adopte un cono, conviene verificar que el valor de estas tracciones no supere a la admisibles del material.
- Comparando los mínimos obtenidos en las Figs. 4 y 5 y los de la Fig.7 se concluye que es suficiente analizar solo el comportamiento del Hiperboloide en lugar de la Estructura Mojada, debido a que estos valores mínimos son similares.

CONCLUSIONES

La metodología de optimización de formas propuesta en este trabajo, minimizando las Flexiones Volumétricas y los Desplazamientos Volumétricos, puede ser una valiosa herramienta para el diseñador de superficies estructurales en general y en particular, de recipientes que contengan líquidos, debido a que se consideran los principios de la Mecánica Estructural.

Para el caso particular del depósito de agua estudiado, se obtienen las siguientes conclusiones:

- La geometría del hiperboloide en contacto con el líquido, que posee un mejor comportamiento estructural esta comprendida dentro del siguiente intervalo:

$$0.10 \leq \frac{f}{L} \leq 0.12$$

- Cuando la relación f/L del hiperboloide supera 0.16, conviene adoptar una geometría cónica, que posee apreciables ventajas constructivas, pero es conveniente verificar el valor de las tracciones máximas en la cara mojada.
- A los efectos de simplificar el cálculo, una vez resuelto el estado tensional de toda la estructura, las Flexiones Volumétricas y los Desplazamientos Volumétricos, se los puede analizar solo en la lámina hiperbólica, obteniéndose resultados con una buena precisión.

REFERENCIAS

- [1] Haas, A.M., "Láminas de Hormigón", Edición en español, Instituto E. Torroja, Madrid, (1971).
- [2] Ortega, N.F., Arias, J.V. "Comparison of Mechanical Efficiency Between an Hyperbolic Paraboloid and a Experimental Model", IV World Congress on Computational Mechanics, Buenos Aires, 1998.
- [3] Cervera Bravo, J., "Tres Teoremas Fundamentales de la Teoría del Diseño Estructural", Informes de la Construcción N° 399, Madrid, 1989, págs. 57-66.
- [4] Quintas Ripoli, V., "Sobre el Teorema de Maxwell y la Optimización de Arcos de Cubierta", Informes de la Construcción, Nr. 400, Madrid, 1989, págs. 57-70.
- [5] *Algor12 Professional Mech/VE 1999. Docutech, Linear Stress and Dynamics*, Reference Division. Pittsburgh, Pennsylvania.
- [6] Robles, S. I. ; Ortega, N. F "Optimización del Diseño de láminas. Obtención de las Mínimas Flexiones Volumétricas Estructurales" Mecánica Computacional, Vol. XIX, Argentina, 2000, págs.287-292.
- [7] Arredondo, F.; Benito, C.;Echegaray, G.;Nadal, J.;Paez, A.; Del Pozo, F.; "La obra de Eduardo Torroja", Inst. de España; Madrid,1977, págs. 242-248.
- [8] Paez, A.; Del Pozo, F.; "La Cuba Hiperbolica de Fedala", Informes de la Construcción n° 137, IETCC, Madrid, 1962.