

DISEÑO DE ESTÉREO ESTRUCTURAS BASADO EN SU COMPORTAMIENTO MECÁNICO

María I. Montanaro^a, Irene E. Rivas^a y Néstor F. Ortega^b

^a *Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Av. del Valle 5737, 7400 - Olavarría, Argentina, mmontana@fio.unicen.edu.ar*

^b *Departamento de Ingeniería Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253, 8000 - Bahía Blanca, Argentina, nfortega@criba.edu.ar*

Palabras Clave: Estéreo Estructuras, Optimización Estructural, Desplazamientos Volumétricos.

Resumen. Es notable el incremento que se ha dado en la construcción de cubiertas realizadas con estéreo estructuras metálicas. Por ello, resulta importante establecer parámetros de diseño, con la finalidad de obtener estructuras más económicas y con una adecuada seguridad.

En este trabajo se presenta un análisis, realizado con una técnica de optimización, para el diseño de la geometría de estéreo estructuras de acero de base rectangular. Se analiza mecánicamente esta tipología estructural para diferentes condiciones geométricas y vinculación, a los efectos de reducir el peso total de la misma y las deformaciones en sus nudos, dos parámetros que varían en forma antagónica. La metodología empleada, para efectuar este proceso de optimización, consiste en minimizar separadamente dos funciones objetivo: Desplazamientos Volumétricos y Tensiones Volumétricas. El Desplazamiento Volumétrico está definido como la sumatoria del producto del desplazamiento de cada nodo, por el volumen de influencia de las barras que concurren a dicho nudo. Un procedimiento similar se aplica para la función objetivo denominada Tensiones Volumétricas. Para realizar los análisis mecánicos de las distintas estructuras, se recurre al empleo del Método de los Elementos Finitos.

Específicamente, la variable que se optimiza es la altura (también denominada, espesor) medida entre las capas superior e inferior de las estéreo estructuras y el ancho, en planta, de los módulos.

1 INTRODUCCIÓN

El empleo de las estructuras espaciales de acero en la construcción ha tenido un importante desarrollo. Principalmente, porque presentan cualidades estéticas, unidas a ventajas económicas y técnicas. Por sus características, las mallas espaciales son aptas para cubrir grandes superficies sin columnas intermedias, es por ello que han sido empleadas fundamentalmente como estructuras portantes en cubiertas de salones de exposiciones, de polideportivos y de edificios industriales entre otros.

Se puede considerar como espacial a toda estructura en la cual, la distribución de los elementos resistentes es tal que, se cometerían errores significativos si se realiza un análisis de su comportamiento como estructuras planas independientes.

En particular, las estructuras de cubiertas espaciales planas pueden ser consideradas como celosías tridimensionales, que se caracterizan por estar constituidas por elementos muy simples, barras y nudos, ensamblados. Las superficies envolventes de la malla están representadas por dos planos paralelos dispuestos horizontalmente, en los que se encuentran situados los nudos, que permanecen unidos mediante barras diagonales.

En el desarrollo de este trabajo se consideran estructuras espaciales planas, de dos capas, formadas por barras de acero. Se considera la disposición de entramado rectangular, en la cual la intersección de los elementos que conforman ambos planos, entre sí y con los bordes de los límites extremos, se produce en forma perpendicular. Esta disposición resulta ser una de las más utilizadas en el ámbito de las construcciones civiles.

La altura es un factor determinante en la rigidez de estas estructuras (Davoodi et al., 2007). Normalmente, reciben cargas perpendiculares a su plano y se caracterizan por la repartición de los esfuerzos en dos o más direcciones, constituyendo una tipología estructural eficiente.

Como en cualquier tipo de estructura, en las mallas espaciales concurren una serie de variables cuya incidencia sobre el costo y la resistencia puede ser importante. Es posible que algunas de ellas queden impuestas por la funcionalidad del edificio, las cargas a soportar, la luz a cubrir, las características arquitectónicas, el transporte, y el procedimiento de montaje etc. También existen otras que pueden ser elegidas con bastante libertad por el profesional. Una de esas variables puede ser el tipo de malla, la cual está directamente relacionada con los parámetros que la determinan, en particular se puede mencionar la longitud de cada una de las barras de la retícula plana (L). Se puede establecer que la densidad de nudos está directamente relacionada con el costo de la estructura y que, además, la longitud de barra es la variable que mayor incidencia tiene sobre la misma, por lo tanto este parámetro resulta ser el de mayor repercusión económica.

Para las barras de los entramados que se estudian en este trabajo, se usan secciones tubulares de acero manteniendo, mayoritariamente, constante el diámetro exterior y variando el espesor, en función de los requerimientos de cálculo (El-Sheikh, 1998) y la disponibilidad de tubos comerciales. Esta sección transversal se adapta muy bien a esta tipología estructural, por su adecuado comportamiento frente a esfuerzos de compresión, por su mayor rigidez a torsión y por la facilidad de protección contra la corrosión al estar cerradas todas las barras. Otra ventaja que presenta el empleo de estas secciones es que se simplifica la construcción y el uso de los elementos de unión.

Resulta interesante realizar la optimización del diseño de este tipo de estructuras espaciales de barras, que permita al proyectista seleccionar la configuración más adecuada y las dimensiones de los elementos componentes de la estructura. Estudios previos sobre la optimización de entramados de barras, de estereo estructuras planas, han sido realizados por

Rivas et al. (2012). En el presente trabajo se da continuidad a los mismos y se presentan resultados, obtenidos mediante la aplicación del proceso de optimización, con la finalidad de alcanzar una adecuada relación (h/L) entre el espesor que está dado por la separación entre dichos planos y la longitud de cada una de las barras de la retícula, que pertenecen a los planos superior e inferior (normalmente, horizontales). El espesor de la malla, tiene incidencia apreciable en el costo, ya que los esfuerzos originados en una determinada malla son inversamente proporcionales al valor de esta altura (Cavia Sorret, 1993).

2 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

Los procesos de optimización constituyen una valiosa herramienta en el campo de la Ingeniería Estructural. En anteriores trabajos se empleó el método de los Desplazamientos Volumétricos para optimizar, desde el punto de vista mecánico, estructuras tales como láminas (Robles and Ortega, 2001) (Ortega and Robles, 2003), estructuras móviles de barras (Robles and Ortega, 2009), fundaciones (Orbanich et al. 2004) y estructuras espaciales de barras (Rivas et al. 2012).

En este trabajo se optimizan los Desplazamientos Volumétricos de entramados espaciales planos cuadrados y rectangulares, formados por barras tubulares de acero.

Este proceso de optimización permite considerar la incidencia de los desplazamientos de los nudos de toda la estructura, permitiendo tener un conocimiento global de su comportamiento. El procedimiento consiste en minimizar los desplazamientos, de las mencionadas estructuras, empleando como función objetivo un parámetro denominado "Desplazamiento Volumétrico" (DV), el que se obtiene con la Ecuación (1):

$$D = \sum_{i=1}^n \delta_i L_i A_i \quad (1)$$

donde:

δ_i es el desplazamiento total de cada nodo i

L_i es la semilongitud de cada una de las barras que llegan al nudo i

A_i es el área de la sección transversal de la barra correspondiente

La formulación matemática de la optimización, para el caso particular de la minimización de los desplazamientos de las estructuras de barras de acero, teniendo en cuenta el volumen de las mismas, se puede plantear de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar } \varphi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2)$$

Considerando las condiciones de borde, que limitan el espacio de posibles soluciones de x :

$$G_k(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq 0 \quad (3)$$

donde:

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ son las variables de diseño;

$\varphi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ es la función objetivo, que en el primer caso que se estudia es el DV ;

$G_k(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ son las funciones de restricción; y

$x_{il} \leq x_i \leq x_{iu}$ son los límites superior e inferior de la variable de diseño i .

Para determinar el valor de los desplazamientos se consideraron cargas gravitacionales, peso propio de la estructura y sobrecarga útil sobre la cubierta. El análisis se efectuó mediante un software de cálculo, basado en el Método de los Elementos Finitos, conocido comercialmente como ALGOR 22 (2009). Con el mismo se ha efectuado un análisis lineal,

usando elementos tipo “beam”.

Para la verificación de las barras se consideraron los lineamientos especificados por el Reglamento CIRSOC 301 (2005).

Con la misma metodología de cálculo se puede minimizar el parámetro denominado Tensiones Volumétricas (TV) tal como se indica en la Ecuación (4):

$$TV = \sum_{i=1}^n |\sigma_i| \times L_i \times A_i \quad (4)$$

donde:

σ_i la tensión a la que se encuentra sometida cada barra componente de la estructura que llega al nudo i

L_i es la semilongitud de cada una de las barras que llegan al nudo i

A_i es el área de la sección transversal de la barra correspondiente

Debido a que el esfuerzo axial es el predominante en estas estructuras, en el presente trabajo se consideraron, sólo, las tensiones axiales.

En este trabajo, el proceso de optimización se aplica a efectos de encontrar una relación óptima entre la longitud de una barra perteneciente a cualquiera de los planos paralelos horizontales del emparrillado y la separación entre dichos planos.

3 ESTRUCTURAS ANALIZADAS

Se consideraron emparrillados planos de disposición bidireccional y rectangular, analizando particularmente la malla denominada octaédrica normal, que resulta ser una de las más empleadas en el ámbito de la construcción, y que se genera por repetición de semioctaedros o pirámides de base cuadrada (ver Figura 1).

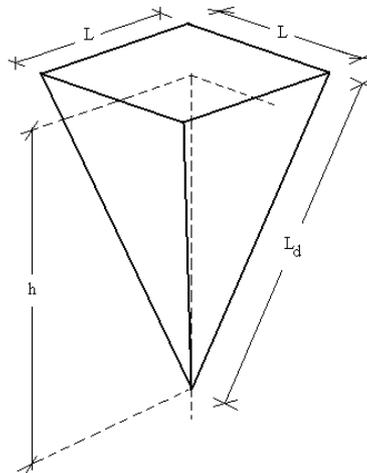


Figura 1: Módulo del emparrillado bidireccional rectangular

En cada capa (planos paralelos superior e inferior) se forma una retícula cuadrada, quedando los nudos sobre los centros de los cuadrados de la cara opuesta. Es decir, se tienen dos parrillas paralelas de idéntica configuración, pero que se encuentran desplazadas una de la otra en planta, manteniendo la misma dirección. A cada nudo concurren ocho barras, cuatro horizontales y cuatro diagonales.

En función de la ubicación y número de apoyos se evalúan dos casos: emparrillados planos de sección cuadrada (12 m de lado) que descargan sobre apoyos dispuestos en cada una de las

esquinas de la planta y, emparrillados planos de sección rectangular (12 m x 24 m) ubicados sobre seis apoyos (uno en cada una de las esquinas y dos en la parte central de los laterales de mayor longitud). Se indica que la planta rectangular equivale a dos plantas cuadradas, con sus respectivos apoyos, dispuestas consecutivamente. En todos los casos los apoyos restringen los seis grados de libertad del nudo y se ubican en el plano superior del entramado. Se emplea el elemento tipo “beam” para modelar las barras. En la Figura 2 se puede observar la geometría del entramado correspondiente a uno de los modelos evaluados, cuya resolución se efectuó empleando el software ALGOR 22 (2009). El material usado para los cálculos es acero ASTM-A36.

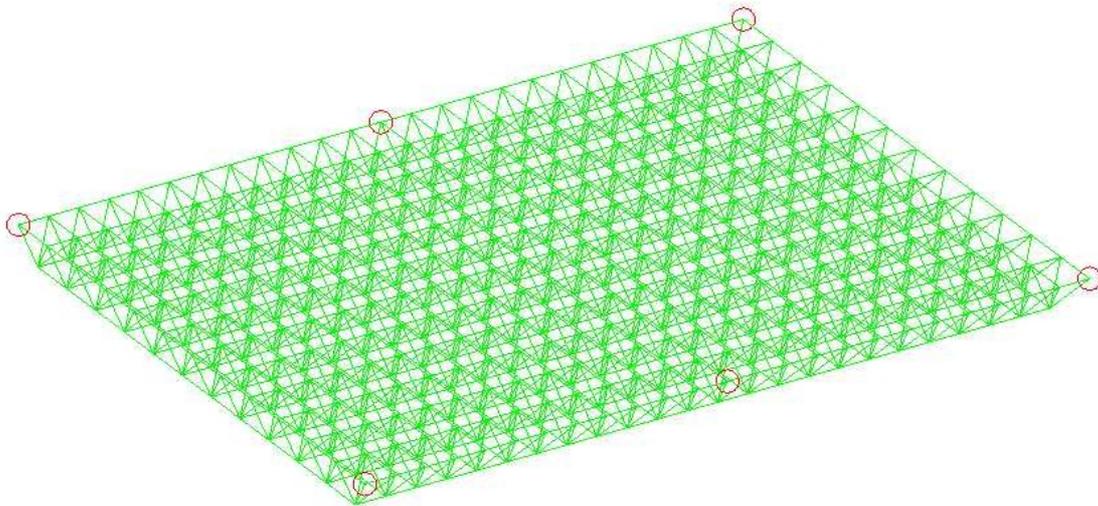


Figura 2: Disposición de barras del modelo rectangular

Se consideraron cargas gravitatorias correspondientes a: peso propio, peso de la cubierta y sobrecarga útil sobre cubierta, esta última de acuerdo con lo establecido por el Reglamento CIRSOC 101 (2005), actuando normalmente al plano superior de la estructura las cuales se transfieren a los apoyos puntuales.

Se analizaron emparrillados planos con diferentes relaciones h/L (altura/longitud de barra). Se adoptó un intervalo de valores más amplio que las relaciones que habitualmente se suelen emplear en este tipo de construcciones, con el objetivo de extender el campo de posibles soluciones.

4 RESULTADOS OBTENIDOS

Se presentan a continuación los resultados obtenidos, a partir de la aplicación del proceso de optimización, relacionados con Desplazamientos Volumétricos y con Tensiones Volumétricas.

En la materialización de una estructura intervienen otros factores relacionados con el proyecto arquitectónico entre los que se puede mencionar, como ejemplo, la adecuación de las longitudes de las barras para que sean submúltiplos de la longitud en que se fabrican. Por ello resulta conveniente que el producto de este proceso de minimización sea un intervalo de valores, donde con muy pequeñas variaciones, todos los resultados comprendidos en el mismo posean un adecuado comportamiento estructural.

4.1 Desplazamientos Volumétricos

Tal como se ha mencionado previamente los valores de los Desplazamientos Volumétricos de las estructuras estudiadas, se aprecian en los gráficos de las Figuras 3 y 4 que están en función de la relación h/L .

En la Figura 3 se presenta el gráfico con la curva de tendencia correspondiente al valor de los Desplazamientos Volumétricos, en función de la relación h/L , para los emparrillados planos cuadrados apoyados en las cuatro esquinas.

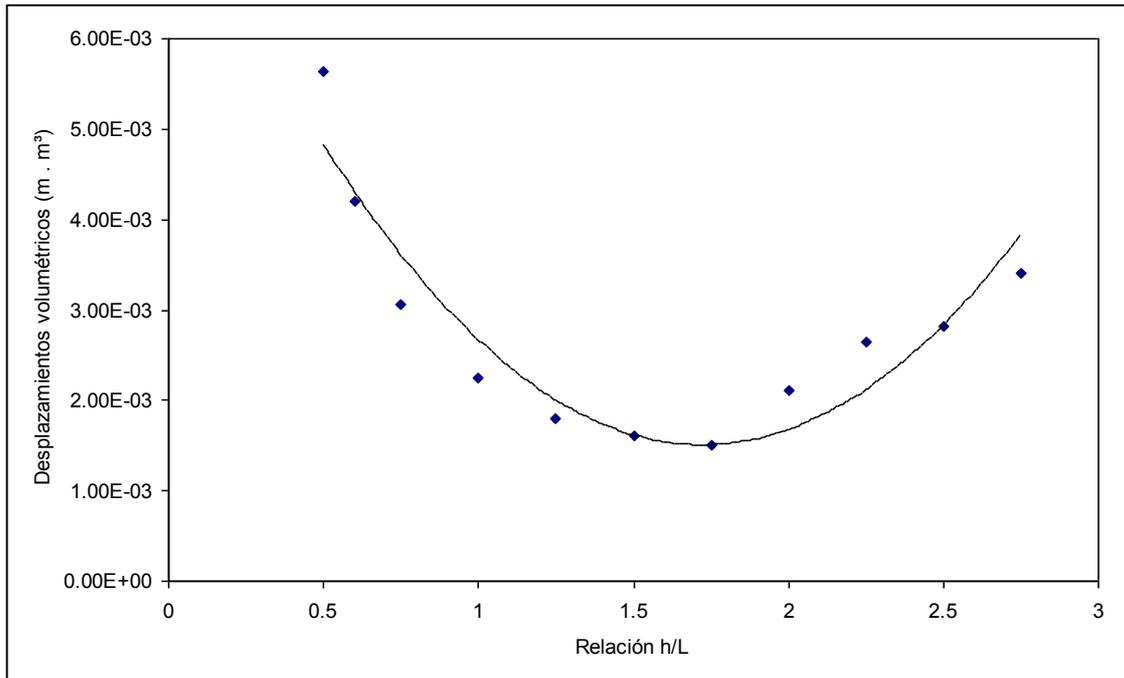


Figura 3: Desplazamientos Volumétricos. Emparrillado cuadrado

En Figura 3 se puede observar que los valores óptimos corresponden al intervalo de h/L que va desde aproximadamente 1.50 hasta 1.80.

En Figura 4 se presenta el gráfico con la curva de tendencia correspondiente al valor de los Desplazamientos Volumétricos, en función de la relación h/L , para los emparrillados planos rectangulares dispuestos sobre seis apoyos.

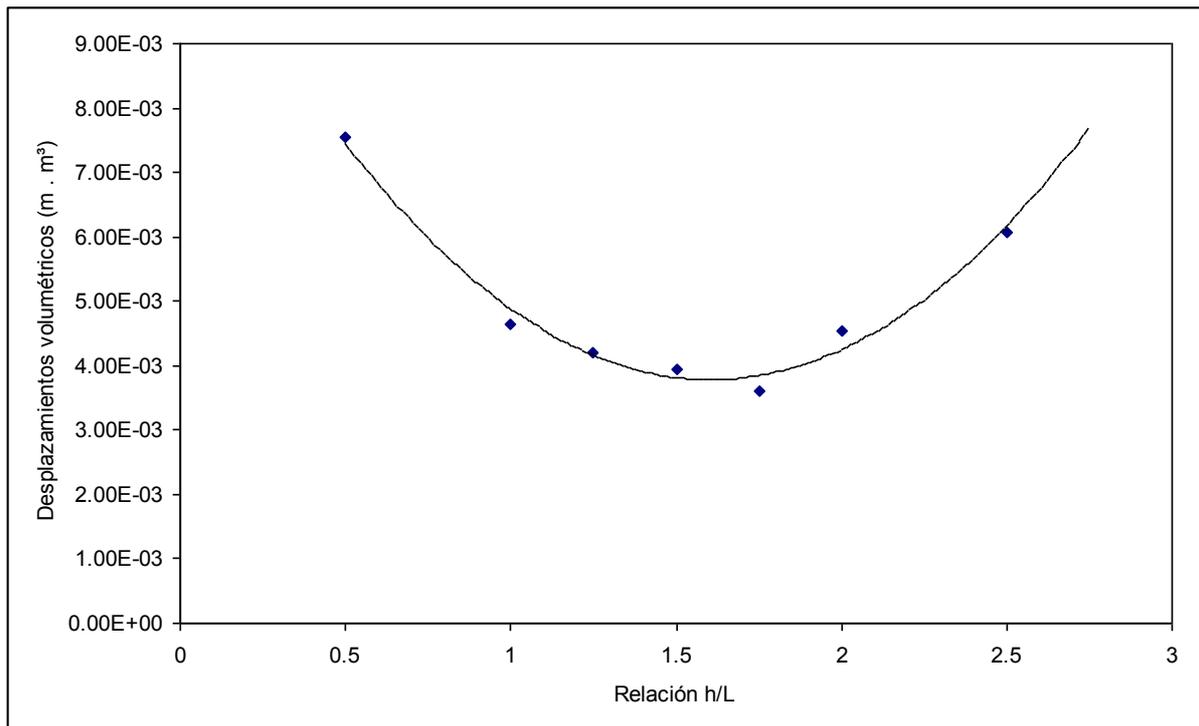


Figura 4: Desplazamientos Volumétricos. Emparrillado rectangular

En la Figura 4 se advierte que los valores óptimos corresponden al intervalo en que la relación h/L varía aproximadamente entre 1.40 y 1.70.

4.2 Tensiones Volumétricas

En las Figuras 5 y 6 se presentan los gráficos con las respectivas curvas que representan la tendencia correspondiente a la variación de las Tensiones Volumétricas, en función de la relación h/L , para empaillados planos cuadrados dispuestos sobre cuatro apoyos y rectangulares soportados sobre seis apoyos.

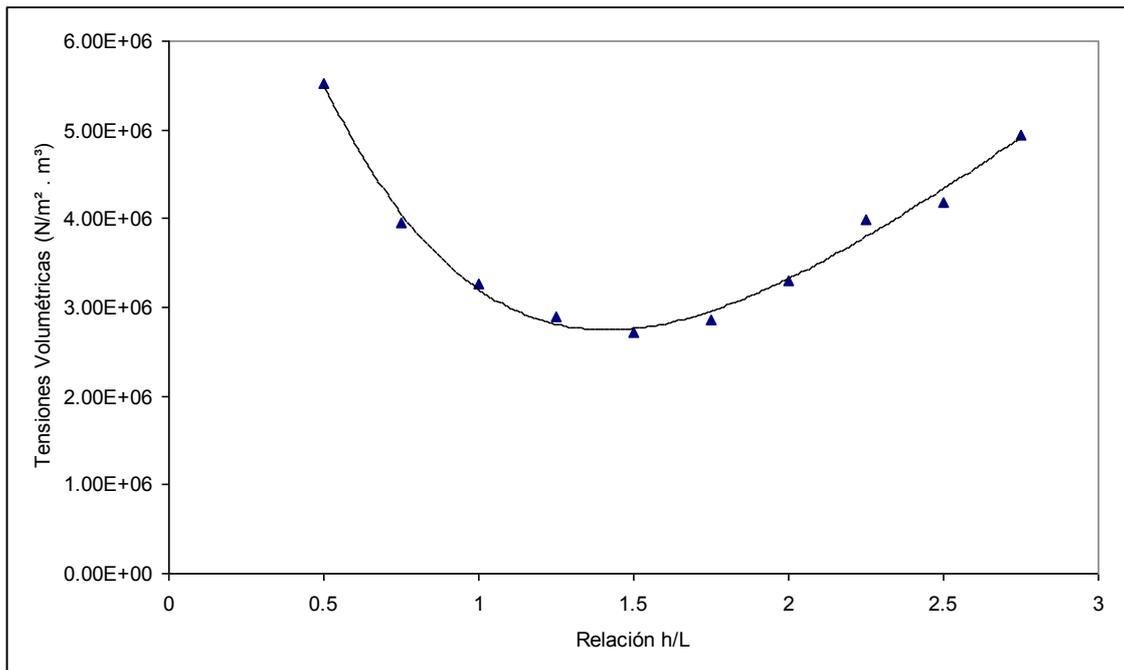


Figura 5: Tensiones Volumétricas. Empaillado cuadrado

Analizando las Tensiones Volumétricas de la estructura, dispuesta sobre cuatro apoyos, cuyos valores están graficados en la Figura 5, se puede observar que los valores donde las Tensiones Volumétricas son mínimas, corresponden al intervalo 1.25 y 1.75 de la relación h/L .

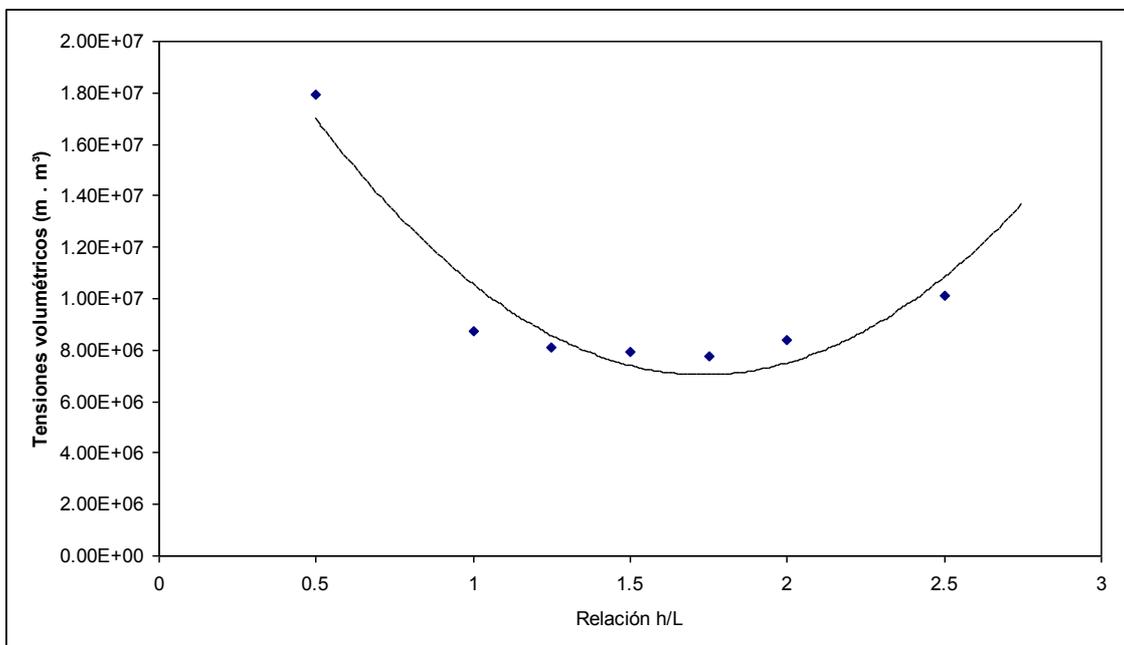


Figura 6: Tensiones Volumétricas. Empaillados rectangulares

En la Figura 6 se observa que los valores óptimos de las Tensiones Volumétricas de la estructura rectangular, dispuesta sobre seis apoyos, corresponden al intervalo en que la

relación h/L varía aproximadamente entre 1.50 y 2.00.

Contrastando los resultados obtenidos en este trabajo al considerar Desplazamientos Volumétricos y Tensiones Volumétricas, simultáneamente, se puede establecer que la relación h/L óptima para los emparrillados planos se encuentra comprendida entre los siguientes valores:

- 1.50 y 1.75 para emparrillados planos cuadrados que se hallan dispuestos sobre cuatro apoyos
- 1.50 y 1.70 para emparrillados planos rectangulares que descargan sobre seis apoyos

5 CONCLUSIONES

En función de los resultados obtenidos en este trabajo, se puede establecer que la técnica de optimización aquí presentada posee utilidad práctica, para el diseño de las estructuras espaciales de acero. Es adecuada para determinar rangos de espesores entre planos paralelos de emparrillados planos. Por ello, resulta ser una valiosa herramienta para el diseñador de estructuras metálicas de barras, ya que permite analizar los desplazamientos y las tensiones del conjunto de la estructura.

Esta técnica puede resultar de utilidad en el diseño de estructuras y, especialmente, para la optimización de las mismas, considerando solamente las cargas gravitatorias, que son las dominantes, posteriormente, se deben realizar las verificaciones para la acción de las restantes cargas, a las que estará sometida la estructura, tal es el caso de acciones sísmicas, eólicas, etc.

Se puede observar que cuando a un emparrillado plano cuadrado se le adiciona otra superficie contigua, de iguales características y dimensiones en planta, el intervalo de valores de la relación h/L óptima (1.5 a 1.7) no presenta variaciones significativas.

Como continuidad de este trabajo se considera conveniente efectuar un análisis similar, para otras dimensiones de plantas rectangulares, con la finalidad de observar la variación o no del intervalo en que la relación h/L de los módulos resulta ser óptima.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Facultad de Ingeniería y a la Secretaría General de Ciencia, Arte y Tecnología de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, por el apoyo brindado para el desarrollo de estas investigaciones.

REFERENCIAS

- ALGOR 22, Profesional Mech/VE. *Docutech, linear stress and dynamics, reference Division*. Pittsburgh. Pennsylvania, 2009.
- Cavia Sorret P., Las mallas espaciales y su aplicación en cubiertas de grandes luces. *Revista de Edificación*, 15, 7-15, 1993.
- CIRSOC 101, *Reglamento Argentino de Cargas Permanentes y Sobrecargas Mínimas de Diseño para Edificios y Otras Estructuras*, CIRSOC-INTI, Buenos Aires, 2005.
- CIRSOC 301, *Reglamento Argentino de estructuras de acero para edificios*, CIRSOC-INTI, Buenos Aires, 2005.
- Davoodi M.R., Pashaei M.H. and Mostafavian S.A., Experimental study of the effects of bolt tightness on the behaviour of Mero-type double layer grids, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 48, 1, 45-52, 2007.
- El-Sheikh A., Optimum design of space trusses, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 39, 3, 159-168, 1998.
- Orbanich C.J., Ortega N.F. y Figueroa J., Determinación de parámetros de diseño de plateas

- de fundación, mediante las Deformaciones Volumétricas. *Mecánica Computacional*, Vol. XXIII, 2004.
- Ortega N.F. and Robles S.I., The design of hiperbolic paraboloids on the basis of their mechanical behavior. *Journal of thin – walled structures*, Elsevier, Nr. 41, 769-784, 2003.
- Rivas I.E., Montanaro M.I. and Ortega N.F., Diseño de estereo estructuras considerando su comportamiento mecánico. *Mecánica Computacional Vol. XXXI, Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, 1421-1431, 2012.
- Robles S.I. and Ortega, N.F., Optimization of shell shape by minimizing displacements. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 42, 137, 139-147, 2001.
- Robles S.I. and Ortega N.F., Optimization of a Telescope Movable Support Structure by Means of Volumetric Displacements, *Structural Engineering and Mechanics*, Techno Press, 31, 4, 29-42, 2009.