

## DISEÑO DE ESTEREO ESTRUCTURAS CONSIDERANDO SU COMPORTAMIENTO MECANICO

Irene E. Rivas <sup>a</sup>, María I. Montanaro <sup>a</sup> and Néstor F. Ortega <sup>a, b</sup>

<sup>a</sup> *Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Av. del Valle 5737,  
7400 - Olavarría, Argentina, irivas@fio.unicen.edu.ar*

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

**Keywords:** Optimización Estructural, Desplazamientos, Estructuras Metálicas.

**Abstract.** A partir de la segunda mitad del Siglo XX ha ido incrementándose el uso de cubiertas realizadas con estereo estructuras metálicas. Por ello, resulta importante determinar parámetros de diseño que puedan facilitar el trabajo del proyectista y del calculista de las mismas, 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 estereo estructuras de acero. Se analiza mecánicamente esta tipología estructural con diferentes condiciones geométricas y vinculación a tierra, a los efectos de reducir el peso total de la misma y las deformaciones en sus nudos, dos parámetros que varían en forma antagónica. Para efectuar este proceso de optimización se recurre a minimizar una función objetivo llamada Desplazamientos Volumétricos. Esta función está definida 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 con otra 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) entre las capas superior e inferior de las estereo estructuras y el ancho, en planta, de los módulos.

## 1 INTRODUCCION

Desde hace algunas décadas el empleo de las estructuras espaciales en la construcción ha tenido un importante desarrollo. Entre las causas que lo han motivado cabría citar como fundamental el hecho que están concebidas bajo la perspectiva de conseguir un alto grado de prefabricación, aspecto que ha permitido importantes ahorros de mano de obra, tanto en la fabricación como en el montaje, el cual se puede efectuar con gran rapidez y facilidad, ya que puede hacerse el armado en tierra y levantarse el emparrillado entero, una vez completo. Todos los elementos necesarios se limitan a unos pocos tipos de barras y uniones sencillas, adaptados a condiciones de carga y luces diversas.

El aspecto del emparrillado es también agradable, desde el punto de vista estético. En algunos casos se deja a la vista, siendo relativamente fácil colocarle por encima, la cubierta y por debajo el cielo raso, mientras que en la zona intermedia se pueden colocar fácilmente los conductores, tuberías y placas aislantes de temperatura y ruidos.

Por sus características, las mallas espaciales son especialmente aptas para cubrir grandes espacios sin columnas intermedias, es por ello que han sido empleadas como estructuras portantes en las cubiertas de salones de exposiciones, polideportivos, edificios industriales, etc. Logrando este objetivo con una estructura plana, que tenga cierta altura, que es un factor determinante en la rigidez de esta tipología estructural (Davoodi et al., 2007).

Desde el punto de vista de la clasificación estructural se puede considerar como espacial a toda estructura en la cual, la distribución de los elementos resistentes es tal que no permite un análisis de su comportamiento por medio de planos independientes. La topología, distribución geométrica de barras en el espacio, se consigue como consecuencia de la repetición y yuxtaposición de poliedros sencillos, correspondiéndose las barras con las aristas de aquellos y los nudos con sus vértices (Cavia Sorret, 1993).

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. A dichas estructuras se las conoce también con el nombre de parrillas de doble capa. El comportamiento del conjunto estructural es similar al de una placa ortótropa en la cual las flexiones según dos direcciones ortogonales quedan canalizadas a través de las barras horizontales y los esfuerzos cortantes son soportados por las diagonales. Debido a esta interconexión, las cargas concentradas que actúan sobre una parte de la estructura son resistidas no sólo por los elementos sobre los que cargan directamente, sino también por medio de otros elementos que pueden estar ubicados a distancia considerable del punto de aplicación de la carga. Normalmente, reciben cargas perpendiculares a su plano medio y se caracterizan por la repartición de los esfuerzos en dos o más direcciones, constituyendo una tipología estructural eficiente.

Existen varios tipos de estructuras espaciales de doble capa usadas en la práctica de la Ingeniería Civil, las hay en configuraciones de dos sentidos (rectangular y diagonal), de tres sentidos (triangular, hexagonal y triangular con hexagonal) y cuatro sentidos (combinación de rectangular y diagonal) según sea la disposición de las barras en los planos o capas, existiendo otras combinaciones de barras (Wang, 1998).

Los emparrillados planos están formados por conjuntos cruzados de vigas paralelas, orientados en dos o tres direcciones, y son utilizados para cubrir plantas cuadradas o rectangulares, de luces importantes como ya se ha mencionado. En la [Figura 1](#) se presentan las

dos disposiciones más usadas que son: las 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, y las de entramado diagonal, que si bien por su disposición permiten un mejor aprovechamiento del material, presentan mayores dificultades constructivas.

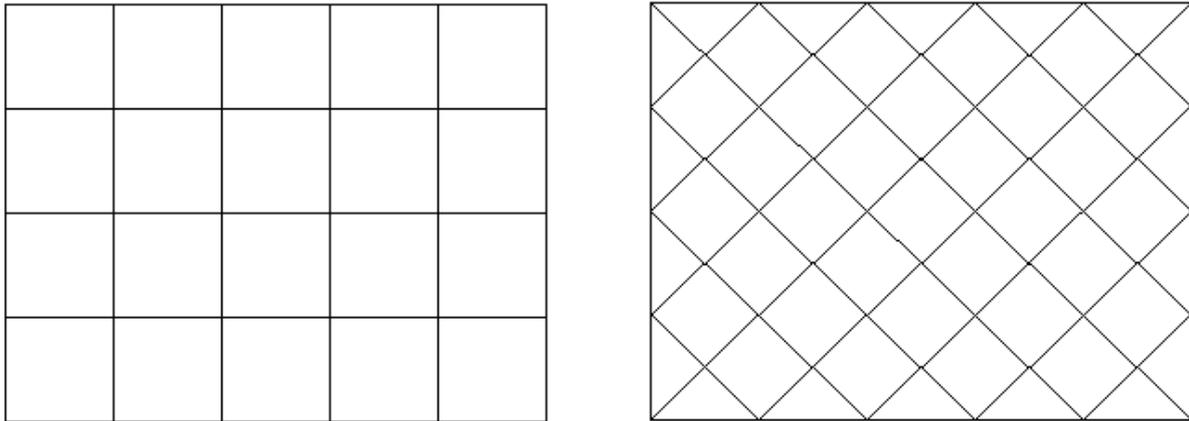


Figura 1: Disposición en planta de barras en emparrillados planos

Las formas seccionales más comunes para las barras son perfiles ángulo y perfiles te para emparrillados de poca importancia, mientras que para los restantes casos se emplean tubos de sección circular. Estos últimos se adaptan muy bien a esta tipología estructural, gracias a su mejor comportamiento frente a esfuerzos de compresión y también a su mayor rigidez a torsión y facilidad de protección contra la corrosión por estar cerradas con soldadura todas las barras. Otra ventaja en el empleo de estas secciones es que el diámetro exterior de las barras puede ser constante, pudiendo usar diferentes espesores de paredes de los tubos para resistir diferentes esfuerzos, simplificando así la construcción y el uso de elementos de unión. De esta manera presentan una interesante expresión arquitectónica, que permite caracterizar la obra con su utilización. El problema fundamental de estas estructuras lo constituyen los nudos, ya que la concurrencia de barras en distintos planos y el proceso constructivo genera dificultades en su proyecto. En los nudos existe un estado tensional complejo y una adecuada resolución del mismo es fundamental (Davoodi et al., 2007). Por este motivo, muchos de estos nudos están patentados.

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. Algunas de ellas pueden quedar bastante impuestas por la funcionalidad del edificio a cubrir, como son la carga unitaria a soportar, la luz, el sistema de cubierta, la apariencia arquitectónica, la facilidad de transporte, el procedimiento de montaje, etc. Sin embargo existen otras que, teniendo una repercusión trascendental sobre el costo, pueden ser elegidas con bastante libertad por el profesional. Una de esas variables puede ser el tipo de malla pero, una vez fijada ésta, mucha mayor trascendencia tienen los parámetros que la determinan: ( $L$ ) longitud de cada una de las barras de la retícula que pertenecen a los planos superior e inferior (normalmente, horizontales) y ( $h$ ) el espesor que está dado por la separación entre dichos planos. Del incremento de la densidad de nudos resulta un incremento en el costo. Por ser la longitud de barra ( $L$ ) la variable que mayor incidencia tiene en la densidad de nudos de la estructura, este parámetro resulta ser el de mayor repercusión económica. En cuanto al espesor de la malla, también tiene incidencia apreciable en el costo, ya que los esfuerzos originados en una

determinada malla son inversamente proporcionales al valor de este parámetro (Cavia Sorret, 1993).

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 y siempre utilizando los diámetros comerciales.

Resulta interesante la optimización del diseño de estas estructuras espaciales de barras que permiten al diseñador seleccionar el tipo de configuración más adecuado para diferentes condiciones de cargas provenientes de una cubierta o de un entrepiso que inclusive puede llegar a ser de hormigón (El-Sheikh and Shaaban, 1997) y las dimensiones de los elementos componentes de la estructura. Si bien por lo general se pone énfasis en lograr una estructura de peso mínimo, no siempre resulta ser la de mínimo costo. También influyen en el costo de la estructura el costo de la materialización de las uniones en los nudos y de los procedimientos de montaje. Como inicio de una serie de estudios para la optimización de entramados de barras, en este trabajo se efectúan y presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación de los procesos de optimización con la finalidad de alcanzar una adecuada relación  $L/h$  de la estereo estructura plana.

## 2 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

Los procesos de optimización constituyen una importante herramienta para las distintas ramas de la Ingeniería. En particular en el campo de la Ingeniería Estructural se pueden aplicar, entre otros, a la determinación de la geometría de diferentes tipologías y para diferentes elementos estructurales. 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) y fundaciones (Orbanich et al. 2004).

En este trabajo se optimizan los Desplazamientos Volumétricos de emparrillados planos, más específicamente, se analizan entramados cuadrados, formados por barras tubulares de acero, con dos distribuciones de apoyo distintas.

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. Para cumplir con el objetivo anteriormente mencionado se procede a minimizar los desplazamientos, de dichas estructuras, empleando como función objetivo un parámetro denominado “Desplazamiento Volumétrico” ( $DV$ ). El mismo se obtiene como la sumatoria del producto del desplazamiento total de cada nodo  $i$  ( $\delta_i$ ), multiplicado por el volumen de influencia de la estructura en el mismo punto ( $L_i \times A_i$ ), según la siguiente ecuación:

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

Siendo  $L_i$  la semilongitud de cada una de las barras que llegan al nudo y  $A_i$  el área de la sección transversal de la barra correspondiente.

Para determinar el valor de los desplazamientos se consideraron cargas gravitacionales, peso propio de la estructura y sobrecarga útil sobre la cubierta o el entrepiso. 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”.

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  $x$ :

$$\begin{aligned} G_k(x_1; x_2; \dots; x_n) &\leq 0 \\ x_i^l &\leq x_i \leq x_i^u \end{aligned} \quad (3)$$

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 Desplazamiento Volumétrico ( $DV$ );

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

$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u$  son los límites superior e inferior de la variable de diseño  $i$ .

Para la verificación de las barras se consideraron las especificaciones establecidas por el Reglamento [CIRSOC 301 \(2005\)](#).

Mediante un análisis similar, al detallado anteriormente para los Desplazamientos Volumétricos, y con la misma metodología de cálculo se puede trabajar con la tensión ( $\sigma_i$ ) a la que se encuentra sometida cada barra componente de la estructura. Se aplica el método con la finalidad de minimizar el parámetro que se denomina Tensiones Volumétricas ( $TV$ ). El mismo se obtiene como la sumatoria del valor absoluto de la tensión máxima ( $\sigma_i$ ), a la que se encuentra sometida cada barra  $i$ , multiplicado por el volumen de dicha barra ( $L_{ii} \times A_i$ ), tal como se indica en la siguiente ecuación:

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

Siendo  $L_{ii}$  la longitud total de la barra  $i$  y  $A_i$  el área de su sección transversal.

Particularmente en este trabajo se consideraron las tensiones axiales, ya que son las predominantes en estas estructuras de barras.

### 3 EMPARRILLADOS ANALIZADOS

Dentro de los emparrillados planos de disposición bidireccional y rectangular se analiza aquí la denominada octaédrica normal, que resulta ser una de las mallas más empleadas en la construcción, y que se genera por repetición de semioctaedros o pirámides de base cuadrada (ver [Figura 2](#)), unos con un vértice (sima de la pirámide) hacia arriba o hacia abajo y otros vértices en un mismo plano separados una altura  $h$ , mientras que los reticulados de barras aledaños están invertidos.

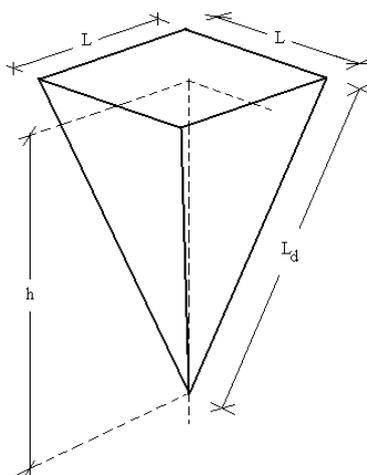


Figura 2: Módulo del emparrillado bidireccional rectangular

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. Se las conoce también con el nombre de parrillas desplazadas, ya que consisten en dos parrillas paralelas de idéntica configuración, pero que se encuentran deslazadas una de la otra en planta, manteniendo la misma dirección. A cada nudo concurren ocho barras, cuatro horizontales y cuatro diagonales, ver Figura 3. La planta del entramado aquí analizado es de forma cuadrada, de 12.00 m de longitud de lado.

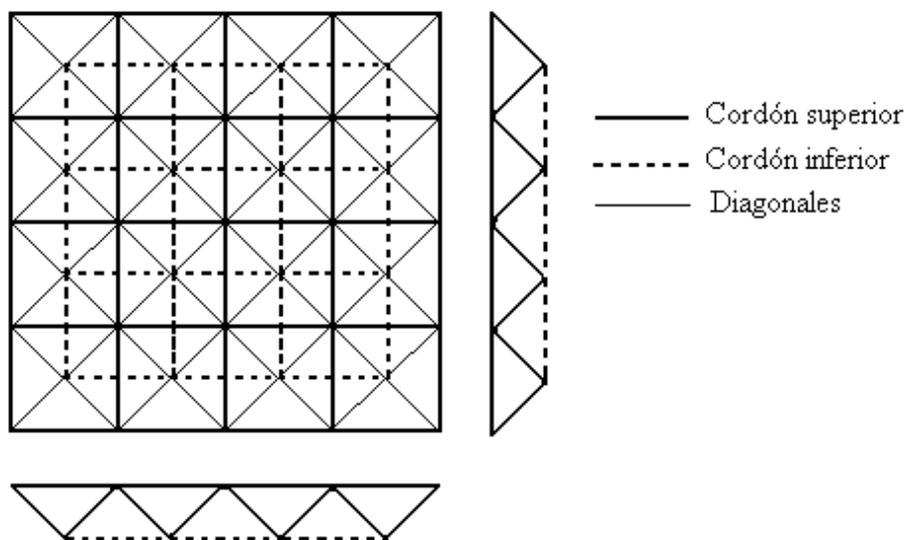


Figura 3: Disposición de barras en una estereo estructura

En los análisis se consideraron cargas gravitatorias (peso propio, peso de la cubierta y sobrecarga útil sobre cubierta), actuando normalmente al plano superior del emparrillado, las cuales se transfieren a los apoyos puntuales. Como se ha mencionado para los modelos, aquí analizados, se evalúan dos casos en función de la ubicación y número de apoyos: en primer lugar se considera al emparrillado sobre cuatro apoyos (dispuestos en cada una de las esquinas de la planta) y, posteriormente, sobre ocho apoyos (cuatro en esquinas y cuatro en la parte central de los bordes laterales). En todos los casos, los apoyos se vinculan directamente con

nudos dispuestos en el plano superior del entramado.

Como se menciona precedentemente, la resolución de los emparrillados de acero se efectuó empleando el software ALGOR 22 (2009). En la Figura 4 se presenta la geometría de un entramado correspondiente a uno de los modelos analizados.

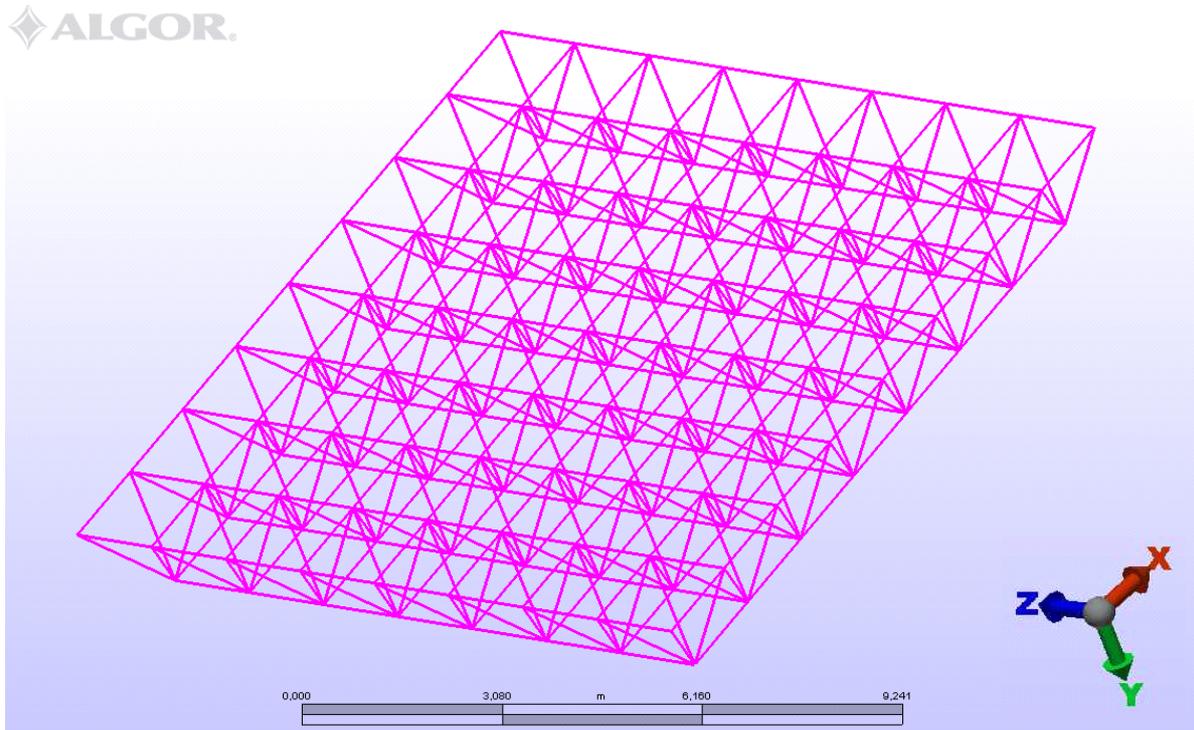


Figura 4: Modelo computacional del emparrillado plano

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, es decir la altura del mismo también denominada espesor.

#### 4 RESULTADOS OBTENIDOS

De la aplicación del proceso de optimización se obtuvieron diferentes resultados, relacionados con Deformaciones Volumétricas y con Tensiones Volumétricas, los cuales se presentan a continuación. Es interesante comentar que se analizaron emparrillados con distintas relaciones  $h/L$ , variando esta relación entre 0.50 y 2.75, debido a que es un intervalo de valores más amplio que las relaciones que habitualmente se suelen emplear en este tipo de construcciones, con el objeto de extender el espectro de posibles soluciones.

##### 4.1 Desplazamientos Volumétricos

En Figuras 5 y Figura 6 se presentan los gráficos con las curvas de tendencia correspondientes al valor de los Desplazamientos Volumétricos, en función de la relación  $h/L$ , para emparrillados apoyados sobre cuatro y sobre ocho apoyos, respectivamente.

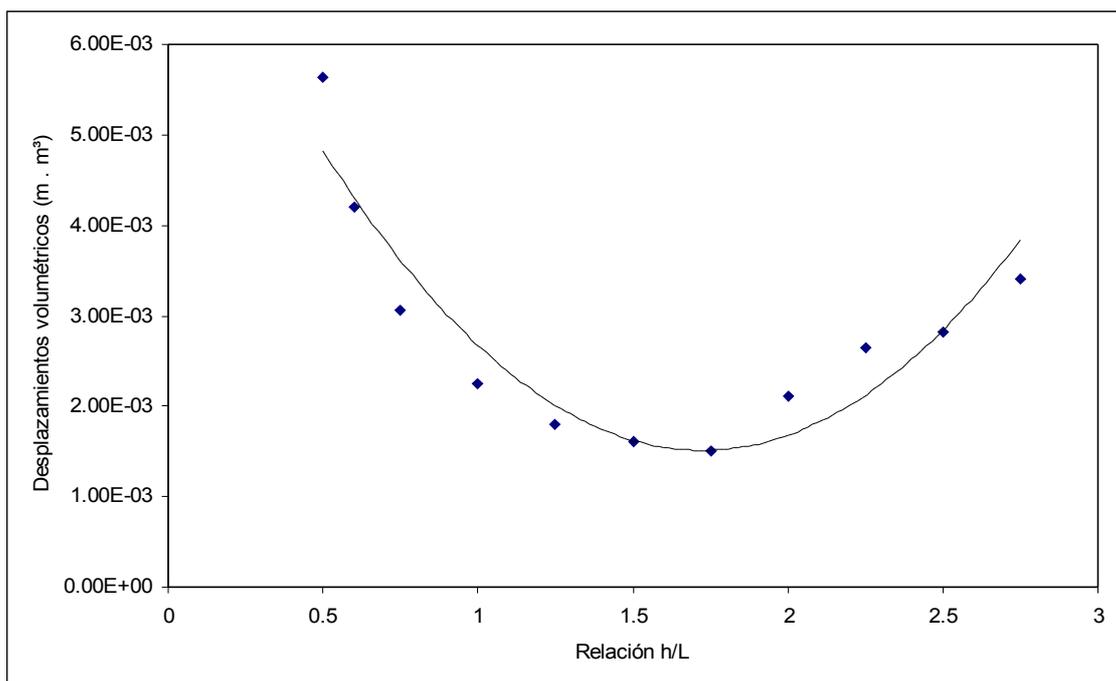


Figura 5: Desplazamiento Volumétrico en función de la Relación L/h. Estructura sobre cuatro apoyos

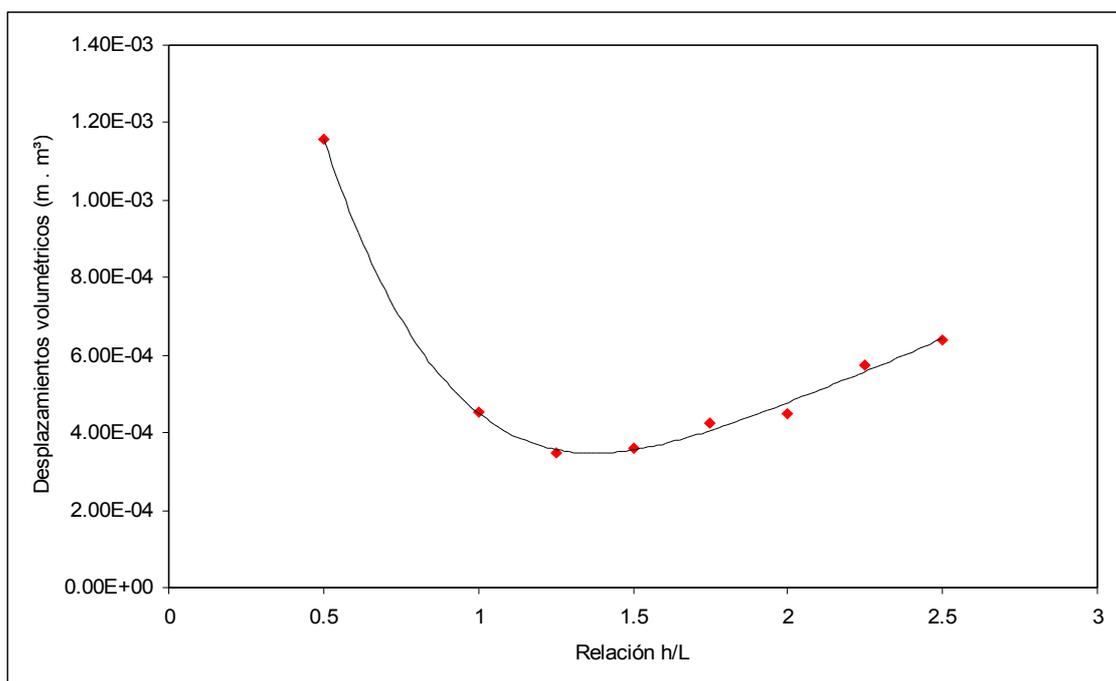


Figura 6: Desplazamiento Volumétrico en función de la Relación L/h. Estructura sobre ocho apoyos

Con respecto a los valores óptimos de los Desplazamientos Volumétricos de la estructura, dispuesta sobre cuatro apoyos, en la Figura 5 se los grafica en función de la relación h/L. Los valores óptimos corresponden al intervalo de h/L que va desde aproximadamente 1.5 hasta 1.8. Debido a que en el diseño de obras, es difícil establecer recomendaciones para la adopción de soluciones puntuales, ya que en la materialización de una estructura intervienen otros factores relacionados con el proyecto arquitectónico, tratando que las longitudes de las

barras de la estructura sean submúltiplos de la longitud comercial en la que se fabrican las barras, etc., 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 muy buen comportamiento estructural.

Por su parte, en la [Figura 6](#) se observa la variación de los Desplazamientos Volumétricos de la estructura, dispuesta sobre ocho apoyos, advirtiéndose que los valores óptimos corresponden al intervalo en que la relación  $h/L$  varía aproximadamente entre 1.25 y 1.50.

## 4.2 Tensiones Volumétricas

En [Figura 7](#) y [Figura 8](#) se presentan los gráficos con las curvas de tendencia correspondientes a las Tensiones Volumétricas en función de la relación  $h/L$ , para emparrillados dispuestos sobre cuatro y sobre ocho apoyos, respectivamente.

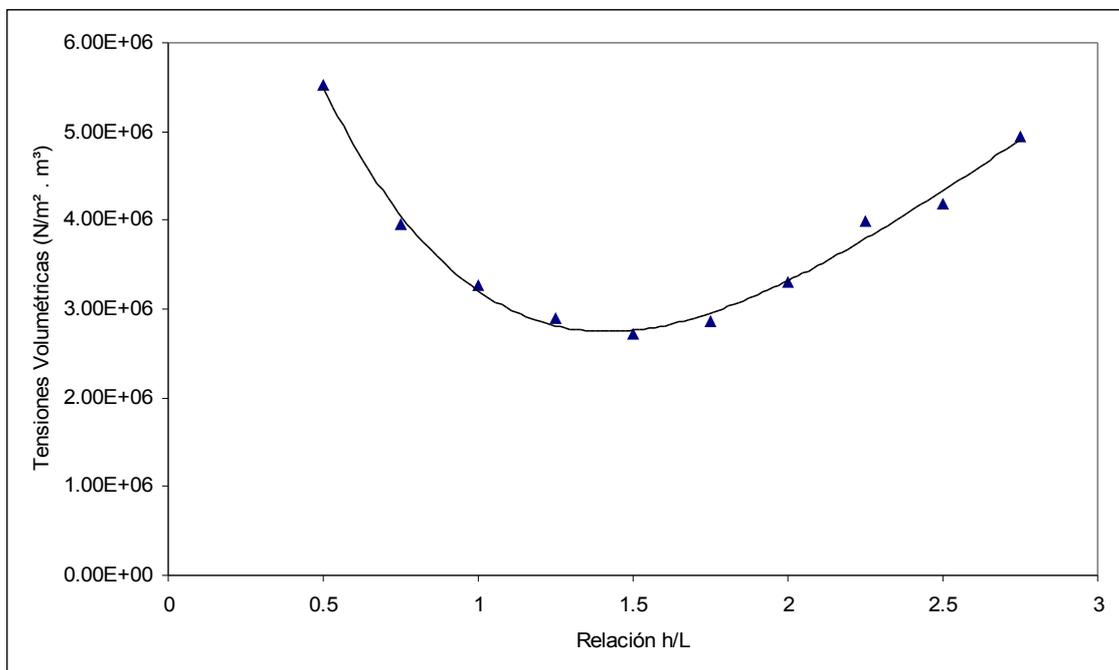


Figura 7: Tensiones Volumétricas en función de la Relación  $L/h$ . Estructura sobre cuatro apoyos

Analizando las Tensiones Volumétricas de la estructura, dispuesta sobre cuatro apoyos, cuyos valores están graficados en la [Figura 7](#), se puede observar que los valores donde las TV son mínimas corresponden al intervalo 1.25 y 1.75 de la relación  $h/L$ .

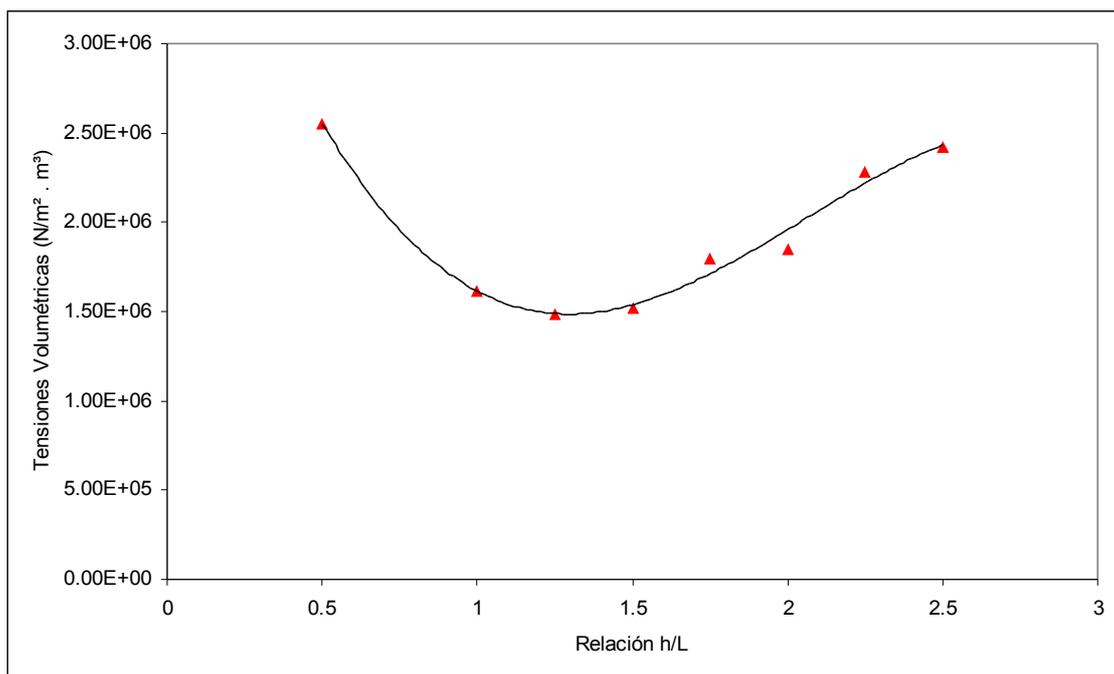


Figura 8: Tensiones Volumétricas en función de la Relación L/h. Estructura sobre ocho apoyos

En la [Figura 8](#) se puede observar que los valores óptimos de las tensiones volumétricas de la estructura, dispuesta sobre cuatro apoyos, corresponden al intervalo en que la relación h/L varía aproximadamente entre 1.10 y 1.50.

Contrastando los resultados obtenidos en este trabajo, 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 cuando el emparrillado se dispone sobre cuatro apoyos, considerando Desplazamientos Volumétricos y Tensiones Volumétricas.
- 1.25 y 1.50 cuando el emparrillado se sostiene sobre ocho apoyos, considerando Desplazamientos Volumétricos y Tensiones Volumétricas.

Cuando se incrementa, de cuatro a ocho, el número de apoyos se puede observar que la relación h/L óptima disminuye, tanto para Desplazamientos Volumétricos como para Tensiones Volumétricas, como es de suponer resulta más conveniente que la estructura tenga menor altura. [Cavia Sorret \(1993\)](#) recomienda que, en general, para estructuras de grandes luces con esfuerzos importantes, resulta conveniente que el espesor (h) se aproxime al valor de la longitud de barra (L), siempre que sea compatible con las posibles limitaciones que, por otras razones, puedan imponerse al volumen de la cubierta. [El-Sheikh \(1998\)](#) realiza la misma recomendación, en lo referente a la relación de lados de cada elemento del emparrillado.

## 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 determinar el rango de espesores entre planos paralelos de estereo estructuras de acero. Transformándose en una valiosa herramienta para el diseñador de estructuras metálicas de barras, debido a que permite analizar los desplazamientos o las tensiones en los elementos estructurales, simultáneamente con el volumen de la misma.

Esta técnica puede resultar de utilidad en el diseño de las estructuras y, especialmente, para la optimización de las mismas considerando solamente las cargas gravitatorias dominantes, debiéndose realizar posteriormente la verificación para cuando actúan las restantes cargas a las que puede hallarse sometida una estructura, tal es el caso de acciones sísmicas, eólicas, etc.

## 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 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.
- El-Sheikh A. and Shaaban H., Shear interaction between space trusses and timber boards, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 39, 3, 155-164, 1997.
- Orbanicha C.J., Ortega N.F. and 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.
- Robles, S. and Ortega, N., 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., 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.
- Wang B.B., Application of BP system in space structures, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 39, 3, 169-174, 1998.