

## OPTIMIZACIÓN DE UNA ESTRUCTURA MÓVIL DE BARRAS, MEDIANTE DESPLAZAMIENTOS VOLUMÉTRICOS

Néstor F. Ortega y Sandra I. Robles

Departamento de Ingeniería. Universidad Nacional del Sur  
Av. Alem 1253. B8000CPB Bahía Blanca, Argentina. Tel. 54 (0291) 459-5100 Int. 3226  
e-mail: nfortega@criba.edu.ar

**Palabras clave:** Análisis Estructural, Optimización, Telescopio

**Resumen.** *En el presente trabajo se expone una técnica de optimización, aplicada al comportamiento mecánico estructural de un telescopio de gran diámetro (10 m). En este proceso de optimización se trata de minimizar el peso de la estructura que soporta a la óptica del telescopio, con una serie de restricciones que limitan las deformaciones de los espejos, que producirían aberraciones ópticas, además se tienen en cuenta los desplazamientos relativos entre los espejos primario, secundario y terciario, que provocarían pérdidas de alineamiento de los haces luminosos, que degradan el desempeño óptico del telescopio, condición que es crucial para asegurar una excelente calidad de las imágenes obtenidas. Con el fin de comparar, en las distintas estructuras propuestas, la evolución de los dos parámetros, peso y deformación de la estructura, cuyos efectos son contrapuestos se propone el uso del parámetro Deformaciones Volumétricas, debido a que los considera en conjunto. Es importante destacar que en el caso de las estructuras móviles, como el telescopio aquí analizado, la complejidad de este problema crece en la medida que la estructura debe permitir tres tipos de movimientos, debiéndose analizar diversas posiciones de equilibrio de la misma, a los efectos de contemplar las distintas sollicitaciones a la que esta sujeta la estructura.*

## 1 INTRODUCCIÓN

En determinados procesos de optimización se trata de minimizar ciertos parámetros, tales como los vinculados con el comportamiento mecánico o el peso de la estructura. Para realizar este proceso de deben considerar, como condiciones de borde, restricciones que están directamente relacionadas con aspectos funcionales de la obra.

La metodología de optimización de formas propuesta en este trabajo, es similar a la empleada anteriormente en estructuras continuas, tales como cubiertas laminares <sup>1, 2, 3</sup> y depósitos de fluidos <sup>4</sup>. En este trabajo se muestra una aplicación de esta técnica a una estructura metálica móvil de barras, en este caso, la estructura de un telescopio de gran diámetro (10 m), en donde se han tenido que considerar fuertes condicionantes, provenientes de los requerimientos del instrumental óptico, que forma parte del mismo. Cabe acotar que este nivel de condicionamientos no es frecuente en otras estructuras.

La principal función de la estructura de un telescopio es la de soportar el sistema óptico, con toda su instrumentación, pero se debe tener en cuenta que además debe mantener la alineación y apuntado, mientras esta siguiendo la trayectoria de cualquier objeto astronómico, con extrema precisión. Esto conduce a una situación bastante acotada en la cual se deben evaluar muchas restricciones, respecto de los desplazamientos de la estructura que soporta al instrumental, para evitar aberraciones ópticas, sumado a esto se debe tener en cuenta la complejidad que se origina en el hecho que la estructura es móvil. Además, se debe considerar que la minimización del peso de la estructura, está íntimamente relacionada con la reducción de las inercias térmicas, costo de la estructura y del mecanismo de movimiento, lo que llevaría a tratar de diseñar una estructura de bajo peso. Asimismo, se debe tener presente que para disminuir los desplazamientos, se debería adoptar estructuras de alto peso. Para salvar esta disyuntiva entre estas dos tendencias contrapuestas, se emplea en el proceso de minimización el parámetro Desplazamiento Volumétrico, que considera en conjunto la influencia de los desplazamientos y del peso.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL TELESCOPIO

El telescopio que se analiza en este trabajo es muy similar al que actualmente se esta montando en La Palma, Islas Canarias, España <sup>5</sup>. La tipología adoptada es una de las más difundidas en los telescopios de gran diámetro, existiendo otros similares en el Observatorio McDonald en Texas cuya construcción culminó en 1997 <sup>6, 7</sup> y el que actualmente se está terminando de montar en Southerland, Northern Cape, South Africa <sup>8</sup>. Cabe acotar que actualmente se esta proyectando otro telescopio, cuyo diámetro es de 30 m, este proyecto es conocido bajo el nombre de California Extremely Large Telescope (CELT) <sup>7</sup>. y lo está realizando un equipo a cargo del mismo diseñador que el del Observatorio McDonald, el Dr. S.J. Medwadowski.

Con relación al telescopio montado en las Islas Canarias, se puede decir que se ha elegido este lugar, para emplazarlo, debido a las excelentes condiciones del cielo. Esta ubicado en el cráter de un volcán apagado, a más de 2000 metros sobre el nivel del mar, donde la atmósfera es normalmente seca, estable y transparente. Debido a la altura en la que se encuentra, esta sujeta a temperaturas externas que varían entre  $-15$  y  $35$  °C, no obstante el rango de

temperaturas reinante, durante el 98 % de las noches del año, período en el cual las condiciones climáticas le permiten estar en operaciones, en esos momentos el rango de temperaturas varía entre  $-2$  a  $19^{\circ}\text{C}$ . La contaminación lumínica es virtualmente nula, debido a que no hay ninguna urbanización cerca, sumado a que la iluminación pública está legalmente controlada, existiendo fuertes restricciones, con el fin de minimizar la contaminación, debido a que existe, en la isla, un importante número de telescopios, en su mayoría propiedad de diferentes países de la Comunidad Europea.



Fig. 1. Montaje de la estructura del telescopio, ubicado en las Islas Canarias.

## 2.1 Sistema óptico

El telescopio aquí estudiado es uno de reflexión, con dos espejos que alimentan a un foco Cassegrain. Adicionalmente, posee un espejo terciario, localizado sobre el eje longitudinal de la estructura reticular, que alimentará los dos focos Nasmyth y los cuatro focos Folded-Cassegrain, ubicados sobre el anillo central.

El espejo primario posee un área equivalente al de un espejo circular de 10 m de diámetro y esta compuesto de 36 segmentos hexagonales de 0,936 m de lado. La longitud focal del espejo es de 16,50 m. Debido a que la estructura metálica que soporta al instrumental, inevitablemente sufrirá deformaciones y con el fin de evitar las aberraciones ópticas de la imagen, que se pueden originar en las distintas posiciones que se puede ubicar el instrumento para realizar las observaciones, la posición de cada segmento del espejo primario está controlada en forma activa por un sistema de control, con el fin de mantenerlos dentro de una misma superficie nominalmente esférica. Su peso total es de 16560 kg y el de su sistema de soportes 5100 kg.

Con relación al espejo secundario, el mismo esta realizado en una sola pieza hexagonal de 1,177 m de lado, con un radio de curvatura de 3,90 m, también es controlado en forma activa para mantener su alineación dentro del sistema óptico. Puede moverse según 5 grados de libertad, con el fin de mantener su alineación, llevando a cabo otras correcciones y los movimientos de las imágenes, independientemente de las deformaciones térmicas y gravitacionales. La distancia entre el espejo primario y el secundario es de 14,739 m. El peso del espejo secundario es de 60 kg.

Por último, el espejo terciario es plano, con un diámetro máximo de 1,511 m y uno mínimo de 1,062 m, su peso es de 60 kg y es el encargado de direccionar las imágenes hacia los diferentes focos.

El sistema óptico del telescopio se completa con una serie de instrumentos, que tienen por objeto corregir distintas aberraciones ópticas de las imágenes, antes que las mismas sean captadas por el sistema de captura de imágenes astronómicas.

## 2.2 Sistema de soporte y control del posicionamiento del Espejo Primario

Cada segmento que conforma el espejo primario, no posee suficiente rigidez para soportar su propio peso, sin producir deformaciones que distorsionen las imágenes reflejadas, por ello se debe disponer un sistema de soporte que le brinde una adecuada rigidez. Este soporte esta unido a la estructura mediante tres posicionadores, que permiten movimientos en la dirección perpendicular al espejo, con un desplazamiento máximo de 1,2 mm.

Este sistema de soporte debe permitir que los espejos primarios sean fácilmente removibles para realizar los tratamientos superficiales necesarios para su mantenimiento.

## 2.3 Estructura Metálica Resistente

Para facilitar el análisis, la estructura del telescopio puede dividirse en dos elementos principales: la **montura**, que conjuntamente con otros elementos provee dos ejes de rotación, soportando la estructura reticular del telescopio y transfiriendo las cargas a la base donde esta soportada, esta parte de la estructura no ha sido analizada en este trabajo, y la **estructura reticular** la cual sostiene los espejos y la instrumentación relacionada con los mismos, manteniendo el alineamiento óptico dentro de rangos admisibles.

Se eligió una estructura de barras tubulares debido a la gran eficiencia estructural que posee, además tiene menor inercia térmica que si se emplea otro tipo de sección con la misma

resistencia, permitiendo una buena circulación del aire, ofreciendo poca resistencia al viento, gracias a lo cual se reducen las turbulencias, minimizándose la vibración de la estructura.

En la zona central de la estructura tubular, se ubica un anillo metálico de sección cajón, que se lo modeló con un espesor de 12.5 mm, con rigidizadores verticales ubicados en dirección radial, cada 0.85 m. Este anillo, posee gran rigidez y transmite las cargas por flexión y torsión.

Por encima y por debajo de este anillo, existen dos estructuras reticulares sometidas a esfuerzos axiales dominantes.

La **Estructura Superior** esta compuesta por los siguiente subsistemas:

- Estructura tubular superior;
- Estructura del espejo secundario;
- Estructura de la araña;
- Anillo Hexagonal superior; y
- Anillo Hexagonal medio.

Mientras que la **Estructura Inferior** la componen los subsistemas siguientes:

- Celda del espejo primario;
- Anillo tubular; y
- Estructura del espejo terciario.

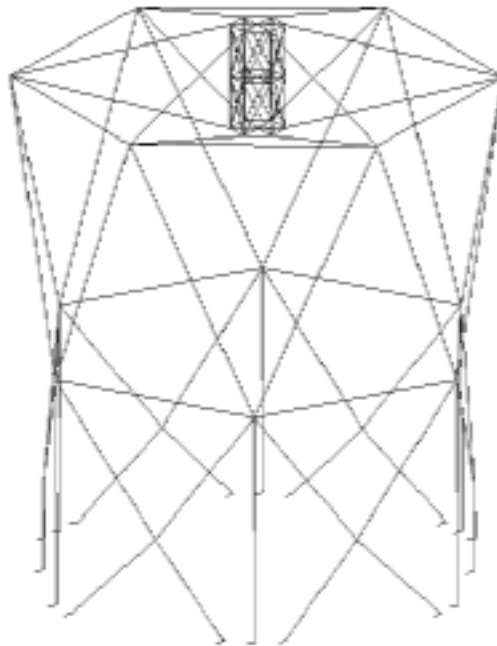


Fig. 2. Parte superior de la estructura tubular.

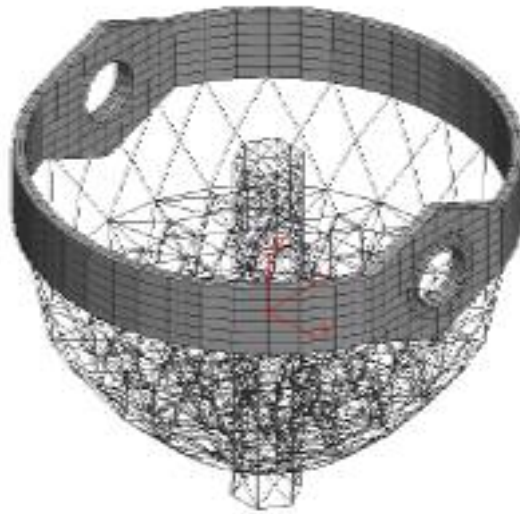


Fig. 3. Parte inferior de la estructura tubular.

Cada una de estas dos partes, presenta una función estructural casi independiente una de la otra, por ello se las puede diseñar y analizar separadamente. Como es de imaginarse, esto trae importantes beneficios, desde el punto de vista computacional. Por estas razones, en este trabajo se las optimizó separadamente, al igual que se hizo cuando se analizó la estructura realizada en las Islas Canarias.<sup>5</sup>

La celda del espejo primario esta formada por una estero-estructura de tres capas. La superior es la encargada de soportar los servo-mecanismos que regulan la posición de los espejos hexagonales. Esta estructura esta unida al anillo metálico mediante barras.

La Estructura Superior es muy similar al diseño de las ya construidas solo que, sobre la parte media, se le agregó un anillo hexagonal, con el fin de rigidizarla. Otro anillo hexagonal corona la estructura tubular superior, circunscribiendo al espejo primario, posee mayores dimensiones y está rotada un ángulo de  $30^\circ$  respecto del mismo. Este anillo soporta una araña, que está compuesta por seis pares de barras, que soportan la estructura del espejo secundario. Estas barras se las ha ubicado de manera tal que se reduzca al máximo posible el bloqueo de luz sobre el espejo primario. En el diseño se debe tener en cuenta que es deseable que esta estructura tenga una sección transversal muy angosta y que esté alineada sobre las juntas, ubicadas entre los segmentos del espejo primario, cosa que se logró girando la posición del anillo hexagonal superior. La sombra generada por la araña está limitada al 0.5 % del área superficial del espejo primario.

### 2.3.1 Requerimientos específicos de diseño de la estructura resistente

Sumados a los requerimientos que debe cumplir cualquier estructura, aquí se describirán los requerimientos específicos, que es necesario que reúna esta estructura, considerando su particular uso:

- La rigidez de la estructura reticular debe ser maximizada, para evitar las desalineaciones ópticas, debidas a las deflexiones producidas pos cargas gravitacionales;

- Reducir el peso total de la estructura, para minimizar los costos y disminuir las inercias térmicas, para no inducir turbulencias térmicas, que degradarían la calidad de las imágenes;
- La estructura debe tener una baja y estable emisividad en el infrarrojo, esto se logra con determinados materiales o reduciendo la masa del telescopio;
- El área expuesta de la estructura a las corrientes de aire, debe ser baja para no producir turbulencias en el aire que circula, para evitar el movimiento de las imágenes;
- La estructura del telescopio debe permitir un flujo de aire suave alrededor y a través de los elementos, especialmente aquellos ubicados por encima del espejo primario. Esto permite una reducción de los gradientes de temperatura entre los diferentes elementos estructurales, minimizando las desalineaciones ópticas producidas por este efecto;
- El mecanismo del telescopio debe permitir movimientos según tres grados de libertad, con una elevada precisión y rigidez, considerando que, en función de la distancia al Planeta Tierra del objeto observado, puede ser necesario realizar exposiciones de una misma imagen durante varias horas. Para facilitar esto, conviene reducir el peso del instrumento; y
- No está previsto que opere ante acciones sísmicas, no obstante debe estar preparado para soportarlas durante su vida útil.

Sintetizando los seis primeros requerimientos, se puede decir que se debe adoptar una estructura tal que, su peso sea reducido, manteniendo una rigidez adecuada a su finalidad. Con relación al último requerimiento y a las vibraciones que se pueden originar por la acción dinámica del viento y las rotaciones del telescopio, no se las tendrá en cuenta en este trabajo de optimización. Algo similar ocurre con las acciones térmicas.

A los efectos de simplificar el proceso de optimización, se trabajará con las cargas estáticas de origen gravitatorio, que son las dominantes y luego debería verificarse la estructura prediseñada, ante acciones dinámicas provenientes de la rotación del telescopio y originadas por la acción del viento. Realizando los refuerzos estructurales, que surjan de esta verificación.

### **3 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN**

#### **3.1 Bases Teóricas**

El proceso de optimización aquí presentado, se aplica a la geometría de los distintos elementos que forman parte de la estructura metálica de barras, que conforman el telescopio en estudio. Se debe mencionar que el anillo con sección tipo cajón de pared delgada, que vincula la Estructura Superior con la Inferior, que sostiene el espejo primario, que es el encargado de transmitir los esfuerzos a la montura, se incluyó dentro del modelo, pero no se lo consideró dentro de la optimización. Cabe acotar que la geometría y peso de este anillo es muy similar al adoptado en el telescopio ubicado en las Islas Canarias<sup>5</sup>.

A los efectos de analizar la eficiencia de, por ejemplo, dos estructuras distintas no son suficientes para comparar los desplazamientos máximos, debido a lo limitado de este análisis, que se reduce al comportamiento de un solo punto, sino que debería adoptarse una técnica que considere en una forma más general estos desplazamientos.

Con el objeto de minimizar los desplazamientos de la estructura, se utilizó un parámetro que se ha llamado “**Desplazamiento Volumétrico**” ( $DV$ ) que se obtiene como la sumatoria del producto del desplazamiento de cada punto  $i$  ( $\delta_i$ ), multiplicado por el volumen de influencia del mismo ( $L_i \times A_i$ ), según la siguiente expresión<sup>3</sup>:

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

Para determinar el valor de los desplazamientos, se adoptó como estado de carga, el peso propio de la estructura, además del peso de la óptica y del instrumental del telescopio. El análisis se efectuó con un software de cálculo basado en el Método de los Elementos Finitos, comercialmente conocido como Algor12<sup>9</sup>. Se ha realizado un análisis lineal de las tensiones, con elementos tipo beam, para la estructura metálica de barras, y el anillo se modeló con elementos planos con un número de lados rectos, que varía entre 3 o 4. Como se puede apreciar, la implementación de esta técnica es relativamente simple.

La formulación matemática de la optimización, para el caso particular de la minimización de los desplazamientos de estas estructuras metálicas de barras, se puede plantear de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar } F(x) = DV(x) \quad (2)$$

donde:

$DV$  (Desplazamiento Volumétrico): función objetivo

$x$  : vector de variables de diseño

Sujeto a las siguientes restricciones:

Minimizar las desviaciones angulares entre las normales a las normales a los espejos;

Minimizar los corrimientos relativos entre espejos;

Limitar el máximo desplazamiento relativo, entre los apoyos de los segmentos del espejo primario.

Cabe acotar que estos desplazamientos relativos están restringidos por la máxima carrera del equipo de control de los segmentos del espejo primario, el que se reduce con el fin de tener un cierto margen de seguridad

## 3.2 Aplicación de la optimización

El caso aquí analizado se realiza dividiendo la estructura reticular en dos partes, una estructura tubular superior (Fig. 2) y otra inferior (Fig. 3) en la que está incluida al anillo metálico de sección cajón.

### 3.2.1 Estructura Superior

Debido a que la estructura es móvil, en una primera etapa se realizó el análisis mecánico en tres posiciones del telescopio: Horizontal, Inclinada a  $45^\circ$ , y Vertical, a los efectos de hallar el estado de cargas más desfavorable, que se pone en evidencia con los Desplazamientos Volumétricos.



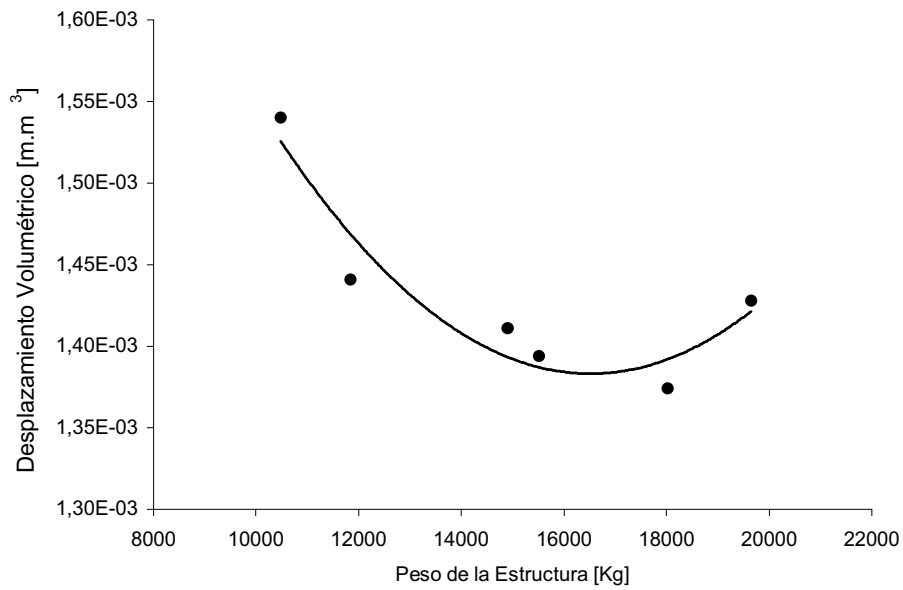


Fig. 4. Desplazamiento Volumétrico de la Estructura Superior, en posición horizontal, en función del peso de la estructura.

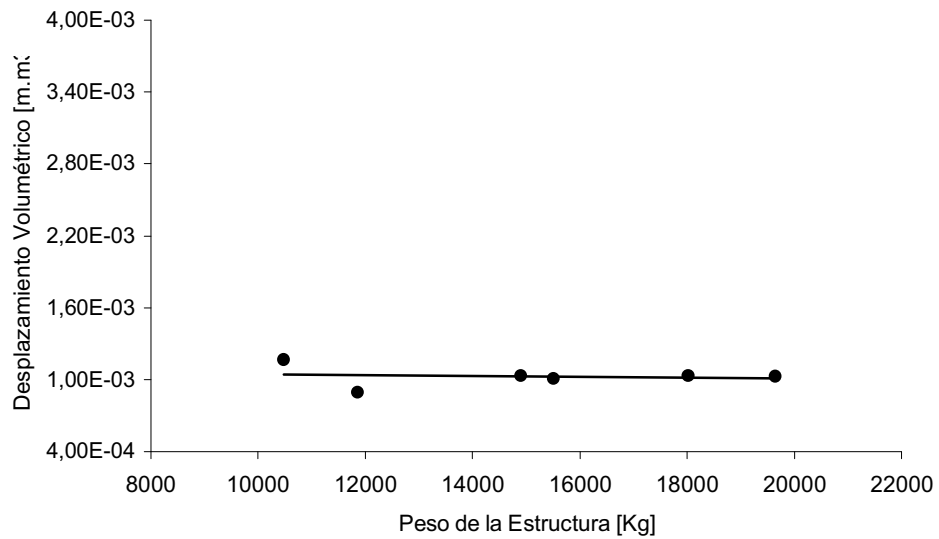


Fig. 5. Desplazamiento Volumétrico de la Estructura Superior, inclinada a 45°, en función del peso de la estructura.

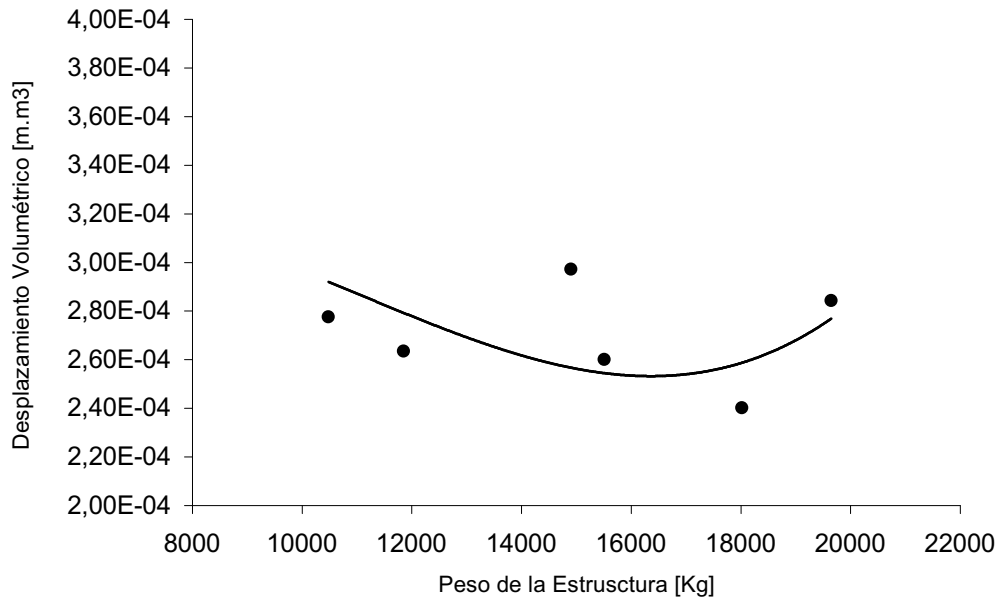


Fig. 6. Desplazamiento Volumétrico de la Estructura Superior, en posición horizontal, en función del peso de la estructura.

Analizando las tres figuras anteriores, se observa que los mayores valores y variaciones de los Desplazamientos Volumétricos, se presentan en la posición horizontal del telescopio, por este motivo la minimización de los Desplazamientos Volumétricos, se realizará con la estructura en esta posición.

En la Fig. 4 se aprecia que los valores óptimos de los Desplazamientos Volumétricos, de la estructura en posición horizontal, corresponden al intervalo de peso de estructura que va desde los 18000 kg, a los 15500 kg. Cabe acotar que similar comportamiento presentan los Desplazamientos Volumétricos en la estructura dispuesta en posición vertical, mientras que en la posición a 45°, los valores obtenidos son prácticamente constantes para los distintos pesos de las estructuras.

### 3.2.2 Estructura Inferior

Como ya se mencionó en el Punto 3.2.1, debido a que la estructura es móvil, corresponde realizar el análisis mecánico en las tres posiciones del telescopio: Horizontal, Inclínada a 45°, y Vertical, a los efectos de hallar el estado de cargas más desfavorable, que se pone en evidencia con los Desplazamientos Volumétricos. En la Tabla 1 se incluyen los Desplazamientos Volumétricos, correspondientes a cada una de las tres posiciones, para uno de los modelos estudiados, cuyo peso es de 4900 kg.

Aquí solo se estudiará el comportamiento mecánico de la estructura inferior en la posición vertical, no obstante se analizaron las otras dos posiciones en las que se registraron desplazamientos menores.

Tabla 1. Desplazamiento Volumétrico de la estructura Inferior determinados en el modelo de 4900 kg, en las tres posiciones.

Modelo	Desplazamiento Volumétricos (m x m <sup>3</sup> )
Horizontal	0.00056
Inclinado a 45 °	0.00088
Vertical	0.00112

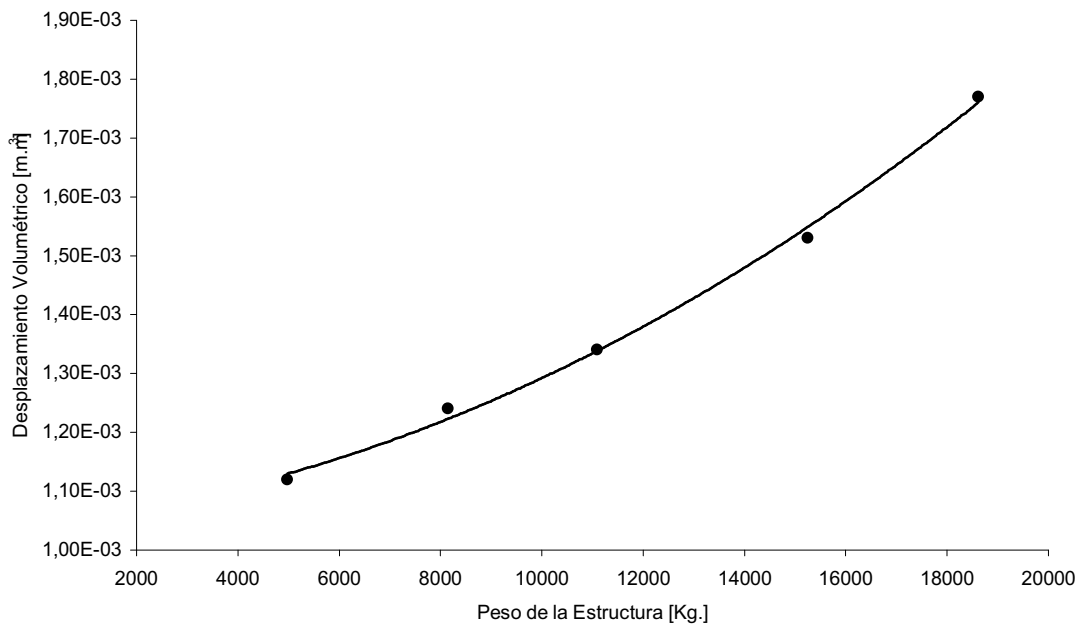


Fig. 7. Desplazamiento Volumétrico de la Estructura Inferior, en posición vertical, en función del peso de la estructura.

En la figura anterior se aprecia que la variación de los Desplazamientos Volumétricos es muy pequeña, incrementándose los mismos a medida que crece el peso de la estructura. Desde este punto de vista se podría adoptar, casi cualquier modelo, pero por razones económicas la selección debería recaer sobre los más livianos.

Este es el momento en que se deben considerar las restricciones propias de la función que tendrá la estructura. Una de estas limitaciones es el desplazamiento que puede compensar el equipo de control activo, para el posicionamiento de los segmentos del espejo primario, que en el caso aquí analizado posee un rango máximo de 1.2 mm. No obstante, a los efectos de poseer un cierto margen de seguridad, se adoptan como valederos los modelos cuyas diferencias máximas de los desplazamientos, en los puntos donde se apoyan los segmentos del espejo, no excedan de 1 mm. En estas condiciones se encuentran los modelos cuyos pesos son: 18618 kg ( $\Delta\delta = 0.8616$  mm) y 15246 kg ( $\Delta\delta = 0.8962$  mm).

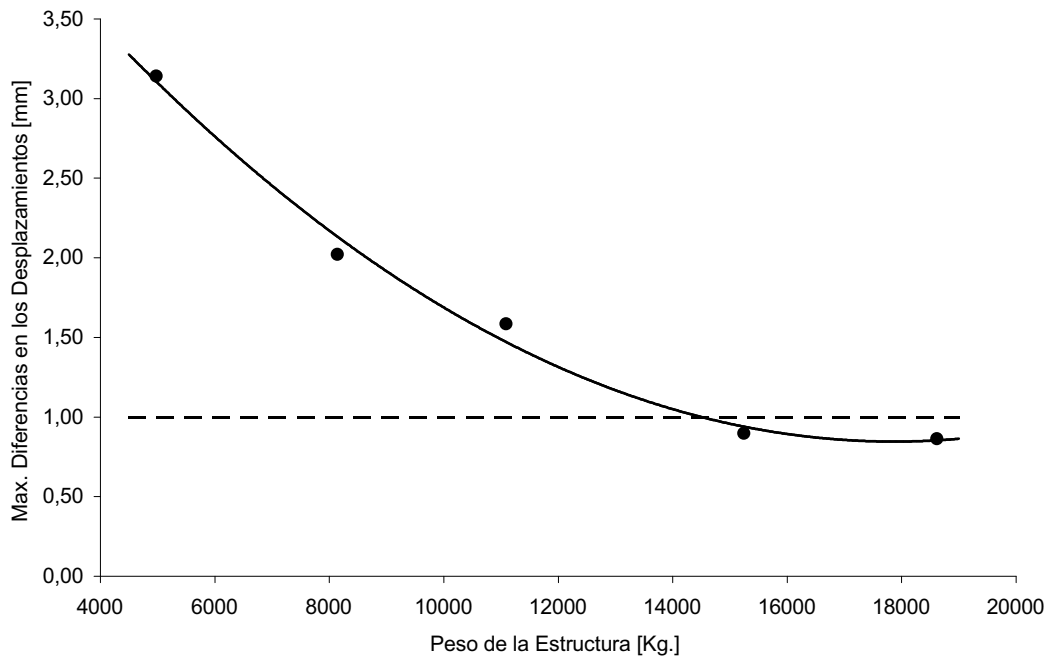


Fig. 8. Diferencias máximas de los Desplazamientos en los apoyos de los segmentos de espejos.

### 3.2.3 Restricciones ópticas que afectan a las dos estructuras en conjunto

A continuación se indican las desviaciones angulares, que afectan al alineamiento entre el espejo secundario, que se encuentra montado sobre la Estructura Superior y los espejos primario y terciario, que están ubicados en la Estructura Inferior. Estas desviaciones angulares están incluidas en las Tablas 2 y 3 y los corrimientos del centro de los espejos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 2. Desviaciones angulares (radianes) entre las normales del espejo primario y del secundario.

Peso de Estructura Inferior (kg)	Peso de Estructura Superior (kg)	
	15500	18000
18600	5.90e-5	5.90e-5
15250	5.59e-5	5.59e-5

Tabla 3. Desviaciones angulares (radianes) entre las normales del espejo secundario y del terciario.

Peso de Estructura Inferior (kg)	Peso de Estructura Superior (kg)	
	15500	18000
18600	4.19e-5	4.19e-5
15250	5.88e-5	5.88e-5

Tabla 4. Corrimiento (mm) del espejo secundario respecto del terciario.

Peso de Estructura Inferior (kg)	Peso de Estructura Superior (kg)	
	15500	18000
18600	7.10e-4	5.90e-4
15250	5.50e-4	4.30e-4

Con relación a las desviaciones angulares entre los espejos, se observa analizando las correspondientes al primario y al secundario (Tabla 2) que son muy reducidas e iguales para ambas Estructuras Superiores; con relación a las Estructuras Inferiores, en todos los casos los valores son similares, no obstante el menor valor corresponde a la estructura de 15250 kg.

Con respecto a las desviaciones angulares entre el espejo secundario y el terciario (Tabla 3) son muy reducidas e iguales para ambas Estructuras Superiores; con referencia a las Inferiores, en este caso la de 18600 kg, es la que presenta las menores desviaciones angulares.

En vista de los resultados analizados hasta aquí, las estructuras elegidas serían, para la Superior es indistinto y para la Inferior, se obtienen resultados diferentes, según la restricción contemplada, por ello se debe recurrir al análisis de alguna otra de las condiciones de borde, en este caso los corrimientos del espejo secundario, respecto del terciario (Tabla 4). En esta tabla se aprecia que la Estructura Superior más conveniente es la de 18000 kg, mientras que en el caso de la Inferior, la que presenta los menores valores, con apreciables diferencias es la que corresponde a la estructura de 15250 kg. Esta diferencia se puede justificar debido a la incorporación de un anillo hexagonal, en la zona media de la estructura superior que favorece su rigidización.

A los efectos de comparar los resultados obtenidos, con los presentados en la referencia <sup>5</sup>, correspondientes al telescopio construido en las Islas Canarias, se puede decir que las Estructuras Inferiores y los anillos son prácticamente iguales, mientras que en las Superiores se aprecian diferencias, siendo las aquí obtenidas más livianas. Cabe acotar que al análisis estático aquí realizado, habría que complementarlo con el estudio del comportamiento dinámico de la estructura, originado por la rotación del instrumento y por la acción del viento.

## 5 CONCLUSIONES

La metodología de optimización de formas propuesta en este trabajo que se basa en la minimización de los Desplazamientos Volumétricos, es una valiosa herramienta para el diseñador de estructuras reticuladas metálicas, debido a que permite analizar simultáneamente los desplazamientos y el volumen de las estructuras. La técnica demostró su potencialidad al ser aplicada satisfactoriamente a una estructura móvil de barras, con fuertes limitaciones en los desplazamientos, a consecuencia de su empleo como soporte del sistema óptico de un telescopio de gran diámetro. Pese a ser una técnica de fácil implementación, con fundamentos teóricos simples.

## Referencias

- [1] N.F. Ortega, and J.V. Arias, “Comparison of Mechanical Efficiency Between an Hyperbolic Paraboloid and a Experimental Model”, *Procc. IV World Congress on Computational Mechanics*, Buenos Aires, (1998).
- [2] S.I. Robles y N.F. Ortega, “Optimización del Diseño de láminas. Obtención de las Mínimas Flexiones Volumétricas Estructurales”, *Procc. Mecánica Computacional*, Vol. XIX, Argentina, 287-292, (2000).
- [3] S.I. Robles y N.F. Ortega, “Study of Volumetric Displacements of Shells”, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, IASS, Vol. 42, N° 137, 139-147, (2001).
- [4] N.F. Ortega, y S.I. Robles, “Minimización de la Fisuración en Recipientes para Fluidos Mediante Técnicas Numéricas”, *Procc. Mecánica Computacional*, Vol. XX, Córdoba, 274-281, (2001).
- [5] Instituto de Astrofísica de Canarias, *Gran Telescopio Canarias, Conceptual Design*, Grantecan S.A., (1997).
- [6] S.J. Medwadowski, “Space frames in Architecture and Science”, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, IASS, Vol. 27, N° 92-93, 7-12, (1986).
- [7] J.F. Abel, Structures by Medwadowski, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, IASS, Vol. 41, N° 92-93, 137-146, (2000).
- [8] K. Meiring, M. de Kock and W.Esterhuize, “Steel Structures for a Large Telescope, Southern African Large Telescope”, *Steel Construction*, Southern African Institute of Steel Construction, Vol. 27, N° 3, 5-8, (2003).
- [9] Algor12 Professional Mech/VE, *Docutech, Linear Stress and Dynamics*, Reference Division. Pittsburgh, Pennsylvania, (1999).