

USE OF OPTIMIZATION TECHNIQUES FOR THE DESIGN OF HEADS IN PRESSURE VESSELS

**María L. Godoy^a, Leonel O. Pico^{a,b},
Néstor F. Ortega^{a,c} y Luis M. Arrien^b**

^a *Área Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Pcia. de Bs. As, Av. Del Valle 5737, Olavaria, Argentina, mgodoy@fio.unicen.edu.ar, lpico@fio.unicen.edu.ar, <http://www.fio.unicen.edu.ar>*

^b *Área Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Pcia. de Bs. As., Av. Del Valle 5737, Olavaria, Argentina, lmarrien@fio.unicen.edu.ar, <http://www.fio.unicen.edu.ar>*

^c *Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina, nfortega@criba.edu.ar; <http://www.uns.edu.ar>,*

Palabras clave: optimización, recipientes a presión, desplazamientos volumétricos, flexiones volumétricas

Resumen. Los recipientes a presión utilizados en la industria son estructuras para las cuales el ingeniero debe encontrar el diseño que garantice un desempeño óptimo. Existen distintas técnicas de optimización, que tienen en cuenta el comportamiento mecánico de la estructura. Entre ellas se encuentran el Método de los Desplazamientos Volumétricos y el Método de las Flexiones Volumétricas, que resultan de utilidad para optimizar la forma de distintos elementos estructurales, en este caso, los cabezales de recipientes a presión.

En el Método de los Desplazamientos Volumétricos, el objetivo es minimizar los desplazamientos de la estructura y en el Método de las Flexiones Volumétricas minimizar las tensiones de flexión y con esto la energía de deformación. La metodología empleada está basada en la combinación de la modelización geométrica y el análisis de estructuras, con herramientas de optimización. Para hallar los desplazamientos y las tensiones usadas en la función objetivo correspondiente, se empleó el Método de los Elementos Finitos.

Las formas de los cabezales pueden ser variadas, siendo las más usuales las de forma esférica y elíptica, pero por razones económicas y constructivas, en muchos casos se utilizan cabezales planos, los cuales deben ser rigidizados para mejorar su estado tensional.

En este trabajo se presenta el estudio de diferentes tipos de cabezales, con distintas relaciones h/D , variando desde 0 (cabezal plano) hasta 1,25, siendo la relación 0,50 correspondiente al cabezal semiesférico, las restantes relaciones corresponden a los semielípticos. El mejor comportamiento estructural se obtiene con los cabezales semiesféricos.

1 INTRODUCCIÓN

Los recipientes sometidos a presión interna pueden estar contruidos utilizando diferentes tipos de cabezales (Megyesy, E.F., 1998.), entre los que se encuentran los semielípticos, semiesféricos y planos, formas que se emplean en el presente trabajo. Cada uno de ellos es recomendable según las condiciones de operación, siendo diferentes sus costos de fabricación.

Los cabezales planos se utilizan generalmente en recipientes sujetos a presión atmosférica, aunque en algunos casos se pueden utilizar como recipientes a presión, siendo su costo de fabricación el más bajo. Los cabezales semielípticos soportan mayores presiones que los toriesféricos y se utilizan cuando el espesor calculado para estos últimos es relativamente alto. Los semiesféricos son utilizados sólo para soportar presiones críticas, puesto que su costo de fabricación es elevado.

En la industria hay ocasiones donde se deben resolver situaciones de forma rápida y económica, es aquí donde el uso de cabezales planos resultan una buena alternativa siempre que las condiciones de operación así lo permitan. Muchas veces una alternativa para su uso es utilizar refuerzos, los cuales disminuyen los desplazamientos en los mismos y generan la redistribución de las tensiones originadas.

La optimización de las formas resulta entonces de suma utilidad (Ortega, N.F., Robles, S.I., 2005), puesto que ofrece una manera clara de comparación de diferentes alternativas constructivas.

En este trabajo se utilizan dos metodologías que permiten optimizar el diseño de recipientes a presión interna. La primera de ellas, consiste en emplear como función objetivo a minimizar el Desplazamiento Volumétrico (DV), y la restante es la función objetivo a ser minimizada es la Flexión Volumétrica (FV) en recipientes sometidos a presión interna, tomando en ambas como variable las formas de sus cabezales. Los resultados obtenidos se han corroborado con las recomendaciones de diseño generalmente adoptadas, por otros autores.

2 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

Es sabido que las superficies laminares están definidas por la configuración geométrica de su superficie media y su espesor en cada uno de sus puntos. Por lo tanto, las técnicas asociadas con el diseño de estas formas determinan la configuración geométrica de su superficie media.

Con el propósito de minimizar los desplazamientos en toda la estructura, se utilizó el parámetro denominado "Desplazamiento Volumétrico" (DV) (Robles S. I., Ortega, N. F., 2001), determinado como la suma de los productos del desplazamiento en cada punto i (δ_i) y el volumen de influencia $V_i = A_i \cdot t_i$ del mismo, siendo A_i el área de influencia del punto i y t_i el espesor de la estructura en dicho punto, según la siguiente expresión:

$$DV = \sum_{i=1}^n \delta_i \cdot V_i \quad (1)$$

Los Desplazamientos Volumétricos dan una idea general de los desplazamientos en toda la estructura, otorgando una visión más amplia que cuando se consideran sólo los desplazamientos máximos.

La formulación matemática de la optimización, para el caso particular de la minimización de los desplazamientos en estructuras sometidas a presión interna, se puede plantear de la siguiente manera:

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

donde:

- DV : desplazamiento volumétrico, utilizada como función objetivo
- $X = h/D$: vector de variables de diseño, en el cual h es la altura del cabezal y D el diámetro del recipiente

Esta optimización está sujeta a las siguientes restricciones:

- Minimizar los desplazamientos en los cabezales del recipiente
- Mantener las tensiones por debajo de la tensión de fluencia de material
- $0 < \frac{h}{D} \leq 1,25$

A los fines de realizar un estudio comparativo, y más exhaustivo del problema, se empleó otro método de optimización de la estructura. Utilizando un procedimiento análogo al anterior y con el propósito de minimizar las flexiones en toda la estructura, se utilizó el parámetro denominado "Flexiones Volumétricas" (FV) (Ortega, N. F., Robles S. I., 2003.; Ortega, N.F., Robles, S.I., 2005), determinado como la suma de los productos de los valores absolutos de la diferencia entre las tensiones superficiales, medidas en ambas caras de la superficie laminar, en cada punto i ($\Delta\sigma_i$) y el volumen de influencia $V_i = A_i \cdot t_i$ del mismo.

$$FV = \sum_{i=1}^n |\Delta\sigma_i| \cdot V_i$$

(1)

Éste parámetro toma en cuenta las variaciones de tensiones que ocurren en ambas caras de la estructura, las cuales fueron analizadas utilizando las tensiones principales máximas.

La formulación matemática de la optimización, para el caso particular de la minimización de las Flexiones Volumétricas en estructuras sometidas a una presión interna, se puede plantear de manera análoga a DV , como:

$$\text{Minimizar } F(x) = FV(x)$$

(2)

donde:

- FV : Flexión Volumétrica, utilizada como función objetivo
- $X = h/D$: vector de variables de diseño, en el cual h es la altura del cabezal y D el diámetro del recipiente

Esta optimización está sujeta a las siguientes restricciones:

- Minimizar las flexiones en los cabezales del recipiente
- Mantener las tensiones por debajo de la tensión de fluencia del material
- $0 < \frac{h}{D} \leq 1,25$

La Figura 1 muestra el esquema de un recipiente a presión típico con cabezal semielíptico genérico.

En los modelos analizados se mantuvieron constantes las dimensiones del cuerpo del recipiente ($H = 3,00$ m; $D = 1,12$ m), los espesores del cuerpo ($e = 9,4$ mm) y de los cabezales superior ($e = 9,08$ mm) e inferior ($e = 9,05$ mm), las condiciones de sustentación y el estado de carga, siendo la variable de diseño la forma de los cabezales, representados por la relación h/D .

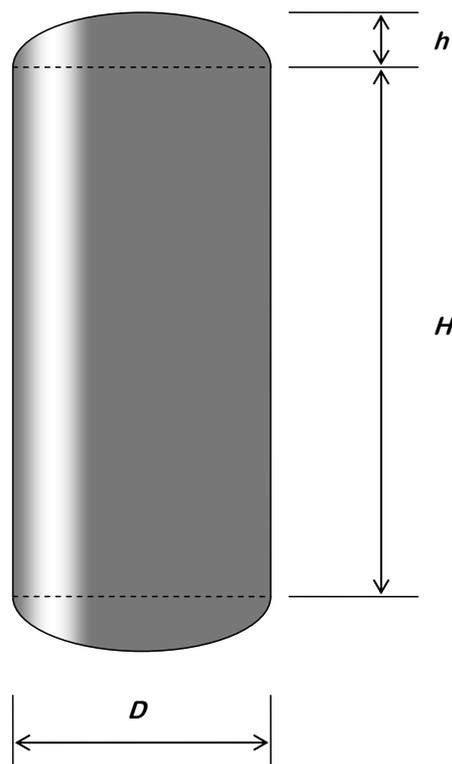


Figura 1: Vista lateral del recipiente con cabezal elíptico genérico

Para la determinación de los desplazamientos y las tensiones en cada punto se realizaron modelos numéricos, utilizando el Método de los Elementos Finitos (MEF) (Burnett, D.S., 1988; Huebner, K.H.; Thornton, E.A.; Byron, T.G., 1995), que permiten obtener dichos valores en cada nodo de la malla utilizada.

Con el uso tanto de DV como de FV es posible comparar diferentes estructuras,

con el propósito de encontrar la más conveniente desde el punto de vista de su comportamiento mecánico y/o funcionalidad. La adopción de diferentes cabezales conduce a variaciones en los campos de desplazamientos y de tensiones. La mayor diferencia ocurre cuando se utilizan cabezales planos, para los cuales la magnitud de los desplazamientos y de la diferencia de tensiones es considerablemente mayor que en otras tipologías. Para poder hacer uso de este tipo de cabezales se deben utilizar refuerzos, a fines de lograr una redistribución de las tensiones que se originan en los mismos (Godoy M.L., Arrien L.M., Pico L.O., 2009).

3 ESTRUCTURAS ANALIZADAS

En los recipientes analizados se mantuvieron constantes las características geométricas del cuerpo vertical, las mecánicas y el estado de cargas, variando sólo la forma de los cabezales.

Se trata de recipientes de acero tipo F24, de los cuales el que posee tapa semielíptica con relación $h/D = 0,25$, es utilizado en la industria para suministro de aire a presión, la cual es de 7.10^5 N/m^2 . En todos los casos la envolvente es cilíndrica, adoptando cabezales de formas semielíptica, semiesférica y planos. Los espesores de los cabezales superior, inferior y envolvente cilíndrica son respectivamente 9,08 mm, 9,05 mm y 9,40 mm. La altura del cuerpo $H = 3,00 \text{ m}$, y su diámetro $D = 1,12 \text{ m}$. En la Figura 2 se muestran dos tomas fotográficas del recipiente, mientras que en la Figura 3 aparece un detalle de la geometría del mismo, donde también se puede observar la disposición de sus soportes a 120° , compuestos por tres perfiles UPN 100.



Figura 2: Tanque acumulador de aire comprimido

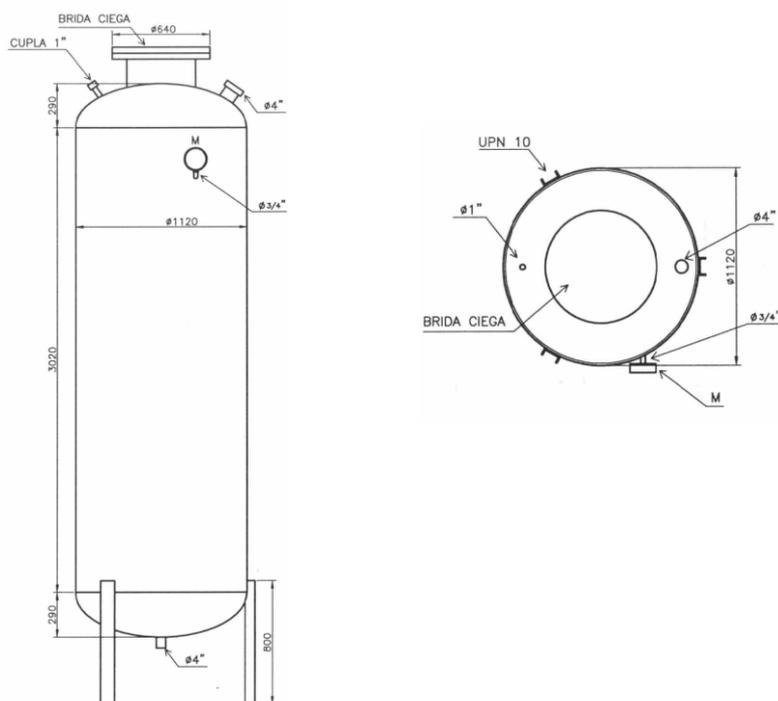


Figura 3: Plano de detalle del tanque acumulador de aire comprimido

4 CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

Como ya se ha expresado, la determinación de los desplazamientos y las tensiones se realizó por medio de modelos numéricos implementados en software de elementos finitos (Algor Software V22, 2008). Para hallar los valores de dichas tensiones, el estado de carga considerado fue de una presión interna de $7 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$. Se adoptó para cada modelo de recipiente un elemento del tipo *placa* rectangular de cuatro nodos, con modelo material isotrópico. Los elementos de sustentación del tanque, constituidos con perfiles UPN 100, según el plano de detalle indicado en la Figura 2, se modelaron con elementos tipo *viga*. Los datos del material que se introducen en el modelo se corresponden a los del acero IRAM 503 F24, de tensión admisible es de $\sigma_{adm} = 9,64 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$, módulo de elasticidad $E = 2,02 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$, densidad $\gamma = 7730 \text{ kg/m}^3$ y módulo de Poisson $\mu = 0,3$.

5 MODELOS ANALIZADOS Y RESULTADOS OBTENIDOS

Se analizaron modelos numéricos de recipientes de cabezales semielípticos con relaciones $h/D = 0,25; 0,75; 1,00$ y $1,25$; cabezal plano, relación $h/D = 0$; cabezal semiesférico, relación $h/D = 0,5$. En todos estos modelos no se consideraron refuerzos en sus cabezales. Por otra parte, se modeló un recipiente de cabezal plano con refuerzos UPN 80 dispuestos radialmente a 60° y un tensor central con un diámetro de 28,5 mm, que vincula ambos cabezales (Godoy, M.L.; Ciancio, P.M.; Arrien, L.M., 2005), a fines de poder comparar el comportamiento estructural del mismo con el recipiente de cabezal plano sin refuerzos.

En las Figuras 4 a 9 se muestran los diferentes modelos analizados, con sus correspondientes mapas de desplazamientos y tensiones principales máximas.

En el recipiente con cabezales planos ($h/D = 0$) sin refuerzos, se obtuvieron $DV = 8,98 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{m}^3$ y $FV = 4,33 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2 \cdot \text{m}^3$. Los DV totales hallados son de un orden de magnitud mayor que los mostrados en la Figura 13, mientras que las FV totales aumentan considerablemente respecto a las mostradas en la misma figura.

Por otra parte, en el recipiente de cabezales planos con refuerzos y sometido a la presión interna de $7 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ se obtuvieron $DV = 8,64 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{m}^3$ y $FV = 8,22 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \cdot \text{m}^3$. En el caso de los DV , éstos son de un orden de magnitud menor que los hallados sin los mencionados refuerzos, mientras que las FV son sustancialmente menores a las encontradas sin dichos refuerzos.

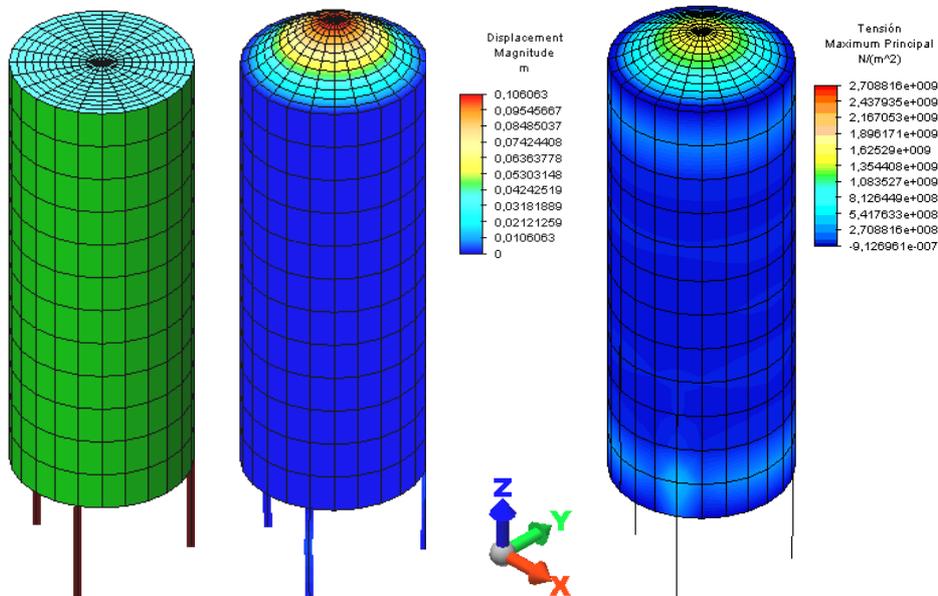


Figura 4: Recipiente con cabezal plano $h/D = 0,00$ y mapas de desplazamientos y tensiones principales máximas

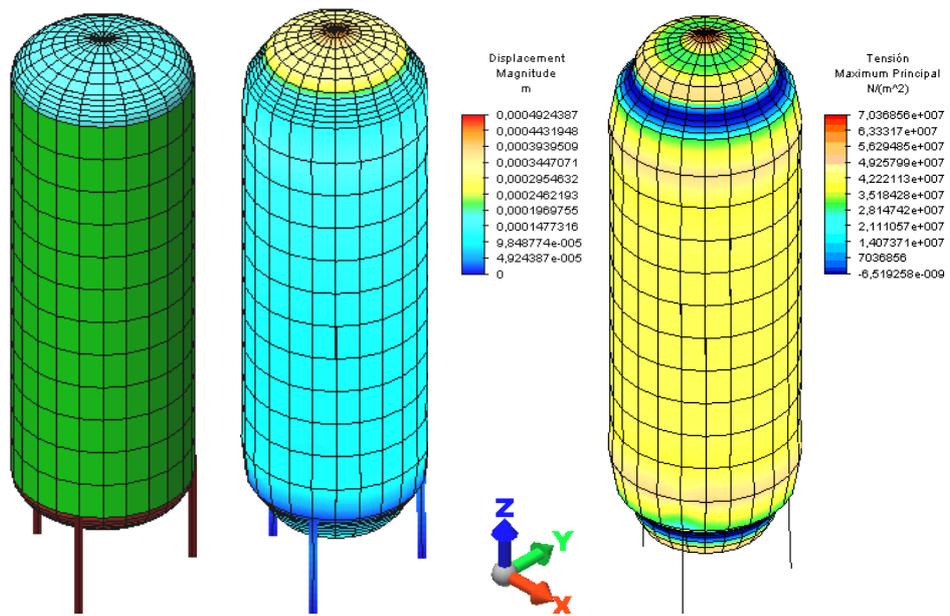


Figura 5: Recipiente con cabezal semielíptico $h/D = 0,25$ y mapas de desplazamientos y tensiones principales máximas

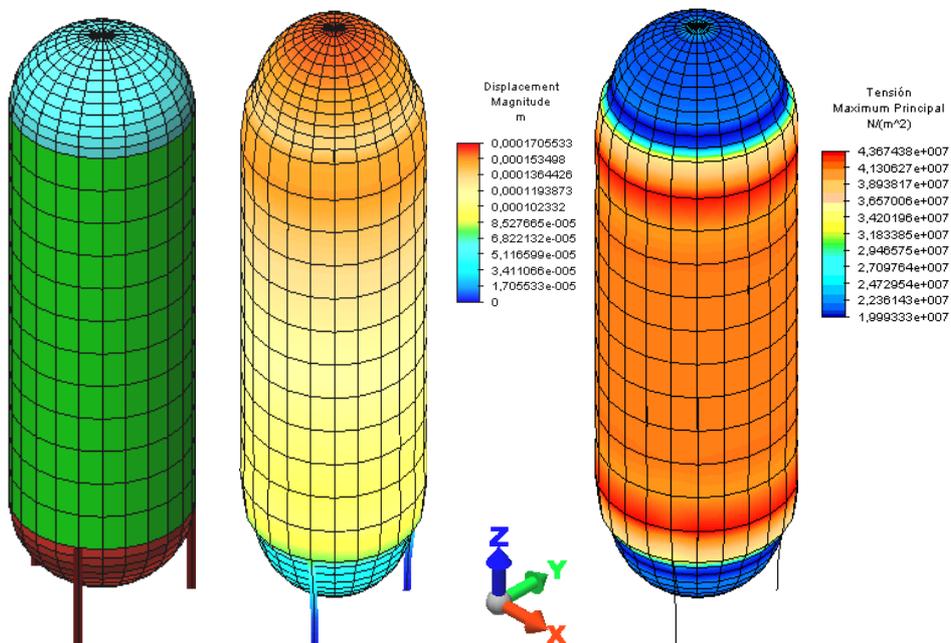


Figura 6: Recipiente con cabezal semiesférico $h/D = 0,50$ y mapas de desplazamientos y tensiones principales máximas

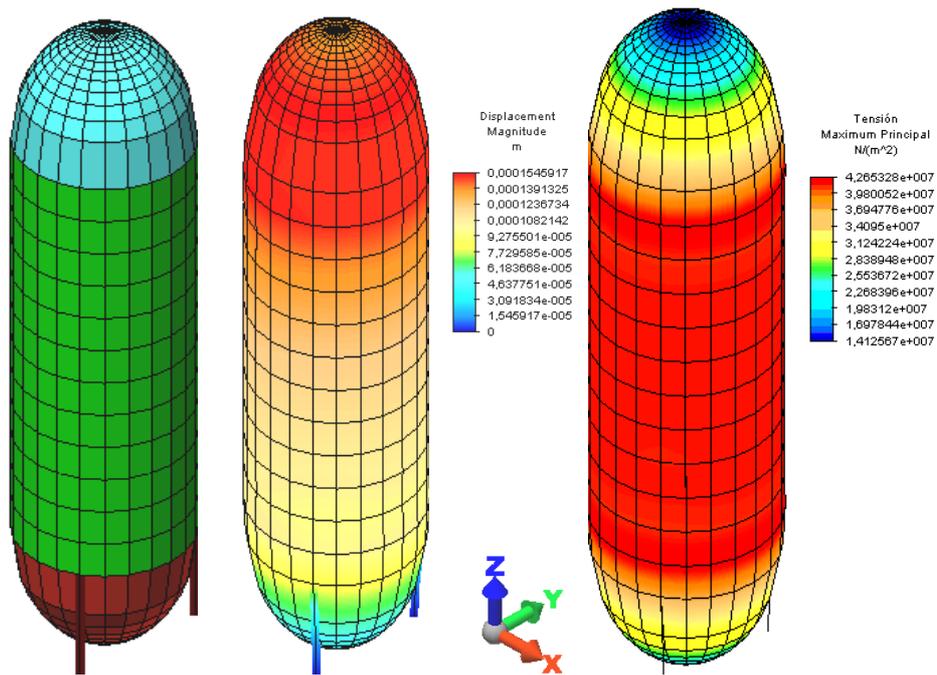


Figura 7: Recipiente con cabezal semielíptico $h/D = 0,75$ y mapas de desplazamientos y tensiones principales máximas

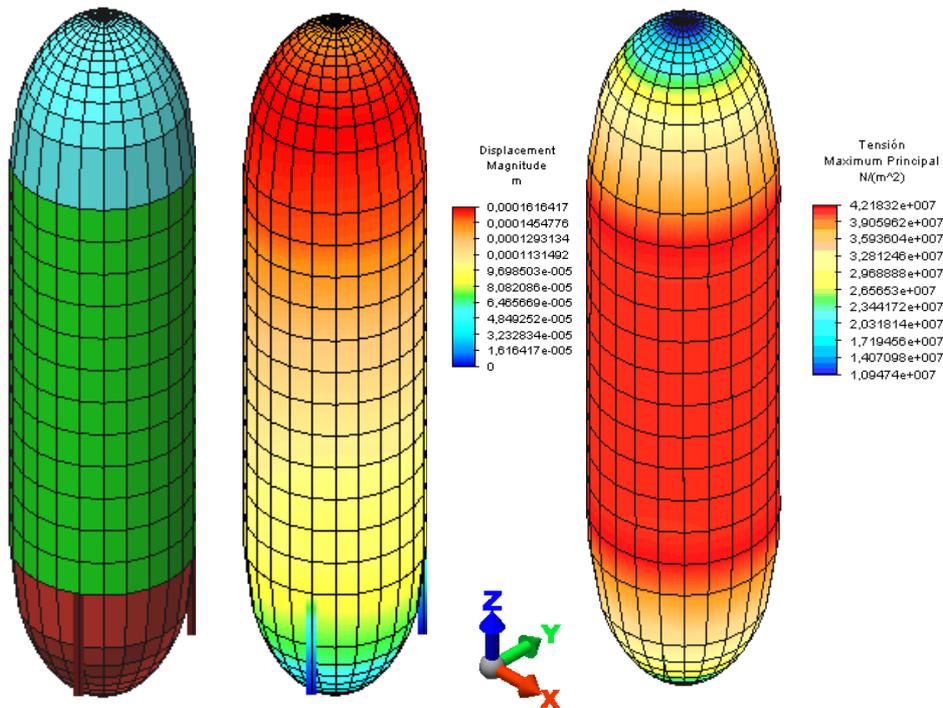


Figura 8: Recipiente con cabezal semielíptico $h/D = 1,00$ y mapas de desplazamientos y tensiones principales máximas

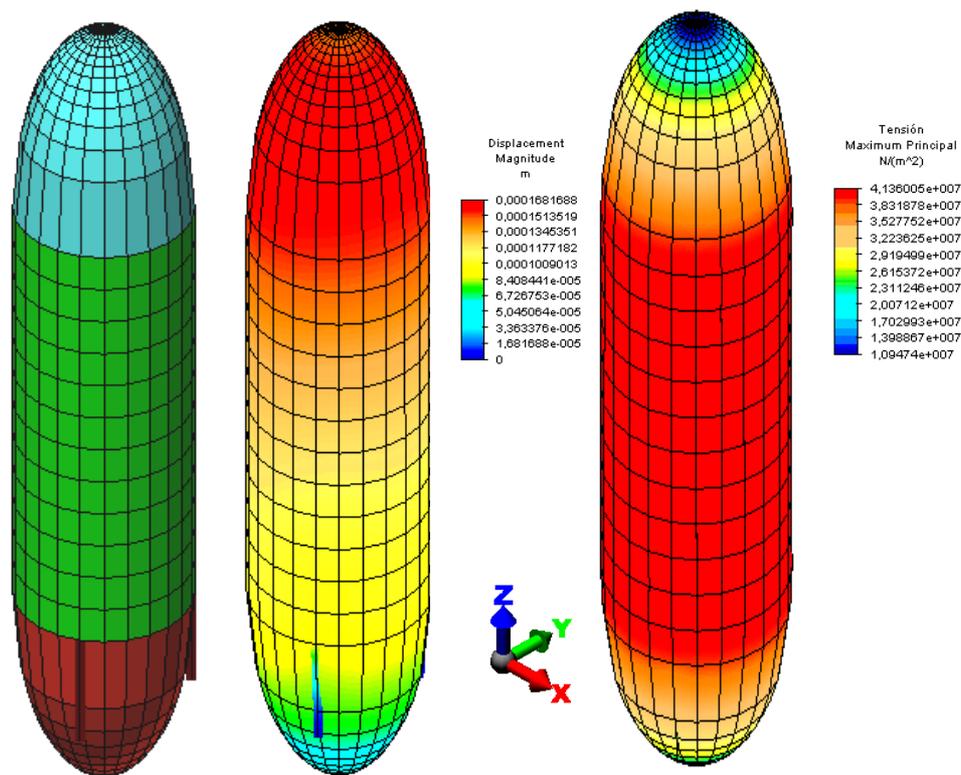


Figura 9: Recipiente con cabezal semielíptico $h/D = 1,25$ y mapas de desplazamientos y tensiones principales máximas

En las Figuras 10 a 13 se grafican los resultados obtenidos de DV y FV para relaciones h/D entre 0,25 y 1,25.

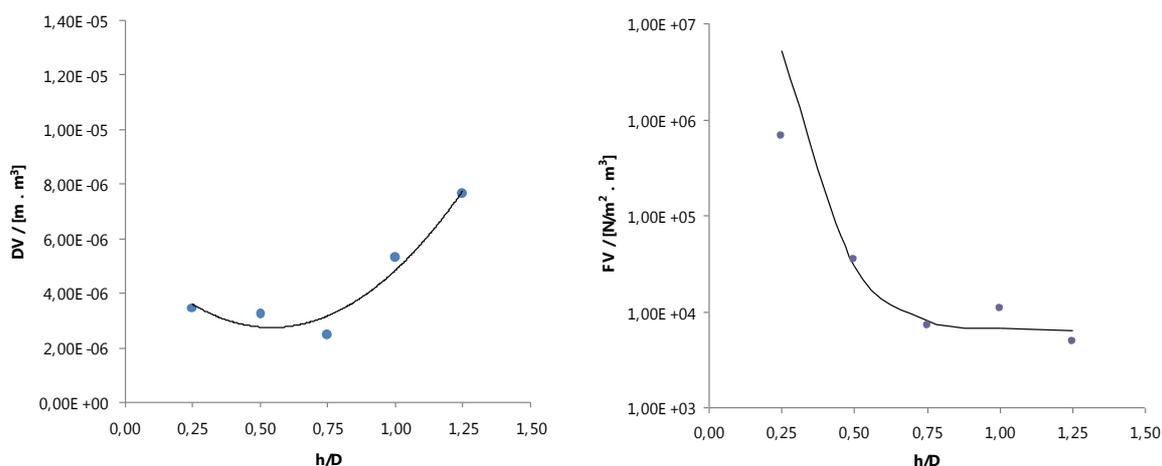


Figura 10: Desplazamientos y Flexiones Volumétricas del cabezal superior del recipiente, en función de la relación h/D

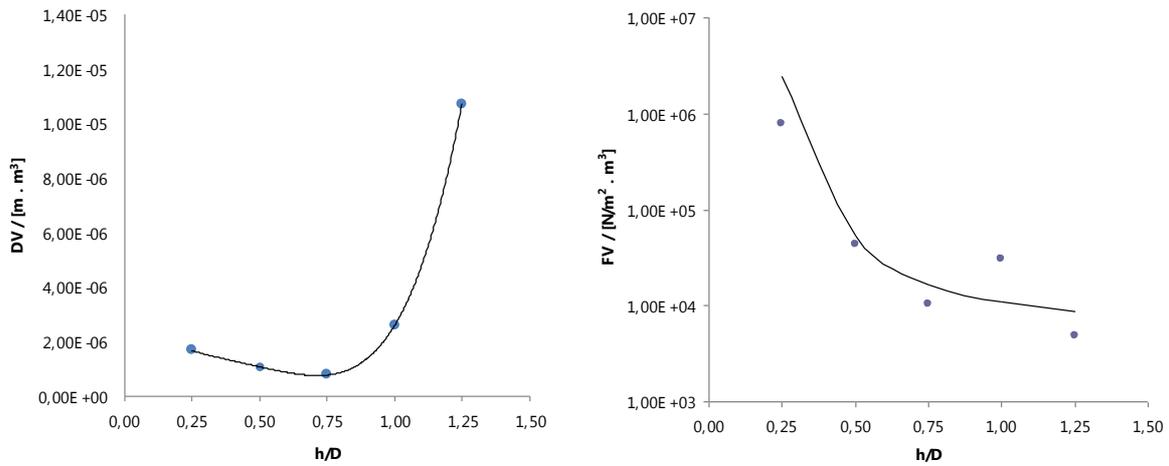


Figura 11: Desplazamientos y Flexiones Volumétricas del cabezal inferior del recipiente, en función de la relación h/D

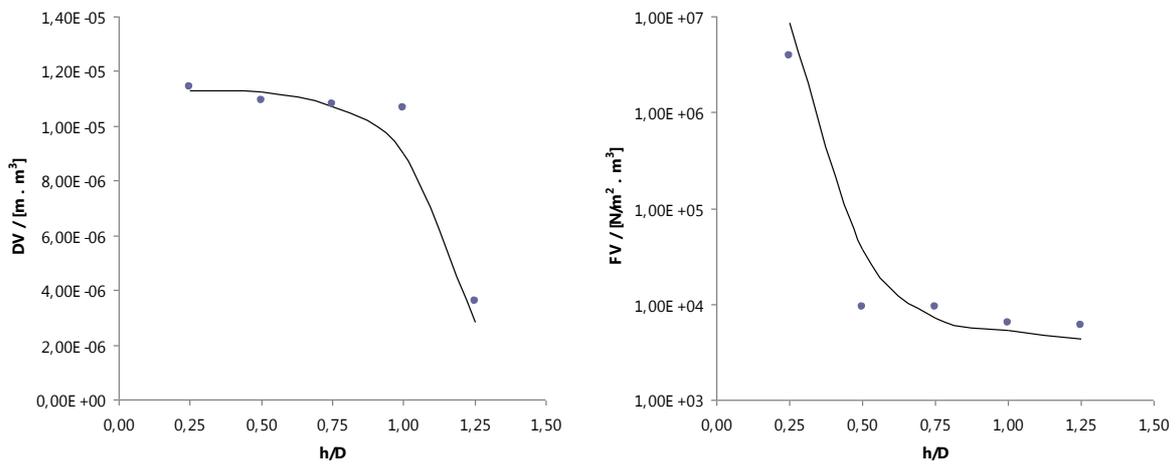


Figura 12: Desplazamientos y Flexiones Volumétricas del cuerpo cilíndrico del recipiente, en función de la relación h/D

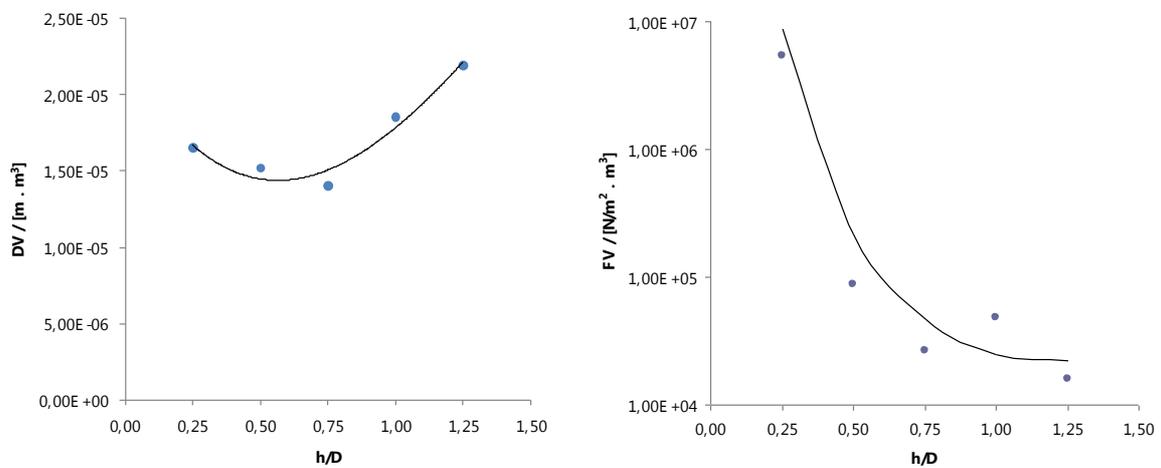


Figura 13: Desplazamientos y Flexiones Volumétricas totales del recipiente, en función de la relación h/D

Es importante destacar que la función DV , para los cabezales superior e inferior, alcanza los menores valores para una relación $h/D = 0,75$. En cuanto al cuerpo cilíndrico del recipiente es notable la disminución de DV a partir de la relación $h/D = 1,00$, no presentando un mínimo en el intervalo estudiado. Esto se debe a que a partir de éste valor se tiene en conjunto un comportamiento estructural más uniforme entre los cabezales y el cuerpo cilíndrico. Utilizando la función FV se observa que tanto para los cabezales superior e inferior, el cuerpo cilíndrico y la estructura en general, dicha función disminuye apreciablemente y no presenta variaciones importantes para relaciones $h/D \geq 0,5$, lo cual permite establecer que cualquiera de las formas de cabezales involucradas con dichas relaciones, se podría utilizar en el diseño óptimo. Sin embargo, relaciones h/D mayores a 0,5 resultan ser costosas y difíciles de materializar. Por tal motivo, los recipientes sometidos a presión interna se materializan con cabezales semiesféricos, especialmente cuando están expuestos a para elevadas presiones internas (ASME, 1998).

Analizando las Figuras 10 a 13, donde se presentan las variaciones de DV y FV , se puede apreciar que acotando el análisis de estas dos variables solo a los cabezales es suficiente, no registrándose variaciones significativas en los h/D obtenidos, si se estudia íntegramente toda la estructura.

6 CONCLUSIONES

La metodología de optimización propuesta en este trabajo utilizando las funciones objetivo DV y FV constituye una valiosa herramienta de diseño para superficies estructurales, en general, y en particular para recipientes sometidos a presión interna.

Para el tipo de estructura analizado, se establece que estudiando las funciones objetivo solo en los cabezales es suficiente. La minimización obtenida utilizando DV , permite definir con mayor precisión el proceso de optimización, dado que dicha función objetivo presenta un claro mínimo relativo para $h/D = 0,75$, mientras que la optimización empleando FV no presenta un mínimo definido. En correspondencia con lo anterior, compatibilizando ambos métodos, aunque el mejor comportamiento estructural se logra con relación $h/D = 0,75$, a los fines constructivos se suele adoptar:

- Cabezales planos con refuerzos, para presiones internas bajas
- Cabezales semiesféricos, para presiones internas elevadas

REFERENCIAS

Algor Software V22, 2008.

ASME, *Boiler and Pressure Vessel Code*, Sección VIII, División 2. 1998.

Burnett, D.S., *Finite Element Analysis from concepts to applications*. Addison-Wesley Publishing Company, 1988.

- Godoy M. L., Arrien L. M., Pico L. O., *Análisis de refuerzos en recipientes a presión de tapas planas*, Vol. XXVIII Mecánica Computacional, ISSN 1666-6070, 1828-1833, 2009.
- Godoy, M.L.; Ciancio, P.M.; Arrien, L.M., *Análisis del comportamiento de cabezales con distintas geometrías en recipientes a presión*, Vol. XXIV Mecánica Computacional, ISSN 1666-6070, 2315-2323, 2005.
- Huebner, K.H.; Thornton, E.A.; Byron, T.G., *The Finite Element Method for Engineers*. Third Edition, John Wiley & Sons, 1995.
- Megyesy, E.F., *Manual de recipientes a presión. Diseño y cálculo*. Limusa-Noriega Editores, 1998.
- Ortega, N. F., Robles S. I., The design of hyperbolic paraboloids on the basis of their mechanical behavior, *Journal Thin-Walled Structures*, 41:769,784, 2003.
- Ortega, N.F., Robles, S.I., Form finding of revolution shells by analysing mechanical behavior of the finite element method. *J. Strain Analysis*, 40:775-784, 2005.
- Robles S. I., Ortega, N. F., Study of volumetric displacements of shells, *Journal of the International Association for shell and spatial structures*, 42:139,148, 2001.