

**ESTUDIO COMPARATIVO MEDIANTE EL MÉTODO DE
ELEMENTOS FINITOS DE LAS TAPAS UTILIZADAS EN
RECIPIENTES CILÍNDRICOS HORIZONTALES SOMETIDOS A
PRESIÓN INTERIOR**

**COMPARATIVE STUDY THROUGH FINITE ELEMENT METHOD OF LIDS
USED IN CYLINDRICAL VESSEL IN HORIZONTAL POSITION SUBJECT TO
INTERNAL PRESSURE**

Eusebio V. Ibarra-Hernández^{1}, Idalberto Mendoza Díaz², Marlene Dupin-Fonseca¹,
Félix A. Goya-Valdivia¹, Belkis F. Guerra- Valdés¹ y Yohanny Rangel Machado²*

¹ Centro de Estudio de Química Aplicada (CEQA). Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas Carretera a Camajuaní km 5 ½ Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Departamento de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas Carretera a Camajuaní km 5 ½ Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Noviembre 9, 2016; Revisado: Enero 4, 2017; Aceptado: Marzo 23, 2017

RESUMEN

En el trabajo se realiza un estudio de los recipientes cilíndricos, colocados en posición horizontal, sometidos a presión interior, destacándose las tapas como una de sus partes fundamentales. La caracterización geométrica de estos elementos se realiza haciendo uso del *Autodesk Inventor pro. 2016*, modelador paramétrico de sólidos, ensamblajes y superficies para el diseño mecánico de partes complejas. Las diferentes formas geométricas de los fondos (tapas) que se analizan en este trabajo son: Circulares planos con y sin reborde, Elípticos con diferentes valores del factor k , Toriesféricos con diferentes valores del factor M y los fondo semiesféricos. Se realiza un estudio comparativo, haciendo uso del método de los elementos finitos (MEF), del comportamiento de las tensiones y deformaciones en las diferentes formas geométricas anteriormente mencionadas demostrándose que aunque los mejores valores de resistencia y rigidez los presentan los fondos semiesféricos y las mejores opciones de fabricación los circulares planos, no son estos los fondos que más se utilizan en estos tipos de recipientes, resultando los fondos elípticos los de mayor uso. Los resultados

Copyright © 2017. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Eusebio V. Ibarra-Hernández, Email: eusebioih@uclv.edu.cu

obtenidos permiten mejorar el diseño y conocer el espesor límite en las zonas más solicitadas.

Palabras clave: Tapas y fondos, recipientes a presión, tensiones y esfuerzos, Método de Elementos Finitos

ABSTRACT

In this work a study of the cylindrical vessels in horizontal position and subject to internal pressure is carried out, where lids are one of the main components of this equipment. *The Autodesk Inventor pro. 2016* is used to make the geometrical characterization of these elements: parametric solid modeler, assemblies and surfaces for the mechanical design of complex parts. The different geometric forms of the lids and bottoms analyzed in this work are: flat-circular with or without flange, elliptical with different values of the K factor, torispherical with different values of the M factor and the hemispherical bottoms. Using the Finite Element Method (FEM), a comparative study is made about the behavior of the stress and strain in the different geometrical forms mentioned before, being demonstrated that although the best resistance and rigidity values are presented by the hemispherical bottoms and the best options of production by the flat-circulars, they are not the bottoms used the most in this vessels, being the elliptic bottoms those of more use. The results obtained allow optimizing the design and knowing the thickness limit in the most requested areas.

Key words: Lids and bottoms, pressure vessel, stress and strain, Finite Element Method

1. INTRODUCCIÓN

El rápido incremento que han experimentado las producciones químicas han exigido de un vertiginoso desarrollo de la tecnología de producción del equipamiento químico, incluyendo los recipientes a presión a los que se le exige que cada vez sean más eficientes, seguros, y económicos, debido a lo cual se hace necesario contar con los métodos de diseño y herramientas adecuados para garantizar el correcto diseño de estos. Para la elaboración del diseño, se debe determinar el tipo de recipiente, los parámetros fundamentales del material de construcción y otros datos necesarios para calcular o chequear su resistencia mecánica, este trabajo es realizado por un proyectista sobre la base del proceso de producción elegido, del cálculo químico-tecnológico, de las particularidades del medio en que trabajará y de las condiciones y medios que se dispone para su construcción Josef (2006).

De la correcta elección del tipo de geometría a utilizar en las tapas de los recipientes cilíndricos horizontales sometidos a presión interior dependerá en gran medida la funcionalidad y seguridad del mismo. En la selección de las mismas influyen varios factores entre los que destacan: la economía de material, la facilidad de fabricación y la resistencia mecánica de estas. Los objetivos propuestos para este trabajo fueron, en primer lugar, los de analizar las principales formas geométricas de las tapas a utilizar en estos recipientes así como el evaluar por medio del método de elementos finitos las

tensiones y deformaciones en estos elementos con el fin de poner en manos de los diseñadores una herramienta que los ayude en esta tarea.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el manejo de cantidades relativamente “pequeñas” de gases los recipientes cilíndricos, Figura 1, son más recomendables que los esféricos debido a su menor costo de fabricación. La mayoría de los aparatos se fabrican con virolas cilíndricas, laminadas, conformadas o fundidas Assakkaf (2003). Los fondos y las tapas son partes integrantes de la virola, como regla ellas no son separables de la misma y fabricadas del mismo material (son generalmente soldadas a las virolas), en los equipos forjados y fundidos, ellas son partes integrales de la virola. Sobre la forma de las tapas influyen varios factores:

- La forma de la virola que va a ser conectada a la tapa.
- Los requerimientos tecnológicos o del proceso.
- Presión y temperatura del fluido a procesar.
- Otras consideraciones de diseño.

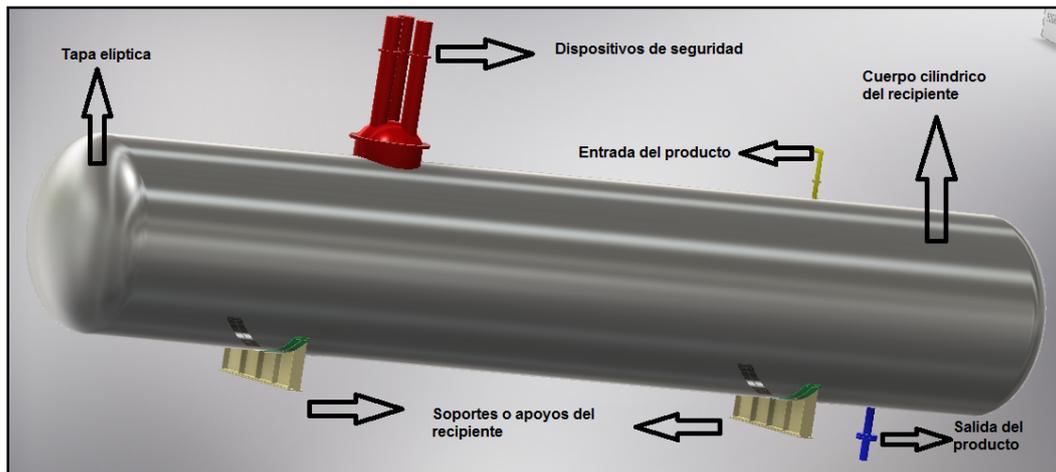


Figura 1. Elementos fundamentales de un recipiente cilíndrico a presión interior en posición horizontal

Siendo las configuraciones más comunes, para estos tipos de recipientes, las siguientes; tapa elíptica, tapa toriesférica, tapas semi-esféricas y las tapas planas con o sin reborde.. La geometría de las tapas y fondos de los recipientes a presión responden a bóvedas de paredes delgadas con formas de superficie en revolución y cargadas simétricamente. Para simplificar el análisis del estado tensional de estos elementos, se considerará un estado tensional biaxial lo cual es permitido debido a los bajos valores que tienen las tensiones radiales en los aparatos de paredes delgadas Josef (2006) y Assakkaf (2003). El estado tensional del material de las envolturas descrito anteriormente está dado por la suma de dos componentes:

1. El estado tensional originado por fuerzas uniformemente distribuidas sobre la superficie, tales como las originadas por la presión de los líquidos o gases o el propio peso.

2. El estado tensional originado por la acción de fuerzas y momentos distribuidos que actúan en el contorno del recipiente.

El primero se puede determinar por la “teoría membranaral” o por la “teoría de los momentos” según se requiera. Los resultados obtenidos por la teoría membranaral son precisos para el diseño ingenieril Sánchez-Capitán (2011), siendo ésta ampliamente usada en el diseño estructural. La teoría de los momentos no es utilizada usualmente para determinar las tensiones o estado tensional para fuerzas distribuidas uniformemente sobre las superficies, las ecuaciones obtenidas por esta teoría son complejas y la diferencia de los resultados obtenidos con respecto a la membranaral es insignificante Moss (2004) y Assakkaf (2003)

El segundo de los componentes se pone de manifiesto en aquellos lugares donde existan cambios bruscos en las cargas, espesores de la pared o en las propiedades del material, así como en las zonas de los apoyos, donde el estado tensional se determinará haciendo uso de la “teoría de los momentos” Moss (2004)

Se realizará a continuación el diseño y modelación de los diferentes tipos de tapas de estos recipientes mediante el método de elementos finitos (MEF) Autodesk (2016), para ello se les aplicará una carga, a todos, de 1,2 MPa. Los fondos a emplear serán del tipo toriesférico, elíptico, plano y semi - esférico; con los cuales, luego de diseñados y simulados, se realizará una comparación de todos los resultados obtenidos y se seleccionará el que mejores datos proporcionó.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Diseño y simulación de los fondos tipo planos

En este caso se valorarán dos formas geométricas diferentes, la circular plana con y sin reborde, analizándose para ambos casos la distribución de las tensiones y las deformaciones con el objetivo de compararlo con las restantes formas geométricas.

En la Figura 2 se muestra la forma geométrica de la tapa y se destaca en color azul la zona por donde se fija dicho elemento, para la modelación por (MEF), nótese que esta área coincide con la cara que estará en contacto con la superficie de la virola o la brida, además se muestran las cargas aplicadas (2,5MPa) al fondo circular plano o tapa y se destaca en color verde-azul el área de acción de dichas cargas, Akin (2009). Esta condición fue aplicada de igual manera a las restantes formas geométricas analizadas en este trabajo, además el resto de las tapas tendrán el mismo diámetro interior, ASME (2004).

En las Figuras 3 y 4 se muestra la distribución de las tensiones para los fondos analizados (circular plano y circular plano rebordado). Además, cabe resaltar que en la Tabla 1 se presentan los valores máximos y mínimos de tensiones y deformaciones obtenidos durante el proceso de simulación de las tapas en cuestión. Los valores que muestra la simulación demuestran claramente que este tipo de fondo es totalmente inadecuado para este tipo de recipiente sometido a presión interior.

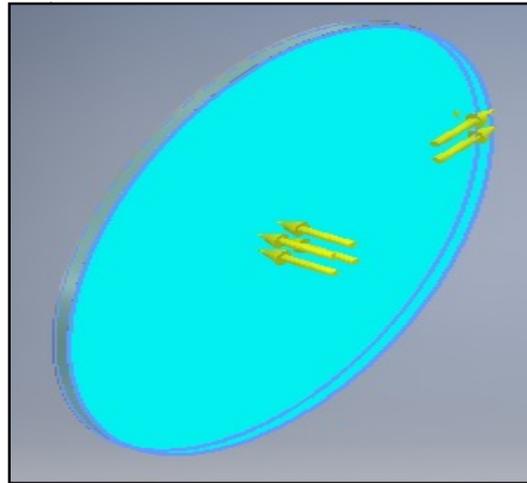


Figura 2. Representación de la forma de la tapa, de la zona por donde esta se fija y de las cargas aplicadas Autodesk, (2016).

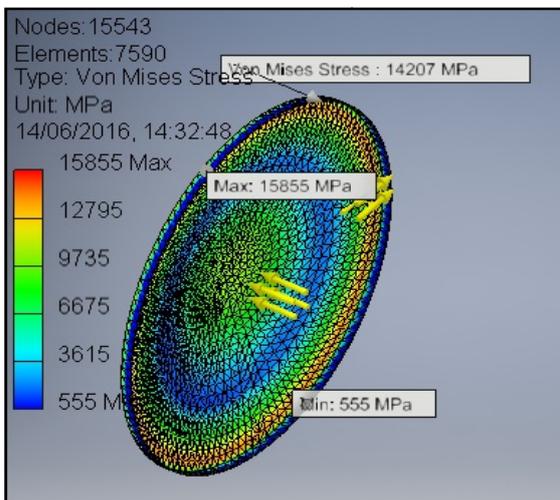


Figura 3. Valores de tensiones máximas y mínimas obtenidas durante la simulación del fondo circular plano

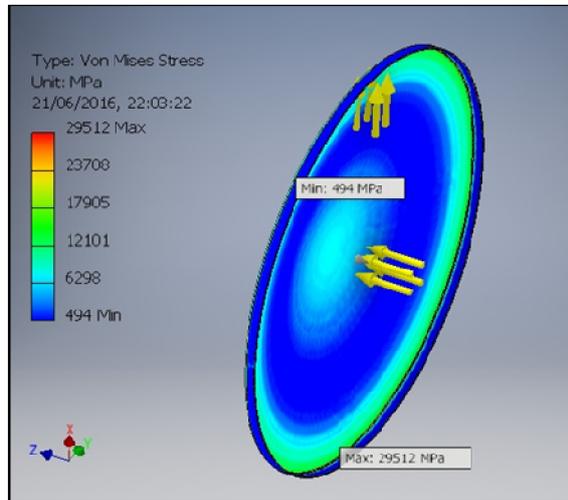


Figura 4. Valores de tensiones máximas y mínimas obtenidas durante la simulación del fondo circular plano reforzado Autodesk, (2016)

Tabla 1. Comparación de los resultados obtenidos durante la simulación de los diferentes tipos de fondos planos

Tipos de Fondos	Tensión Von Mises (MPa)		Deformaciones Mecánicas en el eje x (mm)		Deformaciones Mecánicas en el eje y (mm)		Deformaciones Mecánicas en el eje z (mm)	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Fondo circular plano	555,158	15855,1	-28,4959	28,5974	-28,5966	28,4389	0,8314	5126,9
Fondo circular plano rebordeado	494,427	29511,5	-29,2902	29,2917	-29,4221	29,3275	-0,9341	5307,3

3.2. Diseño y simulación de fondos tipo elípticos, Guzmán (2006) y ASME (2004)

Se analizaron los fondos con valores de M, ASME (2004) menores, igual y superior a 1, esto corresponde con alturas del fondo de 650,750 y 850 mm respectivamente. La simulación del fondo con $h_f=850$ mm se presenta en la Figura 5. Como se puede observar en los resultados mostrados en la Tabla 2, el fondo elíptico con $h_f=850$ mm es el que menor valor de tensiones y deformaciones presenta. Es por ello que, de los tres tipos de fondos elípticos, este sería el recomendado para ser utilizado en las prestaciones de mayor severidad. Estos resultados coinciden con los obtenidos al hacer uso de las formulaciones teóricas para el cálculo de las tensiones que brindan los diferentes códigos internacionales, como es el caso del código ASME.

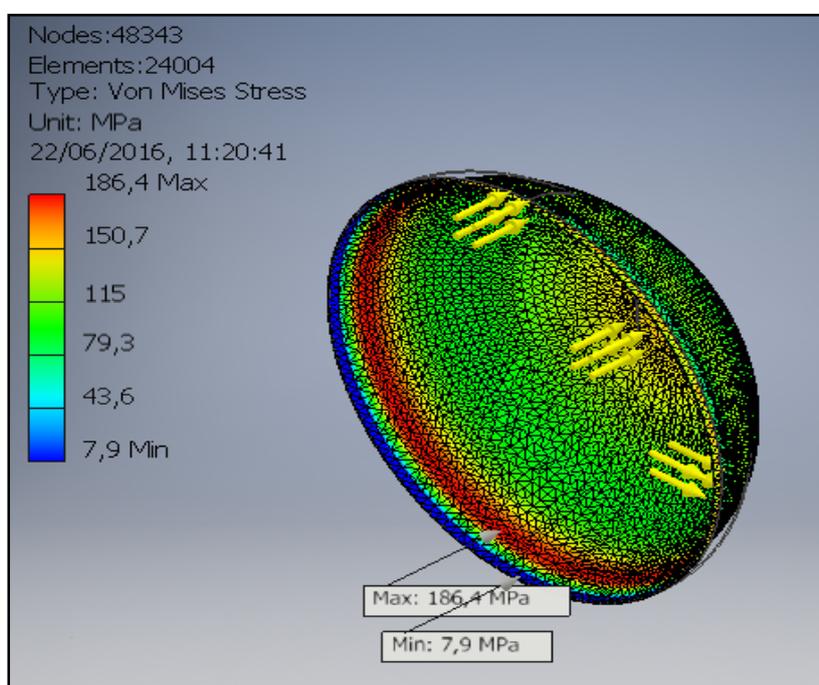


Figura 5. Valores de tensiones máximas y mínimas obtenidas durante la simulación del fondo elíptico con $h_f=850$ mm Autodesk, (2016)

Tabla 2. Resultados de la simulación de los diferentes tipos de fondos elípticos

Tipos de Fondos	Tensión Von Mises (MPa)		Deformaciones Mecánicas en el eje x (mm)		Deformaciones Mecánicas en el eje y (mm)		Deformaciones Mecánicas en el eje z (mm)	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Elíptico con $h_f = 650 \text{ mm}$	43,861	361,952	-1,9774	1,782	-0,1597	6,019	-1,8013	1,797
Elíptico estándar con $h_f = 750 \text{ mm}$	22,0318	261,368	-1.2544	1,237	-0,0518	4,243	-1,2433	1,243
Elíptico con $h_f = 850 \text{ mm}$	7,923	186,433	-0,7888	0,787	-0,0025	3,023	-0,7887	0,788

3.3. Diseño y simulación de fondos tipo toriesféricos

Para el diseño de estos fondos ASME (2004), se tomó el valor estándar, el cual corresponde a la relación $L/r=10$ y luego se seleccionaron valores de L/r de 8 y 12, diseñándose dos fondos más, obteniendo resultados diferentes al estándar, Tabla 3.

Tabla 3. Datos a tener en cuenta durante el diseño del fondo toriesférico, tomando como guía la relación L/r con $L=D=3000 \text{ mm}$ ASME (2004)

L/r	7	8	9	10	11	12	14
M	1,41	1,46	1,50	1,54	1,58	1,62	1,69

La simulación del fondo con $L/r=8$ se presenta en la Figura 6 y en la Tabla 4 se muestran los resultados de todas las simulaciones

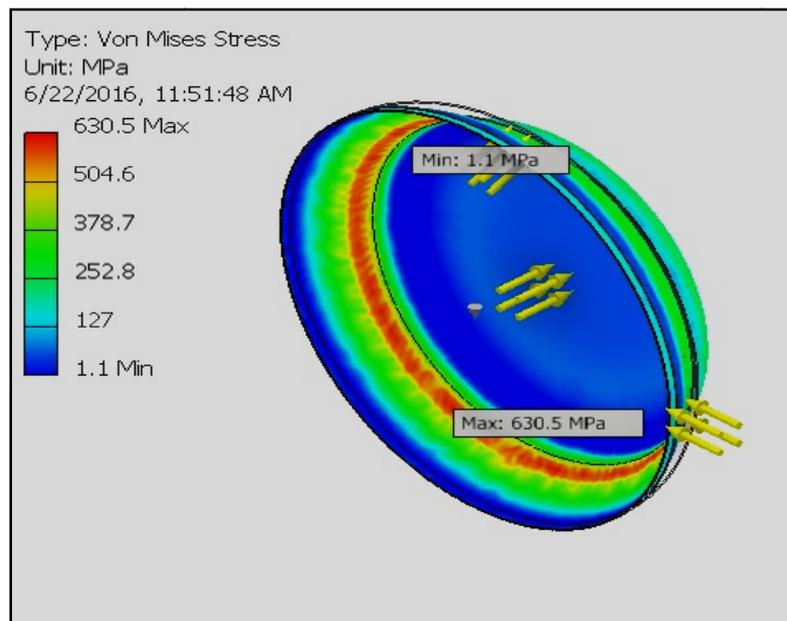


Figura 6. Valores de tensiones máximas y mínimas obtenidas durante la simulación del fondo toriesférico con $L/r=8$ Autodesk, (2016)

Tabla 4. Comparación de los resultados obtenidos durante la simulación de los diferentes tipos de fondos toriesféricos

Tipos de Fondos	Von Mises (MPa)		Deformaciones Mecánicas en el eje x (mm)		Deformaciones Mecánicas en el eje y (mm)		Deformaciones Mecánicas en el eje z (mm)	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Fondo toriesférico con $L/r = 8$	1,0854	630,4	-2,7781	2,801	-0,5524	7,7769	-2,7616	2,7768
Fondo toriesférico estándar con $L/r = 10$	9,8448	749,6	-3,5039	3,092	-0,6681	8,7611	-3,3739	3,3919
Fondo toriesférico con $L/r = 12$	13,739	800,3	-3,5846	3,640	-0,6731	8,9279	-3,5317	3,5573

3.4. Diseño y simulación de un fondo tipo semi – esférico

En la Figura 7 se presenta la simulación de este tipo de fondo y en la Tabla 5 los resultados de la simulación

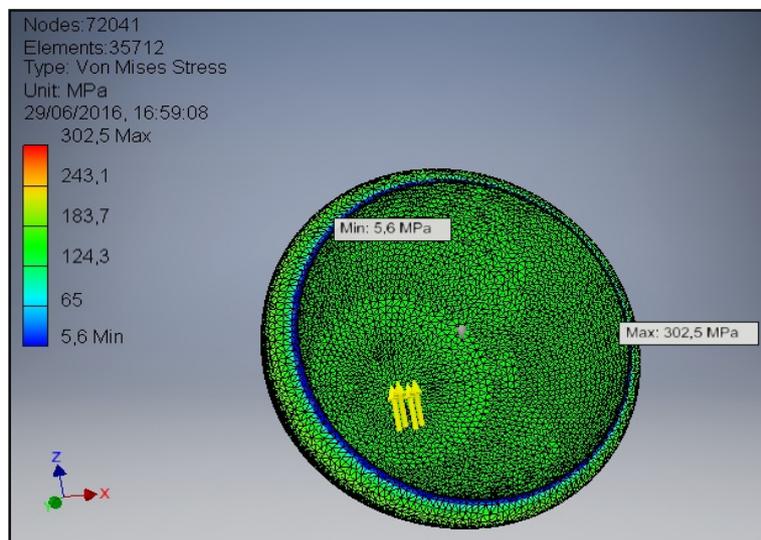


Figura 7. Valores de tensiones máximas y mínimas obtenidas durante la simulación del fondo semi – esférico Autodesk (2016)

Tabla 5. Resultados obtenidos durante la simulación del fondo tipo semi - esférico

<i>Tipos de fondos</i>	<i>Tensión Von Mises (MPa)</i>		<i>Deformaciones Mecánicas en el eje x (mm)</i>		<i>Deformaciones Mecánicas en el eje y (mm)</i>		<i>Deformaciones Mecánicas en el eje z (mm)</i>	
	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>
Fondo semi-esférico para R = 1500	2,7827	302.5	-0,493	0,4933	0	0,5215	-0,4932	0,4930

La forma esférica resulta, dentro las diferentes formas geométricas utilizadas en los recipientes a presión, la más resistente desde el punto de vista de resistencia de materiales debido a que para este tipo de geometría los radios meridionales y tangenciales resultan iguales lo que conlleva a que las tensiones, meridionales y tangenciales, presenten los mismos valores.

3.5. Estudio comparativo

Como se puede observar en la Tabla 6, el fondo semi - esférico fue el que mejores valores de tensión y deformaciones mecánicas presentó. Le siguen los fondos elípticos, los toriesféricos y por último los planos. Es de destacar que, como es conocido, los fondos semi-esféricos resultan difíciles de fabricar y encuentran un mayor uso en los recipientes que presentan grandes diámetros. Tomando en consideración lo antes expuesto para la gran mayoría de los recipientes cilíndricos horizontales, el fondo que mayor uso encuentra es el elíptico rebordeado pues además de presentar muy buenas características de resistencia mecánica resulta más fácil y barato de fabricar que el semiesférico.

Tabla 6. Resumen de los mejores resultados obtenidos en cuanto a tensiones y deformaciones durante la simulación de todos los fondos diseñados anteriormente

<i>Tipos de fondos</i>	<i>Tensión Von Mises (MPa)</i>		<i>Deformaciones Mecánicas en el eje x (mm)</i>		<i>Deformaciones Mecánicas en el eje y (mm)</i>		<i>Deformaciones Mecánicas en el eje z (mm)</i>	
	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>
Fondo semi-esférico para R = 1500	2,7827	151,248	-0,493	0,4933	0	0,5215	-0,4932	0,4930
Elíptico con $h_f = 850 \text{ mm}$	7,923	186,433	-0,7888	0,7879	-0,0025	3,0239	-0,7887	0,7881
Fondo toriesférico con $L/r = 8$	1,0854	630,494	-2,7781	2,8010	-0,5524	7,7769	-2,7616	2,7768
Fondo plano	555,15	15855,1	-28,495	28,597	-28,59	28,438	0,831	5126,9

4. CONCLUSIONES

1. Se considera que los principales resultados y conclusiones del trabajo están resumidos en los siguientes aspectos:
2. De los diferentes tipos de fondos estudiados el fondo circular plano con/sin reborde resultó el de peores resultados descartándose completamente su utilización en estos tipos de recipientes, los códigos y normas así lo confirman.
3. El fondo que mejores resultados mostró fue el semi – esférico, pero este tipo de geometría resulta muy difícil de construir además de ser muy caro por lo que su uso en estos tipos de recipientes es muy exclusivo
4. Entre los fondos elípticos y los toriesféricos, ambos rebordeados, los elípticos resultan de mejores características por lo que son estos últimos los que mayor uso encuentran en los recipientes cilíndricos horizontales sometidos a presión interior además estos fondos resultan menos difíciles y más baratos de fabricar que los semi - esféricos

REFERENCIAS

- Akin, J.E., FEA Concepts: SW., Simulation Overview Concepts of Stress Analysis, Draft 13.0, Copyright 2009, All rights reserved, 2009, pp. 29-44.
- ASME., American Society of Mechanical Engineers., Boiler and Pressure Vessel Code, Sección VII, division 1, Subsección A, Parte UG, 2004, pp. 1-100.
- Assakkaf, A.I., Thin-Walled Pressure Vessels. Lecture 24, Components: Combined Loading (8.4), Department of Civil and Environmental Engineering University of Maryland, College Park, 2003, pp. 1-34.
- Autodesk Inventor Profesional, Microsoft Corporation, Estados Unidos de América, 2016.
- Guzmán, L.J., Diseño mecánico de recipientes a presión bajo el código ASME sección VIII, división 1, Universidad Simón Bolívar, Decanato de Estudios Profesionales, Coordinación de Ingeniería Mecánica, 2006, pp. 1-100
- Josef, L.Z., Pressure Vessel Design. The Direct Route., Printed in Great Britain, First edition, 2006, pp. 3-33.
- Moss, D.R., Pressure Vessel Design Manual, Ilustrat procedures for solving major Pressure Vessel design problems., Elsevier, 2004, pp. 203-254.
- Sánchez-Capitán, C.D., Análisis de tensiones en piezas mecánicas de geometría cilíndrica utilizando el método de los elementos finitos., Proyecto fin de carrera de Ingeniería Técnica Industrial (Mecánica), Universidad de Salamanca, 2011, España, pp. 1-186.