

Análisis Comparativo de Recipientes a Presión Toroidal de Material Compuesto por Elementos Finitos

[Comparative Analysis of Toroidal Pressure Vessels of Composite by Finite Elements]

Darwin Patiño¹⁻²⁻³ and Alfonso Corz⁴

¹Estudiante de Doctorado, Departamento de Ingeniería Mecánica Computacional,
Universidad de Cádiz, Escuela Politécnica Superior de Algeciras,
Cádiz, Algeciras, Spain

²Docente de Programación Avanzada Orientada a Objetos,
Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Matemáticas y Física, Carrera de Ingeniería en Sistemas,
Guayaquil, Ecuador

³Research Scholar, Departamento de Mecánica Aeroespacial,
West Virginia University,
Estados Unidos de Norte America, Virginia Occidental, Morgantown, USA

⁴Docente, Departamento de Ingeniería Mecánica Computacional,
Universidad de Cádiz, Escuela Politécnica Superior de Algeciras
Cádiz, Algeciras, Spain

Copyright © 2018 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In the present study, by using the FEM finite element method, a series of toroidal pressure vessels will be constructed and a comparative analysis will be carried out to determine the type of composite material that offers the best resistance that supports the stresses and stresses. deformations that a container subjected to different pressure levels could suffer.

By using the ANSYS software and with the respective APDL code, the models to be compared are built; the tests are carried out virtually in a simulated environment, which allows us to approach a real environment, apply computational engineering criteria to have a greater precision in the measurements made in the geometry combined with the type of material, with the pressure load and with the angular orientation of the sheets within a laminate.

In this study, the code required to create the geometry of the container is exposed, as well as the way in which the data of the material and the corresponding model of the element to be used are entered, as well as the way in which the application is applied. finite element model and the mesh to be used.

The final objective is to determine the angular orientation with a determined number of carbon fiber sheets so that the toroid reaches an acceptable resistance by a criterion of failure, which allows to minimize the waste of material and excess weight at an appropriate cost.

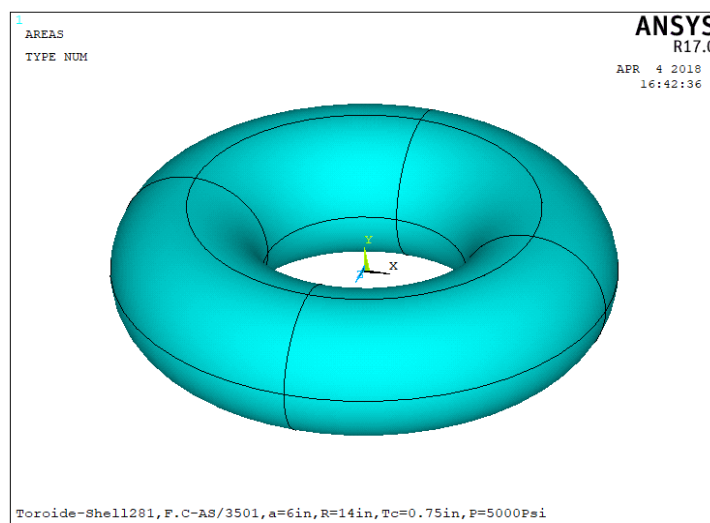
KEYWORDS: Computational Engineering, Mechanical Design, Toroid, Optimization, Finite Elements, Laminates, Carbon fiber.

1 INTRODUCTION

Un recipiente de forma toroidal es una cascara axilsimétrica de revolución con una sección recta que no tiene intersección con el eje de revolución. Estos recipientes inicialmente se fabricaban de un material isótropo [1] como el caso del acero, pero con el pasar del tiempo y a medida que se han desarrollado nuevas tecnologías de materiales [2] se han obtenido prestaciones importantes con los materiales compuestos.

Los recipientes toroidales se han venido utilizando en la industria aeronáutica, naval y automotriz para el almacenamiento de gas natural GNC a presión para ser usado en diferentes tipos de vehículos.

Usar materiales compuestos en la fabricación de recipientes a presión de forma toroidal[5], ofrece muchas ventajas sobre otras estructuras de materiales comunes como los metálicos ya que se destacan por tener un peso más ligero y la capacidad de adaptar el material a los requisitos de diseño.



Recipiente Toroidal

Los requisitos de diseño hacen variar los parámetros de construcción, tales como ángulos de orientación de las láminas, la secuencia de apilamiento y el espesor del laminado, se podrían obtener criterios de optimización que permitirían reducir deformaciones, aumentar la resistencia y minimizar el peso del recipiente.

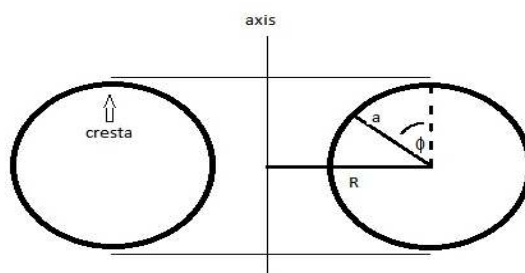
La obtención de soluciones para las tensiones y deformaciones en un toroide son más difíciles que en otras cascara axilsimétricas de revolución, debido a la discontinuidad de la fibra ocurrida en las secciones lineales del toroide y en su cresta por lo que se han venido planteando soluciones para toroides ortótropos [14],[15] basados en este criterio; estas soluciones sólo tienen en cuenta el comportamiento global del toroide, descuidando las distribuciones del sentido de la fibra y la dirección transversal destacada dentro de cada capa del material compuesto.

Para el análisis comparativo, se tomara la información del toroide reflejado en el estudio [19] y se contrastaran con el nuevo modelo toroidal, además se utilizará el método de elementos finitos como herramienta de análisis matemático y mediante el uso del software ANSYS[6] se realizarán las pruebas y ensayos de manera virtual.

2 FORMULACIÓN DEL MODELO

2.1 LA GEOMETRÍA

Se ha usado un modelo, cuya geometría tiene una sección recta circular de espesor t que puede variar, esta sección recta girada toma la forma de un círculo de radio a , la misma que al ser rotada mediante revolución alrededor de un eje o axis a una distancia R entre el centro de la sección recta y el eje forma el toroide, esta distancia R se denomina el radio mayor del toroide. El ángulo φ de la dirección meridional para un toroide circular es tangente a la sección recta. La mitad superior del toroide se define desde $-90 < \varphi < 90$, con la cresta que ocurre en $\varphi = 0$.



Geometría circular del toroide

Debido a su geometría, las sobrecargas de fibras de un toroide tendrán una natural variación de espesor debido a la acumulación de fibras. El volumen de fibra es constante a través del toroide, por lo que el espesor de la cascara toroidal disminuirá radialmente desde el eje de revolución debido al aumento en el área de superficie del toroide; este grosor puede definirse como una función de la coordenada meridional, ϕ , y una referencia de espesor t_c se toma como el espesor en la cresta del toroide [7].

Para un toroide circular con presión interna, las aproximaciones de la teoría de cascara lineales para las fuerzas meridionales y línea circunferencial están publicadas en [8]–[10] donde p es la magnitud de la presión interna.

$$N_{\phi} = \frac{pa}{2} \left(1 + \frac{R}{R - a(\sin \phi)} \right) \tag{1}$$

$$N_{\theta} = \frac{pa}{2} \tag{2}$$

La fuerza lineal se considera que es constante a través del espesor y se relaciona con la tensión en la cascara por $N = \sigma t$. La fuerza lineal meridional N_{ϕ} , disminuye a medida que la distancia desde el eje de revolución aumenta mientras que la fuerza de la línea circunferencial N_{θ} , se mantiene constante a través del toroide, por lo que la carga meridional es dominante dentro de él.

El equilibrio de una cascara de revolución bajo presión interna está dada por [8], [9] donde r_{ϕ} y r_{θ} son el meridiano y los radios de curvatura circunferencial, respectivamente:

$$\frac{N_{\phi}}{r_{\phi}} + \frac{N_{\theta}}{r_{\theta}} = p \tag{3}$$

Las técnicas de análisis desarrolladas en modelos toroidales de material compuesto, han basado los criterios de optimización en el diseño del sentido de la fibra[11] sobre un mandril para construir el toroide, así como la contabilización del grosor del laminado por el apilamiento de las mismas; la simulación con varias capas de fibra mediante la teoría de laminación y la aplicación de cargas mediante el análisis de elementos finitos sobre la superficie del toroide, genera un comportamiento difícil de modelar ya que uno de los principales problemas es el desplazamiento discontinuo de la fibra desde la parte de la cresta del mismo hacia las regiones internas como se aprecia en la figura 2.

radio_a = 6 ! 10in

radio_R = 14 ! 15in

pax = 0 ! coordenadaX del origen / axis

pay = 0 ! coordenadaY del origen / axis

ccx = pax+radio_R !centro X de la circunferencia

ccy = pay !centro Y de la circunferencia

.

.

K,2,pax+radio_R-radio_a,pay

K,5,pax+radio_R,pay+radio_a

K,8,pax+radio_R+radio_a,pay

K,10,pax+radio_R,pay-radio_a

K,15,ccx,ccy ! centro de la circunferencia

K,20,pax,pay+radio_a ! puntos para el axis

K,21,pax,pay-radio_a

! cuatro arcos para crear un circulo

CIRCLE,15,radio_a,,,360,32

LSEL,S,LINE,,2,7

LSEL,A,LINE,,10,15

LSEL,A,LINE,,18,23

LSEL,A,LINE,,26,31

LDELE,ALL,,1

LSEL,ALL

LPLOT

LARC,23,14,15,radio_a !L1-ARCO

LARC,12,3,15,radio_a !L2 - ARCO

LARC,39,33,15,radio_a !L3 - ARCO

LARC,31,25,15,radio_a !L4 - ARCO

AROTAT,16,2,9,8,3,1,20,21

AROTAT,32,4,25,24,5,17,20,21

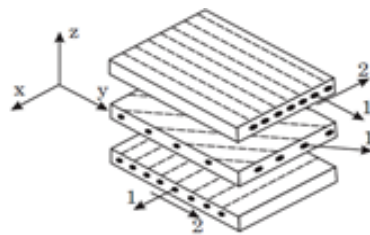
.

.

2.2 EL LAMINADO

Las propiedades del shell de múltiples capas se determinan mediante el uso básico de la teoría de laminación, en donde la orientación de las láminas dentro del laminado es un factor importante que influye en la resistencia del toroide frente a posibles deformaciones. Por otra parte hay que considerar que la técnica de bobinado por enrollamiento de hilos genera una acumulación de fibra en las regiones internas o axiales del toroide tal como se aprecia en la figura 1, esta distribución no homogénea de fibras a lo largo del toroide, plantean una variación de espesor en áreas plenamente identificadas que podrían reflejar un desperdicio de material pero que al mismo tiempo proporcionarían un refuerzo implícito sobre los sectores más propensos a la deformación y ruptura dentro de la geometría toroidal.

Por definición las láminas de material [12] compuesto son, material ortótropo, en donde sus propiedades mecánicas están condicionadas por las de la fibra y la matriz. La micromecánica [12] de las láminas nos permite obtener parámetros que marcan su comportamiento mecánico. Los materiales ortótropos tienen un comportamiento elástico que está caracterizado por una serie de constantes elásticas asociadas a tres direcciones mutuamente perpendiculares; por lo que el comportamiento elástico queda caracterizado por nueve constantes independientes: tres módulos de elasticidad longitudinal (E1, E2, E3), tres módulos de rigidez (G12, G23, G31) y tres coeficientes de Poisson (ν12, ν23, ν31). Que en el caso de una lámina quedan reducidas a cuatro constantes: E1, E2, G12 y ν12; siendo G21 = G12 y ν21 = $\frac{E_1}{E_2} \nu_{12}$, donde la dirección de las fibras se indica mediante el subíndice 1 y la dirección transversal a las fibras con el subíndice 2; ν21 es el coeficiente de Poisson en la dirección de las fibras y ν12 es el mismo coeficiente en la dirección transversal de ellas.



Láminas de un laminado

Para toroides de material ortótropo construido con materiales compuestos, la relación constitutiva se puede definir utilizando la teoría de laminación, dado por [12][13][14].

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon \\ \kappa \end{Bmatrix} \tag{4}$$

Donde N es el vector de fuerzas de línea en el plano, M es el vector de momentos por longitud, ε es el vector de tensiones del plano medio, y K es el vector de curvaturas del plano medio. El laminado es constante y las matrices A, B y D corresponden a la rigidez en el plano, plegado y al acoplamiento de estiramiento de rigidez flexional, respectivamente, definida como [18].

.

ET,1,SHELL281

! Constantes Ingenieriles

! Material - AS/3501 Carbono/Epoxy

MP,EX,1,2.001e7 ! E1=0.200007e6Psi
 MP,EY,1,1.300e6 ! E2=1.305339e6Psi
 MP,EZ,1,1.300e6 ! E2=E3=1.305339e6Psi
 MP,PRXY,1,0.3 ! V12=0.3
 MP,PRYZ,1,0.49 ! V13=0.49
 MP,PRXZ,1,0.49 ! V23=0.3
 MP,GXY,1,1.030e6 ! G12=1.029767e6Psi
 MP,GYZ,1,0.899e6 ! G23=0.899234e6Psi
 MP,GXZ,1,0.899e6 ! G13=0.899234e6Psi
 .
 .
 .
 ! Espesor de 0.75in = 12laminas de 0.0625in

SECTYPE,1,SHELL,,UP

SECDATA,0.0625,1,45,3
 SECDATA,0.0625,1,-45,3
 SECDATA,0.0625,1,0,3
 SECDATA,0.0625,1,90,3
 SECDATA,0.0625,1,45,3
 SECDATA,0.0625,1,-45,3

SECDATA,0.0625,1,-45,3
 SECDATA,0.0625,1,45,3
 SECDATA,0.0625,1,90,3
 SECDATA,0.0625,1,0,3
 SECDATA,0.0625,1,-45,3
 SECDATA,0.0625,1,45,3

SECOFFSET,MID !ubicación desde el plano medio

SECCONTROL,,,,,,,,

.
 .
 .

2.3 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.

El modelo de elementos finitos se ha aplicado mediante ANSYS [6] el mismo que ofrece una variedad de herramientas para el análisis estructural, se ha empleado el elemento tipo shell, ya que es uno de los elementos que permiten un modelado axilsimétrico con propiedades del material de entrada del laminado constantes. Dentro de los elementos de ANSYS se toma como referencia el elemento SHELL281 para obtener resultados con una mejor precisión compuesto de ocho nodos, el modelo shell de elementos finitos requiere un modelo tridimensional del toroide; el toroide puede ser modelado por la sección recta haciéndole un barrido a través de un arco axilsimétrico obligando a que las condiciones sean aplicadas a los bordes libres del mallado.

```
.  
.   
.   
MSHKEY,0 ! FREE MESH  
MSHAPE,1,2D  
AMESH,ALL  
  
/ESHAPE,1 ! 1 para la dimensión real  
/REPLOT  
  
NSEL,ALL,ALL  
NUMMRG,ALL ! se pegan todos los nodos  
  
LSEL,S,LINE,,79  
LSEL,A,LINE,,100  
LSEL,A,LINE,,93  
LSEL,A,LINE,,86  
DL,ALL,ALL,ALL !lineas,areas,grados de libertad  
  
NSEL,ALL,ALL  
ASEL,ALL  
SFA,ALL,,PRES,5000 !5000Psi  
SFTRANS  
.   
.   
.
```

2.4 EL CRITERIO DE FALLA

El criterio de falla proviene de las curvas de ajuste obtenidas de pruebas experimentales que se emplean para predecir fallas; es representado por medio de la notación de índice de falla, la cual es usada por varios paquetes de elementos finitos y es definido como:

$$I_F = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{resistencia}} \quad (5)$$

Se predice la falla cuando $I_F \geq 1$. La razón de resistencia es el intervalo del índice de falla.

$$R = \frac{1}{I_F} = \frac{\text{resistencia}}{\text{esfuerzo}} \quad (6)$$

La falla se predice cuando $R \leq 1$.

Usando el criterio de Tsai-Wu, el índice de falla es definido como [12]

$$I_F = \left[-\frac{B}{2A} + \sqrt{\left(\frac{B}{2A}\right)^2 + \frac{1}{A}} \right]^{-1} \quad (7)$$

Con

$$\begin{aligned} A = & \frac{\sigma_1^2}{F_{1t}F_{1c}} + \frac{\sigma_2^2}{F_{2t}F_{2c}} + \frac{\sigma_3^2}{F_{3t}F_{3c}} + \frac{\sigma_4^2}{F_4^2} + \frac{\sigma_5^2}{F_5^2} \\ & + \frac{\sigma_6^2}{F_6^2} + C_4 \frac{\sigma_2\sigma_3}{\sqrt{F_{2t}F_{2c}F_{3t}F_{3c}}} \\ & + C_5 \frac{\sigma_1\sigma_3}{\sqrt{F_{1t}F_{1c}F_{3t}F_{3c}}} \\ & + C_6 \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sqrt{F_{1t}F_{1c}F_{2t}F_{2c}}} \end{aligned} \quad (8)$$

$$B = (F_{1t}^{-1} - F_{1c}^{-1})\sigma_1 + (F_{2t}^{-1} - F_{2c}^{-1})\sigma_2 + (F_{3t}^{-1} - F_{3c}^{-1})\sigma_3 \quad (9)$$

$FC,1,S,XTEN,1.850e5$

$FC,1,S,YTEN,4.200e3$

$FC,1,S,ZTEN,1E12$

$FC,1,S,XCMP,-4.900e4$

$FC,1,S,YCMP,-2.290e4$

FC,1,S,ZCMP,-1E12

FC,1,S,XY,7.1e3

FC,1,S,YZ,1E12

FC,1,S,XZ,1E12

FC,1,S,XYCP,-1

FC,1,S,YZCP,-1

FC,1,S,XZCP,-1

3 FORMULACIÓN DE MODELOS

En términos de ingeniería un laminado constante puede ser determinado o extraído de la matriz de rigidez en el plano, en donde el laminado es definido por [18]. Se han analizado varios modelos y se han revisado varios estudios que se han centrado en la orientación del bobinado del lamiando [3], [15], [16], los hilos de fibra se enrollan sobre una matriz que es escogida para una determinada situación[17], está técnica denominada filament winding, otra técnica empleada es la denominada fiber placement en la que se utilizan cintas de fibra de carbono que se las pegan sobre un molde en diferentes ángulos de orientación, con esta técnica se controla de una mejor manera el desperdicio de material.

M1, material ortótropo genérico, orientación de las láminas a $[0/\pm 45/90]_n$; Numero de capas $n = 12$.

M2, material Kevlar/Epoxy, orientación de las láminas a $[0/\pm 45/90]_n$; Numero de capas $n = 12$.

M3, Carbono/Epoxi, orientación de las láminas $[0/\pm 45/90]_n$; Numero de capas $n = 12$.

M4, Carbono/Epoxi, orientación de las láminas $[\pm 45/0/90/\mp 45]_s$; Numero de capas $n = 12$.

Tabla 1

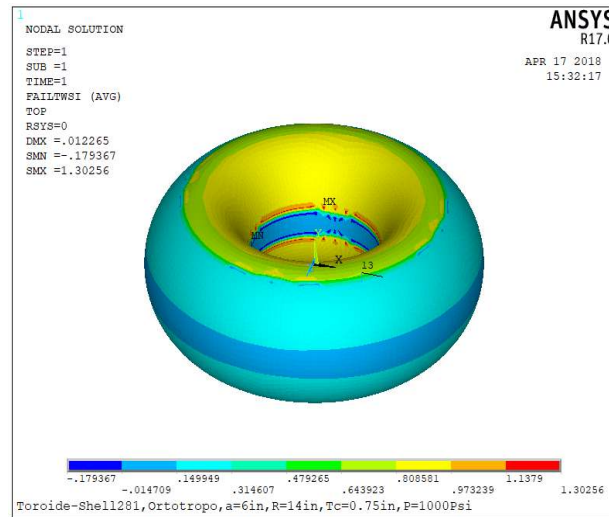
	M1	M2	M3, M4,M5
E ₁	10e6	11e6	2.001e7
E ₂	5e6	0.8e6	1.3e6
V ₁₂	0.3	0.34	0.3
V ₁₃	0.37	0.37	0.49
G ₁₂	0.3e6	0.3e6	1.030e6
G ₁₃	0.2e6	0.2e6	0.899e6
X _t	2.098e5	1.85e5	2.098e5
Y _t	7.5e3	4.2e3	7.5e3
X _c	2.098e5	-4.9e4	2.098e5
Y _c	2.99e4	-2.29e4	2.99e4
S	1.349e4	7.1e3	1.349e4

Para los modelos M1 y M2 las características mecánicas fueron tomadas de [19] y se contrastarán contra los modelos M3, M4 y M5 de AS/3501 Carbono/Epoxi con sus correspondientes orientaciones y constantes ingenieriles.

Los toroides para el análisis son tomados de [19], las características geométricas son similares pero de diferentes tipo de material, el radio mayor $R=16in$ y el radio menor $a=10in(254\text{ mm})$ el espesor total $t_c=0.75in(19,05\text{ mm})$ el laminado está a diferentes orientaciones angulares, y son sometidos a una presión de 1000 psi. Estos dos toroides, el ortótropo genérico y el de kevlar/epoxi serán comparados con un nuevo modelo construido con cintas laminares de fibra de carbono AS/3501 con laminación simétrica y no simétrica de diferentes orientaciones angulares.

4 ENSAYOS VIRTUALES

En los ensayos virtuales usaremos los modelos empleados por [19] y los contrastaremos con un modelo de fibra de carbono de iguales características geométricas pero con una sobre carga de material en la sección meridional interna tal como se refleja en la figura 1; esta sobre carga de material que generalmente se genera por la técnica de bobinado finalmente creará un refuerzo implícito en las áreas axiales reduciéndose así la tendencia a fallos y rupturas de esas áreas.



Modelo M1

En este modelo de material genérico, el coeficiente de fallo es de 1.30256 y las aproximaciones a fallas se reflejan en las áreas axiales del toroide, las mismas que sobrepasan el coeficiente de Tsai-Wu, apreciándose un desperdicio de material en las áreas meridionales del toroide y verificándose que el modelo no ofrece la resistencia necesaria para la presión establecida.

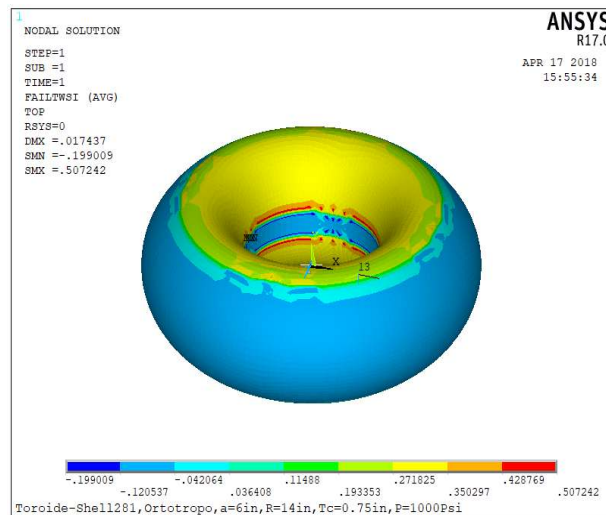
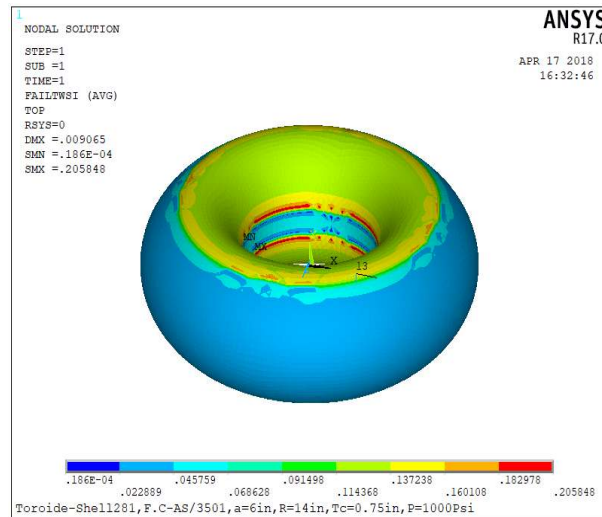


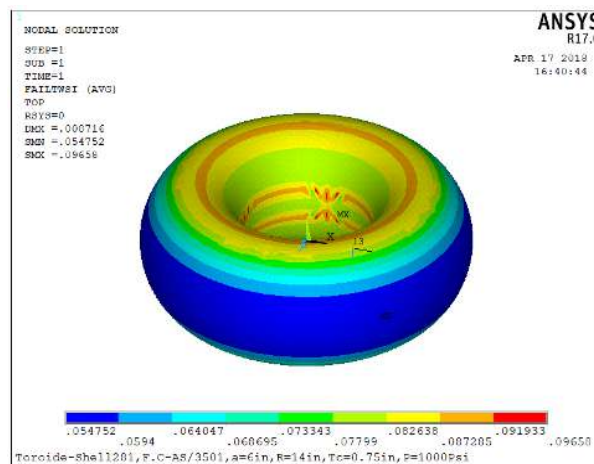
Fig. 5. Modelo M2

Este modelo construido con kevlar, refleja un mejor rendimiento que el modelo genérico, su coeficiente de fallo es de 0.507242 y está a 79% por debajo del modelo M2 y aun 49% debajo del establecido por Tsai-Wu, se aprecia además que los fallos más próximos se dan en las áreas axiales del toroide, este modelo ofrece mayor resistencia a la presión y refleja un menor consumo de material, además se puede apreciar un pequeño aumento de deformación con respecto al modelo de la Figura 4.



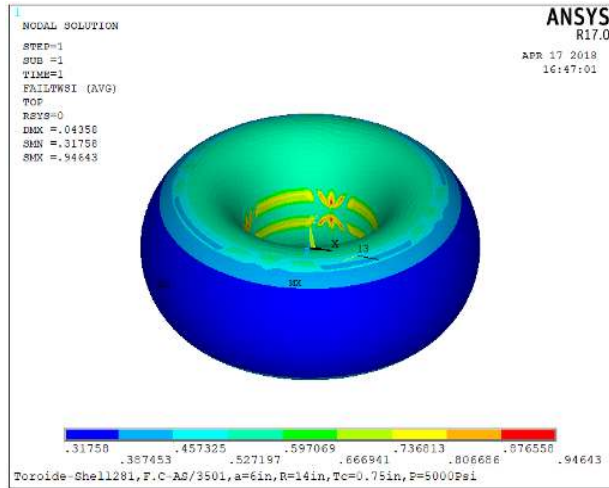
Modelo M3

Este modelo tiene características similares al modelo de la figura 5 y solo difiere en su tipo de material, se sigue apreciando que las áreas axiales son las más susceptibles a fallas, su coeficiente de fallo se ha reducido en un 79% y su nivel de deformación se ha reducido considerablemente apreciándose un mayor consumo de material con respecto al modelo de Kevlar.



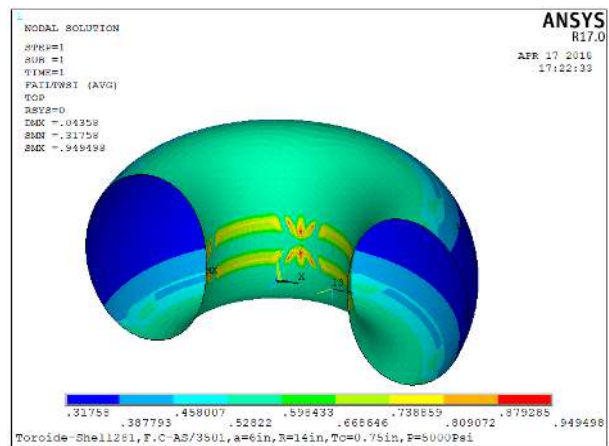
Modelo M4

Este modelo es el resultado de una mejora del modelo M3 en la figura 6, se emplearon 12 láminas apiladas simétricamente con una orientación angular de $[\pm 45/0/90/\mp 45]_s$, lográndose reducir el índice de fallo así como las tensión de las áreas axiales, por lo que se puede apreciar que hay un aumento considerable a la resistencia del recipiente.



Modelo M5

La secuencia de apilamiento de las láminas del modelo M4 en la figura 7, ha permitido generar un nuevo modelo con una variante que permitió aumentar la resistencia del modelo, las áreas axiales están con 12 láminas orientadas simétricamente a $[\pm 45/0/90/\mp 45]_s$, lográndose un mejor aprovechamiento del material así como elevar su resistencia a 5000Psi.



En este corte transversal del modelo M5 se aprecia la reducción del consumo de material cuando el toroide es sometido a 5000psi de presión, manteniendo el índice de fallo dentro del valor establecido por Tsai Wu.

5 RESULTADOS

En la siguiente tabla se aprecian los resultados de deformación y coeficientes de fallo de los modelos comparados.

Tabla. 2

	DMX	Coficiente de Fallo Tsai-Max	% de variación de la Deformación	% de variación del coeficiente de Fallo
M1	0.122655	1.30256	-	-
M2	0.17437	0.507242	42%	61%
M3	0.009065	0.205848	93%	84%
M4	0.008716	0.09658	93%	93%
M5	0.04358	0.949448	65%	27%

El índice de fallo del modelo M1 ha sobrepasado el 30% del valor establecido por Tsai Wu, reflejándose que no soporta la presión al que fue sometido, a diferencia del modelo M2 el cual refleja que su índice de fallo se ha reducido en un 61% aunque la deformación haya aumentado un 42% el modelo M2 ofrece una mejor resistencia que el modelo M1.

El modelo M3 es un modelo que difiere de los modelos M1 y M2 solo en el tipo de material ya que la secuencia de apilamiento laminar $[a/\pm b/c]_n$ se mantuvo, ofreciendo una mejor resistencia que ha alcanzado a reducir el índice de fallo en un 84% así como la deformación en un 93% no obstante se evidencia un desperdicio de material.

El modelo M4 es una variante del modelo M3 al que se le ha cambiado la orientación de las láminas y se le ha creado un laminado simétrico $[\pm b/a/c/\mp b]_s$, la mejora plantea una reducción del índice de falla de 93% manteniendo la deformación con una muy pequeña deformación.

Al observarse gráficamente que las áreas axiales de los modelos son las más susceptibles al fallo o ruptura, se elaboró el modelo M5 que combina la simetría de la secuencia de apilamiento laminar, así como la orientación angular de las mismas para tener un mejor aprovechamiento de la distribución del material sobre el toroide, alcanzándose una resistencia a los 5000psi de presión al que es sometido.

6 CONCLUSIONES

Los modelos M1 y M2 obtenidos de [19] proporcionaron resultados consistentes, el modelo que obtuvo una mejor resistencia fue el M2 por lo que se determina que el tipo de material de este modelo influyó considerablemente sobre la resistencia del modelo.

Puesto que M3 fue elaborado con fibra de carbono para contrastarse contra M1 y M2, y al reflejarse que se redujo el nivel de deformación, así como su coeficiente de fallo se ha determinado que la fibra de carbono ofrece una mejor resistencia que los otros materiales en iguales condiciones

En el modelo M4 se cambiaron la secuencia del laminado, así como los ángulos de orientación de sus capas, por lo que se ha determinado que los cambios realizados han influido directamente sobre el mejoramiento de la resistencia del modelo toroidal.

El modelo M5 es un modelo M4 evolucionado, tiene una mejor distribución de la fibra de carbono sobre las áreas axiales y no axiales del toroide; esta distribución de material ha permitido que el recipiente pueda alcanzar a soportar hasta 2.8 veces más la presión que los otros modelos con un nivel de deformación aceptable y un índice de fallo dentro del nivel establecido.

El análisis de elementos finitos ha proporcionado resultados consistentes, estableciendo la confianza y la validez de los ensayos virtuales realizados sobre los toroides ortótropos con espesor constante; determinándose que las secuencias de apilamiento de las láminas, así como su orientación angular ocasionan la reducción o el aumento de la resistencia del recipiente toroidal.

El criterio de fallo de Tsai-Wu, ha permitido determinar las regiones donde las intensidades de tensiones ocasionarían la ruptura en una primera lamina, la variación de su índice ha permitido realizar los ajustes necesarios sobre el recipiente toroidal para obtener un modelo que ofrezca la resistencia esperada a la presión al que es sometido sin que se produzca ruptura.

RECOMENDACIONES FUTURAS

Realizar el estudio para la implementación de un optimizador, que minimice el consumo de material en la construcción de un toroide, en donde el espesor y los ángulos de orientación de las láminas deberían modificarse en un proceso iterativo donde heurísticamente se pueda alcanzar la optimización deseada.

Debido a la eficiencia computacional del modelo de elementos finitos la optimización puede ser alcanzada rápidamente aplicando diversas técnicas heurísticas que actualmente estamos implementando dentro de esta investigación; los criterios de fallos podrían ser aplicados como elementos de restricción de mayor importancia.

Un recipiente a presión de forma toroidal, fabricado de fibra de carbono, por su geometría y por el tipo de material requiere de un estudio que determine la mejor ubicación de un agujero para poner un elemento de conexión tipo válvula o tubuladura.

Realizar un estudio, que determine el mejor algoritmo heurístico de optimización, para recipientes a presión de forma toroide fabricado de fibra de carbono.

REFERENCIAS

- [1] C. T. Herakovich, *Mechanics of Fibrous Composites*, vol. 27. Wiley, 1997.
- [2] A. Miravete and J. Cuartero, "Materiales compuestos 03."
- [3] L. Zu, S. Koussios, and A. Beukers, "Design of filament-wound circular toroidal hydrogen storage vessels based on non-geodesic fiber trajectories," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 660–670, 2010.
- [4] L. Zu, Q. He, and Q. Ni, "Pattern Design for Non-Geodesic Winding Toroidal Pressure Vessels," in *16 Th International Conference on Composite Materials*, 2007.
- [5] T. DeLay and K. Roberts, "Toroidal Tank Development for Upper-stages," Nov. 2003.
- [6] "Composites Analysis in ANSYS Composites Analysis in ANSYS • Composites and Advantages • Traditional Composites Modeling, Interface Delamination and Failure Simulation • ANSYS - Fibersim Interface," pp. 1–58, 2005.
- [7] J. Li, S., Cook, "An Analysis of Filament Overwound Toroidal Pressure Vessels and Optimum Design of Such Structures," *J. Press. Vessel Technol.*, vol. 24, no. 2, pp. 215–222, 2002.
- [8] R. A. Clark, "On the Theory of Thin Elastic Toroidal Shells," *Math. Phys.*, vol. 29, no. 3, pp. 146–178, 1950.
- [9] S. Timoshenko, S., Woinowsky-Kreiger, "Theory of Plates and Shells," in *McGraw-Hill*, McGraw-Hill, Ed. New York, 1959.
- [10] J. Cook and B. J. Richards, "Aparato de Contención de Gas," 2002.
- [11] L. Z. Haixiao Hu, Shuxin Li, Jihui Wang, "Structural design and experimental investigation on filament wound toroidal pressure vessels," 2015. [Online]. Available: http://ac.els-cdn.com/S0263822314005923/1-s2.0-S0263822314005923-main.pdf?_tid=a37d9c02-e55a-11e5-b3f9-00000aacb35e&acdnat=1457461495_b8f1a80ce19799a7efa295bef16af056. [Accessed: 08-Mar-2016].
- [12] E. J. Barbero, *Introduction to Composite Materials Design, Second Edition*. 2010.
- [13] H. T. Hahn and S. W. Tsai, *Introduction to Composite Materials*. CRC Press, 1980.
- [14] C. T. Herakovich, "Mechanics of Fibrous Composites," in *John Wiley and Sons*, New York, 1998.
- [15] L. Zu, S. Koussios, and A. Beukers, "Shape optimization of filament wound articulated pressure vessels based on non-geodesic trajectories," *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 2, pp. 339–346, Jan. 2010.
- [16] L. Zu, S. Koussios, and A. Beukers, "Composites : Part A Design of filament – wound domes based on continuum theory and non-geodesic roving trajectories," *Compos. Part A*, vol. 41, no. 9, pp. 1312–1320, 2010.
- [17] L. Zu, "Stability of fiber trajectories for winding toroidal pressure vessels," *Compos. Struct.*, vol. 94, no. 5, pp. 1855–1860, 2012.
- [18] L. Zu, S. Koussios, and A. Beukers, "Minimum weight design of helically and hoop wound toroidal hydrogen storage tanks with variable slippage coefficients," *Polym. Compos.*, vol. 33, no. 12, pp. 2218–2227, 2012.
- [19] M. J. Vick and K. Gramoll, "Finite Element Study on the Optimization of an Orthotropic Composite Toroidal Shell," *J. Press. Vessel Technol.*, vol. 134, no. 5, p. 051201, 2012.