

Alfonso Corza^a, Darwin Patiño^b, Jorge Veintimilla Alcas^c^a Calpe Institute of Technology, Algeciras, España^b Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador^c Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación, Universidad de Málaga, Málaga, España

Recipiente a Presión Toroidal para Almacenamiento de Hidrogeno

RESUMEN

Historia del artículo:

Recibido 8 de Junio 2019

En la versión revisada 20 de Junio 2019

Aceptado 5 de Julio 2019

Accesible online 15 de Setiembre de 2020

Palabras clave:

Hidrogeno

Recipientes a Presión

MEF

Toroidal

Composite

El futuro del transporte, pasa por dos variantes, almacenamiento energético en baterías o almacenamiento de hidrogeno para consumo como combustible. En el caso de la utilización de hidrogeno, es necesario almacenar el mismo en recipientes adecuados que den al vehiculo una autonomía suficiente similar a la que tendría con otro tipo de combustible como la gasolina o el gasoil. Los recipientes de materiales compuestos, son una solución idónea para la solución de este problema, dada su relación resistencia peso muy favorable frente a los metálicos. Una de las soluciones que actualmente se están estudiando es utilizar recipientes a presión de forma toroidal la cual se adapta muy bien a las disposiciones típicas de los vehículos actuales. Por otra parte se puede ver en este trabajo que esta forma de recipiente tiene ventajas evidentes. Se ha utilizado un material como el AS4D/9301 (Carbono-epoxy), obteniéndose una solución que cumple con el criterio de fallo de Tsai-Wu para obtener un diseño correcto, mediante una simulación por el Método de Elementos Finitos.

Toroidal Pressure Vessel for Hydrogen Storage

ABSTRACT

Keywords:

Hydrogen

Pressure vessel

FEM

Toroidal

Composite

The future of transport, goes through two variants, energy storage and storage of energy for consumption as fuel. In the case of the use of hydrogen, that is, in the same way, in the same way, in the same way, in the same way, in the same way as fuel and gasoline. The containers of composite materials, an ideal solution for the solution of this problem, a very favorable weight relationship with the metal ones. What adapts very well to the typical characteristics of current vehicles. On the other hand it can be seen in this work that this form of container has obvious advantages. A material such as AS4D/9301 (Carbon-epoxy) has been used, obtaining a solution that meets the Tsai-Wu failure criterion to obtain a correct design, through a simulation of the Finite Element Method.

1 Introducción

Uno de los desafíos que se plantean en el campo energético, es la transformación del hidrogeno en energía, que conlleva a la reducción de contaminación del medio ambiente, este es un factor que influye de forma importante para su uso como combustible en automoción[1], para lo que se requieren recipientes resistentes para su almacenamiento. Una de las principales barreras en el diseño de los recipientes es la adaptabilidad y la capacidad de almacenar suficiente hidrogeno para generar la misma o mayor cantidad de energía que genera el diésel o la gasolina[2].

Generalmente se usan cilindros metálicos para el almacenamiento de gases e hidrogeno, que pesan entre 110.23lb(50Kg) y 427.7lb(194Kg), y pueden almacenar entre 80L y 200L de gas, soportando una presión aproximada de 2.9001ksi(200bar)[3], pero hay estudios que reflejan que los recipientes toroidales son muy adecuados para el almacenamiento de gas[4], por lo que se han usado en la industria aeronáutica, naval y automotriz en diferentes tipos de vehículos; inicialmente se fabricaban de material isótropo como el acero, pero a medida que se han desarrollado nuevas tecnologías de materiales compuestos se han rediseñado con este material con buenos resultados[5].

El uso de materiales compuestos en los recipientes toroidales ofrece muchas ventajas sobre los materiales convencionales y destacan por tener un peso más ligero y una gran capacidad para adaptarse a los requisitos de diseño; la rigidez, resistencia y peso, son algunas propiedades destacadas de los *composites*, que no se encuentran en un solo material, porque se derivan de la combinación de las propiedades de los materiales que lo conforman[6].

La fibra de carbono[7] tiene una estructura microscópica cristalina compuesta de átomos de carbono, para su fabricación[8] se toman miles de filamentos de carbono que se unen para formar un hilo, que por general tiene un diámetro entre 5 o 10 micras. La fibra junto con la matriz de resina, forma un material compuesto que destaca entre los demás por sus buenas propiedades. La matriz tiene como función mantener la forma de la estructura compuesta, mantener alineadas las fibras y actuar como medio de transferencia de tensiones y al mismo tiempo como elemento de protección de las fibras. El material compuesto carbono-epoxy, tiene un costo aceptable, por lo que su uso permite obtener materiales de bajo peso, alta resistencia y gran rigidez, y son muy usados en la industria aeronáutica como en el modelo B787 de Boeing[9] o en el A350-XWB de Airbus[10] y en la industria del automotriz[11].

Obtener soluciones, de desplazamiento y de esfuerzos del laminado de material compuesto sobre un toroide, son más difíciles de obtener que en otras cascaras axisimétricas de revolución, debido a las peculiaridades de las ecuaciones en diferentes lugares del toroide y principalmente en su cresta (Fig.1b); varias soluciones elásticas, para toroides ortótropos sometidos a presión interna están disponibles en la literatura, [12],[13] y se han considerado optimizaciones del diseño para toroides fabricados mediante técnicas de laminación con fibra[14],[15],[16].

Mediante una técnica de optimización se soluciona el problema relacionado con la minimización del volumen de material que se requiere para construir un toroide. Hay técnicas clásicas que encuentran la solución óptima y demuestran que son la mejor manera para garantizar mínimos locales, por lo que en ocasiones tienen un bajo rendimiento. Por otra parte, están las técnicas aproximadas que evitan, en lo posible, el problema de los mínimos locales, pero la solución óptima es solo aproximada. Entre las técnicas aproximadas, destacan las metaheurísticas de optimización[17] que son consideradas como estrategias genéricas de alto nivel. Particle Swarm Optimization (PSO) es un algoritmo metaheurístico que realiza exploraciones en espacios de búsqueda de gran tamaño, brinda flexibilidad y adaptabilidad (descrita por James Kennedy y Russell C. Eberhart), inicialmente fue creado para la elaboración de modelos de conductas sociales que se reflejan en la naturaleza [18], que a la hora de hacer una búsqueda profunda la hace en el espacio en el que existe la mayor probabilidad de encontrar lo que busca[19]; esta idea fue trasladada al campo de la computación como un algoritmo para la resolución problemas en los que se plantean funciones con muchas variables, y cuyo objetivo es buscar la solución óptima o una muy cercana a la óptima[20].

En el presente trabajo se tendrá como objetivo la optimización de un recipiente toroidal M5, proveniente del análisis comparativo de recipientes a presión de forma toroidal con material compuesto registrado en[21], la geometría está en función de los radios $R=14\text{in}(355.6\text{mm})$, $a=6\text{in}(152.4\text{mm})$ y el espesor del laminado $t_c=0.75\text{in}(19.05\text{mm})$ se mantiene fijo en todo el recipiente. Es de mencionar que en otro estudio [22] previo se alcanzó a reducir el volumen del material en un 17.7% llegando a soportar almacenamiento de GNC a 34.47Mpa de presión. Hay referencias que indican que el mercado energético está buscando el almacenamiento de hidrogeno como elemento de combustión y generación de energía para el mercado del automóvil, por lo que hay estudios que indican que se requiere de un recipiente que pueda almacenar hidrogeno a unos 70Mpa.

Se emplea el método de elementos finitos MEF para realizar el estudio y se realizaran simulaciones virtuales por medio del software ANSYS. El recipiente se diseña aplicando el modelo de recipientes de espesor variable y se emplea uno de los métodos de optimización disponibles en ANSYS combinado con un algoritmo externo PSO, para obtener un recipiente cuyo laminado sea liviano y que permita alcanzar la resistencia esperada.

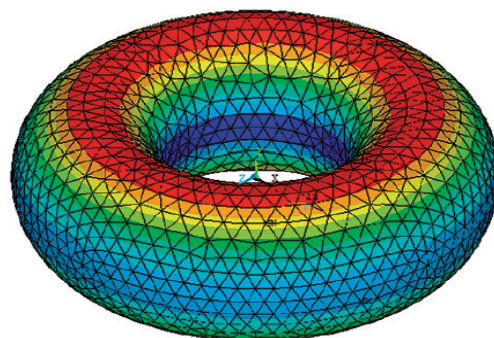


Figura 1. Recipiente Toroidal



2 Geometría Toroidal

El toroide de la (Figura. 1) se ha formado girando una sección transversal (Figura. 2a) o sección recta circular de radio **a** alrededor de un eje de rotación(axis) cuyo radio **R** es el radio mayor del toroide ver la (Figura. 2b), el espesor **t** usualmente se asume constante pero puede ser variable según [22] con lo que se alcanzaría un ahorro significativo y una reducción de espesor en su laminado.

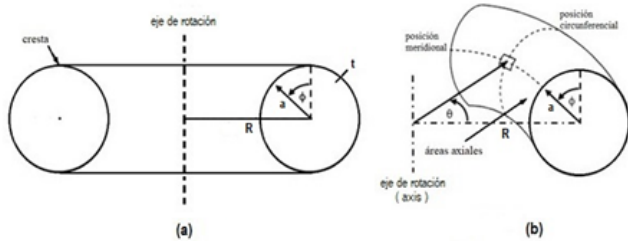


Figura 2. Geometría del Toroide.

La geometría del toroide y las tenciones que se generan dentro él se encuentra documentadas en [22].

El volumen del toroide sin incluir la pared esta dado por

$$V_t = 2 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot a^2 \tag{1}$$

En donde al reemplazar **a** por **a+t** se incluiría la pared

$$V_{pt} = 2 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot (a+t)^2 \tag{2}$$

Puesto que $v_{pt} > v_t$, el volumen de la pared del toroide v_{pt} determina la diferencia entre Ec (10) y Ec (9)

$$V_{pt} - V_t = 2 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot (2 \cdot a \cdot t + t^2) \tag{3}$$

El margen de diferencia entre el cálculo analítico Ec (11) y el valor que ofrece el MEF sería

$$\text{margen} = 100 \cdot (V_{pt} - V_{MEF}) / V_{pt} \tag{4}$$

2.1 Laminado y material

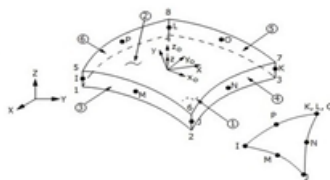


Figura 3. Elemento Shell281

El elemento apropiado para el análisis elástico lineal de estructuras de pared delgada, es el shell281 (Figura. 3), las grandes rotaciones que se pueden dar y/o grandes deformaciones en aplicaciones no lineales su forma cuadrilátera tiene 8 nodos con 6 grados de libertad, en cada nodo: se pueden dar traslaciones en los tres ejes (x, y, z) y

rotaciones alrededor de los tres ejes, puede ser usado considerando la teoría de membrana y de flexión, por lo que puede usarse para la modelación de aplicaciones de cascaras compuestas, la precisión en la modelación con shell de material compuesto está gobernada por la teoría de placas de *Reissner-Mindlin* [24].

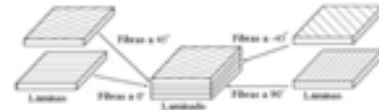


Figura 4. Laminado.

Las propiedades mecánicas de las láminas, están dadas por la dirección de las fibras, por lo que la micromecánica de ellas nos permite obtener parámetros que marcan su comportamiento mecánico[25].

Estos composites están caracterizados por las constantes elásticas asociadas a tres direcciones mutuamente perpendiculares y tienen un comportamiento elástico representado por nueve constantes independientes formadas por tres módulos de elasticidad longitudinal, tres módulos de rigidez y tres coeficientes de Poisson según la Tabla. 1.

Las láminas unidireccionales de material compuesto formadas por fibra carbono(AS) y matriz de resina epoxi(9301) que se consideran para el proceso de optimización han dado buenas prestaciones según [21], y en pruebas realizadas en la literatura [26] donde se refleja que el material AS4D/9301 ofrece buenas prestaciones en recipientes toroidales sometidos presión.

Material - AS4D/9310					Descripción
Propiedad	Valor	Und	Valor	Und	
E1	19.415	Msi	133.86	GPa	Módulo de elasticidad
E2=E3	1.118	Msi	7.706	GPa	Módulo de elasticidad
G12=G13	0.625	Msi	4.306	GPa	Módulo de rigidez
G23	0.4003	Msi	2.76	GPa	Módulo de rigidez
V12=V13	0.301		0.301		Coefficiente de Poisson
V23	0.396		0.396		Coefficiente de Poisson
F1t	2.65E+05	Psi	1830	MPa	Resistencia longitudinal a tracción
F1c	1.59E+05	Psi	1096	MPa	Resistencia longitudinal a compresión
F2t	8.27E+03	Psi	57	MPa	Resistencia transversal a tracción
F2c	3.31E+04	Psi	228	MPa	Resistencia transversal a tracción
F3t	1.00E+12	Psi	1.00E+06	MPa	Resistencia (valor grande que no se calcula)
F3c	1.00E+12	Psi	1.00E+06	MPa	Resistencia (valor grande que no se calcula)
F4	1.00E+12	Psi	1.00E+06	MPa	Resistencia (valor grande que no se calcula)
F5	1.00E+12	Psi	1.00E+06	MPa	Resistencia (valor grande que no se calcula)
F6	1.03E+04	Psi	71	MPa	Resistencia longitudinal a cortante
C6	-1		-1		Coefficiente, defaults -1
C4	-1		-1		Coefficiente, defaults -1
C5	-1		-1		Coefficiente, defaults -1
ρ	1.44g/cm ³ =0.0236Kg/m ³				Densidad del material compuesto

Tabla 1: Propiedades del material AS/3501[27].

3 Método

Se establece un modelo por medio de elementos finitos sobre un APDL, donde elabora el diseño inicial con un toroide de espesor fijo, para luego ser contrastado con uno de espesor



variable, el toroide de espesor variable tendrá una serie de adecuaciones que se relacionan con su geometría y que tiene que ver con la sectorización de las áreas meridionales, se plantearon 6 sectores por lo que se usarán 6 espesores tk1...tk6 uno para cada sector los mismos que estarán condicionados por:

$$\begin{aligned}
 0 &\leq tk_1 < b_1 \\
 b_1 &\leq tk_2 < b_2 \\
 b_2 &\leq tk_3 < b_3 \\
 b_3 &\leq tk_4 < b_4 \\
 b_4 &\leq tk_5 < b_5 \\
 b_5 &\leq tk_6 \leq b_6
 \end{aligned} \tag{5}$$

Con límites que cumplen con $b_1 < b_2 < b_3 < b_4 < b_5 < b_6$ según la (Figura. 5)

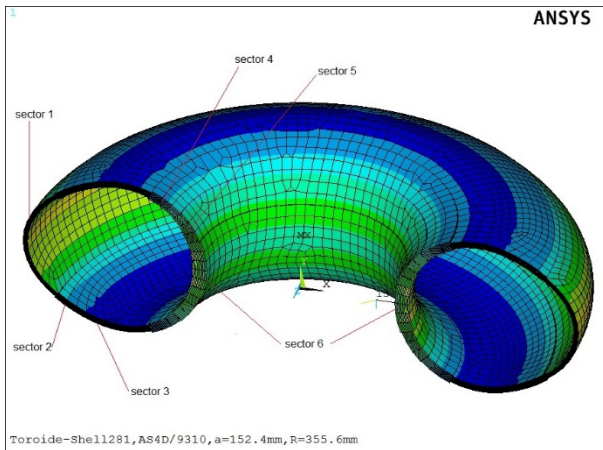


Figura 5. Sectores del Toroide

Los ángulos que se han tomado para cada sector tienen intervalos libres según se refleja en la (Tabla 3).

Sector	Ángulos			Intervalo
1	ang11	ang12	ang13	0°-180°
2	ang21	ang22	ang23	0°-180°
3	ang31	ang32	ang33	0°-180°
4	ang41	ang42	ang43	0°-180°
5	ang51	ang52	ang53	0°-180°
6	ang61	ang62	ang63	0°-180°

Tabla 2. Ángulos de las Capas del Laminado por Sectores

Para determinar el valor de los espesores en función de los ángulos de orientación de las capas del laminado, se toma como referencia información proveniente del estudio previo [16], en donde se estudió una técnica de bobinado que se la ha adaptado como técnica de laminación a emplearse en este modelo toroidal y que se refleja en la (Ec. 6)

$$t_\alpha = \left(\frac{(R+a)\sin\alpha_0}{(R+a\cdot\cos\phi)\sin\alpha} \right) \cdot t_0 \tag{6}$$

En la (Ec.6) se refleja que el espesor del bobinado t_α está en función del ángulo α que determina la dirección de la capa, así como el ángulo ϕ que representan la coordenada meridional en la curvatura geodésica del toroide, el ángulo α_0 es el ángulo inicial del laminado.

		ϕ	$\cos \phi$	α	$\sin \alpha$	$t_\alpha(\text{mm})$	Sector
R(mm)	355.6	22.5	0.92388	57	0.83867	20.60660	1
R(mm)	152.4	67.5	0.38268	54	0.80902	25.61851	2
t_α	19.5	100	-0.17365	48	0.74314	35.07358	3
		120	-0.50000	43	0.68200	45.02142	4
α_0	60	140	-0.76604	38	0.61566	58.33819	5
$\sin \alpha_0$	0.866025	160	-0.93969	35	0.57358	70.42095	6
		180	-1.00000	34	0.55919	75.49942	6

Tabla 3. Sectores del Toroide

En la tabla 3. se reflejan los valores iniciales para la construcción del diseño toroidal para la optimización.

3.1 Criterio de Fallo

En el proceso de simulación hay que tener un control de las capas del laminado, la orientación angular de ellas influye en resistencia o el fallo de cada capa del laminado que se definen según (Ec. 7,8,9)

$$I_F = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{resistencia}} \tag{7}$$

Se predice el fallo cuando $I_F \geq 1$

La razón de resistencia es el inverso del índice de fallo

$$R = \frac{1}{I_F} = \frac{\text{resistencia}}{\text{esfuerzo}} \tag{8}$$

El fallo se predice cuando $R \leq 1$

El criterio de fallo usado para contrarlar la resistencia del laminado en este modelo es el de Tsai-Wu según (Ec. 9) y que se encuentra descrito de forma ampliada en la literatura [25].

$$I_F = \frac{1}{R} = \left[-\frac{B}{2A} + \sqrt{\left(\frac{B}{2A}\right)^2 + \frac{1}{A}} \right]^{-1} \tag{9}$$

La descripción de las resistencias y coeficientes de Tsai-Wu relacionados con el material se registran en la Tabla 1.

3.2 Simulación Numérica por MEF

La simulación numérica realizada por medio del método de Elementos Finitos (MEF) toma criterios de la literatura: [22],[25],[28] que se usarán en el script del ADPL(ANSYS Parametric Desing Language), para realizar un análisis elástico



lineal, la técnica de mallado a usarse será local y se controlará globalmente en términos de la longitud del borde del elemento utilizado en los límites de la superficie del mismo; se usará un mallado libre con 10392 elementos de forma cuadrilátera, el tamaño global del elemento será de 0.8in(20.32mm) con 20784 nodos. Las condiciones de contorno establecen restricciones en los ejes Y,Z para los nodos 8(R+a,0,0) y 9(-R-a,0,0) y restricciones en los ejes X,Y para los nodos 3(0,0,R+a) y 14(0,0,-R-a) para mantener apoyado el toroide.

3.3 Validación Experimental del Modelo Toroidal

El modelo toroidal es validado con datos tomados de un toroide que fue ensayado experimentalmente en [16]; está formado por un "liner" de titanio con espesor $t_0 = 0.07874$ in(2mm) y un laminado de fibra de aramida y matriz epoxy, con un espesor por lamina de 0.01417in(0.36mm); este laminado está formado por 12 láminas. La orientación angular está en función del ángulo ϕ cuyo valor está entre $0 < \phi < \pi$, además emplea un ángulo α que sirve para orientar el bobinado de las fibras y para determinar el espesor $t\alpha$ de acuerdo a la orientación de la fibra.

Después de haberse realizado las pruebas utilizando el modelo de MEF desarrollado por nosotros, se procedió a contrastar los resultados con los resultados experimentales obtenidos por Haixiao Hu [16], obteniéndose una presión límite para comportamiento lineal en los ensayos, de 4351.13Psi(30MPa) y una presión límite en el caso de nuestro modelo numérico de 4303.27Psi(29.67MPa). Dado que el error entre el modelo numérico y experimental es de 1.1%, se acepta como válida la

metodología del modelo de MEF para nuestros modelos sucesivos de recipientes toroidales.

4 Optimización

El esquema de optimización se ha realizado por medio de los métodos que se encuentran disponibles en ANSYS y con un método metaheurístico llamado PSO (Particle Swarm Optimization). Con el método RAND de Ansys se generan los diseños iniciales y que se asocian con las partículas de la población inicial para el algoritmo PSO mediante el cual se encuentra el óptimo que puede ser local o global; luego en una última pasada se usa el método aproximación de subproblema SUB de Ansys para encontrar el óptimo global de darse el caso; se interactúa con los APDL que se ejecutan en modo *Batch*.

En el diseño del problema se plantea la minimización de la función objetivo $T_{volumen}$, se definen las variables de diseño (DV) tomadas de la (Ec. 13) para los espesores y los ángulos (Tabla. 2), se establecen además 12 variables de estado (SV) cada una relacionada con el Tsai máximo de cada capa del laminado, para poder obtener el F_{cMax} ; además se cuentan con un tsai máximo por cada sector del toroide para efectos de control. Mediante las variables de estado realizamos un control de la resistencia del laminado ante la presión a la que es sometido.

5 Resultados

En la (Tabla 4) se reflejan los resultados de la optimización con los cuales se representan las tendencias en la (Figura 6).

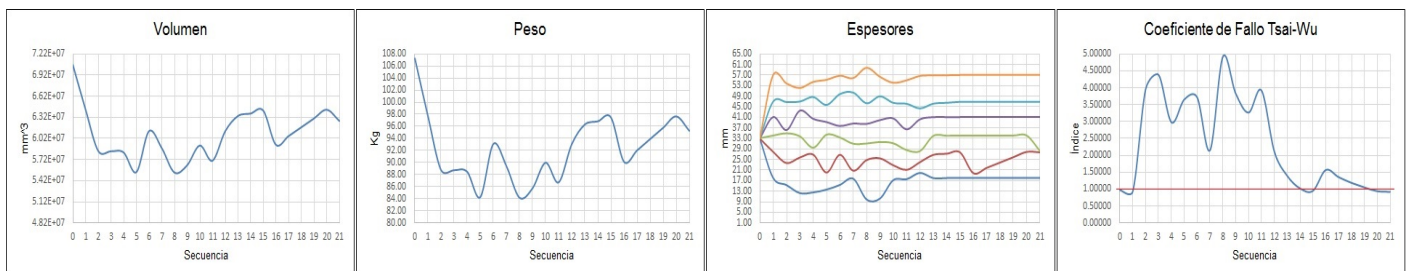


Figura 6. Tendencias de Resultados

El comportamiento del volumen y del peso del material reflejados en la (Figura. 6) tienen una tendencia decreciente; los espesores tienen un comportamiento definido dentro del rango establecido en la (Ec. 5) según el condicionamiento creciente. El coeficiente de fallo es quien condiciona el proceso y este termina cuando el índice se acerca a 1.



Sec	Volumen mm ³	Peso Kg	Tsai	Espesor de Sectores(mm)					
				e1	e2	e3	e4	e5	e6
0	7.06E+07	107.32	0.96872	33.00	33.00	33.00	33.00	33.00	33.00
1	6.43E+07	97.74	0.93504	18.00	28.00	34.00	41.00	47.00	57.00
2	5.84E+07	88.79	3.96561	15.32	23.81	34.84	36.16	46.80	53.79
3	5.84E+07	88.75	4.38815	12.26	25.88	33.69	43.43	46.99	52.10
4	5.82E+07	88.49	2.97890	12.53	26.96	29.38	40.35	48.67	54.39
5	5.54E+07	84.26	3.65488	13.61	20.25	34.32	39.15	45.71	55.18
6	6.12E+07	93.10	3.71969	15.38	26.89	33.24	37.68	49.80	56.71
7	5.89E+07	89.46	2.14733	17.74	20.93	30.88	38.59	50.37	55.83
8	5.54E+07	84.19	4.92391	9.87	24.91	30.95	38.46	46.32	59.72
9	5.64E+07	85.73	3.83342	10.20	25.58	31.51	39.87	48.95	56.32
10	5.92E+07	90.00	3.26704	17.18	22.95	31.06	40.50	46.51	54.06
11	5.71E+07	86.73	3.92462	17.56	21.28	28.45	36.42	46.14	54.99
12	6.12E+07	93.05	2.11221	19.93	24.13	28.09	40.18	44.39	56.65
13	6.34E+07	96.34	1.39171	17.97	26.87	33.87	40.99	46.19	56.83
14	6.37E+07	96.87	1.01686	17.99	27.29	33.92	40.99	46.49	56.89
15	6.42E+07	97.52	0.94412	18.00	27.81	33.99	41.00	46.88	56.99
16	5.93E+07	90.15	1.56484	18.00	20.01	33.99	41.00	46.88	56.99
17	6.06E+07	92.04	1.35110	18.00	22.01	33.99	41.00	46.88	56.99
18	6.18E+07	93.92	1.18208	18.00	24.01	33.99	41.00	46.88	56.99
19	6.30E+07	95.81	1.04621	18.00	26.00	33.99	41.00	46.88	56.99
20	6.43E+07	97.69	0.93453	18.00	28.00	33.99	41.00	46.88	56.99
21	6.27E+07	95.29	0.91613	18.00	27.81	28.01	41.00	46.88	56.99

Tabla 4. Resultados

Con los datos tomados de la tabla 4, **sec 0** (secuencia inicial) se elabora el modelo Tec modelo de espesor constante y con **sec 21** modelo de espesor variable.

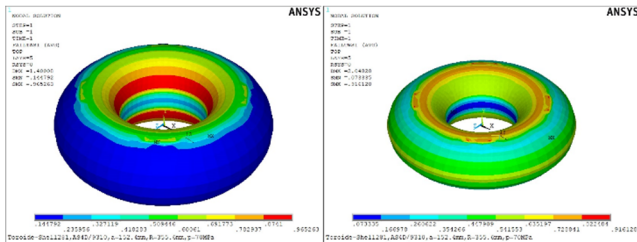


Figura 7. Índice de Fallo en Tec y Tev

La (Figura. 7) refleja que índice de fallo de Tev es de 0.916128 se ha reducido el 5.1% con respecto al índice de Tec que es 0.965263, en ambos casos MX señala que el fallo se producirá el área axial de los toroides, pero además en Tev se aprecia que hay un mejor aprovechamiento del material en sus áreas axiales.

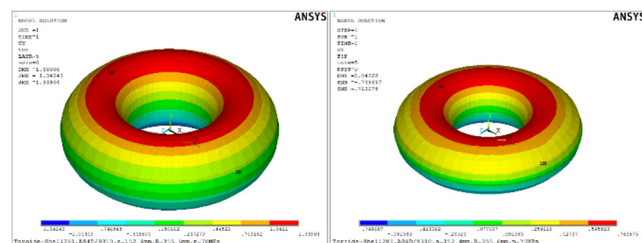


Figura 8. Desplazamientos de Tec y Tev

La (Figura. 8) refleja que el desplazamiento en el modelo Tev es de 0.763675mm y se ha reducido el 47.97% con respecto a Tec que tiene 1.33904mm, en ambos casos MX señala que en la cresta del toroide es donde se refleja el desplazamiento.

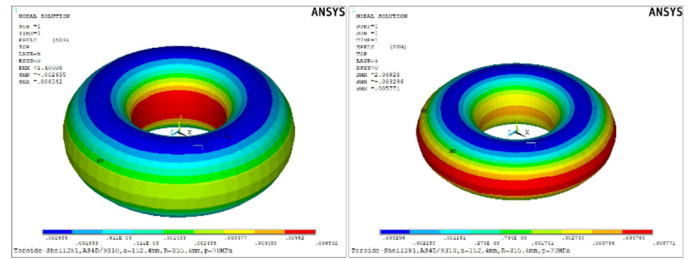


Figura 9. Deformación de Tec y Tev

La (Figura. 9) refleja el índice de deformación en los modelos Tec(0.006542) y Tev(0.005771) tiene una variación de 11.79%, la deformación se ha reducido en el modelo Tev.

6 Conclusiones

En la tabla 5, se refleja la reducción de los pesos entre el modelo toroidal de espesor constante Tec y modelo de espesor variable Tev.

Modelos	Pesos		Ahorro	
	Kg	%	%	Kg
Tec	107.32	-	-	-
Tev	95.29	0.112	12.02	12.02

Tabla 5. Ahorro de Material

La optimización ha reducido el volumen y el peso del material en un 11.2%, lo que significa que se alcanzó a reducir 12.02Kg de peso de material entre el Tec (107.32Kg) y el Tev(95.29Kg) según se aprecia en la (Figura. 10).

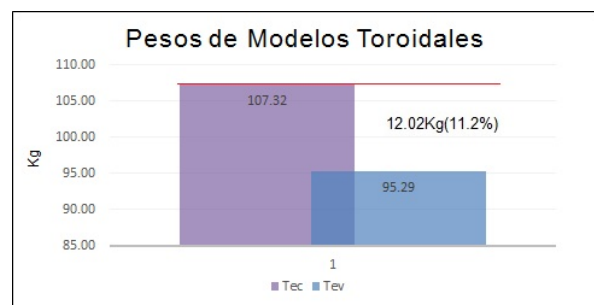


Figura 10. Reducción de Pesos

Los espesores se han reducido sin que se pierda la resistencia del laminado tal como lo refleja la variación del índice de deformación y el desplazamiento.

En el análisis se ha determinado, que la variación angular para la ubicación de las capas del laminado en el apilamiento laminar, producen un aumento o disminución en la resistencia del laminado, cuando este es sometido a presión.

Referencias

[1] Gutiérrez Jodra, L.: El Hidrógeno, Combustible Del Futuro. Real Acad. Ciencias Exactas, Físicas y Nat. 99, 49-67 (2005). [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(98\)00115-3](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(98)00115-3)



- [2] Sirosh, N., Niedzwiecki, A.: Development of storage tanks: High-pressure vessels, <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-73749087443&partnerID=tZOTx3y1>, (2008)
- [3] COMPRESION, K.: Cilindros GNC Vehicular, <http://www.kioshicompression.com/vehicular.html>
- [4] Cook, J., Richards, B.J.: Aparato de Contención de Gas, (2002)
- [5] Fowler, C.P., Orifici, A.C., Wang, C.H.: A review of toroidal composite pressure vessel optimisation and damage tolerant design for high pressure gaseous fuel storage. *Int. J. Hydrogen Energy*. 41, 22067–22089 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.039>
- [6] Miravete, A.: *Materiales Compuestos. Volumen I y II. Mater. compuestos.* (2000). <https://doi.org/10.3989/mc.2010.46908>
- [7] Park, S.J., Kim, B.J.: Carbon fibers and their composites. Springer Ser. Mater. Sci. (2015). https://doi.org/10.1007/978-94-017-9478-7_8
- [8] Huang, X.: Fabrication and properties of carbon fibers, (2009). <https://doi.org/10.3390/ma2042369>
- [9] Boeing: Recuperado de: www.boeing.com, www.boeing.com
- [10] Airbus: Recuperado de: www.airbus.com, www.airbus.com
- [11] Ferrari: Recuperado de www.ferrari.com, www.ferrari.com
- [12] Maksimuk, V.A., Chernyshenko, I.S.: Nonlinear elastic state of thin-walled toroidal shells made of orthotropic composites. *Int. Appl. Mech.* (1999). <https://doi.org/10.1007/BF02682397>
- [13] Park, J.S., Hong, C.S., Kim, C.G., Kim, C.U.: Analysis of filament wound composite structures considering the change of winding angles through the thickness direction. *Compos. Struct.* (2002). [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00137-4](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00137-4)
- [14] Zu, L., Koussios, S., Beukers, A.: Pattern design and optimization for filament - wound toroidal pressure vessels. In: 23rd Technical Conference of the American Society for Composites, Memphis, TN, USA (2008)
- [15] Zu, L.: Stability of fiber trajectories for winding toroidal pressure vessels. *Compos. Struct.* (2012). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.027>
- [16] Hu, H., Li, S., Wang, J., Zu, L.: Structural design and experimental investigation on filament wound toroidal pressure vessels. *Compos. Struct.* (2015). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.11.023>
- [17] Yang, F., Wang, P., Zhang, Y., Zheng, L., Lu, J.: Survey of swarm intelligence optimization algorithms. In: Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Unmanned Systems, ICUS 2017 (2018). <https://doi.org/10.1109/ICUS.2017.8278405>
- [18] Kennedy, J., Eberhart, R.: Particle swarm optimization. *Proc. ICNN'95 - Int. Conf. Neural Networks.* (1995). <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- [19] Tao, W., Liu, Z., Zhu, P., Zhu, C., Chen, W.: Multi-scale design of three dimensional woven composite automobile fender using modified particle swarm optimization algorithm. *Compos. Struct.* (2017). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.065>
- [20] Poli, R., Kennedy, J., Blackwell, T.: Particle swarm optimization. *Swarm Intell.* (2007). <https://doi.org/10.1007/s11721-007-0002-0>
- [21] Patiño, D., Corz, A.: Análisis Comparativo de Recipientes a Presión Toroidal de Material Compuesto por Elementos Finitos [Comparative Analysis of Toroidal Pressure Vessels of Composite by Finite Elements]. *Int. J. Innov. Appl. Stud.* 25, 162–175 (2018)
- [22] Vick, M.J., Gramoll, K.: Finite Element Study on the Optimization of an Orthotropic Composite Toroidal Shell. *J. Press. Vessel Technol.* 134, 051201 (2012). <https://doi.org/10.1115/1.4005873>
- [23] Li, S., Cook, J.: An Analysis of Filament Overwound Toroidal Pressure Vessels and Optimum Design of Such Structures. *J. Press. Vessel Technol.* 124, 215 (2002). <https://doi.org/10.1115/1.1430671>
- [24] Reddy, J.N.: *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis, Second Edition - Book.* (2003). <https://doi.org/10.1038/sj.leu.2403242>
- [25] Barbero, E.J.: *Introduction to Composite Materials Design, Second Edition.* (2010)
- [26] PATIÑO PEREZ, D., CORZ RODRIGUEZ, A.: DISEÑO ÓPTIMO DE UN RECIPIENTE TOROIDAL A PRESIÓN DE MATERIAL COMPUESTO PARA VEHÍCULOS A GAS. *DYNA Ing. E Ind. DYNA-ACELERADO, 0–0* (2019). <https://doi.org/10.6036/9096>
- [27] Springer, G.S., Kollar, L.P.: Displacements, Strains, and Stresses. In: *Mechanics of composite structures* (2003). [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(94\)90053-1](https://doi.org/10.1016/0263-8223(94)90053-1)
- [28] Barbero, E.J., Shahbazi, M.: Determination of material properties for ANSYS progressive damage analysis of laminated composites. *Compos. Struct.* (2017). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.074>

