

Análisis de recipientes a presión reforzados con alambre usando el método del elemento finito

Analysis of wire reinforced pressure vessels by means of the finite element method

Pedro Daniel Granados Negrete¹, Mary Paz Moreno Palacios¹, Martín Said Pérez Rodríguez¹, Miguel Ernesto Gutiérrez Rivera¹

¹ División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, C.P. 36885, Salamanca, Guanajuato, México.
pd.granadosnegrete@ugto.mx (P.D.G.N); mp.morenopalacios@ugto.mx (M.P.M.P.); ms.perezrodriguez@ugto.mx (M.S.P.R); miguel.gutierrez@ugto.mx (M.E.G.R)

Resumen

En este trabajo se presenta el análisis de la respuesta mecánica de recipientes a presión reforzados con alambre en su parte cilíndrica. Partiendo de un prototipo existente, se desarrolla un modelo de elemento finito, utilizando elementos cascarón y aplicando condiciones de frontera de simetría (dada la geometría del recipiente) y diferentes presiones de trabajo propuestas. Los esfuerzos de von Mises en la parte cilíndrica para diferentes números de capas de refuerzo son presentados con la finalidad de demostrar el efecto del uso del refuerzo sobre los recipientes. Además, se muestran y comparan los valores de la masa del recipiente reforzado para diferentes espesores de alambre, así como para recipientes sin refuerzo.

Palabras clave: Recipientes a presión, Refuerzo con alambre, Análisis por elemento finito, ANSYS.

Introducción

El desarrollo de recipientes metálicos a presión comenzó a finales del siglo XIX, impulsado por la necesidad de almacenar dióxido de carbono para bebidas. Con el tiempo, estos recipientes encontraron aplicaciones en diversos campos, como el almacenamiento de combustibles y equipos de buceo, entre otros. Hoy en día, el diseño de tanques metálicos se centra en la capacidad de soportar altas presiones y bajas temperaturas. Para satisfacer estos requisitos, se han empleado materiales compuestos, que, aunque son costosos, ofrecen ventajas significativas en términos de resistencia, rigidez y bajo peso.

El diseño de recipientes a presión con materiales compuestos requiere considerar las propiedades físicas y mecánicas del material, así como la geometría estructural del tanque. La presión de falla del tanque es un aspecto fundamental en el diseño, ya que define la seguridad del recipiente.

Una alternativa a los materiales compuestos es el uso de alambre de alta resistencia para el refuerzo de los tanques, tal como lo realizó la compañía *Wire Through Cylinders* (Saxena et al., 2019) para almacenar hidrógeno. Esta empresa llevó a cabo pruebas experimentales y modelos de elementos finitos asumiendo un comportamiento isotrópico del refuerzo. Por otro lado, Celaya et al. (2021) emplearon el método de elementos finitos para determinar las propiedades equivalentes del refuerzo en recipientes a presión tipo II, considerando un comportamiento ortotrópico y utilizando el método de celda unitaria.

Actualmente, los combustibles fósiles son los más utilizados, representando alrededor del 80% del consumo energético mundial, aunque solo generan el 66% de la energía producida. La sobrepoblación y el crecimiento industrial han agravado los problemas de contaminación, convirtiéndose en uno de los principales desafíos globales (Celaya et al., 2022). Además, la quema de combustibles fósiles ha contribuido a aproximadamente 8.7 millones de muertes a nivel mundial en 2018 (Martins, 2021).

La principal aplicación de los combustibles fósiles es en el transporte, donde impulsan motores de combustión interna; los más comunes se encuentran en vehículos. Además, estos hidrocarburos son fundamentales para la producción de numerosos productos petroquímicos (Nunez, 2023).

Para reducir la contaminación asociada con el uso de combustibles fósiles, se han desarrollado diversas alternativas de energía renovable a lo largo de los años, como los sistemas fotovoltaicos y eólicos. En este contexto, el uso de combustibles alternativos, como el hidrógeno, se ha presentado como una posible solución a la problemática actual (Celaya et al., 2022). Aunque aún existen desafíos para utilizar el hidrógeno de manera eficiente, la tendencia indica que el hidrógeno es uno de los combustibles más prometedores para mejorar la eficiencia energética y contribuir a la conservación del medio ambiente (Guerra et al., 2010).

El hidrógeno tiene una densidad energética alta, prueba de esto es que un 1 kg de hidrógeno tiene la misma cantidad de energía que 1 kg de gas natural o en 8 kg de gasolina. Esto sugiere que el hidrógeno puede ser igual o más eficiente en términos de energía, en comparación con otros combustibles. Sin embargo, su almacenamiento presenta inconvenientes significativos. Se requieren contenedores grandes para almacenar hidrógeno, lo que plantea problemas para su incorporación en vehículos de transporte. Además, al ser un gas incoloro, inodoro y con una llama casi imperceptible, su fuga resulta muy riesgosa debido a la dificultad para detectarla (Guerra et al., 2010).

Existen cuatro tipos de recipientes a presión para almacenamiento de hidrógeno, como los que se presentan en la Figura 1. Aunque los recipientes a presión suelen ser cilíndricos, también pueden tener formas polimórficas o toroidales (Barthelemy et al., 2016).

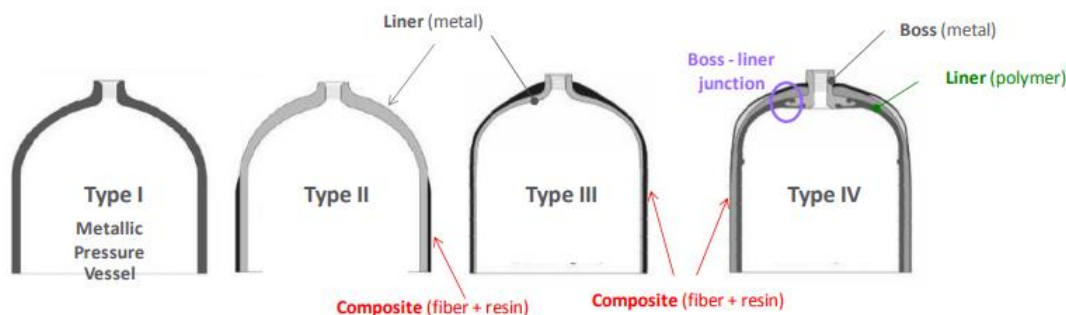


Figura 1. Representación de COPV de tipo I, II, III y IV (Barthelemy et al., 2016).

Uno de los tipos de recipientes a presión es el metálico, conocido como tipo I. Los recipientes tipo II consisten en un aro de revestimiento metálico grueso, envuelto en la parte cilíndrica con un compuesto de fibra y resina. Por otro lado, los recipientes a presión basados en materiales totalmente compuestos, designados como *Composite Overwrapped Pressure Vessels* (COPV), están fabricados con un revestimiento plástico o metálico recubierto con fibras de carbono incrustadas en una matriz polimérica (devanado de filamento). Cuando el revestimiento contribuye a la resistencia mecánica en más del 5%, el COPV es de tipo III, principalmente con revestimiento metálico. En caso contrario, el COPV se clasifica como tipo IV, con un revestimiento principalmente de polímero o, rara vez, un revestimiento metálico extremadamente fino (Barthelemy et al., 2016).

El objetivo de este trabajo es contribuir en el estudio de los recipientes a presión reforzados con alambre, mediante un análisis numérico, y con ello encontrar una alternativa que satisfaga los requisitos para tanques a presión para el almacenamiento de hidrógeno. Para este análisis numérico del comportamiento del recipiente a presión revestido con alambre en su parte cilíndrica, se simula la respuesta del refuerzo utilizando las propiedades equivalentes presentadas por Celaya et al. (2021).

Proceso de análisis

Para el análisis y simulación del modelo de elemento finito, se sigue la metodología propuesta por Celaya et al. (2022), la cual se enfoca en los siguientes puntos:

- Geometría de referencia
- Material
- Mallado y condiciones de frontera

A continuación, se presenta el desarrollo de cada uno de éstos, para el modelo propuesto.

Geometría

Para el análisis se toma como referencia la geometría de un tanque tipo II ya existente, el cual se muestra en la Figura 2. Los espesores del recipiente se presentan en la Figura 3 y la lista detallada de éstos se muestra en la Tabla 1.



Figura 2. Recipiente real.



Figura 3. Geometría general.

Tabla 1. Espesores más importantes del recipiente de referencia, en relación con el diagrama de la Figura 3.

Número de sección	Espesor [mm]
1	5.98
2	13.52
3	4.00
4	9.76
5	7.54
6	4.53
7	4.57
8	6.11

Por otro lado, cabe mencionar que la longitud total del recipiente es de 225.96 mm, además el diámetro del alambre que se usará como refuerzo es de 0.1524 mm. Por lo que el espesor del refuerzo se obtendrá multiplicando ese valor por el número de capas. Los espesores utilizados en cada modelo de elemento finito se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Espesores correspondientes a las diferentes capas de refuerzo.

Número de capas	Espesor de refuerzo [mm]
0	0
1	0.1524
2	0.3048
3	0.4572
4	0.6096
5	0.7620

Material

El modelo de material usado para el modelo de elemento finito del recipiente es lineal, elástico e isotrópico, correspondiente al acero AISI 1018 CD. Las propiedades mecánicas de este material -módulo de elasticidad (E) y relación de Poisson (ν)- se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades del AISI 1018 CD.

Material	E [GPa]	ν
Acero	200	0.3

Por otro lado, el modelo de material usado para el refuerzo en el modelo de elemento finito es lineal, elástico y ortotrópico, correspondiente a las propiedades equivalentes del refuerzo del alambre de acero. En la Tabla 4 se listan las propiedades equivalentes tomadas del trabajo de Celaya et al., 2021, las cuales corresponden a tres módulos de elasticidad (E), tres módulos de elasticidad a cortante (G) y tres relaciones de Poisson (ν).

Tabla 4. Propiedades equivalentes del refuerzo de alambre.

Modelo	E_x [GPa]	E_y [GPa]	E_z [GPa]	G_{xy} [GPa]	G_{xz} [GPa]	G_{yz} [GPa]	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}
Alambre de piano	181.20	19.40	19.40	22.30	22.30	10.10	0.17	0.17	0.06

Mallado y condiciones de frontera

Debido a la geometría del recipiente, se establecieron las siguientes condiciones de frontera para el análisis. En primer lugar, se utilizó solo una cuarta parte del recipiente, aprovechando la simetría del diseño. En segundo lugar, se restringió el desplazamiento en la dirección X en el área de la base del recipiente para prevenir el movimiento de cuerpo rígido. Finalmente, se aplicó una condición de presión en las áreas internas del modelo, como se muestra en la Figura 4.

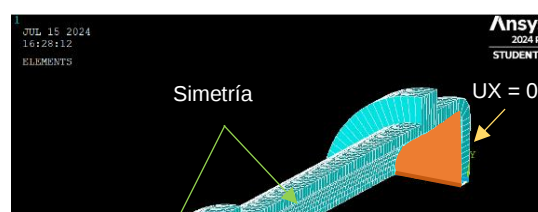


Figura 4. Condiciones de frontera sobre el modelo en ANSYS®.

El elemento usado para el mallado en ANSYS® es un Shell281, el cual está compuesto por ocho nodos y seis grados de libertad en cada nodo, con traslación y rotación en los ejes X, Y y Z, tal como se muestra en la Figura 5. Este elemento es adecuado para analizar estructuras de cascarón con espesor delgado, hasta espesores moderadamente gruesos. Además, este elemento tiene en cuenta los efectos de las presiones distribuidas, lo cual nos facilita analizar el recipiente mostrado anteriormente (ANSYS, 2024).

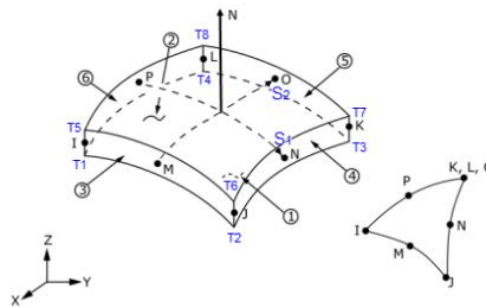


Figura 5. Representación del elemento Shell281 (ANSYS, 2024).

Resultados

La carga de trabajo a la que se somete el recipiente, para las pruebas numéricas, va desde 100 psi hasta 1000 psi, en incrementos de 100 psi. Para cada una de estas presiones, se obtuvieron los esfuerzos de von Mises en la parte cilíndrica del recipiente y se observó que ninguno de éstos supera la resistencia a la fluencia del AISI 1018 Cold Drawn, que es de 370 MPa (Matweb, s.f). Además, los esfuerzos en la parte cilíndrica del recipiente fueron disminuyendo, al ir aumentando el número de capas en el refuerzo, tal como se ilustra en la Figura 6.

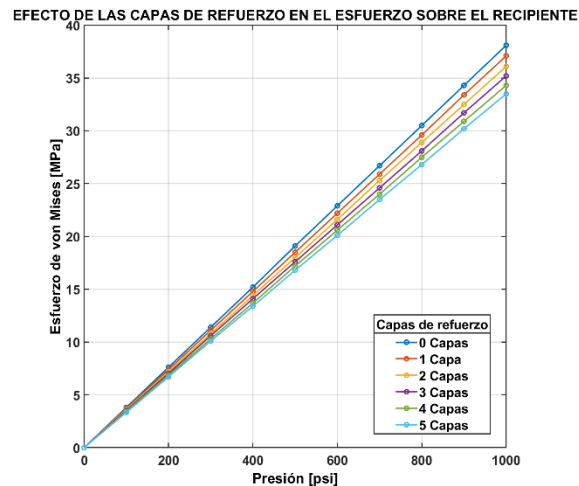


Figura 6. Esfuerzos de von Mises para diferentes capas de refuerzo.

También, se realizaron modelos de elemento finito para recipientes del tipo I (sin refuerzo) y se pudo verificar que el valor de los esfuerzos de von Mises para un recipiente reforzado con alambre en su parte cilíndrica son muy semejantes que los esfuerzos de von Mises para un recipiente con el espesor de su pared cilíndrica aumentado, tal como se muestra en la Figura 7.

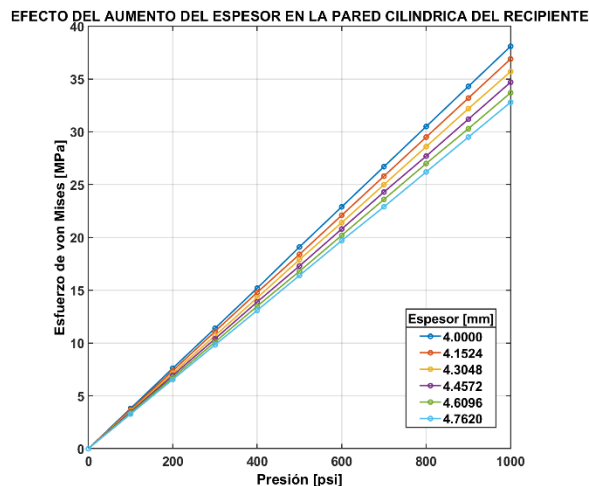


Figura 7. Esfuerzos de von Mises para diferentes espesores de la pared cilíndrica en un recipiente tipo I.

Los resultados obtenidos, indican que el recipiente es seguro bajo las presiones calculadas, ya que los esfuerzos no alcanzan la resistencia a la fluencia. A continuación, en la Tabla 5, se presentan los factores de seguridad para los esfuerzos de von Mises máximos, correspondientes a una presión de 1000 psi, considerando diferentes números de capas de refuerzo en la parte cilíndrica.

Por otro lado, el valor de la masa de un recipiente reforzado con alambre resulta ser menor que el de un recipiente con el espesor de su pared cilíndrica aumentada, tal como se muestra en la Figura 8. Además, la diferencia entre la masa de estos dos tipos de recipientes aumenta de forma favorable para el recipiente reforzado con alambre, al incrementar el espesor agregado a la parte cilíndrica. En este caso, para una capa de refuerzo la diferencia de masa es de 0.156%, para dos capas de refuerzo es de 0.307%, para tres capas de refuerzo es de 0.454%, para cuatro capas es de 0.597% y para cinco capas es de 0.736%.

Tabla 5. Factores de seguridad de la parte cilíndrica del recipiente a 1000 psi, para diferentes capas de refuerzo.

Número de capas	Factor de seguridad
0	9.711
1	9.973
2	10.249
3	10.511
4	10.787
5	11.045

MASA EN UN RECIPIENTE REFORZADO CONTRA UN RECIPIENTE CON EL ESPESOR DE LA PARED CILINDRICA AUMENTADO

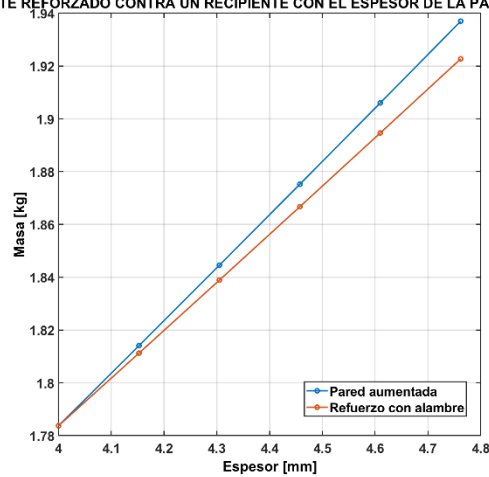


Figura 8. Comparación de la masa de un recipiente con aumento de espesor en la parte cilíndrica frente a un recipiente reforzado con capas de alambre.

Conclusiones

Se analizó un recipiente a presión reforzado en su parte cilíndrica con alambre de acero. Se variaron el número de capas de refuerzo y se discutieron los valores de esfuerzos a diferentes presiones. Al obtener los resultados del análisis del recipiente reforzado con alambre, acordes al comportamiento esperado, se determinó que el modelo propuesto para el análisis es funcional. Así mismo, los resultados obtenidos indican que al aumentar las capas de refuerzo sobre la parte cilíndrica disminuyen los esfuerzos sobre ésta y son similares a los obtenidos al aumentar el espesor de la parte cilíndrica del recipiente (tanque tipo I). Así también, al usar alambre como refuerzo el valor de la masa del recipiente tipo II es menor que en el recipiente tipo I, y esta diferencia de masas aumenta al incrementar el espesor agregado a la parte cilíndrica.

Bibliografía

- ANSYS (2024). SHELL281. Ansys Help. https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v241/en/ans_elem/Hlp_E_SHELL281.html
- Barthelemy, H., Weber, M., & Barbier, F. (2016). Hydrogen Storage: Recent Improvements and Industrial Perspectives. p. 13.
- Celaya García, L.D., Gutiérrez Rivera, M. E., Ledesma Orozco, E., Aceves, S., Martínez Ramírez, I. (2021). Equivalent properties of pure metallic reinforcement for pressure vessels using the finite element method. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(s.n), 5-10. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03026-0>
- Celaya García, L.D., Gutiérrez Rivera, M. E., Ledesma Orozco, E. R., Zavala González, F. J. (2022). Diseño de un tanque de almacenamiento de hidrógeno tipo II usando propiedades equivalentes. *MEMORIAS DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DE LA INGENIERÍA MECÁNICA EN MÉXICO XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM*, s.v (s.n), 158-162. https://somim.org.mx/memorias/memorias2022/articulos/A1_156.pdf
- Guerra, C. F., Rodríguez, E. A., & Ferrera, D. F. (2010). El hidrógeno: vector energético del futuro. *Energía & Minas: Revista Profesional, Técnica y Cultural de los Ingenieros Técnicos de Minas*, (8), 20-27.
- Martins A. (2021). *La contaminación que causa 1 de cada 5 muertes en el mundo (y cuáles son los países de América Latina más afectados)*. BBC NEWS MUNDO. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-56001440>
- Matweb (s.f) AISI 1018 Steel, cold drawn. Matweb. Material Property Data. <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3a9cc570fbb24d119f08db22a53e2421>
- Nunez C. (2023). *Qué son los combustibles fósiles*. NATIONAL GEOGRAPHIC. <https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2023/12/que-son-los-combustibles-fosiles#:~:text=Estos%20combustibles%20no%20renovables%2C%20que%20incluyen%20el%20carb%C3%B3n%2C,de%20productos%2C%20desde%20el%20acero%20hasta%20los%20pl%C3%A1sticos>.
- Saxena A., Prakash A., Sharp G., Thomson W., David T., Harless F., Vain J., Miller I., Nagpal V., Peters D.T., Tipple C., Milligan J., Nibur K., Romanoski G. (2019) Low cost hydrogen storage at 875 bar using steel liners and steel wire wraps. *Tech. rep, WireTough Cylinders*, LLC, Bristol, VA (United States)