

Análisis de recipientes de presión reforzados con compuestos de fibra continua

Walter B. Castelló, Juan F. Giró y Julio C. Massa

*Departamento de Estructuras, Facultad de C. E. F. y N., Universidad Nacional de Córdoba
Casilla de Correo 916, (5000) Córdoba, Argentina. e-mail: wcastello@efn.uncor.edu*

RESUMEN

En la actualidad está muy difundido el uso de reservorios de presión reforzados con materiales compuestos donde un recipiente metálico (liner) provee estanqueidad y algo de resistencia, y una cubierta bobinada de material compuesto adiciona resistencia estructural al conjunto. Una aplicación interesante de este tipo de recipientes son los tanques para automóviles equipados con Gas Natural Comprimido. Este trabajo es continuación de uno anterior donde se diseñó un recipiente de aluminio reforzado con un compuesto de fibra de vidrio en una matriz de resina epoxi.

Estos recipientes son relativamente simples de construir, pero presentan una compleja estructura interna con tensiones iniciales debidas a la pretensión de los filamentos en el bobinado y a las tensiones resultantes del proceso de curado del material compuesto. En el curado a temperatura el liner se expande y como consecuencia al enfriarse se despega del compuesto, esto conduce a la pérdida de la interfase metal-compuesto disminuyendo la transmisión de cargas entre los dos materiales. Es posible reestablecer el vínculo entre metal y compuesto a través de un zunchado bajo presión, llevando al liner a un estado de deformaciones plásticas. Se debe considerar también que en el proceso de bobinado el liner debe ser lo suficientemente rígido para permitir que la fibra pueda ser situada en la posición correcta, y una vez finalizado el proceso debe soportar la pretensión de las fibras sin que se produzca pandeo.

Un aspecto muy importante en el diseño de estos reservorios es la definición correcta de la presión de zunchado del liner metálico. Se propone aquí un método analítico para definir esta presión a partir de la aplicación de una teoría para vigas de sección compuesta. Se han empleado nuevas técnicas de análisis y simulación computacional basadas en el método de elementos finitos para la simulación del zunchado del recipiente y el análisis de su estado residual de tensiones. Se ha realizado también una revisión sobre el tratamiento de las propiedades mecánicas de los compuestos de fibra continua en función de los desarrollos actuales en esta área. Los resultados obtenidos validaron el modelo matemático utilizado para el análisis del zunchado y la verificación a falla.

Palabras Claves: recipientes de presión, materiales compuestos, teoría de vigas de material compuesto.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo trata el diseño y análisis de recipientes cilíndricos de presión utilizados como tanques de combustible en los automóviles equipados con Gas Natural Comprimido (GNC), considerando recipientes de aluminio reforzados con material compuesto.

Los cilindros de aluminio con refuerzo de material compuesto se comenzaron a desarrollar en las etapas iniciales de la carrera espacial con el objeto de lograr un máximo rendimiento operativo, comparable a los tanques de acero, pero con un menor peso. El liner metálico brinda hermeticidad al tanque mientras que el refuerzo de compuesto provee la resistencia necesaria para el almacenamiento de gases a elevadas presiones.

Posteriormente este tipo de recipientes se empezó a utilizar en la industria automotriz donde se adoptaron los cilindros de presión de aluminio reforzados con fibra de vidrio (bobinado de filamentos) para mejorar principalmente la relación potencia / peso. Si bien es conocido que las propiedades de la fibra de vidrio son inferiores a otras fibras (carbono, aramida), su bajo costo fue el factor determinante para su elección. También hay que recordar que la fibra de vidrio es muy susceptible a la corrosión por agua y ácidos.

Actualmente los recipientes de acero están muy difundidos debido a su bajo costo, sin embargo si se considera la relación potencia / peso surge la necesidad de utilizar otros materiales más livianos. Las dimensiones y características de los recipientes de acero varían lo suficiente como para abarcar todas las necesidades del mercado.

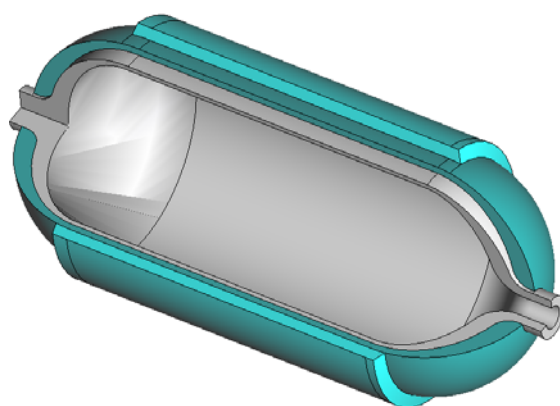
En la Figura 1 se muestra un corte esquemático de un cilindro de presión de acero típico, y se detallan las dimensiones generales. El extremo del recipiente posee una unión roscada y por lo tanto su espesor debe ser superior a los 0,020 m.

En la Figura 2 se pueden observar las dimensiones generales de un cilindro de presión bobinado, equivalente al cilindro de acero mostrado en la Figura 1. También se muestra el detalle de los distintos materiales, el liner metálico y las capas de refuerzo de material compuesto.



Diámetro: 0,355 m. Longitud: 0,85 m.
Espesor en la parte cilíndrica 0,016 m.

Figura 1 Cilindro de acero para GNC.



Diámetro: 0,38 m. Longitud: 0,88 m.
Espesor en la parte cilíndrica 0,031 m.

Figura 2 Cilindro reforzado con fibra de vidrio.

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS CILINDROS REFORZADOS CON MATERIAL COMPUESTO

Los cilindros de presión bobinados son simples de construir, pero presentan una compleja estructura interna, especialmente en los domos, y tensiones iniciales debidas a la pretensión de los filamentos durante el bobinado y al curado que se realiza para facilitar la unión de la fibra con la resina.

Durante el bobinado el liner debe ser lo suficientemente rígido para evitar deformaciones excesivas a fin de que la fibra pueda ser situada en la posición correcta. Además, una vez realizado el bobinado, debe poder soportar la pretensión de las fibras sin que se produzca pandeo. Estos requerimientos se cumplen fijando un espesor del liner adecuado [1,2,3]. Durante el proceso de curado el liner se expande y al enfriarse se despegar del material compuesto desapareciendo la interfase metal-compuesto, reduciéndose en consecuencia la posibilidad de transmisión de cargas entre los dos materiales [1].

A los fines de solucionar este inconveniente se realiza un zunchado, aumentando la presión interna del recipiente para producir deformaciones permanentes en el liner y favorecer su vínculo con el compuesto [4]. En la Figura 3 se muestra el diagrama de zunchado y un ciclo normal de trabajo del cilindro. En esta figura un liner metálico con capacidad portante es definido como aquel capaz de resistir el pandeo producido por un nivel de tensiones de compresión (E) mostrado en la figura (consecuencia de la tensión de bobinado de las fibras) cuando el compuesto y el liner no están pegados. Tanto el liner como el material compuesto son diseñados para minimizar el ciclo de histéresis del liner metálico en su ciclo de tensiones debido a las presiones de operación (desde E hasta J y hasta E nuevamente).

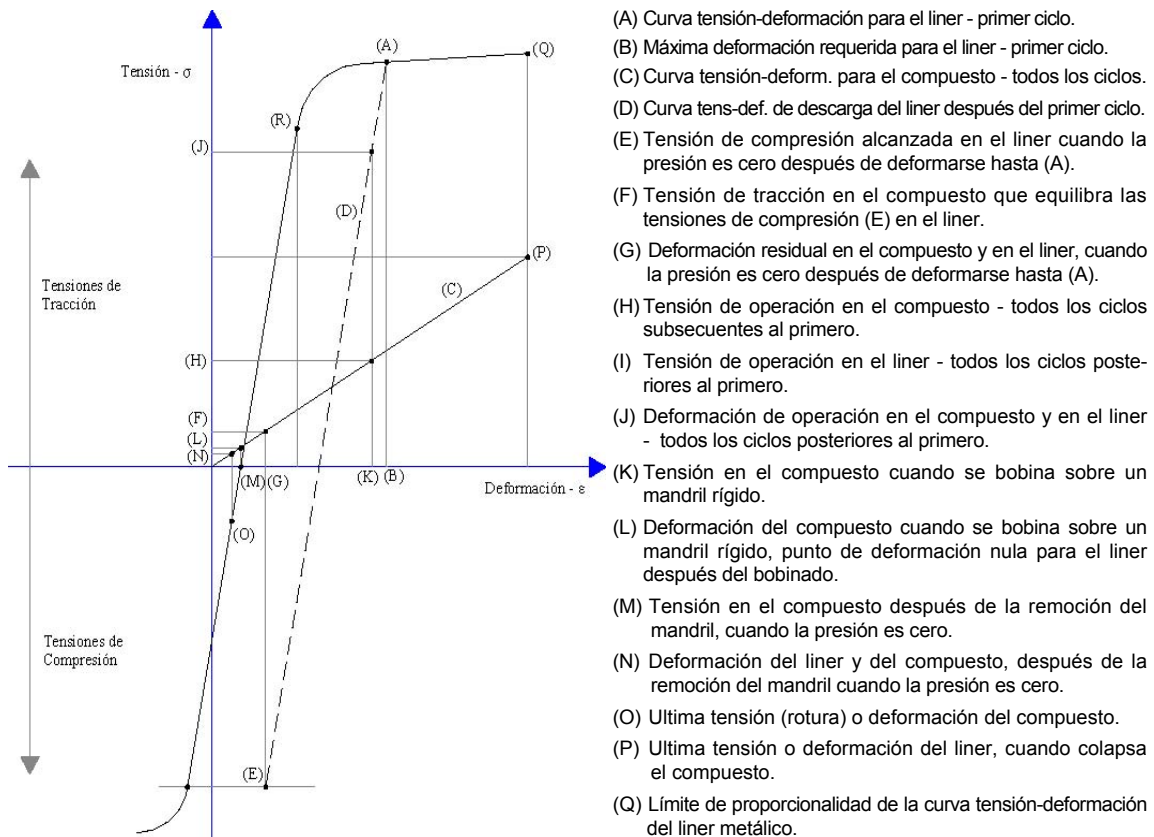


Figura 3 Diagrama tensión-deformación y proceso de zunchado del liner [4].

Podría mantenerse al mandril sin tensiones (o deformaciones) mientras se procede con el bobinado, considerando un mandril rígido (punto M, mandril presurizado). Sin embargo una vez removido el mandril el liner entrará en un estado de compresión, debido a la presión de bobinado (punto O). Cuando la diferencia de presiones interior-exterior es nula la magnitud de esta compresión de equilibrio dependerá de los espesores relativos, de la rigidez del compuesto y de la rigidez del liner. Cuando se aplica la carga de presión de zunchado, el liner metálico se deforma hasta (A), este punto está fijado por el material, el espesor y la carga. En general se puede decir que el estado de tensiones plano que se produce en el liner debido a la presión de zunchado debería al menos producir un 1 % de deformación específica.

Cuando la carga inicial es removida después de la deformación plástica, el liner sigue la curva de descarga paralela a la curva de carga (curva A-E). Así se tiene un nuevo punto de equilibrio para la compresión ejercida por la pretensión de las fibras, punto E (deformación G).

Los tanques metálicos reforzados con materiales compuestos se diseñan de forma tal que el punto E no exceda:

- a) La tensión crítica de pandeo del liner, cuando el mismo no está pegado al compuesto.
- b) Una fracción prefijada del límite elástico de compresión del liner.

La presión de operación será siempre menor que la presión de zunchado. De esta forma durante el ciclo de aplicación de cargas de presión el rango de deformaciones del liner estará situado entre los puntos G y K. Para el presente análisis se estipuló que el punto no superaría una cierta fracción del límite elástico de compresión del liner. Como consecuencia del zunchado en la interfase metal-compuesto se tendrán solo esfuerzos de fricción puros.

3. PROCESO DE DISEÑO DE RECIPIENTES DE PRESIÓN DE ALUMINIO REFORZADOS CON MATERIALES COMPUESTOS

El diseño comienza una vez que se han determinado todos los requerimientos, incluyendo la forma (diámetro y longitud), sus características (presión, peso y volumen), ambiente en el que estará trabajando (humedad, temperatura y cargas externas) y cualquier otro aspecto necesario.

Conociendo estos parámetros se puede realizar un cálculo preliminar de la geometría por el método de la red [3], que determina las tensiones sobre los meridianos y paralelos considerando que las cargas son soportadas únicamente por la fibra de vidrio, de modo de establecer su comportamiento ante las solicitaciones y establecer los espesores necesarios de material compuesto.

La selección de los materiales constitutivos está regida por las características requeridas y por el ambiente en los que deberán desempeñarse. El método de bobinado de fibras continuas (helicoidal y circunferencial) se elige de modo de obtener la geometría deseada con el equipo disponible. A partir de aquí se debe realizar un análisis detallado usando el ángulo de bobinado establecido, el espesor de fibras calculado, y el peso de compuesto resultante mediante el método de elementos finitos [5]. Resulta necesaria una descripción precisa de la ubicación/dirección del filamento en todos los puntos y de las tensiones iniciales, a fin de lograr una evaluación creíble de la integridad y durabilidad estructural del recipiente.

En la Figura 4 se muestra el diagrama de flujo del proceso utilizado para el diseño y análisis.

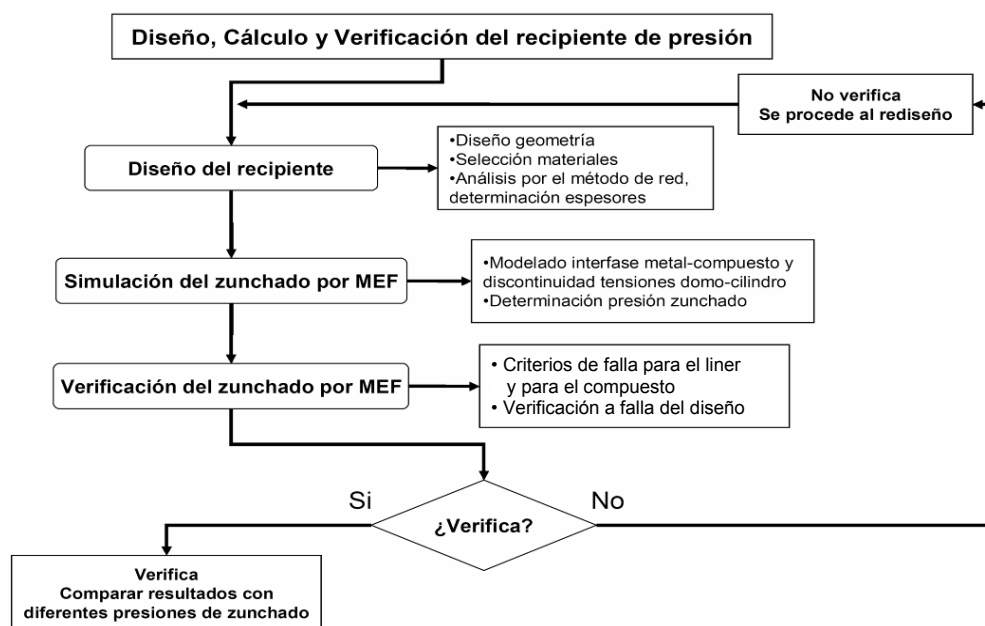


Figura 4 Proceso de diseño, modelado y verificación utilizado.

El análisis de tensiones y deformaciones mediante el método de elementos finitos [6] permite al diseñador evaluar adecuadamente las tensiones de discontinuidad en la unión domo-cilindro y probar diferentes soluciones constructivas hasta obtener la más satisfactoria.

El método aceptado en forma general consta de tres etapas y su ejecución correcta define en buen grado la eficiencia del cálculo [7].

Primera etapa: definición de las hipótesis de cálculo, las cuales surgen de la combinación de las acciones a las que estará sometida la estructura y de las condiciones de contorno.

Segunda etapa: proceso de cálculo, que en su forma más general implica definir una geometría, adoptar un material para esta geometría y aplicar una serie de hipótesis de cálculo.

Tercera etapa: Análisis de los datos recabados y modificación de la geometría y la composición del material hasta conseguir un diseño eficiente que cumpla con los requisitos impuestos. Puede ocurrir que sea necesario realizar las etapas anteriores nuevamente.

Se da entonces una variación en el proceso de cálculo clásico, ya que además de diseñarse la configuración geométrica como en el proceso clásico, también se están diseñando los materiales de la estructura de modo que satisfagan todos los requerimientos.

4. EJEMPLO: DISEÑO DE UN RECIPIENTE REFORZADO CON COMPUESTOS

Como ejemplo de lo expuesto se presentan los resultados obtenidos para el diseño y cálculo de un recipiente de presión reforzado con compuestos para uso en automóviles propulsados por GNC [8]. La geometría está íntimamente ligada a los materiales, ya que las propiedades de estos determinan los espesores necesarios del liner y del compuesto.

El material del liner debe ser dúctil y a la vez resistente, por ese motivo se elige el aluminio 6061-T6 cuyo módulo de elasticidad es $E = 69637 \text{ MPa}$, su tensión de fluencia $\sigma_f = 296 \text{ MPa}$ y su tensión de rotura $\sigma_R = 413,7 \text{ MPa}$. Para el bobinado se utilizan fibras de Vidrio E en una matriz Epoxi, debido a su bajo costo. El módulo de elasticidad en la dirección de la fibra es $E = 44130 \text{ MPa}$ y su tensión de rotura $\sigma_R = 1020 \text{ MPa}$.

El diseño se basa en la utilización del método de red [3] bajo las siguientes hipótesis:

- La presión de diseño es tres veces superior a la de trabajo, por lo tanto tenemos $P = 60$ MPa.
- Se considera que el colapso de la fibra de vidrio puede ocurrir a un 50 % de su tensión de rotura.
- La geometría del liner está predefinida en base a trabajos y ensayos anteriores.

La geometría se divide en dos partes: el cilíndrico y los domos.

Tramo cilíndrico: la longitud de este tramo es de 0,50 m y el diámetro base del liner sobre el cual se toman los espesores es de 0,314 m (con un espesor de 7 mm). Mediante la aplicación del método de red, el ángulo y espesores del bobinado en este tramo resultan:

$$\alpha = 11,17^\circ \quad T_{\text{tot}} = 0,0282 \text{ m} \quad T_c = 0,0184 \text{ m} \quad T_h = 0,0098 \text{ m}$$

siendo T_c el espesor del bobinado circunferencial y T_h el del helicoidal.

Domo: la geometría del liner en el domo está detallada en [8] y su espesor varía de un mínimo de 0,007 m a un máximo de 0,025 m aproximadamente. Las características del bobinado sobre el domo dependen de la disposición de las fibras, la geometría del liner en este tramo y de las características del bobinado en el tramo cilíndrico (se emplea la ecuación geodésica aproximada).

En la Figura 5 se muestra la geometría general del cilindro reforzado con compuesto, como así también un detalle de la geometría del domo.

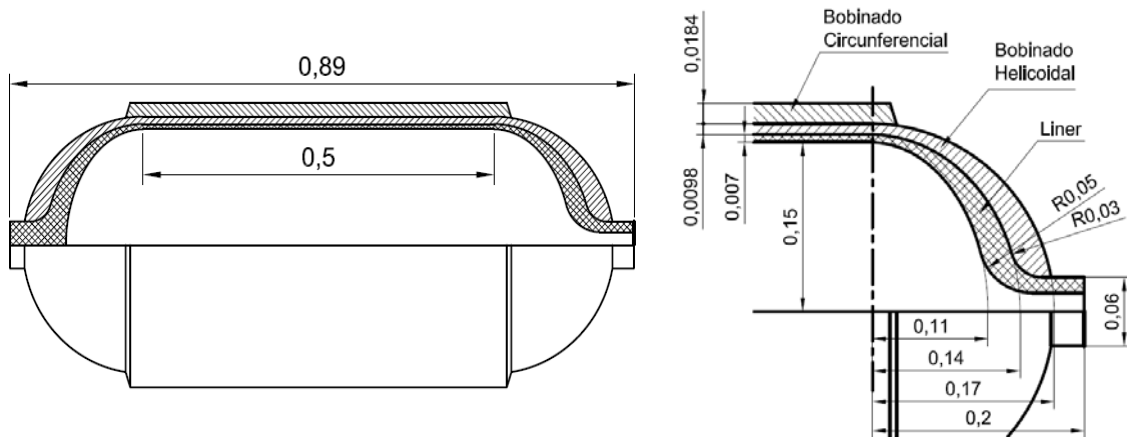


Figura 5 Geometría del recipiente bobinado y detalle del domo (dimensiones en metros).

Para determinar la presión de zunchado, la cual produce deformaciones plásticas en el liner, se aplicó la teoría de vigas de materiales compuestos [9] de modo de obtener las contribuciones de ambos materiales (aluminio y compuesto) a la capacidad portante del recipiente.

A través de esta teoría podemos determinar dos diagramas, el primero muestra tensiones equivalentes en función de la presión (Figura 6) y el segundo muestra deformaciones equivalentes en función de la presión (Figura 7). Con estos diagramas se puede determinar una presión de zunchado cuya magnitud provoca en el liner una deformación plástica del orden del 1%. Para obtener estos diagramas se considera que el espesor del recipiente es relativamente pequeño respecto del radio del cilindro y se tiene un caso de tensión plana, de esta forma la tensión efectiva de Von Mises se puede determinar fácilmente en función de las tensiones membranales.

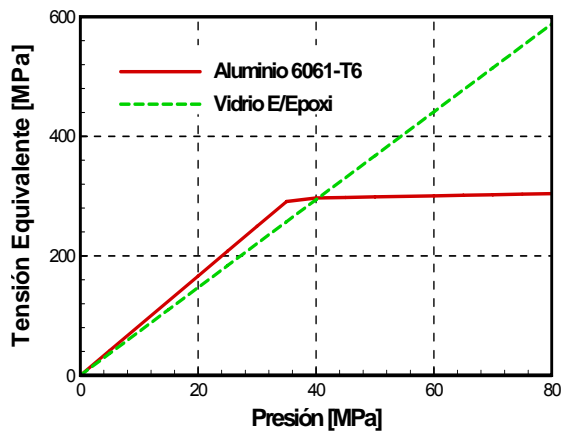


Figura 6 Tensión en función de la presión de carga.

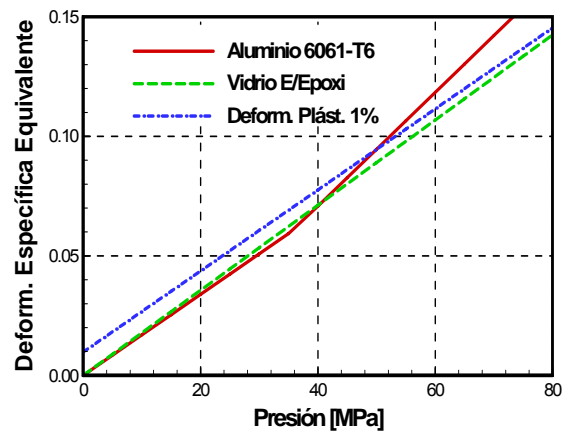


Figura 7 Deformación en función de la presión de carga.

La línea de trazos en la Figura 7 corresponde a una deformación del orden del 1%. La presión de zunchado, alrededor de 48 MPa, se lee en intersección de la línea de trazos con la curva correspondiente al aluminio. Para llevar a cabo el análisis de zunchado se debe determinar el modelo geométrico a analizar y luego el tipo de análisis que permita resolver el problema planteado.

Las hipótesis para el análisis fueron:

- El espesor en los domos permite descartar los cuellos.
- Debido a la simetría axial se analiza una cuarta parte del recipiente.
- El compuesto se modela con elementos sólidos cuyo material es función del ángulo de bobinado, según la zona.
- La presión de análisis es $P = 48$ MPa, sin embargo a fines comparativos se consideran también presiones de 44 y 52 MPa.
- El análisis es del tipo no lineal estático.

El modelo geométrico adoptado se muestra en la Figura 8 y el mallado en la Figura 9.

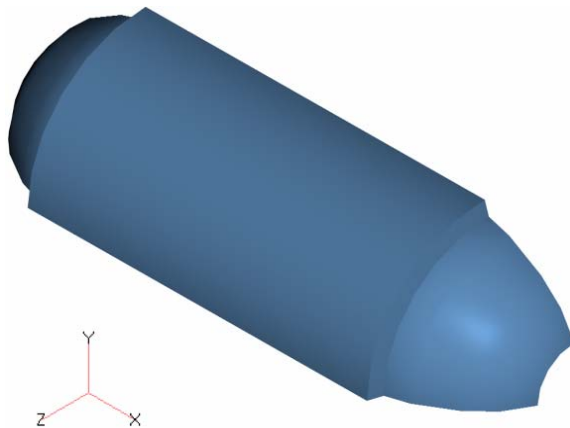


Figura 8 Modelo geométrico.

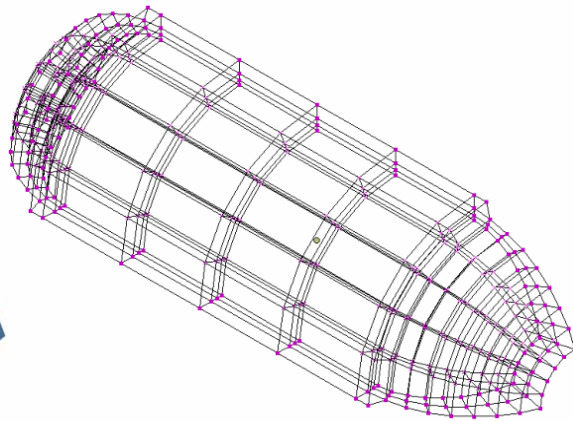


Figura 9 Malla del modelo geométrico.

La adopción de una cuarta parte del recipiente permite tener un modelo numérico con menor cantidad de nodos lo simplifica el cálculo. Las condiciones de apoyo corresponden al modelo reducido utilizado, en los planos de corte del recipiente (XZ y XY) se colocan empotramientos deslizantes que permiten la libre expansión del cilindro cuando se aplica la carga de presión.

Por último, sobre los cuellos de los domos los nodos están rígidamente empotrados, esto se asemeja bastante al comportamiento real. La carga de presión a aplicar es 48 MPa. Debido a que el software utilizado realiza incrementos de carga y genera una serie de resultados, para poder obtener el estado de tensiones residuales del zunchado se tuvo que aplicar una carga casi nula (10^{-7} MPa) a continuación de la de zunchado.

El análisis por elementos permitió determinar que la deformación plástica experimentada por el liner es del orden del 1%. Como elemento patrón para determinar la deformación específica se tomó el radio del liner en la sección cilíndrica, por ser este tramo el que sufre mayores deformaciones.

La Figura 10 es un gráfico de las deformaciones totales en función de las salidas por incremento de carga (Pasos de Carga). El paso de carga 10 corresponde a la aplicación de la presión de zunchado, mientras el paso 21 corresponde al estado de deformación plástica residual después del zunchado.

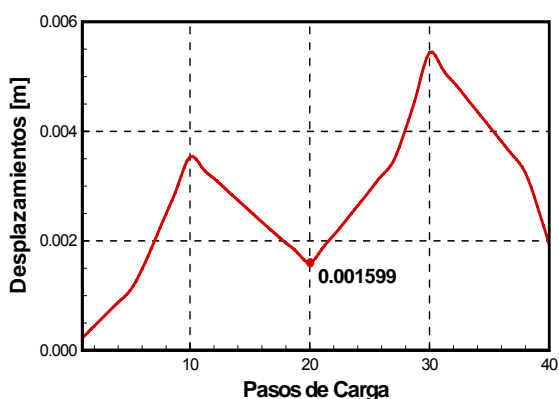


Figura 10 Deformación plástica producto del zunchado.

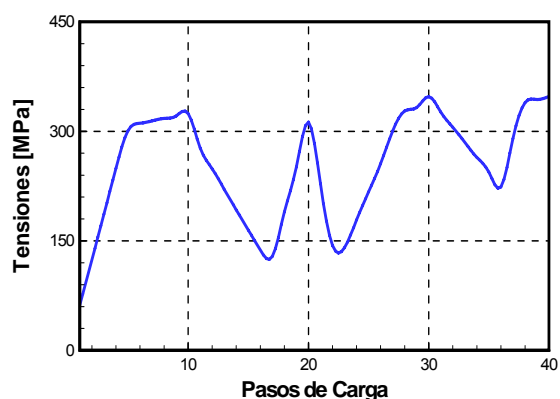


Figura 11 Tensiones de Von Mises en función de las salidas.

El máximo desplazamiento permanente después del zunchado es de 1,6 mm. Se determinó que los máximos están en la parte central del tramo cilíndrico. El diagrama más significativo respecto al zunchado se presenta en la Figura 11 donde se han graficado las tensiones de Von Mises en función de la carga aplicada.

Como se comentó, el paso 21 corresponde al estado residual de tensiones del zunchado. Después de la carga de zunchado (paso 10) la tensión comienza a disminuir porque la presión disminuye. Sin embargo se puede observar que cerca del paso 17 la tensión se recupera y tiende a aumentar hasta un valor del orden del 300 MPa. Este valor es el correspondiente al estado residual de tensiones.

Este fenómeno es el resultado del proceso de zunchado. Cuando se descarga el cilindro después del zunchado existe un punto a partir del cual el liner deformado plásticamente se resiste a seguir cediendo. Mientras el compuesto, elástico por naturaleza, tiende a comprimir el liner de aluminio para poder retornar a su estado inicial. Por supuesto existirá un punto de equilibrio donde el liner quedará con cargas de compresión debido al compuesto y el compuesto con cargas de tracción debidas al liner deformado. La verificación a falla se realiza empleando una presión cuyo factor de carga es 3,3 con lo cual la presión de verificación es 66 MPa. Se resolvió aplicar esta presión a continuación del análisis de zunchado de modo que las condiciones iniciales correspondan al estado residual de tensiones del zunchado. El tipo de análisis es similar al anterior, como también lo son las condiciones de apoyo.

De la simulación realizada se obtuvo que el coeficiente de seguridad es 1,19 (cociente entre la tensión de rotura del aluminio σ_R y por la tensión efectiva de Von Mises obtenida como resultado del análisis usando la carga mayorada, 3,3 veces la carga); por lo tanto el diseño se consideró como válido. Se toma la tensión de rotura del aluminio como patrón de comparación por ser la menor, además el aluminio posee un mayor módulo de rigidez que el compuesto y toma más carga que este.

Posteriormente a la verificación se compararon las tensiones y deformaciones obtenidas en el cilindro para tres presiones de zunchado diferentes en un rango de ± 4 MPa. Las Figuras 12 y 13 contienen respectivamente los desplazamientos totales y la tensión efectiva de Von Mises, en función de la carga aplicada para las tres presiones de análisis.

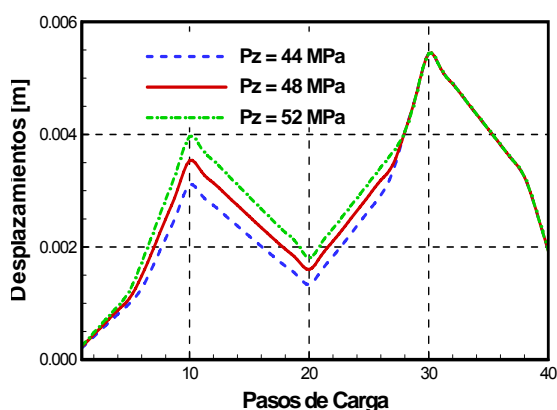


Figura 12 Desplazamientos totales.

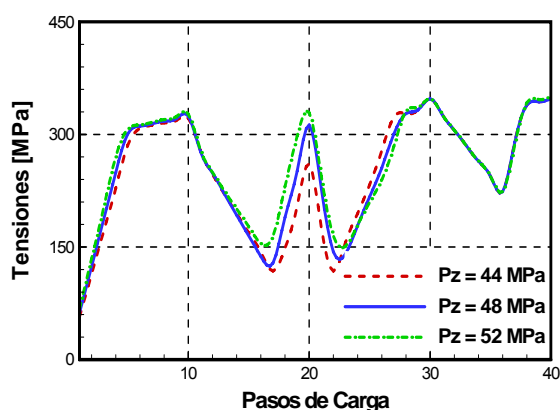


Figura 13 Tensiones efectivas de Von Mises.

Como puede observarse en los gráficos anteriores, al aumentar la presión de zunchado aumenta también el estado residual de tensiones y debe tenerse presente que este estado podría alcanzar un valor que provocara la inestabilidad del liner (pandeo). Si este efecto se hiciera presente, el software de elementos finitos alerta al usuario. Desde el punto de vista de las deformaciones se puede ver que la presión de 44 MPa no es suficiente para provocar una deformación del 1%, y este factor es limitante porque el principal objetivo es producir una deformación plástica de este orden.

Es interesante observar que existe una zona (pasos 5 al 11) donde las tensiones se mantienen casi constantes, mientras que las deformaciones aumentan rápidamente, concordando con el campo plástico del aluminio. Esta conducta coincide con el comportamiento real, lo que valida el análisis realizado. En cuanto al efecto de la presión de zunchado, se observa que no afecta en un alto porcentaje a la tensión alcanzada durante la verificación. Esto se debe a que el ciclo de histéresis (carga-descarga) es función de la presión de plastificación y la presión de verificación resulta igual para los tres casos.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman el modelo matemático utilizado para el análisis del zunchado y la verificación a falla del diseño.

El comportamiento después del zunchado del modelo del recipiente reproduce adecuadamente un proceso real de estas características.

El desempeño del material es correcto en todo el rango de análisis ya que exhibe, además del comportamiento elástico, un campo plástico con grandes deformaciones producidas por bajos niveles de carga como sucede en la realidad.

6. REFERENCIAS

- [1] S.T. Peters, W.D. Humphrey, R.F. Foral, *Filament Winding Composite Structure Fabrication*, Sampe, Enero 1991.
- [2] S.T. Peters, W.D. Humphrey, *Engineered Materials Handbook: Composites, Filament Winding, Volume 1*, ASM International, 1998.
- [3] M. Marchetti, D. Cutolo, *Tecnologie dei Materiali Compositi*, Edizioni Scientifiche Associate, 1974.
- [4] R.E. Landes, *Glass Fiber Reinforced Metal Pressure Vessel Design Guide*, NASA CR-120917, Julio 1972.
- [5] E.J. Barbero, *Finite Element Analysis of Composite Materials*, CRC Press, 2007.
- [6] O.O. Ochoa, J.N. Reddy, *Finite Element Analysis of Composite Laminates*, Kluwer Academic Publishers, 2006.
- [7] P. Antequera, L. Jiménez, A. Miravete, *Cálculo y Diseño de Estructuras de Materiales Compuestos de Fibra de Vidrio*, Secretariado de publicaciones de la Universidad de Zaragoza, 1993.
- [8] W.B. Castelló, *Diseño y Análisis de Recipientes de Presión Reforzados con Materiales Compuestos*, Trabajo final, Departamento de Aeronáutica, FCEfYN, UNC, Julio 2001.
- [9] J.C. Massa, E.J. Barbero, A Strength of Materials Formulation For Thin Walled Composite Beams With Torsion, *Journal of Composite Materials*, **32**(5): 1560-1594, 1998.