



Optimización del desempeño de componentes basados en materiales compuestos carbono-epoxi empleados en la industria aeroespacial

Germán Alejo Remondegui, Natalia Romano

Compuestos Estructurales Termorrígidos (CET), INTEMA, CONICET, Mar del Plata

Correo Electrónico: gerremondegui@gmail.com

Dirección: Av. Juan B. Justo 4302 - CP (B7608FDQ), Buenos Aires, Argentina

Tópicos: Materiales, Procesos

I.	Objetivo	Pag. # 3
II.	Justificación	Pag. # 3
III.	Alcance	Pag. # 4
IV.	Desarrollo del Trabajo	Pag. # 4
V.	Conclusiones	Pag. # 9
VI.	Bibliografía / Referencias	Pag. # 10

I. Objetivo

El presente trabajo se enmarca en los desarrollos llevados adelante en conjunto entre el Grupo de Compuestos Estructurales Termorrígidos de INTEMA y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). En particular, busca resolver desafíos tecnológicos planteados en el desarrollo de tanques ultralivianos para el vehículo espacial Tronador II, a través de una serie de ensayos y estudios que se realizarán a prototipos de dichos tanques. Las actividades para concretar el objetivo planteado son las siguientes:

- Fabricar tubulares basados en materiales compuestos reforzados con fibras de carbono utilizando la técnica de *filament winding*.
- Estudiar el efecto de las variables de procesamiento en el nivel de defectos del material compuesto.
- Obtener tubulares con menos del 3% de porosidad y contenido de fibras mayor al 50% en volumen.
- Fabricar un tubular capaz de soportar una presión interna mayor a los 600 bares (50% más que la presión de operación).
- Modelar el comportamiento mecánico del componente por elementos finitos y validar los resultados con valores experimentales de deformación y presión de rotura.

II. Justificación

Los tanques ultralivianos son un componente de gran importancia en los vehículos lanzadores, ya que el ahorro en peso que permiten se traduce directamente en un aumento en la carga útil que pueden colocar en el espacio [1]. El costo estimado de cada kilogramo enviado al espacio es cercano a US\$ 20.000 [2]. En el mercado actual, la mayoría de los recipientes a presión son metálicos o poseen un *liner* interior metálico que facilita el procesamiento y actúa como barrera para los fluidos contenidos (tanques tipo I, II y III). Estas partes metálicas elevan considerablemente el peso de los componentes. En los tanques tipo V desarrollados para CONAE, tanto la retención del fluido como la integridad del componente son aseguradas por el laminado de material compuesto de resinas reforzadas con fibras de carbono (CFRP).

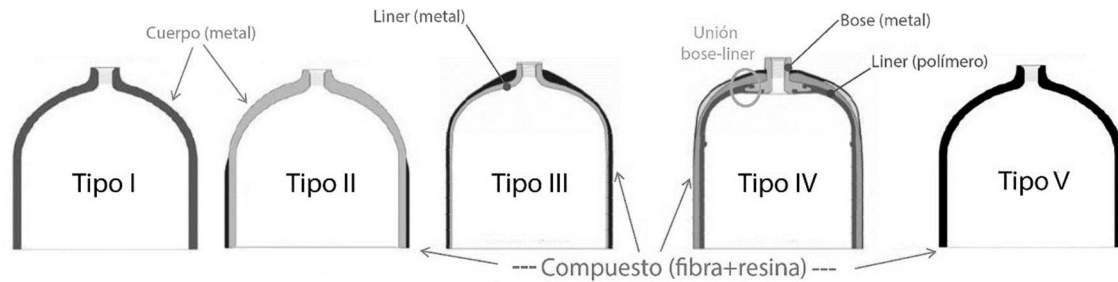


Figura 1: Tipos de recipientes a presión. [3]

Un problema de gran relevancia en los tanques sin *liner* es que cualquier fisura no crítica en el material compuesto genera una pérdida del gas contenido, lo que se traduce en la falla del componente a presiones menores que las de diseño. Se ha demostrado que los defectos de fabricación como poros y zonas secas inducen una disminución en la resistencia al corte interlaminar en los materiales compuestos, disminuyendo el umbral de deformación (y por lo tanto presión interna) a partir del cual aparecen las fisuras [4]. Por esta razón deben encontrarse las condiciones de procesamiento que permitan disminuir el nivel de poros y zonas secas a valores mínimos, al tiempo que se incrementa el contenido volumétrico de fibras (mayor volumen de fibras se traduce en un menor peso del tanque). El trabajo prevé diseñar, fabricar y caracterizar prototipos cilíndricos de fibra de carbono y matriz epoxi creados mediante el proceso de filament winding. Se obtendrán valores de porosidad y de la fracción volumétrica de fibras en condiciones de procesamiento diferentes, observando cómo influyen sobre la falla del componente sometido a presión interna. Se utilizará la simulación como parte importante del diseño con el objetivo de encontrar un modelo numérico que prediga los resultados.

III. Alcance

El presente trabajo se limita a la fabricación, caracterización y simulación mecánica con elementos finitos de prototipos de tanques ultralivianos con forma cilíndrica, los cuales tendrán un diámetro interno de 100,6 mm, y un largo aproximado de 600 mm. Los tubulares serán elaborados con resina epoxi y fibra de carbono, a través del método de filament winding.

IV. Desarrollo del trabajo

El trabajo consta de tres etapas principales: fabricación de tubulares por filament winding, caracterización del material compuesto y simulación.

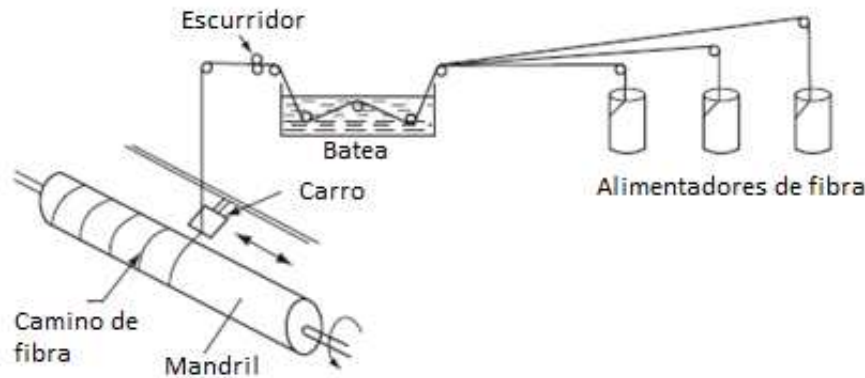


Figura 2: Esquema del proceso de filament winding húmedo. [5]

Durante la primera etapa se buscó el control adecuado de las condiciones del proceso que permita disminuir el nivel de defectos y mejorar las propiedades de los componentes fabricados, a través de la reducción de la porosidad y el aumento de la fracción volumétrica de fibras.

Las condiciones del proceso a modificar para intentar lograr el objetivo fueron: velocidad de rotación del mandril, configuración del enrollado (ángulo existente entre el eje axial del mandril y la fibra enrollada), viscosidad del sistema reactivo en la batea (dependiente de la temperatura y sus características químicas), el tipo de batea (con extracción o no del exceso de resina) y la tensión de las fibras. La velocidad de giro del mandril se modifica desde el código de laminación, al igual que la configuración de enrollado. La viscosidad del sistema reactivo se considera en el momento en el que está en la batea a una temperatura constante (en el mandril, a temperatura ambiente, aumenta la viscosidad). Con un dinamómetro se mide la tensión de las fibras, previo al enrollado y con el fluido ya en la batea. Esta tensión depende de la tensión que provee el ajuste de los alimentadores y la agregada por el camino que recorre la fibra en la batea. Se debe mencionar que el valor de tensión medido e informado solo es inicial, ya que al momento de comenzar la laminación la tensión aumenta o disminuye según el ángulo. Otras condiciones como ancho y distribución de la banda de fibras, distribución de la matriz, avance del curado, entre otros también afectan al producto final, pero no fueron modificados sustancialmente en el desarrollo de este proyecto.

Las condiciones de procesamiento para cada tubo son las presentadas en la Tabla 1. Las condiciones iniciales fueron elegidas de acuerdo a la experiencia previa del grupo de trabajo en la fabricación de tubulares.

N° de tubo	Tipo de batea	Vel. de giro [mm/min]	Viscosidad [cP]	Tensión inicial de las fibras	Ángulos de enrollado [°]
0	Rodillo	6000	215	baja	± 86 / ±34 / ±62 / ±19
1	Rodillo	2000	215	alta	±54,74
2	Rodillo	6000	215	alta	±54,74
3	Rodillo	2000	215	baja	±54,74
4	Inmersión	2000	320	alta	±54,74
5	Inmersión-DB	2000	320	alta	±30 / ±60 / ±86
6	Inmersión-DB	2000	320	alta	±54,74
7	Inmersión	2000	320	alta	±54,74
8	Inmersión	2000	320	alta	±54,74
9	Inmersión	2000	320	alta	± 86 / ±54,74 / ± 87

Tabla 1: Condiciones utilizadas en cada tubo.

En este proyecto, la tensión inicial de las fibras se considera alta para valores mayores a 4,5 kgf y baja para menores a 2 kgf.

Los tubos N°0, 1, 2 y 3 fueron utilizados para evaluar las distintas condiciones de tensión de fibras y velocidad de giro, centrandos los cambios realizados en dichas variables. La selección de los valores empleados para las distintas variables se basa en un estudio realizado por la firma Toray® que perseguía el mismo objetivo [6]. A partir de la evaluación realizada de porosidad y contenido de fibras, se fijaron las condiciones de velocidad de giro del mandril (2000 mm/min) y la tensión inicial de las fibras (alta), ya que se consideran óptimas para los fines de este proyecto.

Para el caso del tubo N°4, se decidió realizar el cambio del tipo de batea. El cambio fue promovido por los datos observados en un trabajo anterior realizado por el grupo para laminaciones realizadas en otro equipo de filament winding donde se alcanzaron valores muy bajos de porosidad y altos valores de contenido de fibra, indispensables en nuestro proyecto.

En el tubo N°5 se utilizó el sistema DGEBA/amina, como de aquí en adelante, a una viscosidad similar a la de los tubos anteriores, con la misma batea y tensión de fibras que el tubo anterior pero el enrollado se produjo a distintos ángulos. El cambio introducido en el sistema reactivo fue motivado por estudios de K_{1c} realizados en el grupo, los cuales muestran un mejor comportamiento del nuevo sistema adoptado. El cambio de ángulos buscaba el estudio de la influencia de la batea de inmersión a distintos ángulos. La iniciativa de disminuir el ángulo de devanado era necesaria debido a la presencia de este tipo de ángulos para la laminación de un tanque (proyecto futuro). Además, se utilizó el dispositivo doctor blade.

Los tubos N°6 y N°7 también fueron realizados en el mismo mandril, en la misma fecha. Se volvió a la configuración del entramado de ±54,74°. En el tubo n°6 se utilizó el doctor blade y en el tubo n°7 no. Las decisiones tomadas buscaron

determinar los cambios de propiedades finales que introducía el cambio de resina, analizar la posibilidad práctica del uso del doctor blade y su influencia.

El tubo n°8 se realizó de la misma forma que el tubo n°7 pero de mayor extensión, para que pueda utilizarse en un ensayo de prueba hidráulica, además de poder evaluar la repetitividad en la caracterización del material. El último tubo también se fabricó en las mismas condiciones, excepto en el número total de capas y la secuencia de laminado utilizada, necesarias para la finalización del proyecto.

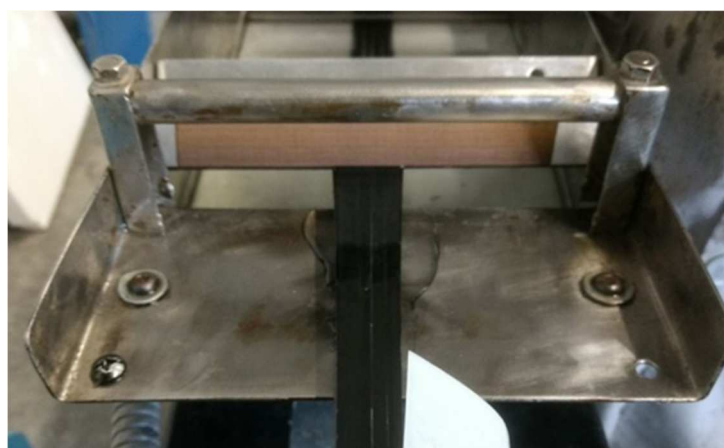


Figura 3: Dispositivo escurridor de resina Doctor blade (DB).

Para efectuar la caracterización del material compuesto (segunda etapa) se calculó el porcentaje de porosidad, mediante microscopía óptica, y el porcentaje de fibras por digestión.

El análisis de porosidad se realizó tomando en cuenta no solo el valor final de la porosidad sino también su distribución, ya que cuanto mayor sea el tamaño del poro más propenso será a la iniciación de fisuras. Los valores obtenidos son presentados en la Tabla 2.

N° de tubo	Porosidad [%]	Tamaño medio de poros [mm ²]	Cont. de fibras por digestión
0	4,89	0,005	0,4093
1	4,30	0,002	0,5008
2	4,55	0,004	0,4300
3	1,97	0,003	0,4397
4	0	0	0,5388
5	7,62	0,004	0,5077
6	6,06	0,003	0,4978
7	2,58	0,001	0,5177
8	2,90	0,003	0,4788
9	2,33	0,002	0,5543

Tabla 2: Porcentajes de porosidad.

En la última etapa, se buscó predecir la presión de falla por simulación de elementos finitos, posteriormente determinada mediante una prueba hidráulica, de

los tubos N°1 y N°9. Para ello, se evaluaron dos criterios de daño por separado y se tomó como referencia el primero en ocurrir, es decir, para el menor valor de presión. Los criterios utilizados son los siguientes:

- Falla por tensión: se corrobora que los esfuerzos en todas las direcciones y el esfuerzo de corte no superen los valores de resistencia asignados a cada lámina. Se pueden identificar tres modos de falla: longitudinal, transversal o de corte.
- Hashin: se caracteriza por ser un indicador del inicio de daño. Se diferencian cuatro modos de falla: falla de fibra en tracción, falla de fibra en compresión, falla de matriz en tracción y falla de matriz en compresión.

Para el tubular N°1 la falla se predijo a una presión de 154 bares por los dos mecanismos en simultáneo. Dicho valor es mayor que la obtenida durante la prueba hidráulica (135 bares). Para el tubo N°9, en cambio, la presión de falla de simulación fue de 609 bares donde se superó la tensión de corte interplanar. Por lo tanto, la presión de falla predicha por el modelo numérico se encuentra por debajo del valor obtenido para la prueba hidráulica, el cual fue 627 bares.

Finalmente, se evalúa la validez de los resultados comparando las deformaciones circunferenciales y longitudinales medidas con strain gage durante la prueba hidráulica del tubo N°9 con las predichas por el modelo numérico.

Luego de analizar las presiones de falla según los criterios de daño seleccionados, es necesario corroborar si el comportamiento del material utilizado en la simulación coincide con el real. Si se tiene en cuenta solamente la presión de falla no es suficiente para asegurar la veracidad de los resultados. Esto sucede porque no se puede afirmar que el criterio adoptado represente físicamente lo que ocurre durante la prueba hidráulica. Consecuentemente, para verificar la correcta implementación del modelo numérico y las propiedades utilizadas para el material, es necesario comparar las deformaciones.

Los resultados son presentados en la Figura 4.

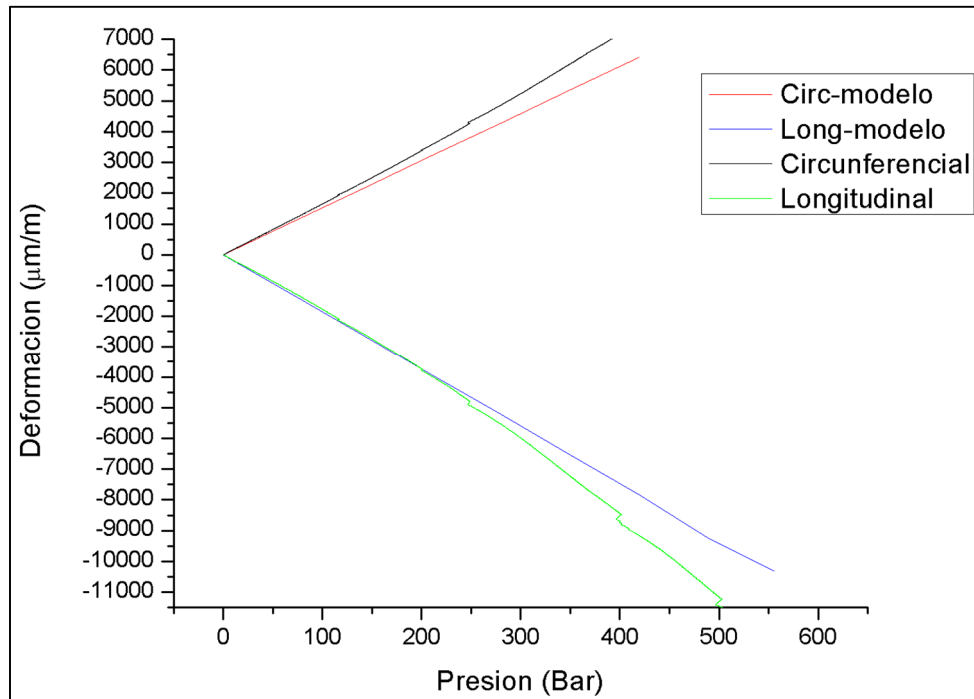


Figura 4: Gráfico de deformación vs presión real y simulado.

Las deformaciones reales son, en ambas direcciones, levemente mayores para cada presión que los valores simulados. Para la deformación circunferencial se pueden identificar diferencias a través de todo el rango de presiones. Para la deformación longitudinal, en cambio, las rectas se mantienen prácticamente idénticas hasta una presión interna de aproximadamente 250 bares, y a partir de ese punto las deformaciones reales comienzan a separarse a gran velocidad.

V. Conclusiones

En este proyecto se propuso, como principal objetivo, la optimización de las condiciones de procesamiento de tubos de material compuesto de resina epoxi y fibra de carbono, para lograr minimizar la porosidad por debajo del 3% y aumentar el contenido volumétrico de fibras por encima del 50%. Al evaluar las distintas condiciones de procesamiento de los tubos, puede distinguirse un conjunto de condiciones más apto para la fabricación de los tubulares: tensión de fibra alta (cerca a 5 kgf) y velocidad de giro del mandril baja mejoran el contenido de fibras del tubo considerablemente. La configuración de enrollado de $\pm 54,74^\circ$ evita la generación de zonas secas que se producen en la unión de capas con distintos ángulos, mientras que ángulos menores o iguales a $\pm 30^\circ$ favorecen la aparición de zonas secas y poros. La impregnación en batea de inmersión comprobó ser superior a aquella de rodillo. El agregado de capas exteriores e interiores cercanas a 90° mejora las propiedades mecánicas, al mismo tiempo que asegura valores de porosidad por debajo del objetivo planteado.

Los resultados de la presión de falla obtenidos mediante simulación por elementos finitos resultaron muy cercanos a los valores alcanzados durante los ensayos de prueba hidráulica. Se asume que la discrepancia en los resultados

radica principalmente en la imposibilidad de incorporar la influencia de porosidad y zonas secas a los modelos de falla.

Las diferencias encontradas entre la deformación predicha por la simulación y la prueba hidráulica pueden deberse a que la excesiva deformación haya modificado la precisión de los resultados medidos por el extensómetro. Finalmente, la predicción del modelo se considera satisfactoria, ya que el error se mantiene por debajo del 10% hasta valores elevados de presión. A partir de los 250 bares es posible que durante el ensayo ocurran fenómenos de relajación asociados al sostenimiento de la presión constante durante cierto tiempo, y eso no se computa en el modelo.

Los resultados obtenidos son fundamentales para continuar el desarrollo de tanques ultralivianos tipo V, ya que se hallaron las condiciones de procesamiento que aseguran un bajo contenido de defectos y se probó que dichas condiciones aseguran que se pueden alcanzar los valores de presión de falla de diseño. Al presente, el proyecto continúa con el procesamiento completo de los recipientes a presión (incluyendo los casquetes) y su certificación cumpliendo normas internacionales de calificación de este tipo de componentes.

VI. Bibliografía

- [1] A. López, P. Pascuini, and A. Ramos, "Al Infinito Y Más Allá: Una Exploración Sobre La Economía Del Espacio En Argentina," 2010.
- [2] J. Coopersmith, "The cost of reaching orbit: Ground-based launch systems," *Space Policy*, vol. 27, no. 2, pp. 77–80, 2011.
- [3] H. Barthelemy, M. Weber, and F. Barbier, "Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 11, pp. 7254–7262, 2017.
- [4] L. Gemin, "Fabricación y caracterización de recipientes a presión basados en materiales compuestos reforzados con fibras de carbono," Universidad Nacional de Mar del Plata, 2017.
- [5] P. K. Mallick, *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design*, vol. 20, no. 2. Chicago: Taylor & Francis Group, 2008.
- [6] D. Cohen and S. C. Mantell, "Filament Winding Impregnation Study," 2001.