



Facultad de
Ingeniería



.....
UNIVERSIDAD NACIONAL
DE MAR DEL PLATA

**FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN
DE RECIPIENTES A PRESIÓN
BASADOS EN MATERIALES
COMPUESTOS REFORZADOS CON
FIBRAS DE CARBONO**

**TESIS DE GRADO:
INGENIERÍA EN MATERIALES**

**AUTOR:
LAUTARO GEMIN**

**DIRECTOR:
DR. EXEQUIEL RODRÍGUEZ**

**MAR DEL PLATA
AGOSTO 2017**



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

RESUMEN

Los recipientes a presión tipo V o linerless permiten importantes ahorros de peso debido a que están fabricados en su totalidad de materiales compuestos. Pero este tipo de recipientes presenta varias problemáticas, como las dificultades en el proceso de fabricación, la falta de normativa específica y la microfisuración del material. Este trabajo contribuye al proceso de desarrollo de tanques tipo V, presentando inicialmente un marco teórico sobre los recipientes a presión basados en materiales compuestos y la técnica de procesamiento de filament winding. Se estudia la normativa internacional más relevante sobre recipientes a presión reforzados con material compuesto y se realiza una propuesta de normativa para recipientes fabricados solo de material compuesto. Luego se presentan los resultados de la fabricación varios tubos mediante la técnica de filament winding con el objetivo de optimizar las variables de proceso. Los mismos se laminaron sobre un mandril de acero utilizando un sistema epoxi-anhídrido como matriz y fibras de carbono como refuerzo. Por último se fabrican tres tubos de mayor espesor con la finalidad de que sean ensayados a presión.

ÍNDICE GENERAL

1 - INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1 - Introducción.....	1
1.2 - Objetivos generales.....	2
1.3 - Objetivos específicos.....	2
2 - MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 - Aspectos generales de los materiales compuestos.....	5
2.1.1 - Definición.....	5
2.1.2 - Fibras.....	5
2.1.3 - Matriz.....	7
2.2 - Los materiales compuestos de matriz polimérica.....	9
2.2.1 - Ventajas.....	10
2.2.2 - Aplicaciones.....	11
2.2.3 - Procesamiento.....	13
2.3 - Enrollamiento de filamentos.....	15
2.3.1 - Descripción del procesamiento.....	15
2.3.2 - Ventajas.....	16
2.3.3 - Variables críticas de proceso.....	17
2.3.4 - Parámetros de control en el laminado.....	19
2.4 - Recipientes a presión.....	20
2.4.1 - Tipos de recipientes a presión.....	21
2.4.2 - Mercados.....	22
2.4.3 - <i>Linerless</i>	25
3 - ANÁLISIS DE LA NORMATIVA.....	29
3.1 - AIAA.....	29
3.1.1 - Requisitos de materiales.....	29
3.1.2 - Requisitos de diseño.....	30
3.1.3 - Requisitos de calificación.....	32
3.1.4 - Requisitos de fabricación.....	33
3.1.5 - Requisitos de control de calidad.....	34
3.2 - ASME.....	35
3.2.1 - Requisitos de materiales.....	35
3.2.2 - Requisitos de diseño.....	36
3.2.3 - Requisitos de calificación.....	38
3.2.4 - Requisitos de fabricación.....	40
3.2.5 - Requisitos de control de calidad.....	40
3.3 - ISO.....	42
3.3.1 - Requisitos de materiales.....	42

3.3.2 - Requisitos de diseño.....	43
3.3.3 - Requisitos de calificación.....	43
3.3.4 - Requisitos de fabricación.....	47
3.3.5 - Requisitos de control de calidad.....	47
3.4 - Normativa para recipientes tipo V.....	48
3.4.1 - Requisitos de materiales.....	48
3.4.2 - Requisitos de diseño.....	49
3.4.3 - Requisitos de calificación.....	50
3.4.4 - Requisitos de fabricación.....	50
3.4.5 - Requisitos de control de calidad.....	51
4 - FABRICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE TUBULARES.....	53
4.1 - Descripción del equipo.....	53
4.1.1 - Descripción de la máquina.....	53
4.1.2 - Mandril.....	54
4.1.3 - Pines.....	54
4.1.4 - Alimentador de fibra.....	55
4.1.5 - Batea.....	57
4.1.6 - Devanador.....	58
4.2 - Descripción del procesamiento.....	59
4.2.1 - Creación de Código-G.....	59
4.2.2 - Laminado.....	60
4.2.3 - Curado y desmolde.....	63
4.3 - Caracterización de tubulares.....	65
4.3.1 - Determinación de densidad.....	65
4.3.2 - Determinación del espesor promedio por capa.....	65
4.3.3 - Determinación del volumen de fibra.....	66
4.3.4 - Determinación del contenido de porosidad.....	66
4.4 - Estudio de los parámetros de proceso.....	67
4.5 - Fabricación de tubulares para ensayos a presión.....	74
5 - CONCLUSIONES.....	77
6 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

1 - INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1.1 - Introducción

La tecnología de recipientes a presión está actualmente dominada por los tanques metálicos, denominados tanques tipo I. Luego existen variantes en las que el cuerpo metálico esta reforzado con un material compuesto en su exterior o tanques en los que el metal actúa sólo como revestimiento interior o *liner*, y el componente estructural está dado por el laminado exterior (tanques tipo II y III respectivamente). En estos tipos de recipientes se logra disminuir el peso total, pero la existencia de partes metálicas limita dicha disminución. Un cuarto tipo de tanques utilizan un *liner* de polímero termoplástico y el máximo ahorro de peso se obtiene para los tanques tipo V, denominados *linerless*, que no poseen revestimiento interior. Cuando se emplean fibras de carbono, se logran tanques ultralivianos con gran potencial de empleo en diversas industrias. Por ejemplo, en la industria aeroespacial, su uso permite reducir el peso de los vehículos espaciales y en consecuencia aumentar la carga útil de transporte. El costo estimado de cada kilogramo colocado en el espacio es cercano a los US\$ 20.000 [1]. A su vez, los tanques tipo IV poseen un gran potencial de utilización en la industria del transporte, para el almacenamiento de GNC o en la incipiente industria del almacenamiento de hidrógeno para alimentar vehículos eléctricos.

La obtención de nuevas formulaciones resistentes a la microfisuración y que pueda emplearse en la fabricación de componentes por *filament winding* es uno de los primeros desafíos tecnológicos que deben solucionarse para fabricar tanques ultralivianos [2]. Luego debe estudiarse el material compuesto, en cuanto a las distintas estrategias de laminado, la distribución de tensiones en los casquetes y entre las distintas capas de fibras (con distintas orientaciones) y sus mecanismos de falla. Debe resolverse también la forma de laminar sobre un mandril o alma que luego debe ser retirado. Estas problemáticas no son de resolución trivial, lo que se demuestra en el hecho de que actualmente existen muy pocas soluciones comerciales para este tipo de productos, y es limitada a aplicaciones específicas. En el año 2009 la firma Scorpius Space Launch Company (una *spin-off* de la NASA) de los Estados Unidos lanzó la línea de tanques criogénicos PRESSUREMAXX Sapphire, desarrollada para vehículos espaciales reutilizables. Tres años más tarde una segunda

empresa, Composites Technology Development Inc. del mismo país, presentó la línea de tanques Kiboko, de aplicación en satélites y vehículos aeroespaciales no tripulados (UAV).

El grupo de Compuestos Estructurales de INTEMA y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) han llevado adelante un convenio para desarrollo de tanques ultralivianos tipo V. En los últimos dos años se ha avanzado en la obtención del sistema químico resistente a la microfisuración, se ha resuelto la forma de procesar sobre mandriles solubles y se ha optimizado una secuencia de laminado mediante algoritmos genéticos y modelos de elementos finitos. Pero los nuevos materiales y formas de procesamiento desarrollados impactan en las variables de procesamiento y debe estudiarse la forma de obtener recipientes sin defectos empleando la técnica de Filament Winding. El proceso de optimización de las variables de procesamiento debe realizarse mediante un proceso iterativo de fabricación, evaluación de propiedades y corrección de parámetros de laminación. A su vez, una vez obtenidos los recipientes a presión, se deben realizar pruebas hidráulicas para verificar que se cumplen los parámetros de diseño y pruebas de estanqueidad con Helio, que es el gas que contendrán los tanques en desarrollo. Sin embargo, debido a lo novedosos de los tanques tipo V, aún no existe normativa específica que determine los ensayos necesarios para calificar este tipo de recipientes a presión. Los protocolos de calificación son el resultado de numerosos años de estudio de los procesos de diseño y daño en servicio y del análisis de fallas históricas. Los tanques *linerless* tienen un escaso tiempo de empleo en condiciones reales de servicio, y modos de falla específicos que hace que no puedan emplearse otras normas de manera directa.

1.2 - Objetivos generales

Este proyecto final se propone obtener recipientes a presión tubulares basados en materiales compuestos reforzados con fibras de carbono, empleando sistemas químicos de base epoxi. Se utilizará la técnica de *filament winding*, analizando y optimizando las principales variables de proceso. A su vez, se realizará un análisis exhaustivo de la normativa vigente para la validación de recipientes construidos con materiales compuestos, proponiendo un protocolo de ensayos a implementar para la validación de tanques tipo V.

1.3 - Objetivos Específicos

- ✓ Analizar la normativa vigente para la calificación de recipientes a presión fabricados con materiales compuestos.
- ✓ Elaborar un protocolo de ensayos para la calificación de tanques tipo V.
- ✓ Analizar y optimizar las variables de proceso (temperatura de batea, velocidad de tirado, grado de impregnación de fibra) para minimizar el contenido de defectos.
- ✓ Fabricar recipientes a presión tubulares basados en materiales compuestos reforzados con fibras de carbono utilizando la técnica de *filament winding*.

2 - MARCO TEÓRICO

En este primer capítulo se abordan diferentes aspectos teóricos que son fundamentales para el desarrollo de los temas que se tratan más adelante. Para entender las razones por las cuales los materiales compuestos son una buena elección para fabricar recipientes a presión, se presentan aspectos generales de los mismos y luego se explican las ventajas que tienen sobre otros tipos de materiales más tradicionales. También se enumeran las formas que existen para procesarlos y se explica con más detalle la técnica de *filament winding* ya que es la más utilizada para la fabricación de recipientes. Por último se desarrolla brevemente la evolución histórica de los recipientes a presión, así como también los tipos de recipientes que existen hoy en día y sus principales aplicaciones.

2.1 - Aspectos generales de los materiales compuestos

2.1.1 - Definición

Los materiales compuestos reforzados con fibras consisten en fibras de alta resistencia y alto módulo elástico unidas a una matriz más débil. Las fibras y la matriz trabajan juntas pero mantienen sus propiedades químicas y físicas originales, y combinadas producen un material con propiedades que no podrían lograr ninguno de sus dos constituyentes en forma individual.

La manera más común en la que se utilizan los materiales compuestos para aplicaciones estructurales es en forma de laminados. Los laminados se fabrican apilando varias capas delgadas de fibra y matriz hasta alcanzar el espesor deseado. La orientación de las fibras en cada capa y la secuencia de apilamiento pueden ser controladas para generar un amplio rango de propiedades físicas y mecánicas.

Además de las fibras y la matriz, pueden existir otros componentes en un material compuesto. Recubrimientos y agentes de acoplamiento se aplican sobre las fibras para mejorar su mojado y para generar adhesión a lo largo de la interface con la matriz, lo que resulta en una mejor transferencia de carga entre las fibras y la matriz. También se utilizan rellenos en matrices poliméricas para reducir costos y mejorar su estabilidad dimensional.

2.1.2 - Fibras

Las fibras son el constituyente principal de un material compuesto. Por lo general soportan entre el 70% y el 90% de la carga a la que está sometido el material y ocupan la mayor parte del volumen del mismo [3]. La principal característica de las fibras es su excelente resistencia a la tracción, lo que generalmente se atribuye a su forma de filamento la cual posee muy pocos defectos superficiales [4]. Sin embargo para la mayoría de las fibras su resistencia a la compresión es muy inferior comparada con su resistencia a la tracción.

Las fibras consisten en miles de filamentos, en donde cada uno posee un diámetro de entre 5 y 15 micrones [5]. Los refuerzos pueden presentarse en forma de fibras cortas, con longitudes de entre fracciones del milímetro y unos pocos centímetros, o de fibras continuas, las cuales son cortadas durante el procesamiento. También se pueden encontrar fibras ensambladas bidireccionalmente en forma de telas.

La elección del tipo de fibras, su longitud, su fracción volumétrica y su orientación es muy importante ya que estos parámetros tendrán una gran influencia en las siguientes propiedades del material compuesto: densidad, costo, módulo elástico en tracción y compresión, resistencia en tracción y compresión, resistencia a la fatiga, mecanismo de falla en fatiga, conductividad térmica y eléctrica.

En la mayoría de los casos, antes de ser conformadas en forma de refuerzo las fibras son sometidas a un tratamiento térmico para mejorar su adhesión con la matriz y para reducir su acción abrasiva al pasar por las máquinas de conformado.

Los principales tipos de fibras disponibles comercialmente son:

- De vidrio: son las más comunes en compuestos de matriz polimérica. Poseen módulos elásticos que por lo general se encuentran cercanos a los 80 GPa [4]. Sus principales ventajas son bajo costo, alta resistencia a la tracción, alta resistencia química y buenas propiedades aislantes. Como desventajas se encuentran su bajo modulo elástico, alta densidad, sensibilidad a la abrasión durante su manipulación, baja resistencia a la fatiga y alta dureza que causa desgaste en los moldes y herramientas utilizados.

- De carbono: se encuentran disponibles con módulos elásticos que van desde 207 GPa hasta 1035 GPa [4]. Dentro de sus ventajas se encuentran alto modulo y resistencia por unidad de peso, bajo coeficiente de expansión térmica, alta resistencia a la fatiga y alta conductividad térmica. Sus desventajas son baja deformación a la rotura, baja resistencia al impacto y alta conductividad eléctrica. Su alto costo hace que sean utilizadas principalmente en la industria aeroespacial, donde el ahorro de peso es más importante que el costo.
- Aramídicas: entre las fibras actuales son las que presentan menor densidad y mayor resistencia a la tracción por unidad de peso. Su excepcional resistencia al impacto hace que sean utilizadas en chalecos antibalas y blindajes. Como desventajas se pueden mencionar su baja resistencia a la compresión y la dificultad para ser cortadas y maquinadas.
- Naturales: se utilizan principalmente en la industria automotriz debido a que son biodegradables, se requiere poca energía para producirlas, poseen muy baja densidad y son muy buenas para atenuar ruidos. A pesar de estos están limitadas debido a su baja resistencia mecánica, su baja resistencia térmica y a su elevada absorción de humedad.
- De boro: poseen un módulo muy alto, que combinado con su gran diámetro resulta en una excelente resistencia al pandeo. Es por esta razón que los compuestos reforzados con fibras de boro presentan una buena resistencia a la compresión. Su principal desventaja es su elevado costo, que es incluso mayor al de varios tipos de fibras de carbono.
- Cerámicas: las de carburo de silicio y las de alúmina son las más utilizadas debido a su capacidad de mantener la resistencia a elevadas temperaturas. Son utilizadas en compuestos con matrices metálicas y cerámicas para aplicaciones a altas temperaturas.

2.1.3 - Matriz

La matriz cumple varias funciones en un material compuesto, mantiene a las fibras en su lugar, transfiere las tensiones entre las fibras, mantiene la rigidez y la forma de la estructura, proporciona una barrera contra un ambiente adverso, protege a la superficie de las fibras contra la degradación mecánica y las separa para frenar o reducir la propagación de fisuras.

El rol de la matriz con respecto al comportamiento en tracción del material compuesto no es muy importante, ya que las fibras son las que soportan gran parte de la carga. Sin embargo, la matriz tiene una gran influencia frente al comportamiento del compuesto ante esfuerzos de compresión y corte, ya que provee soporte lateral para que no ocurra pandeo en las fibras. Por esta razón es recomendable utilizar matrices de alto módulo. También es importante que la matriz tenga alta resistencia y tenacidad, ya que estos parámetros controlan la fisuración y la delaminación del material.

Las matrices que se utilizan comúnmente son:

- Termoplásticas: tipo de matriz polimérica en la que sus moléculas no están unidas químicamente, sino por enlaces débiles que pueden romperse temporalmente al aumentar la temperatura, permitiendo que las moléculas se reacomoden si se les aplica presión. Se utilizan generalmente con fibras cortas.
- Termorrígidas: tipo de matriz polimérica en la que, luego de ser curada, sus moléculas están unidas químicamente por enlaces entrecruzados formando una estructura tridimensional rígida. Una vez curadas no pueden ser reformadas ni fundidas. A mayor densidad de entrecruzamientos moleculares, mayor rigidez y estabilidad dimensional tendrá la matriz. Se usan principalmente con fibras continuas debido a que su baja viscosidad facilita el procesamiento. Los polímeros termorrígidos más utilizados son las epoxi, poliéster, viniléster y fenólicas.
- Metálicas: las más comunes son de aluminio y de titanio. Poseen mayor resistencia y módulo elástico que las poliméricas, además se pueden endurecer a través de tratamientos térmicos y mecánicos. Entre sus desventajas se pueden mencionar su alta densidad, sus altas temperaturas de procesamiento y su

tendencia a la corrosión en la interfaz fibra-matriz. Se utilizan generalmente cuando se necesita que el material resista por largos periodos de tiempo sometido a condiciones ambientales severas, como por ejemplo altas temperaturas.

- Cerámicas: las comúnmente utilizadas son de alúmina, mulita, carburo de silicio, nitruro de silicio y carburo de boro. Las ventajas de utilizar cerámicos es que poseen alta estabilidad térmica, elevada resistencia al shock térmico, alto módulo, buena dureza, muy buena resistencia a la corrosión y baja densidad. Sin embargo su fragilidad hace que sean muy susceptibles a la propagación de fisuras, por lo tanto la principal razón para reforzar un cerámico es aumentar su tenacidad a la fractura.

2.2 - Los materiales compuestos de matriz polimérica

A pesar de que los materiales compuestos pueden lograrse con cualquiera de las matrices mencionadas anteriormente y con múltiples formas de refuerzo, los más utilizados son los de matriz polimérica termorígida y fibras continuas.

La elección de fibras como refuerzo se debe a que poseen una resistencia mayor que si el mismo material se encontrara en forma de *bulk*, es decir con gran volumen. Esto se debe a que al poseer menor volumen existe menor probabilidad de encontrar defectos en el material. Los refuerzos también pueden encontrarse en forma de partículas, y también tienen poco volumen, sin embargo su efecto como refuerzo no es tan bueno como el de las fibras. Esto se atribuye a que el efecto de un refuerzo depende de su relación de aspecto, es decir su largo dividido su diámetro, y si esta relación es muy baja la falla del material puede ocurrir por deslizamiento entre la matriz y el refuerzo [6].

Un requisito para una buena unión es que exista compatibilidad termodinámica entre matriz y refuerzo, esto quiere decir que la matriz sea capaz de mojar al refuerzo. Para esto el líquido (la matriz) debe tener baja energía superficial con respecto al sólido (el refuerzo). Las fibras son elementos de alta energía superficial, y los polímeros por lo general tienen una energía superficial muy inferior, por lo tanto el mojado será bueno. En cambio los metales fundidos pueden tener una energía superficial mayor a la de

las fibras, por lo que el mojado será dificultoso. Por esta razón resulta muy difícil fabricar compuestos reforzados con matrices metálicas o cerámicas, y en la mayoría de los casos se utilizan matrices poliméricas.

Otro aspecto fundamental de un material compuesto es la interface entre refuerzo y matriz, la misma debe proveer de una buena unión entre ambos constituyentes. Para que la matriz alcance la totalidad de la superficie del refuerzo, la misma debe ser un líquido de baja viscosidad. Las resinas termorígidas presentan viscosidades mucho más bajas que los polímeros termoplásticos, incluso a temperaturas mucho menores, esto aporta cierta facilidad en el procesamiento y hace que haya más materiales compuestos hechos con polímeros termorígidos que con termoplásticos.

2.2.1 - Ventajas

Desde su aparición, los polímeros reforzados con fibras han reemplazado a los metales en muchas de sus aplicaciones tradicionales. Esto se debe a que este tipo de materiales poseen gran cantidad de ventajas con respecto a los metales.

La resistencia y el módulo de muchos materiales compuestos de matriz polimérica son comparables y hasta algunas veces superiores que muchos de los metales tradicionales. Si a esto le sumamos la menor densidad de los compuestos con respecto a los metales, da como resultado una ventaja inmensa en cuanto a resistencia y módulo por unidad de peso a favor de los compuestos, que pueden llegar a ser entre 3 y 5 veces superiores al de las aleaciones de aluminio y acero [3]. Además, la resistencia a la fatiga de los materiales compuestos es muy superior a la de los metales. Por estas razones los materiales compuestos son utilizados para reemplazar a los metales en aplicaciones estructurales donde el peso es crítico.

La mayoría de los materiales son isótropos, ya que sus propiedades no varían con la dirección en la que se midan. Pero la mayoría de los compuestos son anisótropos, es decir sus propiedades dependen fuertemente de la dirección en la que se midan, debido a que las fibras tienen determinadas orientaciones dentro del laminado. Esto hace que el diseño de estructuras con materiales compuestos sea más dificultoso que con materiales isótropos,

pero también ofrece la oportunidad de emplear sus propiedades en función de los requisitos de diseño.

Otra consideración importante es que los materiales compuestos no tienen fluencia, es decir su rotura ocurre una vez alcanzado su límite elástico. Sin embargo su naturaleza heterogénea les provee mecanismos para la absorción de energía a escala microscópica, que son comparables con el proceso de fluencia. Dependiendo del grado de daño, un laminado puede experimentar algún grado de deterioro en sus propiedades pero por lo general no fallará de manera catastrófica.

Otra ventaja importante de los compuestos con matriz polimérica con respecto a los metales es que no sufren corrosión. Sin embargo muchos compuestos pueden absorber humedad del ambiente, lo que causa cambios dimensionales o tensiones indeseadas. Si este es el caso se debe proteger las superficies del material con algún recubrimiento apropiado.

En cuanto a los procesos de fabricación de los compuestos, puede mencionarse que los mismos requieren menos energía y menor presión que los procesos tradicionales para fabricar metales. La capacidad de integrar partes al utilizar polímeros reforzados es otra gran ventaja, esto permite reducir el número de piezas, el número de operaciones de fabricación, y el número de operaciones de ensamblaje. También existen métodos de procesamiento que permiten eliminar o reducir la cantidad de operaciones de acabado como el maquinado o el desbaste, que son muy comunes en los metales.

En lo que respecta a otras propiedades, puede decirse que el coeficiente de expansión térmica de los compuestos es mucho menor que el de los metales. Como resultado, las estructuras fabricadas con material compuesto tendrán muy buena estabilidad dimensional en un rango más amplio de temperaturas. Con respecto a las conductividades térmica y eléctrica, estas propiedades dependerán fuertemente del tipo de fibras utilizadas. Por lo general si el laminado posee fibras de vidrio será un buen aislante térmico y eléctrico, en cambio con fibras de carbono será un buen conductor de calor y electricidad. Finalmente se puede destacar que los compuestos son no magnéticos, lo que los hace atractivos para muchas aplicaciones relacionadas con la electrónica.

2.2.2 - Aplicaciones

Las aplicaciones industriales y comerciales de los materiales compuestos de matriz polimérica son muy variadas. Las áreas en donde los materiales compuestos tienen aplicaciones estructurales importantes son mencionadas a continuación. Además de las mencionadas, los compuestos tienen gran aplicación en la industria de la electrónica, de la energía, del petróleo y de la medicina, entre otras.

- **Aeronáutica:** la mayor aplicación estructural de los materiales compuestos es la industria aeronáutica, donde la reducción de peso es fundamental. Desde la aparición de la fibra de carbono, los materiales compuestos se convirtieron en el principal constituyente de las alas y el fuselaje de aviones. Su integridad estructural y durabilidad hicieron que cada vez más componentes fueran fabricados de materiales compuestos, y en la actualidad se estima que componen el 50% del peso total de la estructura de un avión comercial [4]. También son utilizados para fabricar los álabes del rotor y otros componentes en helicópteros.
- **Espacial:** la reducción de peso es la razón principal para la utilización de compuestos en vehículos espaciales. Además de ser usados en las estructurales de los componentes más grandes, también son muy utilizados en componentes más pequeños como antenas, paneles solares y plataformas ópticas. Esto se debe a su gran estabilidad dimensional en un amplio rango de temperaturas, ya que muchos materiales compuestos tienen un coeficiente de expansión térmica cercano a cero.
- **Automotriz:** la aplicación de materiales compuestos en automóviles incluye componentes para el cuerpo de los mismos, principalmente el capó y los paneles de las puertas. Los mismos requieren alta rigidez, resistencia al daño y buena terminación superficial.
- **Artículos deportivos:** polímeros reforzados con fibras son utilizados ampliamente en artículos deportivos como raquetas de tenis, calzado atlético, cuadros de bicicletas de carreras, remos y tablas de nieve. Su utilización se basa en que ofrecen reducción de peso, buena amortiguación de vibraciones y flexibilidad en el diseño.

- Naval: polímeros termorrígidos reforzados con fibras de vidrio son utilizados ampliamente en embarcaciones de tipo recreacional. Para embarcaciones de competición se utiliza fibra de carbono con el objetivo de reducir su peso aún más. Cascos, cubiertas y diversos componentes interiores son fabricados con materiales compuestos.
- Infraestructura: los polímeros reforzados con fibras tienen un gran potencial para reemplazar al acero y al hormigón armado en edificios, puentes y otras estructuras civiles. Esto se debe principalmente a la mayor resistencia a la corrosión que ofrecen los materiales compuestos, reduciendo así los costos de mantenimiento y reparaciones, y aumentando la vida útil de la estructura. Otra ventaja importante es que gracias a su menor peso se reducen los costos de transporte desde el lugar de fabricación hasta la zona de construcción.

2.2.3 - Procesamiento

Para que un componente de material compuesto pueda ser utilizado con éxito en una aplicación, el mismo debe tener un proceso de fabricación confiable y rentable. Con el interés en los materiales compuestos para su utilización en la industria, empezaron a aparecer métodos de fabricación para su producción en masa. Las principales formas de procesamiento de polímeros termorrígidos reforzados con fibras se pueden dividir en dos grupos, las de molde cerrado y las de molde abierto.

Dentro de las técnicas que utilizan moldes cerrados se encuentran:

- Pultrusión: es un proceso de alto volumen de producción y bajo costo en el cual se tira de fibras impregnadas con resina y son forzadas a pasar por un molde calefaccionado para fabricar la pieza. En este proceso se generan partes de sección transversal constante y longitud continua, que luego se cortan con la longitud deseada.
- Moldeo por compresión: es un proceso para la elaboración de grandes piezas de material compuesto con un alto volumen de producción. La técnica consiste en rellenar la cavidad de moldeo con un *prepreg* o un *sheet molding compound*

para luego aplicar presión y temperatura. Los *prepregs* son láminas delgadas que consisten en tejidos de fibras pre-impregnadas con una determinada cantidad de resina parcialmente curada, la cual está distribuida uniformemente. Los *sheet molding compounds* son similares a los *prepregs* pero poseen fibras cortas.

- Moldeo por transferencia de resina: es un proceso económico para partes estructurales con un volumen de producción moderado. Consiste en inyectar la resina a presión en un molde en el que previamente se ha colocado el refuerzo seco, para luego curar la pieza en el molde y desmoldarla.
- Infusión: es un proceso de baja inversión para fabricar laminados con alto contenido de fibra y pocas burbujas. Consiste en succionar con vacío la resina hacia el refuerzo seco que se encuentra en un molde de una sola cara. La otra cara se sella con un film flexible y cuando finaliza la infusión se aplica calor para el curado.

Dentro de los procesos con molde abierto se encuentran el moldeo manual y el enrollamiento de filamentos:

- Moldeo manual: fue la primera técnica utilizada para fabricar piezas de material compuesto. A pesar de ser un proceso confiable y sencillo, resulta muy lento y trabajoso. El refuerzo es colocado sobre el molde y se lo impregna con resina, por lo general con la ayuda de un pincel. Luego se compacta utilizando rodillos y se siguen aplicando capas hasta alcanzar el espesor deseado. El curado se realiza por un catalizador que se incorpora a la resina, sin temperatura ni presión.
- Enrollamiento de filamentos: también llamado bobinado de filamentos o en inglés *filament winding*. Consiste en enrollar fibras continuas impregnadas con resina alrededor de un mandril giratorio, que tiene la forma interna del artículo que se quiere producir. Recipientes a presión, tuberías y ejes de transmisión pueden ser fabricados por esta técnica. Debido a su importancia en la

fabricación de recipientes a presión de material compuesto, esta técnica será desarrollada en profundidad a continuación.

2.3 - Enrollamiento de filamentos

2.3.1 – Descripción del procesamiento

Ya que es la técnica empleada en la fabricación de tubulares, la misma será descrita más detalladamente. Durante el procesamiento las fibras son tensionadas y se impregnan en un baño con resina antes de llegar al mandril, el cual tira de las fibras al girar. Luego de la impregnación de las fibras, el exceso de resina es removido de las mismas, ya que de esto dependerá la fracción volumétrica de fibras del material final. Una vez impregnadas y sin resina en exceso, las fibras se juntan en una banda plana. El mandril gira a una determinada velocidad mientras que el carro por el que pasan las fibras se mueve en sentido horizontal, posicionando así la banda de fibras en el patrón deseado sobre el mandril.

Para evitar algunos de los problemas que surgen de utilizar resinas líquidas, se pueden utilizar *prepregs* para realizar el laminado. Esto es llamado *dry winding*, que es una variante al proceso tradicional, llamado *wet winding*. Al utilizar esta variante de la técnica de *filament winding* se eliminan muchas complicaciones relacionadas con el mojado de las fibras, la viscosidad de la resina y la remoción del exceso de resina de las fibras. Por lo tanto la velocidad con la que se puede laminar depende solo de la capacidad de la máquina y por lo general se alcanzan mayores velocidades de producción que en *wet winding*. Además, el contenido de resina en el material final estará predeterminado, por lo que los productos fabricados por esta técnica tendrán una menor variabilidad en sus propiedades mecánicas. Otra ventaja del *dry winding* es que se logran espacios de trabajo mucho más limpios y sin contaminantes para los operarios.

Las mayores desventajas del *dry winding* con respecto al *wet winding* son el elevado costo de los *prepregs* y la necesidad de compactar el laminado durante el curado. No se producirá entrecruzamiento entre moléculas de distintas capas sin que exista compactación. Además, existe la posibilidad de que quede aire atrapado entre capas, el cual debe ser eliminado cuando la viscosidad de la resina cae por el aumento de temperatura.

Debido a que la forma de procesamiento más utilizada es la tradicional, es decir la que utiliza la resina líquida en la batea, a partir de aquí se hablará solo de *wet winding*.

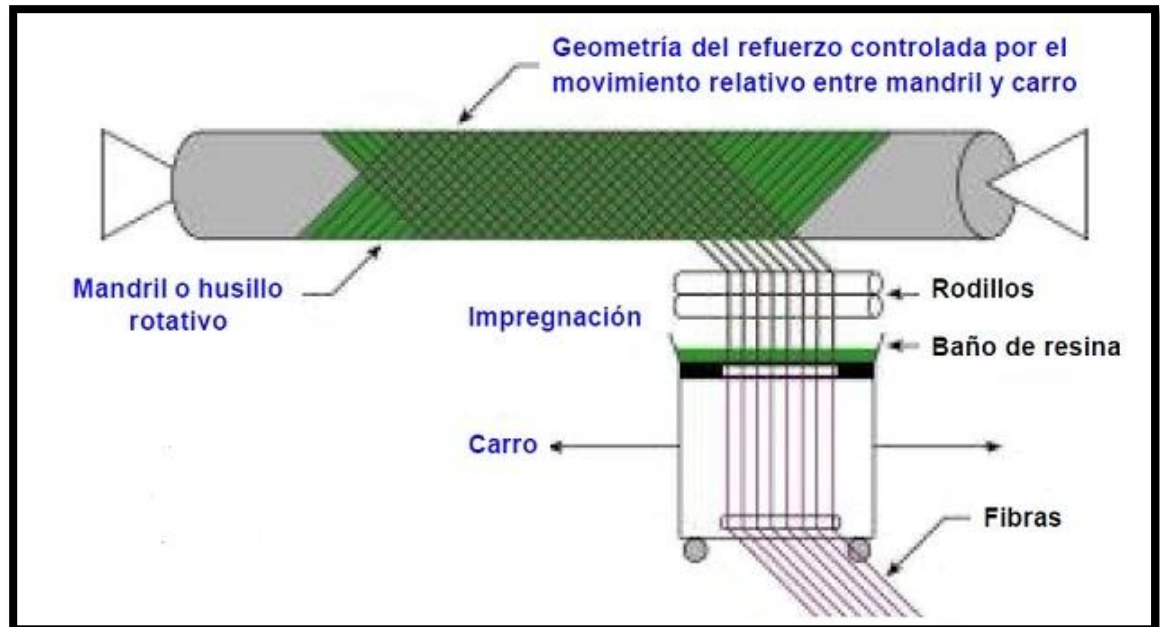


Figura 2.1 - Descripción gráfica del método

Cuando el mandril está completamente cubierto y tiene el espesor deseado, se coloca en un horno para realizar el curado de la resina. Una vez que la resina se ha curado, se retira el mandril, dejando el producto final hueco.

2.3.2 – Ventajas

Las principales ventajas del enrollamiento de filamentos con respecto a los demás métodos de fabricación de materiales compuestos son:

- Alta repetitividad y precisión en la orientación y en la posición de las fibras.
- Capacidad de utilizar fibras continuas en todo el material y la posibilidad de orientarlas en la dirección de carga.
- Habilidad de fabricar compuestos con altas fracciones de fibras, ya que la cantidad de resina se puede controlar de varias maneras.

- Velocidades de procesamiento relativamente altas.
- Fácilmente automatizable.

2.3.3 - Variables críticas de proceso

Asociadas al equipamiento

- **Tensión de las fibras:** una tensión adecuada en las fibras es necesaria para mantener a las fibras alineadas en el mandril y para controlar el contenido de resina en la pieza. Una tensión excesiva puede causar diferencias en el contenido de resina entre las capas internas y externas, tensiones residuales no deseadas en el material final, deformaciones en el mandril o rotura de fibras. Si la tensión no es suficiente pueden aparecer regiones con exceso de resina en el laminado debido a la falta de compactación.
- **Velocidad de rotación:** como el mandril es lo que tira las fibras, su velocidad de rotación controlará la velocidad de laminación de la pieza. Una velocidad alta es necesaria para alcanzar una buena eficiencia en la fabricación, pero la velocidad de rotación está limitada por la complejidad de la pieza y por la precisión requerida en los ángulos de laminado, además de la propia capacidad de la máquina. Velocidades de rotación lentas son útiles para llevar un mejor control de la cantidad de huecos que quedarán en la pieza y para mejorar la impregnación ya que así las fibras permanecerán más tiempo en la batea.
- **Ángulo de bobinado:** se llama ángulo de bobinado al formado entre la banda una vez apoyada sobre el mandril y el eje del mismo. Al variar la velocidad de rotación del mandril y la velocidad horizontal del carro se puede lograr ángulos muy cercanos a 0° (bobinado longitudinal), muy cercanos a 90° (bobinado circunferencial) y todos los intermedios. Las propiedades mecánicas de la pieza dependen principalmente del ángulo de bobinado.
- **Ancho de la banda de fibras:** es el ancho que tiene la banda de fibras una vez apoyada sobre el mandril. Depende de cuantas bobinas se empleen y del número

de filamentos que tenga cada mecha. También varía con el ángulo de bobinado y la tensión de las fibras. Se debe ajustar correctamente el ancho de banda para que no se generen espacios ni superposición entre las bandas contiguas.

Asociadas a las materias primas

- Viscosidad: la viscosidad de la resina utilizada es un factor importante que influye en la impregnación de las fibras. La viscosidad de la resina debe ser baja para impregnar las fibras en movimiento en la batea, pero no tan baja como para que la resina se escurra fácilmente de las fibras ya impregnas. Una resina sin curar se comporta como un fluido de relativamente baja viscosidad, sin embargo la misma aumenta a medida que progresa el curado, esto depende de la cinética de reacción. Los valores de referencia normalmente empleados en la industria están entre 0.5 Pa.s y 1 Pa.s.
- Cinética de reacción: la velocidad con la que aumenta la viscosidad por entrecruzamiento es baja en la primera etapa del curado, pero al alcanzar un cierto grado de curado comienza a aumentar a una velocidad mayor. El tiempo al que la viscosidad tiende a infinito se llama tiempo de gel, y es un parámetro muy importante para el procesamiento ya una vez alcanzado el flujo de resina se detiene. Por lo tanto la resina debe tener una vida útil en la batea que permita el procesamiento sin que ocurra gelación prematura. Por lo general la batea es calefaccionada para bajar la viscosidad de la resina, pero a mayor temperatura más rápido será el avance de la reacción de curado, y por lo tanto se alcanzará la gelación en menos tiempo.
- Contracción: la contracción es la reducción de las dimensiones volumétricas o lineales causadas por el curado o por enfriamiento. El curado genera contracción debido al acomodamiento de las moléculas poliméricas en un arreglo más compacto y a la disminución del volumen libre. La contracción térmica ocurre por el enfriamiento que tiene lugar luego de finalizar el curado a temperatura. Una contracción excesiva puede generar defectos y tensiones residuales en el material final. Para reducirla se puede incorporar rellenos o

ciertos tipos de aditivos. Como en el bobinado de filamentos el curado se realiza con el laminado sobre el mandril, la expansión térmica del mismo también debe ser tomada en consideración, ya que las diferencias entre los coeficientes de expansión entre el laminado y el mandril pueden generar tensiones térmicas.

2.3.4 - Parámetros de control en el laminado

- Huecos: dentro de todos los defectos que se puede producir durante el procesamiento de un material compuesto, los huecos son los más críticos para sus propiedades mecánicas. Por lo general se forman cuando la resina no es capaz de desplazar el aire de la superficie de las fibras al momento en que las fibras se impregnan con la resina. Otra forma de que se generen es a partir de burbujas que estaban atrapadas en la resina, por eso es recomendable removerlas antes de laminar. También se puede atrapar aire entre dos capas durante el laminado, o entre bandas de una misma capa si el ancho de banda utilizado no es adecuado y se generan espacios o superposiciones entre bandas. Incluso los mismos sistemas químicos pueden eliminar volátiles provenientes de la reacción de entrecruzamiento (típicamente en reacciones de condensación) o de la evaporación de diluyentes. Es fundamental controlar la cantidad de burbujas que quedan en el laminado ya que pueden reducir su resistencia y fomentar la absorción de humedad. Un 3% en volumen es una cantidad aceptable de huecos, pero para algunas aplicaciones se necesita un contenido menor al 1% [7].
- Contenido de resina: para obtener buenas propiedades mecánicas, así como un control del peso y el espesor de la pieza, es necesario un apropiado contenido y distribución de resina. El contenido de resina se controla principalmente con la remoción del exceso de resina al pasar las fibras impregnadas por algún tipo de escurridor, por lo tanto resulta fundamental controlar que las fibras que apoyan sobre el mandril tengan la cantidad de resina apropiada, y si esto no es así ajustar los escurridores. También depende de la tensión en las fibras y de la viscosidad de la resina.

- **Grado de Curado:** la transformación de resinas reforzadas sin curar o parcialmente curadas en partes o estructuras sólidas requiere el curado del material a altas temperaturas y presiones por un determinado período de tiempo. La presión provee la fuerza necesaria para el flujo de la resina altamente viscosa y la temperatura es necesaria para iniciar y mantener la reacción química que solidifica la resina. La magnitud de estos dos parámetros, junto con su duración, afectan la calidad final de laminado. El tiempo necesario para curar apropiadamente una pieza se llama ciclo de curado, y como de esto depende la velocidad de producción, se busca que el ciclo de curado sea lo más corto posible. En el enrollado de filamentos la presión para el flujo de resina está dada por la misma tensión de las fibras ya posicionadas en el mandril. Por lo tanto una vez finalizado el laminado solo es necesario llevar el mandril a un horno con la temperatura adecuada y mantenerlo el tiempo necesario para producir el curado de la resina. Por lo general dentro del horno se mantiene la rotación del mandril durante la primera etapa del curado, esto es para evitar la migración y el goteo de la resina todavía viscosa por efecto de la gravedad. Una vez alcanzado el punto de gel ya se puede detener la rotación.

2.4 - Recipientes a presión

Un recipiente a presión es un contenedor diseñado para contener gases o líquidos a presiones mayores que la atmosférica. Son estructuras extensamente utilizadas y pueden encontrarse en casi todas las ramas de la industria moderna. Su diseño, desarrollo, puesta a prueba y operación están regidos por guías de diseños, códigos y normas en todos los países donde son fabricados y utilizados. Esto se debe a que es necesario predecir el comportamiento del recipiente ante la presión interna que experimentará durante su servicio, ya que una falla del mismo puede resultar en una explosión catastrófica.

Como consecuencia de su uso a lo largo de los años, los recipientes a presión metálicos se convirtieron en un tipo de estructura muy confiable. A mediados del siglo 20 surgieron nuevas posibilidades de mejorar el rendimiento de los recipientes a presión, asociadas con la aparición de los materiales compuestos y la tecnología de enrollado de filamentos [8]. La incorporación de materiales compuestos a los recipientes a presión

tradicionales, junto con el desarrollo de sus conceptos estructurales y sus técnicas de procesamiento, resultaron en una importante reducción de peso y costo. Además, impulsaron el surgimiento de una nueva tecnología, la fabricación de recipientes a presión de material compuesto mediante el enrollado de filamentos continuos.

Con respecto al comportamiento mecánico de los recipientes a presión es importante destacar que, por ejemplo en el caso de un recipiente cilíndrico, la tensión circunferencial es el doble que la longitudinal. En consecuencia si el recipiente fuera metálico y tuviera un espesor de pared para soportar las tensiones circunferenciales, automáticamente soportaría las longitudinales. Este no es el caso de los recipientes de material compuesto, ya que las fibras orientadas en sentido circunferencial no soportan tensiones longitudinales. Por lo tanto un recipiente debe tener capas de fibras orientadas con diferentes ángulos de tal forma que las mismas provean una combinación adecuada de resistencia en sentido longitudinal y circunferencial.

2.4.1 - Tipos de recipientes a presión

Dentro del mercado actual de los recipientes a presión se pueden encontrar cinco diseños diferentes. A continuación se realizará una descripción de los mismos:

- Tipo 1: son los recipientes tradicionales donde no hay presencia de material compuesto. Están contruidos solo de metal, por lo general acero.
- Tipo 2: consisten en un recipiente metálico tradicional al cual se lo refuerza envolviéndolo con un material compuesto. Por lo general los recipientes son de acero o aluminio y el compuesto es de matriz termorígida con fibras de vidrio o carbono. El compuesto envuelve al recipiente de tal forma que las fibras queden orientadas en la dirección circunferencial, ya que los esfuerzos más grandes aparecen en esa dirección. En este tipo el recipiente metálico y el material compuesto soportan aproximadamente la misma carga. Cuestan alrededor de un 50% más que los de tipo 1 pero su peso se reduce entre un 30% y 40% [9].
- Tipo 3: en este tipo el metal actúa solo como revestimiento interior o *liner*, cuya función es retener al fluido contenido por el recipiente. Las cargas son

soportadas en su totalidad por el material compuesto, que envuelve completamente al *liner*. En este tipo de recipientes los *liners* son de algún metal dúctil, por lo general aluminio. El material compuesto es una matriz termorígida reforzada con fibras de carbono. Su costo es aproximadamente el doble que los de tipo 2 pero pueden llegar a pesar la mitad [9].

- Tipo 4: son similares al tipo 3 pero en este caso el *liner* es de algún polímero termoplástico, usualmente polietileno de alta densidad o poliamida. Las cargas siguen siendo soportada solamente por el material compuesto. Su costo es similar al de los recipientes tipo 3, pero al no poseer ningún componente metálico el ahorro de peso se intensifica aún más.
- Tipo 5: también llamados *linerless*, ya que el material compuesto es su único constituyente y no poseen ningún otro material que contenga al fluido que se encuentra en el interior del recipiente.

2.4.2 - Mercados:

Los recipientes para almacenar fluidos a alta presión representan uno de los mercados más grandes y con más crecimiento para materiales compuestos. Los recipientes metálicos son utilizados en gran cantidad de aplicaciones ya conocidas, y en particular los de material compuesto se utilizan en el almacenamiento de gases en vehículos espaciales, en equipos de respiración autónomos y en el transporte criogénico de gas natural licuado. Sin embargo su mercado de mayor volumen está relacionado con el empleo de combustibles alternativos a la gasolina y al diesel en automóviles particulares, autobuses y camiones.

La demanda de combustibles alternativos en el mundo está creciendo. Una de las principales razones es que la extracción no convencional de gas natural ha contribuido a bajar el precio en Norteamérica y en algunas partes de Europa. Además, el surgimiento de regulaciones más estrictas a las emisiones (como la normativa Euro6) han aumentado el costo de utilización de los vehículos impulsados por combustibles tradicionales. Debido a esto se ha aumentado la rentabilidad no solo del gas natural comprimido, sino también del hidrógeno gaseoso para celdas de combustible, el cual posee un gran potencial como combustible para automóviles debido a que su combustión es limpia y eficiente.

GNC

El gas natural comprimido ha sido utilizado como combustible para vehículos desde los años 40 y en la actualidad un gran número de vehículos lo utilizan [10]. Inicialmente los recipientes utilizados para almacenar el gas comprimido eran fabricados y testeados en concordancia con las normativas correspondientes a cilindros industriales, pero esto resultaba en que los cilindros fueran más pesados de lo necesario. Además, con la aparición de aleaciones metálicas de alta resistencia y el surgimiento de los cilindros de material compuesto, se hizo necesaria la existencia de una normativa específica para cilindros de gas natural comprimido con uso vehicular.

En 1992 ANSI (American National Standards Institute) desarrolló la normativa NGV2 para contenedores de combustible en vehículos a gas natural. Esta norma contiene requerimientos para los materiales, el diseño, la fabricación y los ensayos de los recipientes que contienen el gas natural comprimido en los vehículos. En el 2000 ISO (International Organization for Standardization) se basó en la normativa ya existente de ANSI y lanzó su norma 11439, que se refería a cilindros de alta presión para el almacenamiento de gas natural como combustible en automóviles.

En los años 80 se lanzó el GNC en Argentina y en 1987, en el marco del plan nacional de sustitución de combustibles líquidos, se declaró de interés nacional la utilización del GNC en el sector de transporte. De allí en adelante la industria del GNC se desarrolló fuertemente en el país. La primera empresa en fabricar tanques para su almacenamiento, transporte y utilización vehicular fue Inflex. La misma ofrece tres modelos distintos de cilindros sin costura: un tipo 1 de acero que se fabrica en distintos tamaños, un tipo 2 de acero reforzado con fibra de vidrio que resulta ser un 30% más liviano que los tipo 1, y un tipo 4 que soporta hasta 3600 psi y es un 40% más liviano que los tipo 2 [11].



Figura 2.2 - Cilindros Inflex tipo 1, 2 y 4

Hidrógeno

El hidrógeno ha sido utilizado por varias décadas como combustible, principalmente en su estado criogénico en aplicaciones espaciales. El uso de recipientes a presión para el almacenamiento de hidrógeno gaseoso es una aplicación relativamente nueva. Con el desarrollo de la tecnología del acero entre principios y mediados del siglo XX, la eficiencia de los recipientes para hidrógeno incrementaba rápidamente. El aumento de la eficiencia en el almacenamiento de hidrógeno gaseoso en cilindros de acero alcanzó su límite en 1970 cuando comenzaron a reconocerse las fallas debido a la fragilización por hidrógeno. Luego de intensivas investigaciones se llegó a la conclusión de que las fallas se debían a la utilización de aceros de alta resistencia, y se determinó que la máxima resistencia de los aceros utilizados en cilindros para transporte de hidrógeno debía fijarse en 950 MPa [12].

El problema de la fragilización por hidrógeno determinó un límite en la eficiencia de los cilindros de acero, y a partir de allí se comenzaron a buscar nuevas opciones de materiales para fabricar un recipiente liviano y de bajo volumen para que pueda ser utilizado en automóviles. En esa época los recipientes de material compuesto solo eran utilizados en equipos de respiración autónoma, ya que su elevado costo evitaba que se expanda su utilización. Un incremento en la demanda de los compuestos y una baja en el precio de los mismos significaron que los recipientes de compuestos puedan ser utilizados en otro tipo de aplicaciones, como el transporte de hidrógeno gaseoso y su utilización como combustible en automóviles.

En la actualidad no existe una normativa vigente para el almacenamiento de hidrógeno a alta presión en cilindros compuestos y su uso vehicular, pero los grandes

fabricantes de la industria automotriz ya tienen sus prototipos de autos a hidrógeno. Para el almacenamiento del mismo desarrollaron recipientes tipo 4 que soportan aproximadamente 10.000 psi y poseen un recubrimiento externo para hacerlos más resistentes a impactos.



Figura 2.3 - Cilindro de almacenamiento de hidrógeno

2.4.3 – Linerless

Dentro de los diferentes tipos de recipientes a presión, los tipo 5 o *linerless* son los más avanzados en cuanto a tecnología. Los mismos están constituidos solamente por material compuesto, es decir no poseen ningún tipo de *liner* que contenga al fluido almacenado. Esto resulta en un ahorro de peso de entre 15% y 20% con respecto a los recipientes con *liner* polimérico (tipo 4), permitiendo almacenar un mayor volumen de fluido y/o reducir el peso total del sistema [2]. El costo de fabricación también se ve disminuido debido a que se eliminan los costos del material del *liner* y de fabricarlo. Además si están diseñados apropiadamente pueden reducir el costo de mantenimiento durante su vida útil, debido a su construcción simplificada.

Problemática de desarrollo

El mandril es un instrumento fundamental en la fabricación de recipientes a presión por *filament winding*. El mismo debe ser lo suficientemente rígido como para soportar la compresión que le genera la tensión de las fibras al enrollarlas y también debe garantizar

que la resina no se adhiera a su superficie, por lo que generalmente se utilizan desmoldantes.

Los mandriles pueden clasificarse en removibles o permanentes. Los permanentes son los *liners*, que en la etapa de procesamiento por enrollado de filamentos actúan como mandril. Los mismos pueden ser metálicos o poliméricos, dependiendo de si se está fabricando un recipiente tipo 3 o tipo 4. Pero si se busca fabricar un recipiente tipo 5, el mandril debe ser removible, es decir debe poder eliminarse una vez finalizado el curado del recipiente sin dañar el material compuesto. Para esto existen varios tipos de mandriles, cada uno con una forma diferente de ser removido, y cada uno con sus ventajas y desventajas. A continuación se realizará una descripción de cada uno:

- **Extraíbles:** consisten en cilindros de acero los cuales son removidos haciendo que el material compuesto ya curado deslice por su superficie. Por lo general tienen una pequeña conicidad a través de su longitud y se les aplica desmoldante para facilitar la extracción. Con este tipo de mandriles solo se pueden fabricar tubos, pero no tanques con casquetes.
- **Plegables:** consisten en muchas piezas que forman una superficie segmentada. Estas piezas se expanden mediante uniones que se despliegan para formar el mandril. Una vez finalizado el curado el mandril se pliega para ser removido. Son muy costosos pero pueden ser reutilizados, además de ofrecer alta repetitividad y precisión en los recipientes fabricados.
- **Quebradizos:** este tipo de mandriles están hechos de yeso y una vez finalizado el curado se los rompe para removerlos. Por lo general se coloca un film que separa el yeso del material compuesto para facilitar su extracción y mejorar la terminación interna del recipiente.
- **Solubles:** estos mandriles se fabrican de materiales que luego pueden disolverse para ser removidos. Sus principales desventajas son su rigidez limitada y que solo pueden utilizarse una vez.

Problemática estructural

En los recipientes tradicionales, el *liner* cumple la función de contener al fluido y la envoltura de material compuesto provee la mayor parte de la resistencia del recipiente. En cambio, los tanques *linerless* necesitan que el material compuesto actúe como barrera evitando la pérdida del fluido contenido y que además soporte las cargas generadas por la presión interna.

El problema que presenta este tipo de recipientes a escala microscópica es que sufren microfisuración, un fenómeno que consiste en la formación de microfisuras sobre la matriz. Estas fisuras se extienden por el espesor de las capas cuyas fibras están en sentido transversal a la dirección de la carga. La formación de estas microfisuras no solo compromete la integridad estructural del recipiente, sino que también puede ocasionar fugas del fluido a través de las paredes del tanque. Las microfisuras comienzan a aparecer a tensiones relativamente bajas, por lo que la presión que puede soportar un recipiente tipo 5 estará determinada por la formación de las mismas.



Figura 2.4 - Microfisura en laminado epoxi-fibra de carbono

Problemática de la normativa

Además del problema de las microfisuras y de las dificultades en la remoción del mandril una vez curado el material, los tanques *linerless* presentan la problemática de que no existen normas específicas referidas a este tipo de recipientes a presión. En la actualidad hay varias normas para recipientes a presión de materiales compuestos tipo 2, 3 y 4, pero

debido a que los recipientes tipo 5 son una tecnología relativamente nueva, todavía no poseen normativa propia.

3 - ANÁLISIS DE LA NORMATIVA

En la actualidad existen una serie de normativas referidas a los recipientes a presión que incluyen materiales compuestos en su construcción. En las mismas se analizan los requisitos que deben cumplirse en cuanto a los materiales utilizados, el diseño empleado, los ensayos para calificar el recipiente, la fabricación del mismo y los ensayos para controlar la calidad de los recipientes fabricados. Sin embargo ninguna de las normativas actuales contempla el uso de recipientes sin *liner*, por lo tanto no existe ninguna guía para el diseño, la fabricación y la validación de este tipo de recipientes. A continuación se analizan las normativas más importantes a nivel mundial referidas a recipientes tipo III y tipo IV, y finalmente se realiza una propuesta de normativa para recipientes tipo V. Para elaborar dicha propuesta se toman en cuenta tanto las normativas para recipientes con *liner* que se presentan en este capítulo como los conocimientos teóricos sobre materiales compuestos, recipientes a presión, *filament winding* y problemáticas de los recipientes *linerless* que se explicaron en el capítulo anterior.

3.1 – AIAA

AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics) publicó en 2006 la norma S-081A, Space Systems, Composite Overwrapped Pressure Vessels. La misma está dedicada a recipientes a presión de *liner* metálico recubierto con material compuesto, es decir recipientes tipo III.

3.1.1 - Requisitos de materiales

Se deben utilizar solamente materiales que hayan sido almacenados adecuadamente. Con respecto al *liner*, el material metálico debe ser seleccionado teniendo en cuenta que: sea compatible con el fluido almacenado en el recipiente, tenga una resistencia adecuada, posea suficiente tenacidad a la fractura y resistencia a la fisuración asistida por el ambiente. El material compuesto, que consiste en fibras de refuerzo impregnadas por una matriz de resina, debe ser seleccionado teniendo en cuenta que: sea compatible con el ambiente al que será expuesto, tenga una resistencia y un módulo adecuados, tenga suficiente vida bajo tensión y sea compatible con el material del *liner*. Los efectos de los procesos de

fabricación que puedan influir en la rigidez y la resistencia del material también deben ser tenidos en cuenta.

3.1.2 - Requisitos de diseño

Se define la máxima presión de operación esperada (en inglés MEOP, *Maximum Expected Operation Pressure*) como la presión máxima a la cual el recipiente operará durante su vida en servicio, incluyendo el efecto de la temperatura y cualquier otro factor que pueda incrementar la presión. Se define la presión de diseño como la presión que el recipiente debe poder soportar sin experimentar rotura ni fallas de ningún tipo.

Cargas, presiones y ambientes

Antes que nada se debe determinar las presiones, la temperatura, las cargas y las condiciones ambientales a las que estará expuesto el recipiente durante su vida en servicio. Se deben considerar los siguientes factores y su variación estadística: todas las cargas inducidas y las presiones, los ambientes que actúan simultáneamente con dichas cargas y presiones, la frecuencia de aplicación de las mismas, sus niveles y duración.

Resistencia

El recipiente debe tener suficiente resistencia para soportar la presión interna junto con las cargas límites dentro de los ambientes de operación esperados y durante toda su vida útil sin experimentar deformaciones perjudiciales, rotura o colapso. Para cumplir con los requisitos de resistencia el mínimo factor de diseño (cociente entre la presión de diseño y la máxima presión de operación esperada) debe ser 1.5.

Vida bajo carga

Se debe verificar que el recipiente no va a fallar durante el tiempo que este presurizado, esto puede hacerse mediante curvas de diseño para determinar la tensión admisible para un determinado tiempo bajo carga. Se grafica la tensión admisible como un porcentaje de la tensión de rotura del material en función del tiempo durante el cual el recipiente está a una presión superior al 60% de la máxima de operación.

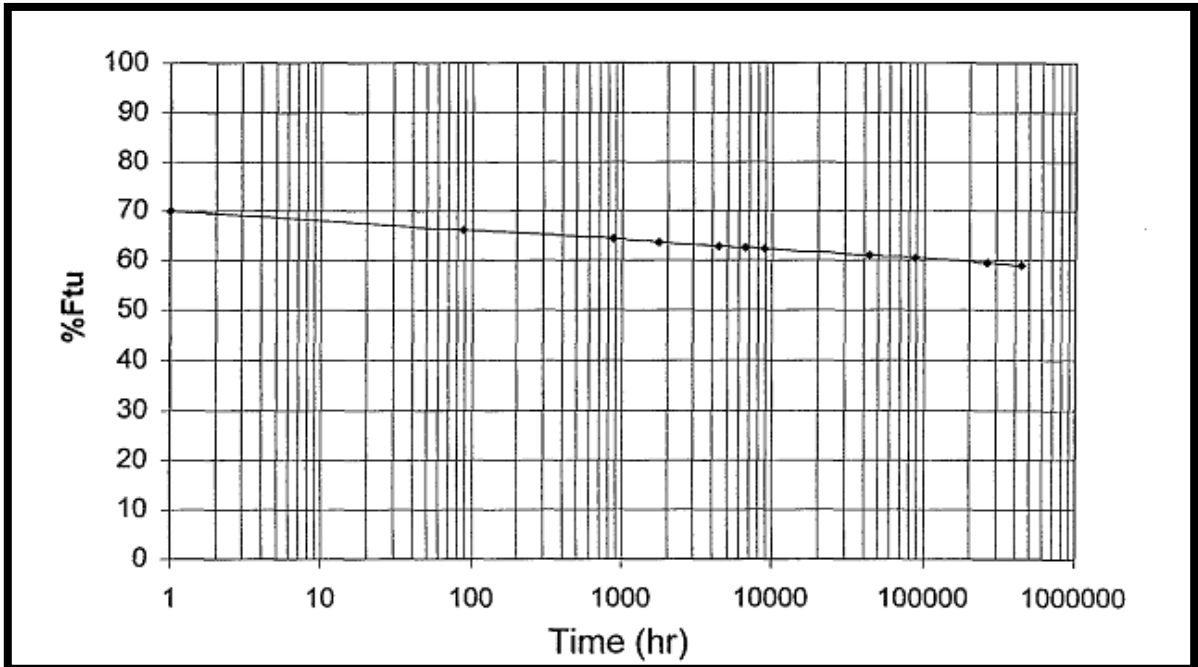


Figura 3.1 - Curva de diseño para recipientes con fibra de carbono

Rigidez

El recipiente debe tener suficiente rigidez para imposibilitar deformaciones perjudiciales a cualquier nivel de presión al que estará sometido durante su vida en servicio.

Térmicos

Todos los efectos térmicos (gradientes térmicos, velocidades de enfriamiento y calentamiento, temperaturas, tensiones térmicas) deben ser considerados en el diseño del recipiente.

Márgenes de seguridad

Mínimos márgenes de seguridad asociados con las variaciones en las propiedades de los materiales deben ser considerados.

Resistencia a la fatiga

La carcasa de material compuesto del recipiente debe tener una vida a la fatiga adecuada. La mínima vida a la fatiga debe ser 4 veces la vida útil del recipiente.

Resistencia al daño

El daño mecánico que puede llegar a sufrir el recipiente desde el curado de la matriz hasta el fin de su vida útil puede disminuir su resistencia por debajo de los requisitos mínimos y por lo tanto se debe implementar un plan de mitigación de daños. Los recipientes que tienen un espesor de pared mayor a ¼ de pulgada y un factor de diseño de 4 o superior están exentos de este requisito. Existen varios enfoques para garantizar la resistencia al daño del recipiente y debe aplicarse al menos uno de los siguientes: utilizar coberturas protectoras, utilizar indicadores de daño, realizar un ensayo de resistencia al impacto sobre un prototipo y sobre el caso más crítico, o realizar un ensayo de resistencia al impacto y luego una inspección visual.

3.1.3 - Requisitos de calificación

A los recipientes que van a ser utilizados para calificación se le debe realizar anteriormente los ensayos de aceptación, los cuales se indican dentro de los requisitos de control de calidad. Los siguientes ensayos deben realizarse en todos los diseños nuevos de recipientes o si se modifica sustancialmente algún diseño existente:

- Prueba de fuga: se debe mantener la presión a la máxima presión de operación durante 30 minutos y medir la velocidad de fuga del recipiente en centímetros cúbicos estandar por segundo. La máxima velocidad de fuga registrada debe ser especificada en el diseño del recipiente.
- Ensayo de presión cíclica: se debe realizar un ensayo de presurización y despresurización entre presión cero y la máxima presión de operación. La cantidad de ciclos requeridos en este ensayo es 4 veces el número de ciclos esperado en la vida útil del recipiente (incluyendo la prueba de presión de aceptación). Si el número de ciclos del ensayo es menor a 50 se deben realizar 50 como mínimo. La temperatura debe ser consistente con la máxima temperatura de operación del recipiente.

- **Ensayo de vibración:** en el caso de que la aplicación sea aeroespacial, se debe realizar un ensayo de vibración que simule el máximo nivel de vibraciones que se esperan durante el vuelo. El recipiente debe estar montado como se montara durante el vuelo y el montaje debe asegurar la rigidez suficiente para que el recipiente experimente todas las vibraciones. Si aparecen frecuencias de resonancia deben ser registradas. La presión del recipiente durante el ensayo debe ser la que tendrá durante el lanzamiento. Se debe generar vibraciones en el eje longitudinal y en el eje lateral del recipiente, que duren 3 veces lo que durará el lanzamiento y tengan el doble de potencia que la esperada.
- **Ensayos de presión para determinar resistencia:** se deben realizar ensayos de rotura para verificar que se cumpla con la presión de diseño. Se debe mantener la presión a la presión de diseño durante tiempo suficiente para demostrar que no ocurrirá rotura a estos niveles de presión y luego incrementar la presión hasta la rotura del recipiente. Para recipientes de tamaño real se recomienda ensayar al menos 30 recipientes si se utiliza un sistema nuevo, pero si se tiene información del sistema utilizado se pueden realizar menos. Como mínimo se deben ensayar dos recipientes, de los cuales uno debe haber sido sometido al ensayo de presión cíclica anteriormente. Si no es posible ensayar recipientes de tamaño real se pueden realizar ensayos con recipientes a escala, pero se deben tomar consideraciones para obtener resultados válidos.

3.1.4 - Requisitos de fabricación

El diseño del recipiente debe emplear procesos y procedimientos probados para la fabricación, y es responsabilidad del fabricante demostrar que dichos procesos y procedimientos están calificados para la fabricación del recipiente. En la fabricación del liner metálico se debe prestar atención especialmente a los procesos de fundición, tratamiento térmico, soldadura, mecanizado, forjado, perforación, desbaste y pulido. Con respecto al material compuesto, todos los materiales incorporados deben tener certificaciones que demuestren rangos de variación aceptables en las propiedades para

asegurar reproducibilidad y confiabilidad en su rendimiento. La cantidad de cada material utilizada durante la fabricación del compuesto debe ser verificada y quedar grabada.

3.1.5 - Requisitos de control de calidad

El fabricante debe realizar ensayos de aceptación sobre todos los recipientes para verificar que han sido fabricados correctamente. Estos ensayos consisten en una prueba hidráulica y en ensayos por técnicas no destructivas.

Prueba hidráulica de aceptación

Todos los recipientes deben ser sometidos a una prueba hidráulica para verificar que posean suficiente integridad estructural para soportar las condiciones de servicio. Durante la prueba los recipientes deben ser capaces de soportar la presión de prueba durante 5 minutos sin experimentar fugas, ruptura o deformaciones perjudiciales. El fluido utilizado para la prueba debe ser compatible con los materiales estructurales del recipiente. La presión de prueba es el producto del factor de prueba por la máxima presión de operación esperada. Si el factor de diseño es menor a 2, el factor de prueba será $(1 + \text{factor de diseño}) / 2$. Si el factor de diseño es mayor o igual a 2 entonces el factor de prueba será 1.5.

Ensayos no destructivos

Todos los recipientes deben ser inspeccionados visualmente y al menos alguna otra técnica no destructiva para establecer la condición inicial de fabricación. Estas inspecciones deben asegurar que no han ocurrido daños ni degradación durante el procesamiento de los materiales, la fabricación del recipiente, los ensayos realizados sobre el mismo, su traslado o almacenamiento. También deben asegurar que los defectos que pueden llegar a causar una falla van a ser detectados. A continuación se mencionan los ensayos no destructivos más comunes:

- Inspección visual: la parte exterior del recipiente puede ser examinado para buscar daños en las fibras. Si se utilizan lupas de magnificación o tintas penetrantes se mejora la capacidad de la inspección. La parte interior del recipiente puede ser examinada utilizando un boroscopio. Las inspecciones deben ser realizadas por un inspector certificado.

- Ultrasonido: la inspección ultrasónica puede ser utilizada para detectar delaminación y pérdidas de adhesión en estructuras compuestas.
- Termografía: por esta técnica se detectan variaciones en la temperatura superficial del material, estas variaciones pueden ocurrir como resultado de discontinuidades internas o defectos estructurales.
- Emisión acústica: esta técnica consiste en monitorear los sonidos que se producen durante la presurización del recipiente, para detectar fisuración en la matriz o ruptura de fibras.
- Shearografía: consiste en comparar imágenes de la superficie del recipiente a distintos niveles de presión para detectar defectos internos que pueden alterar los contornos de la estructura.

3.2 – ASME

ASME (American Society of Mechanical Engineers) publicó en 2007 su norma Boiler and Pressure Vessel Code, Section X: Fiber-Reinforced Plastic Pressure Vessels. La misma habla sobre recipientes en los cuales el *liner* utilizado no debe ser considerado parte estructural del mismo, es decir recipientes tipo III o IV. Esta norma estipula que es responsabilidad del fabricante elaborar la especificación del procedimiento. La misma debe contener datos sobre los materiales y los procesos utilizados para fabricar el prototipo y todos recipientes que se utilizaron para verificar la capacidad de soportar de manera segura las condiciones de servicio.

3.2.1 - Requisitos de materiales

El fabricante del recipiente deberá incluir en la especificación del procedimiento de fabricación las características de todos los materiales utilizados. Las fibras deben cumplir las especificaciones estipuladas por su proveedor. El valor mínimo de resistencia y módulo elástico medidos según ASTM D2343 no debe ser inferior al 90% del valor mínimo publicado por el proveedor para hebras impregnadas con resina.

El proveedor de la resina debe especificar los valores de viscosidad (ASTM D445 o ASTM D2393), equivalentes epoxídicos (ASTM D1652) y gravedad específica (ASTM D4052) con sus correspondientes límites de variación. Para cada lote de resina el fabricante del recipiente debe medir los valores de viscosidad, tiempo de gel (ASTM D2471) y gravedad específica para asegurarse que las características de la resina no hayan cambiado con respecto a las dadas en la especificación del procedimiento. Los valores obtenidos de viscosidad y gravedad específica deben estar dentro de los límites especificados por el proveedor. El valor medido de tiempo de gel debe ser para una formulación y una temperatura específicas, que deben ser representativas con las utilizadas en la fabricación del recipiente. También se debe especificar la máxima temperatura de utilización de la formulación utilizada.

En la especificación del procedimiento se debe incluir el agente de curado utilizado y la relación resina/agente de curado. El fabricante del recipiente debe asegurar que el material ha sido curado adecuadamente. Esto puede hacerse a través de pruebas de dureza de Barcol (ASTM D2583). Las mediciones obtenidas deben estar dentro de los límites especificados por el proveedor de la resina. Si el fabricante del recipiente decide no utilizar el ensayo de dureza de Barcol como medida de un curado apropiado, deberá definir y documentar el método utilizado para asegurar que el material ha sido curado adecuadamente.

3.2.2 - Requisitos de diseño

La norma establece dos métodos de calificar el diseño de un recipiente:

- Diseño clase 1: se califica el diseño del recipiente a través de pruebas destructivas sobre un prototipo.
- Diseño clase 2: se siguen reglas de diseño obligatorias y luego se realizan pruebas de aceptación por ensayos no destructivos.

La presión de diseño se define como la máxima presión permisible en el recipiente; todo recipiente debe poseer un dispositivo de alivio de presión programado para activarse a una presión que no exceda la presión de diseño. La presión de operación es la máxima

presión que se alcanza en el recipiente en condiciones de operación. La presión de operación se debe mantener en un nivel adecuado por debajo de la presión de diseño para evitar la apertura frecuente de los dispositivos de alivio de presión.

Diseños clase 1

Un espesor estimado del recipiente puede ser determinado por procedimientos de diseño sugeridos, pero para determinar si el diseño utilizado es adecuado para determinadas condiciones de servicio se deben realizar pruebas sobre uno o más prototipos. Si se requiere un espesor adicional para soportar cargas suplementarias (peso del recipiente, peso del liner, peso del contenido, cargas de impacto, cargas por gradientes térmicos), este se debe sumar al espesor requerido para soportar la presión interna.

La presión de diseño no debe exceder 10 MPa o una sexta parte de la presión de *bursting*, la cual se define como el nivel de presión en el que ocurre la ruptura o la fractura inestable del recipiente. Para el caso de recipientes con pboo (*polar boss opening only*) no se debe exceder los 20 MPa ni una quinta parte de la presión de *bursting*. Este tipo de recipientes es considerado en caso especial dentro de los recipientes fabricados por *filament winding*, el cual consiste en que los casquetes contengan una única abertura la cual debe estar centrada con el eje de rotación y no superar la mitad del diámetro interno del recipiente.

Diseños clase 2

El espesor del recipiente se determinara a través de las reglas de diseño. El diseño debe basarse en la máxima presión de operación y las cargas adicionales deben ser incluídas en los cálculos de diseño. La máxima presión interna para recipientes diseñados por este método es de 689 kPa y el diámetro interno máximo permitido es 3.66 m. El espesor de pared debe ser superior a los calculados a continuación y nunca debe ser inferior a 6mm:

$$\text{Tensión longitudinal:} \quad t_1 = P \cdot R / 0.002 \cdot E_1$$

$$\text{Tensión circunferencial:} \quad t_2 = P \cdot R / 0.001 \cdot E_2$$

$$P = \text{presión interna}$$

$R = \text{radio interior}$

$E_1 = \text{módulo en la dirección longitudinal}$

$E_2 = \text{módulo en la dirección circunferencial}$

$t_1 = \text{espesor para tensión longitudinal}$

$t_2 = \text{espesor para tensión circunferencial}$

También debe calcularse el espesor de pared para los cabezales:

Cabezales elipsoidales: $t = P \cdot D / 0.002 \cdot E_{hd}$

Cabezales semiesféricos: $t = P \cdot R_s / 0.002 \cdot E_{hd}$

$D = \text{diámetro interior}$

$E_{hd} = \text{módulo de diseño para el cabezal}$

$P = \text{presión interna}$

$R_s = \text{radio esférico interno}$

$t = \text{espesor de pared del cabezal}$

3.2.3 - Requisitos de calificación

Estos requisitos se aplican solo para recipientes de diseño clase 1, debido a que la norma estipula con ecuaciones las presiones máximas de operación para los clase 2. Una vez fabricado el prototipo y antes de realizar los ensayos de calificación se debe comprobar lo siguiente:

- El material compuesto del recipiente debe cumplir con el criterio visual de aceptación dado en un tabla en la que se definen distintos tipos de imperfecciones que pueden aparecer en el laminado, así como la cantidad máxima y el tamaño máximo que se permiten de cada tipo de defecto.
- En cuanto al *liner*, se debe acordar un criterio de inspección del mismo entre el fabricante y el usuario.
- El espesor del recipiente debe ser comprobado en al menos 3 puntos a través de su longitud, para cada uno de sus 4 cuadrantes. Se debe utilizar un dispositivo

que asegure una precisión de $\pm 2\%$. Cuando el recipiente es más largo que 1.5m se debe realizar otro juego de determinaciones de espesor por cada 1.5m adicionales.

- El porcentaje en peso de fibra y resina que componen el material compuesto debe ser determinado por un ensayo de ignición (ASTM D2584-68) o un ensayo de digestión de matriz (ASTM D3171) de una muestra tomada de una porción sin daños del recipiente usado para la prueba de presión de calificación.
- Se debe determinar el peso del recipiente y no debe ser menor al 95% del indicado en la especificación del procedimiento. El dispositivo debe tener una precisión de $\pm 1\%$.

Una vez cumplidos los requisitos establecidos anteriormente, se deben realizar los siguientes ensayos para calificar el diseño del recipiente:

- Se deben realizar ensayos de dureza de Barcol en al menos 3 puntos a través de la longitud del prototipo, para cada uno de sus 4 cuadrantes. Cuando el recipiente es más largo que 1.5m se debe realizar otro juego de determinaciones de espesor por cada 1.5m adicionales. Las mediciones se deben realizar según ASTM D2583.
- El prototipo debe ser sometido a un ensayo de expansión volumétrica usando agua u otro fluido adecuado. El volumen de líquido necesario para llenar el recipiente a presión y temperatura atmosférica debe ser comparado con el necesario para llenarlo a la presión y temperatura de diseño. El volumen de líquido debe ser medido por cualquier método que asegure una precisión de $\pm 0.2\%$.
- Se debe realizar un ensayo de presión cíclica seguido por un ensayo de bursting. El fluido debe ser agua u otro adecuado y debe estar a la temperatura de diseño del recipiente. El recipiente debe ser ciclado desde la presión atmosférica hasta la presión de diseño 100000 veces, excepto para recipientes con pboo, para los cuales se necesitan solo 33000 ciclos. Luego se debe realizar un ensayo de bursting aplicando presión de manera uniforme hasta alcanzar al menos 6 veces la presión de diseño, y 5 veces la presión de diseño para recipientes con pboo, en no menos de un minuto, la máxima presión alcanzada es la presión de calificación. Si el prototipo no

alcanza dicha presión, pero alcanza el 90% de ese valor, se puede repetir el proceso para dos recipientes más, los cuales ambos deben superar la presión de calificación requerida y el promedio de las presiones alcanzadas, incluyendo el primer recipiente, debe ser mayor a la presión de calificación requerida.

3.2.4 - Requisitos de fabricación

El peso del refuerzo se debe ajustar a lo establecido en la especificación del procedimiento con una tolerancia de +10% y -10%. El patrón de enrollamiento debe ser el definido en la especificación del procedimiento y además las fibras deben estar alineadas para resistir las tensiones principales.

El equipo de curado debe ser capaz de proveer un calentamiento uniforme a toda la superficie del recipiente. Los tiempos y las temperaturas de curado deben ajustarse a los establecidos en la especificación del procedimiento.

La tensión en las hebras debe ser controlada durante todo el proceso para asegurar que los filamentos queden uniformemente tensionados en la pared del recipiente. La velocidad de enrollamiento estará limitada solo por la capacidad de la máquina. El ancho de banda y el espaciado de las hebras deben ser los especificados en la especificación del procedimiento.

El liner puede estar hecho de elastómero, plástico o metal. Si el liner se aplica antes de comenzar el proceso de enrollamientos, su espesor y dureza deben ser tales que no se afecte la tensión y orientación de las fibras por deformación o flujo del liner.

3.2.5 - Requisitos de control de calidad

Diseños clase 1

Todos los recipientes fabricados deben ser inspeccionados visualmente para determinar si poseen alguna de las imperfecciones descritas en la tabla 6-100.1. Las dimensiones de todos los recipientes deben estar en conformidad con los límites especificados en la especificación del procedimiento. Si durante la inspección visual surge evidencia de variaciones en el espesor, se deben realizar mediciones de espesor en el área

en cuestión, y la pérdida de espesor no debe ser superior al 10% ni extenderse a una distancia mayor a $0.5\sqrt{Rt}$ del centro del área que presenta la variación. Las imperfecciones pueden ser reparadas si su reparación no afecta la utilidad del recipiente. Todos los recipientes deben ser pesados y el peso de cada recipiente debe ser por lo menos un 95% del peso del prototipo.

Se debe someter a todos los recipientes a ensayos de dureza de Barcol y los valores obtenidos deben estar dentro de los límites dados en la especificación del procedimiento. Todos los recipientes deben ser sometidos a una prueba hidrostática de fuga, utilizando agua u otro fluido adecuado. La presión debe ser mantenida a 1.1 veces la presión de diseño (1.3 veces si el recipiente posee componentes metálicos soldados) durante un minuto y luego el recipiente debe ser examinado a la presión de diseño para verificar que no posea fugas.

Si el fabricante produce menos de 24 recipientes por año, debe repetir el ensayo de presión cíclica seguido por *bursting* en un recipiente por año. Si por año produce 24 recipientes o más, puede repetir el ensayo una vez cada 3 años. Además, sin importar la frecuencia temporal, se debe repetir el ensayo cada 1000 recipientes fabricados. Cada 1000 recipientes fabricados, y al menos una vez por año, se debe repetir el ensayo de determinación de peso de fibra y resina. Cada 10 recipientes fabricados, y al menos una vez por año, se debe repetir el ensayo de expansión volumétrica.

Diseños clase 2

Antes de realizar las pruebas de aceptación en todos los recipientes fabricados, se debe comprobar lo siguiente:

- El material compuesto del recipiente debe cumplir con el criterio visual de aceptación dado en la tabla 6-100.2. Dicha tabla es similar a la tabla 6-100.1 que fue descrita anteriormente, pero se aplica para el control de calidad de diseños clase 2.
- En cuanto al *liner*, se debe acordar un criterio de inspección del mismo entre el fabricante y el usuario.

- El espesor del recipiente debe ser comprobado en al menos 12 puntos y debe ser consistente con el espesor obtenido en los cálculos de diseño. Diámetros, longitudes y otras dimensiones físicas también deben ser comprobadas.
- Se deben realizar ensayos de dureza de Barcol para comprobar que el material ha sido curado apropiadamente. Los resultados deben estar dentro de los límites definidos en la especificación del procedimiento.
- El *liner* debe ser el definido en la especificación del procedimiento, debe estar firmemente unidos a la parte estructural del recipiente y no deben presentar indicios de un calentamiento excesivo.

Una vez cumplidos los requisitos anteriores, se debe verificar mediante una prueba hidráulica que el recipiente no tiene defectos estructurales y es adecuado para ser utilizado en las condiciones de operación para las cuales fue diseñado. Cada recipiente debe ser presurizado hasta 1.1 veces la presión de diseño mientras es monitoreado por sensores que detecten emisiones acústicas causadas por defectos estructurales en crecimiento. El fluido debe ser agua u otro adecuado y debe estar a una temperatura entre 5°C y la temperatura de diseño (o 38°C si dicha temperatura es inferior a 38°C). La presurización no debe exceder una velocidad del 2% de la máxima presión por minuto.

3.3 – ISO

En 2002 ISO (International Organization for Standardization) publicó su norma ISO11119 que se refiere a cilindros de gas construidos de material compuesto. La misma consta de tres partes, y se analizará la tercera parte ya que la misma se refiere a cilindros que poseen *liners* metálicos que no soportan carga o *liners* no metálicos, es decir recipientes tipo III y IV. La norma tiene un alcance que incluye recipientes cilíndricos de hasta 450 litros de capacidad y con una presión interna de hasta 650 bares.

3.3.1 - Requisitos de materiales

El *liner* debe ser fabricado de algún material adecuado para contener el fluido que almacenará el recipiente. El material del *liner* debe ser evaluado por el fabricante y aprobado por un inspector como apropiado para dicha aplicación específica.

Las fibras pueden ser de carbono, de vidrio, aramídicas o una combinación de las mismas. La resina utilizada para la matriz debe ser un polímero apropiado para la aplicación, el ambiente y el tiempo de vida a los que estará sometido el recipiente.

Los materiales utilizados deben ser de calidad uniforme y constante. El fabricante del recipiente debe verificar que cada lote de materiales utilizado tiene las propiedades correctas y es de calidad aceptable, y mantener un registro en el que los materiales de cada recipiente puedan ser identificados.

3.3.2 - Requisitos de diseño

Para calificar el diseño de un recipiente, se deben realizar los ensayos de calificación sobre prototipos. Para la realización de estos ensayos se debe establecer una presión de prueba. Si los recipientes pasan satisfactoriamente todos los ensayos de calificación con una cierta presión de prueba, se establece la presión de trabajo de los recipientes en 2/3 de la presión de prueba.

Los cilindros deben ser diseñados para que sean altamente confiables bajo presión interna constante y cargas cíclicas. Por lo tanto es necesario establecer el cociente de tensiones del material compuesto. El mismo se define como la tensión del material a la presión de rotura dividida por la tensión del material a la presión de trabajo. El mínimo valor del cociente de tensiones debe ser 3.4 para fibras de vidrio, 3.1 para aramídicas y 2.4 para fibras de carbono.

3.3.3 - Requisitos de calificación

Para calificar un nuevo diseño de recipiente, se deben fabricar por lo menos 30 cilindros que sean representativos de dicho diseño para realizar ensayos. Todos los cilindros utilizados para los ensayos de calificación deben haber cumplido previamente los requisitos de control de calidad. Se deben realizar los siguientes ensayos:

- Prueba hidráulica: se debe incrementar la presión del cilindro gradualmente hasta alcanzar la presión de prueba y luego mantenerla por al menos 30 segundos. Se debe rechazar el cilindro si durante la prueba existen pérdidas de fluido, grandes deformaciones, o si el cilindro falla al mantener la presión de prueba.
- Prueba hidráulica de *bursting*: tres cilindros deben ser presurizados hasta la rotura a una velocidad menor a 5 bar/s. La presión alcanzada no debe ser menor al doble de la presión de prueba.
- Ensayo cíclico ambiental: dos cilindros deben ser ensayados en una prueba hidráulica utilizando un fluido no corrosivo. Se los debe presurizar hasta la presión de prueba y luego despresurizar hasta una presión inferior al 10% de la de prueba. No se deben exceder los 15 ciclos por minuto y en ningún momento del ensayo la temperatura en la superficie del cilindro debe exceder los 50°C. Los cilindros deben soportar 250 ciclos por cada año que tengan previsto estar en servicio sin presentar pérdidas ni rotura.
- Ensayo de vacío: un cilindro debe ser sometido a 50 ciclos que consisten en una despresurización desde presión atmosférica hasta una presión de 0.2 bar a temperatura ambiente. El vacío debe ser mantenido por al menos un minuto. Al finalizar el ensayo se debe inspeccionar el interior del *liner* para detectar cualquier tipo de daño producido.
- Ensayo cíclico en condiciones ambientales severas: para este ensayo se debe utilizar el cilindro que se utilizó para el ensayo de vacío. Se deben aplicar 5000 ciclos desde presión atmosférica hasta $\frac{2}{3}$ de la presión de prueba, con condiciones ambientales de temperatura entre 60°C y 70°C y una humedad relativa igual o mayor al 95%. Luego aplicar otros 5000 ciclos con presiones similares pero con una temperatura entre -50°C y -60°C. Luego aplicar unos 30 ciclos desde presión atmosférica hasta presión de prueba, en condiciones ambientales normales. No se deben superar los 5 ciclos por minuto. Finalmente el cilindro debe ser sometido a una prueba hidráulica de *bursting* y alcanzar una presión de 1.4 veces la presión de prueba.

- Ensayo a alta temperatura: dos cilindros deben ser presurizados a la presión de prueba y colocados en un ambiente con una temperatura de al menos 70°C y humedad relativa de menos del 50%. La presión se debe mantener por 1000 horas si la vida útil de diseño es menor a 20 años, o por 2000 horas si es mayor o igual a 20 años. Luego de este ensayo los cilindros deben pasar satisfactoriamente el ensayo de fuga y luego alcanzar dos veces la presión de prueba en una prueba hidráulica de *bursting*.
- Ensayo de fisuras: dos cilindros deben ser fisurados utilizando un *cutter* de 1 mm de espesor. La primera fisura debe ser longitudinal estar ubicada en el centro de la longitud del cilindro, la segunda debe ser circunferencial y estar ubicada a 120° de la otra fisura. Ambas deben tener una longitud de 5 veces el espesor de la pared de material compuesto del cilindro y una profundidad de al menos el 40% del espesor de la misma. Uno de los cilindros debe ser sometido a una prueba de *bursting* y alcanzar 4/3 de la presión de prueba. El otro debe ser sometido a un ensayo cíclico ambiental pero alcanzando 2/3 de la presión de prueba y soportar 1000 ciclos sin pérdidas y 5000 ciclos sin fallar por *bursting* (si falla por pérdidas luego de los 1000 ciclos se considera que el cilindro pasó el ensayo).
- Ensayo de caída: dos cilindros deben ser llenados al 50% de su capacidad con agua. Cada cilindro se debe dejar caer dos veces desde cada una de las posiciones que se indican en la figura. La superficie sobre la cual se dejan caer deber ser de acero y no tener diferencia de más de 2 mm entre ninguno de sus puntos. Luego uno de los cilindros debe pasar la prueba hidráulica de *bursting* y el otro el ensayo cíclico ambiental.

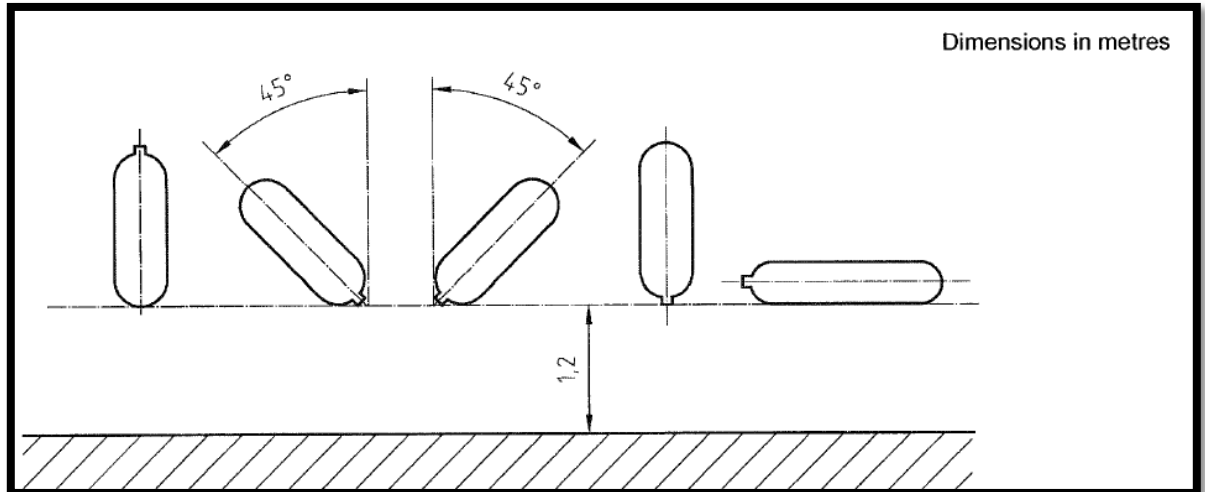


Figura 3.2 - Posiciones para el ensayo de caída

- Ensayo de balística: un cilindro debe ser presurizado a $2/3$ de la presión de prueba con aire o nitrógeno. El cilindro debe ser posicionado de tal forma que la bala impacte en la pared lateral del cilindro con un ángulo de 45° y luego salga también por la pared lateral. El proyectil debe penetrar al menos una pared del cilindro, si esto no ocurre se debe aumentar la energía del impacto. La velocidad del proyectil debe ser de al menos 850 m/s y ser disparado a una distancia menor a 45 m. Cilindros de más de 120 mm de diámetro deben ser impactados con un proyectil de 7.62 mm y cilindros de menos de 120 mm de diámetro deben ser impactados con un proyectil de 5.6 mm. Para pasar este ensayo el cilindro debe permanecer en una pieza.
- Prueba de fuga: se debe presurizar un cilindro a $2/3$ de la presión de prueba utilizando aire, nitrógeno o el gas que contendrá el cilindro durante su vida útil. La velocidad de pérdida de gas debe ser menor a 0.25 ml/h/l.
- Ensayo cíclico neumático: un cilindro debe ser presurizado a $2/3$ de la presión de prueba durante 72 horas con aire, nitrógeno o el gas que contendrá el cilindro durante su vida útil. El cilindro debe ser sometido a 100 ciclos entre presión atmosférica y $2/3$ de la presión de prueba. Cada ciclo debe ser completado entre 55 y 65 minutos. Luego se debe mantener el cilindro a $2/3$ de la presión de prueba por otras 72 horas. La superficie interna del cilindro debe ser inspeccionada visualmente

y no mostrar chichones ni colapso del *liner*. Finalmente el cilindro debe pasar el ensayo cíclico ambiental.

3.3.4 - Requisitos de fabricación

Durante el laminado las fibras deben aplicarse en sentido longitudinal y circunferencial, mientras la tensión de las mismas es controlada, para lograr el espesor deseado de material compuesto. Una vez finalizado el laminado, el compuesto debe ser curado (si es que corresponde) utilizando un perfil de temperatura apropiado. La máxima temperatura debe ser tal que las propiedades mecánicas del *liner* y del compuesto no se vean afectadas negativamente.

3.3.5 - Requisitos de control de calidad

Liners

Todos los *liners* utilizados deben ser examinados visualmente para verificar que su acabado superficial interno y externo sea adecuado. También deben medirse las dimensiones de los mismos y el espesor de pared que poseen, y verificar que se correspondan con los especificados en el diseño.

Un *liner* de cada lote debe ser ensayado para verificar que los mismos poseen las propiedades adecuadas. Si el *liner* es metálico debe ser ensayado según ISO 6892 y si es no metálico según ISO 527-1 e ISO 527-2.

La homogeneidad de todos los *liners* deben ser examinados con algún ensayo no destructivo para verificar que fueron procesados correctamente. Si los *liners* son metálicos, se debe verificar la dureza del 5% de los mismos según ISO 6506-1 o ISO 6508-1 después de someterlos a su tratamiento térmico correspondiente.

Fibras

Cada lote de fibras debe ser sometido a un ensayo para verificar las propiedades en tensión de las mismas. Se debe utilizar la norma ASTM D 2343-95 para fibras de vidrio y aramídicas, y la ASTM D 4018-99 para fibras de carbono.

Recipientes

Cada cilindro fabricado debe ser inspeccionado visualmente para verificar que sus superficies internas y externas estén libres de defectos. Se debe verificar también que sus dimensiones, su peso y su capacidad volumétrica esté acorde a lo especificado en el diseño del mismo.

Todos los cilindros deben pasar satisfactoriamente una prueba hidráulica como la especificada en los requisitos de calificación. Un cilindro por lote de cilindros fabricados debe pasar satisfactoriamente el ensayo cíclico ambiental especificado en los requisitos de calificación. Un cilindro por lote de cilindros fabricados (se puede utilizar el mismo cilindro que se utilizó para el ensayo cíclico ambiental) debe pasar satisfactoriamente la prueba hidráulica de *bursting* especificada en los requisitos de calificación. Todos los cilindros que contengan *liners* metálicos con soldadura o *liners* no metálicos debe pasar la prueba de fuga especificada en los requisitos de calificación.

3.4 – Normativa para recipientes tipo V

Teniendo en cuenta la normativa actual para recipientes con *liner* y los conocimientos teóricos de los recipientes *linerless*, a continuación se realiza una propuesta de normativa para recipientes tipo V. La misma se realiza considerando que estos recipientes son utilizados en mercados de bajo volumen de demanda y con un número de ciclos de carga y descarga durante la vida útil reducido, como por ejemplo en aplicaciones aeroespaciales

3.4.1 - Requisitos de materiales

Debido a que este tipo de recipientes no posee ningún tipo de recubrimiento interno que separe al fluido almacenado del material compuesto, se deben seleccionar una combinación de matriz y refuerzo que sean adecuados para contener el tipo de fluido que almacenará el recipiente. Se debe asegurar que el fluido almacenado no afectará de ninguna forma la integridad del material compuesto durante la vida útil del recipiente. En lo que respecta a la microfisuración, es recomendable utilizar resinas con elevada tenacidad a la fractura, debido a que esa propiedad aporte alta resistencia a la formación de microfisuras.

Todos los lotes de resina y fibras utilizados deben mantener una calidad uniforme y constante. Las fibras utilizadas deben poseer valores de módulo elástico y resistencia adecuados, para esto se deben ensayar dichas propiedades para cada lote utilizado y verificar que los valores se mantengan dentro de rangos aceptables. Lo mismo debe asegurarse para la resina con sus valores de viscosidad, gravedad específica y tiempo de gel.

Se debe realizar un ensayo de tensión uniaxial sobre un laminado fabricado con la resina y las fibras que se van a utilizar en el recipiente. El laminado debe consistir en una cierta cantidad de capas a 90° (fibras perpendiculares a la dirección de la tensión) entre capas a 0° (fibras en el sentido de la tensión), compactadas y curadas con presión y temperatura en una prensa hidráulica. Del laminado se deben cortar probetas de 13 mm de ancho y 200 mm de largo, y pulir uno de sus lados para que puedan diferenciarse sus capas claramente en un microscopio con 10 aumentos. El ensayo consiste en aumentar la tensión mientras se cuentan las microfisuras que aparecen en la capa central, las cuales se pueden ver mediante el microscopio, y se registra la longitud de la probeta. El objetivo del ensayo es obtener la densidad de microfisuras en función de la deformación de la probeta, como también la deformación a la cual aparecen las primeras microfisuras. Ese valor de deformación se utiliza como valor de diseño en el recipiente. Se debe emplear un espesor de laminado que asegure que en todo el recipiente no se supere la deformación a la cual se generan las microfisuras.

3.4.2 - Requisitos de diseño

Para el diseño del recipiente se debe establecer la presión máxima a la cual el recipiente operará durante su vida en servicio (máxima presión de operación esperada). Como este tipo de recipientes no poseen un *liner* que separe el fluido del material compuesto, se asume que la falla de los mismos ocurre cuando se comienza a microfisurar la matriz, ya que estas microfisuras pueden afectar la permeabilidad del recipiente. Las microfisuras comienzan a aparecer a un determinado nivel de deformación, dicho nivel de deformación no debe ser alcanzado nunca ya que generaría un daño irreversible en el recipiente. Como principio de diseño se establece que el recipiente debe tener un espesor tal que la deformación a la cual

aparecen las microfisuras no se alcance antes de que la presión interna llegue a 1.5 veces la máxima presión de operación esperada. Además se debe asegurar que no ocurra falla por rotura del compuesto antes de que la presión interna alcance 2 veces la máxima presión de operación esperada.

3.4.3 - Requisitos de calificación

Se deben fabricar dos recipientes para ensayos de calificación. Ambos deben ser sometidos en primer lugar a una prueba hidráulica de presión cíclica entre presión atmosférica y la máxima presión de operación esperada. La cantidad de ciclos debe ser 4 veces la cantidad de ciclos esperados en la vida útil del recipiente, o 50 ciclos si el número de ciclos para el ensayo resulta menor. Luego de esta prueba ambos recipientes deben ser sometidos a una prueba hidráulica de *bursting*. Se debe aumentar la presión hasta alcanzar 2 veces la máxima presión de operación esperada y mantenerla en ese nivel hasta asegurar que no se produce la falla catastrófica del recipiente. Finalmente seguir aumentando la presión hasta la rotura del recipiente.

3.4.4 - Requisitos de fabricación

Al eliminar el *liner* del proceso de fabricación, se debe utilizar un mandril removible sobre el cual pueda fabricarse el recipiente por *filament winding*. Se pueden utilizar mandriles plegables, quebradizos o solubles, siempre y cuando dicho mandril tenga la rigidez adecuada para soportar la tensión de las fibras durante el laminado. El mandril utilizado también debe soportar la temperatura y las tensiones térmicas que pueda sufrir durante el curado del recipiente. Se debe asegurar que durante la remoción del mandril no se dañe de ninguna forma la superficie interna del recipiente ni se afecte la integridad del mismo.

Durante el laminado se debe prestar especial atención a la ubicación de las bandas, ya que si quedan espacios entre las misma se pueden generar canales por los cuales el fluido puede escapar del recipiente. También se debe controlar constantemente la impregnación de las fibras para evitar que queden secas o que se genere un exceso de resina. Antes de laminar la primera capa sobre el mandril, se puede recubrirlo con resina para evitar que la superficie interna del recipiente quede con las fibras mal impregnadas.

3.4.5 - Requisitos de control de calidad

Antes que nada se debe verificar la integridad estructural de todos los recipientes fabricados. Un inspector certificado debe inspeccionar la superficie interna mediante boroscopia y la externa mediante inspección visual, para asegurar que ambas superficies estén libres de defectos. Además se deben medir los espesores a lo largo de toda la superficie del recipiente por la técnica de ultrasonido para verificar que no presente zonas con falta de material ni delaminaciones. También se debe comprobar el peso, la capacidad volumétrica y las dimensiones de los recipientes fabricados, y asegurar que ninguno de estos parámetros esté fuera de lo especificado en el diseño. En cuanto a la resina se debe controlar su curado mediante calorimetría diferencial de barrido. Se debe tomar una pequeña muestra de la superficie del recipiente, y realizar una corrida dinámica en DSC a fin de identificar la presencia de calor residual y determinar la Tg del sistema. En una segunda corrida, se debe verificar que se alcance la máxima Tg posible, ya que la obtención de valores inferiores es un indicador de mal mezclado de los componentes de la resina.

A todos los recipientes fabricados se les debe realizar una prueba hidráulica de aceptación. En este ensayo se debe presurizar el recipiente a 1.3 veces la máxima presión de operación esperada y mantener la presión durante un tiempo suficiente para asegurar que no ocurran fallas. Una vez verificado que el recipiente fabricado no falla catastróficamente a dicha presión, se le debe realizar un ensayo de estanqueidad de gases para asegurar que no sufre de microfisuración. Se debe presurizar el recipiente a 1.25 veces la máxima presión de operación esperada con el gas que almacenará durante su vida útil y verificar que no presente fugas ni caídas de presión.

4 - FABRICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE TUBULARES

A fin de estudiar las principales variables de procesamiento de tanques sin *liner*, se decidió fabricar componentes tubulares que simulen todas las características de fabricación de los tanques, sin la complejidad geométrica aportada por los casquetes. La fabricación de estos tubulares tiene como objetivo evaluar y mejorar los parámetros de proceso que influyen sobre las características finales de los mismos. En este capítulo se realiza una descripción del equipo y del procedimiento que se utilizaron para fabricar diferentes tubulares, así como también de los ensayos de caracterización que se le realizaron a dichos tubulares. Una vez determinados los parámetros de proceso que resultan en tubulares de mejores propiedades se laminaron una serie de tubos destinados a pruebas de presión.

4.1 - Descripción del equipo

4.1.1 - Descripción de la máquina

La máquina utilizada posee tres motores, uno que genera la rotación del mandril, otro los movimientos del carro y un tercero que permite la rotación y el avance del brazo. Los rodillos de alineación, la batea y el devanador están sobre el carro y se mueven con él. La batea está calefaccionada y posee un control de temperatura. Además de la rotación del mandril y del movimiento horizontal del carro, la máquina también posee dos movimientos adicionales. La inclinación del brazo del devanador es variable para que las fibras apoyen mejor sobre el mandril y, en el caso de que se quiera laminar tanques, la máquina es capaz de acercar o alejar el devanador al eje del mandril para poder laminar los casquetes del mismo.

El control de la máquina se ejerce a través de una computadora en la cual se carga el código de control numérico que indica la secuencia de movimientos que debe realizar el equipo para fabricar una determinada pieza. . Desde la misma se puede interrumpir el laminado en caso de que ocurra algún problema o repetir alguna capa en caso de que salga mal.



Figura 4.1 - Máquina de *filament winding*

4.1.2 – Mandril

El mandril utilizado es un mandril de acero con forma cilíndrica. El diámetro del mismo es de 101,6 milímetros, por lo tanto este será el diámetro interior de los tubos fabricados. El largo del mandril es de 115 centímetros, por lo tanto los tubos fabricados deberán ser más cortos que esta longitud. El mismo posee ranuras en sus extremos para que pueda ser montado en la máquina. También tiene una pequeña conicidad para facilitar el desmolde de los tubos.

4.1.3 – Pines

Si el tubo a fabricar tendrá alguna capa con ángulos bajos con respecto al eje del mandril, se debe utilizar pines. Los pines consisten en una banda de 3 centímetros de ancho que posee tres hileras de clavos, una centrada y las otras dos a medio centímetro hacia cada lado. Los clavos están separados a 0.8 centímetros y abarcan toda la longitud de la banda, que debe ser igual al perímetro del mandril.

Se deben colocar dos pines separados a una distancia determinada. Su función es que la fibra se enganche en los clavos y quede fija cuando el carro llega al límite de carrera y comienza a laminar hacia el otro sentido. Para ángulos altos no son necesarios, pero no se puede laminar con ángulos bajos sin utilizarlos ya que la fibra no quedaría fija sobre el mandril.



Figura 4.2 - Pines

4.1.4 – Alimentador de fibra

Al momento de realizar el laminado las fibras se encuentran enrolladas en las bobinas, y a su vez las bobinas se encuentran en el alimentador de fibras. Dicho alimentador es la estructura que se utiliza para acomodar las fibras que se utilizaran durante el laminado y además darles tensión.

Al salir de las bobinas, cada mecha pasa por detrás de un rodillo que se encuentra a una cierta distancia debajo de la bobina, el cual le da tensión a las fibras por su propio peso. Además, cada bobina se encuentra entre dos tuercas que pueden ajustarse para dificultar la rotación de la bobina y darle más tensión a las fibras.



Figura 4.3 - Alimentador de fibras

Luego de salir del alimentador las mechas pasan por una serie de rodillos en donde se alinean antes de entrar a la batea. De cada bobina sale una mecha, luego todas las mechas se juntan al salir de los rodillos de alineación para formar la banda. La máquina tiene la capacidad de utilizar hasta cuatro mechas.



Figura 4.4 - Rodillos de alineación

4.1.5 – Batea

La batea es el recipiente que contiene la resina con la cual las fibras son impregnadas antes de llegar al mandril. En ningún momento las fibras se sumergen en la resina de la batea, sino que la impregnación se logra mediante cuatro rodillos que se encuentran dentro de la batea y que transfieren la resina que arrastran al entrar en contacto con las mechas.

Primero las fibras pasan por debajo del primer rodillo y luego por encima del segundo. El segundo rodillo es más grande que los demás y su parte inferior se encuentra sumergida en la resina, por lo que la levanta e impregna a las fibras que pasan por la parte superior del mismo. La cantidad de resina que levanta este rodillo se controla mediante un escurridor metálico cuya distancia al rodillo es regulable. Además puede controlarse la abertura entre este rodillo y el tercero, que cumple la función de remover el exceso de

resina que llevan las fibras. Finalmente las fibras ya impregnadas pasan por debajo del tercer rodillo y por encima del cuarto para luego pasar al devanador.

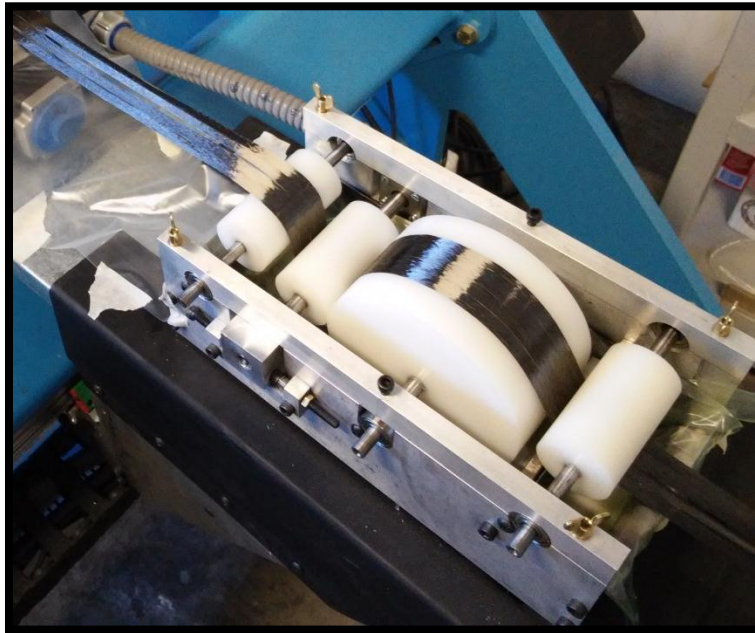


Figura 4.5 - Batea

La batea posee calefacción por resistencias, y un sistema de control que permite mantener fija la temperatura de la batea y así controlar su viscosidad. Variando esta temperatura junto con la abertura del escurridor y la distancia entre el segundo y el tercer rodillo se controla la impregnación de las fibras, y por lo tanto la cantidad de resina que tendrá el material compuesto.

4.1.6 - Devanador

El devanador es el último rodillo por el que pasa la fibra antes de llegar al mandril, este está ubicado en un brazo metálico cuya distancia al mandril es regulable. Su función es hacer que la fibra apoye sobre el mandril de manera correcta, para esto el brazo es capaz de girar cambiando la inclinación del rodillo en función del ángulo con el que se esté laminando. Para ángulos altos de laminado el brazo se mantiene en un ángulo bajo (eje del rodillo casi horizontal) y para ángulos altos de laminado el brazo se mantiene en un ángulo alto (eje del rodillo casi vertical).



Figura 4.6 - Devanador

4.2 – Descripción del Procesamiento

4.2.1 - Creación de Código-G

El código-G es básicamente lo que le indica a la máquina que hacer al momento de laminar. Este código controla la rotación del mandril, el movimiento horizontal del carro y el ángulo del brazo. Para fabricar tubos se utiliza un *software* llamado *filwind5*, que genera el código-G que luego es llevado a la máquina para realizar el laminado.

En el *software* se debe introducir inicialmente la longitud que se desea que tenga el tubo fabricado, la distancia del devanador al mandril y el coeficiente de rozamiento. Luego para cada capa que se quiere laminar se debe ingresar:

- El diámetro sobre el que se laminará. Para la primera capa este será el diámetro del mandril, pero para las capas siguientes será el diámetro del mandril más las capas que ya se laminaron sobre él.

- Si se utilizaran pines o no. En caso de utilizarlos se debe especificar la distancia entre ambos pines.
- El ángulo con respecto al eje del mandril con el que se quiere laminar la capa. La máquina lamina con el ángulo elegido cuando el carro va en un sentido y vuelve a repetir el ángulo con el carro moviéndose en el sentido contrario, por lo tanto con cada capa se cubre dos veces toda la superficie del mandril.
- El ancho de la banda de fibras, es decir el ancho resultante de la banda que forman todas las mechas luego de pasar los rodillos y el devanador.

Una vez que se introdujeron estos parámetros y todas las capas que van a componer el tubo a fabricar, la máquina permite optar entre varios patrones de entrecruzamiento. Finalmente se debe especificar el gasto de fibra para cada capa, que está relacionado con la velocidad con la que se laminará, y verificar que ninguno de los dos motores de la máquina exceda su capacidad.

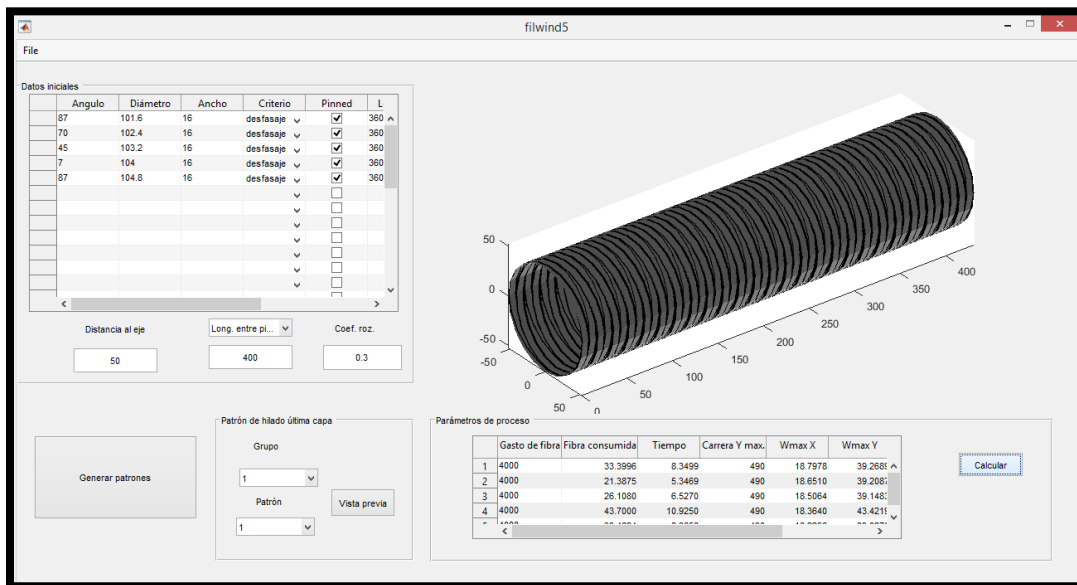


Figura 4.7 - Software Filwind5

4.2.2 - Laminado

Antes de comenzar a laminar se debe tener en cuenta:

- Que el mandril esté colocado en la máquina y con los pines en posición, si es que se utilizaran. Antes de laminar se le debe aplicar desmoldante al mandril. El mismo se aplica en aerosol sobre toda la superficie del mandril donde se va a laminar y se remueve el exceso utilizando papel. Luego el mandril debe ser precalentado a 80°C durante una hora.
- Que la resina esté preparada en cantidad suficiente. Si la resina posee muchas burbujas es recomendable realizarle un sonicado para eliminarlas.
- Que el código-G esté cargado en la máquina.
- Que la batea esté armada con todos los rodillos en posición, la abertura del escurridor y la separación entre rodillos haya sido fijada, y que el control de temperatura esté encendido y a la temperatura deseada.
- Que la distancia del devanador al eje sea la indicada en el código-G que se va a utilizar.
- Que las fibras estén ubicadas correctamente en el alimentador de fibra y que este se encuentre a una distancia adecuada de la máquina.
- Que todas las mechas sigan el camino correcto sin cruzarse desde que salen de las bobinas hasta que llegan al devanador.

Una vez que todo esté en posición se vuelca la resina en la batea y se pinta el mandril con resina para que la primera capa no quede demasiado seca. Se toma la banda de fibras y se tira de ellas hasta que aparezcan impregnadas con resina, luego se le da un par de vueltas alrededor del mandril para que cuando este comience a girar tire de las fibras sin que estas deslicen debido a la tensión que tienen. Se coloca el carro en la posición inicial y se verifica que el devanador no tenga inclinación, es decir que esté en posición horizontal.

Estando el carro, el mandril y el devanador en las posiciones descriptas, desde el controlador de la máquina se toman como cero de referencia dichas posiciones. Una vez realizado esto se puede comenzar a laminar.

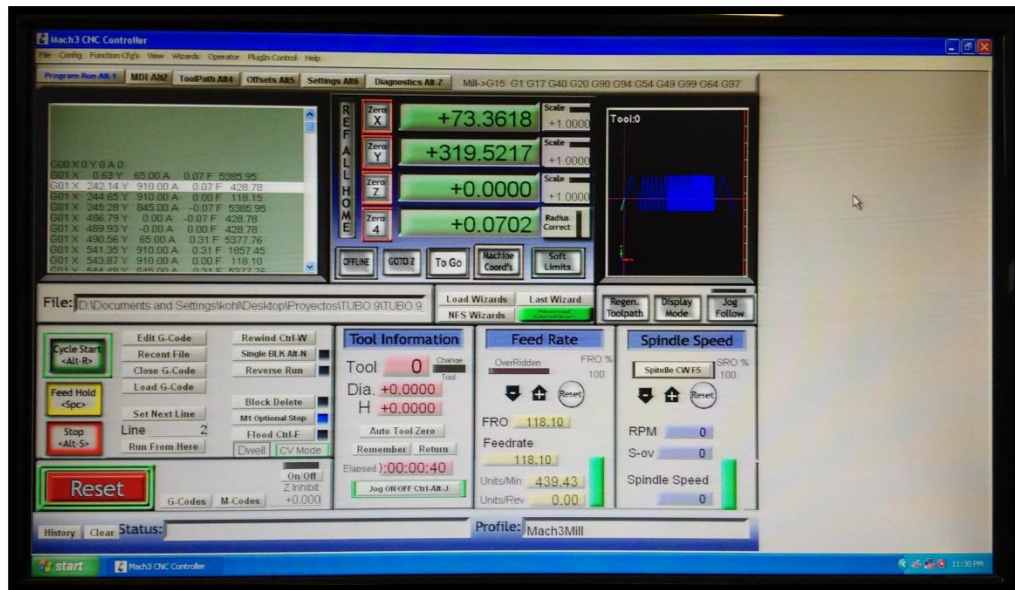


Figura 4.8 - Pantalla del controlador

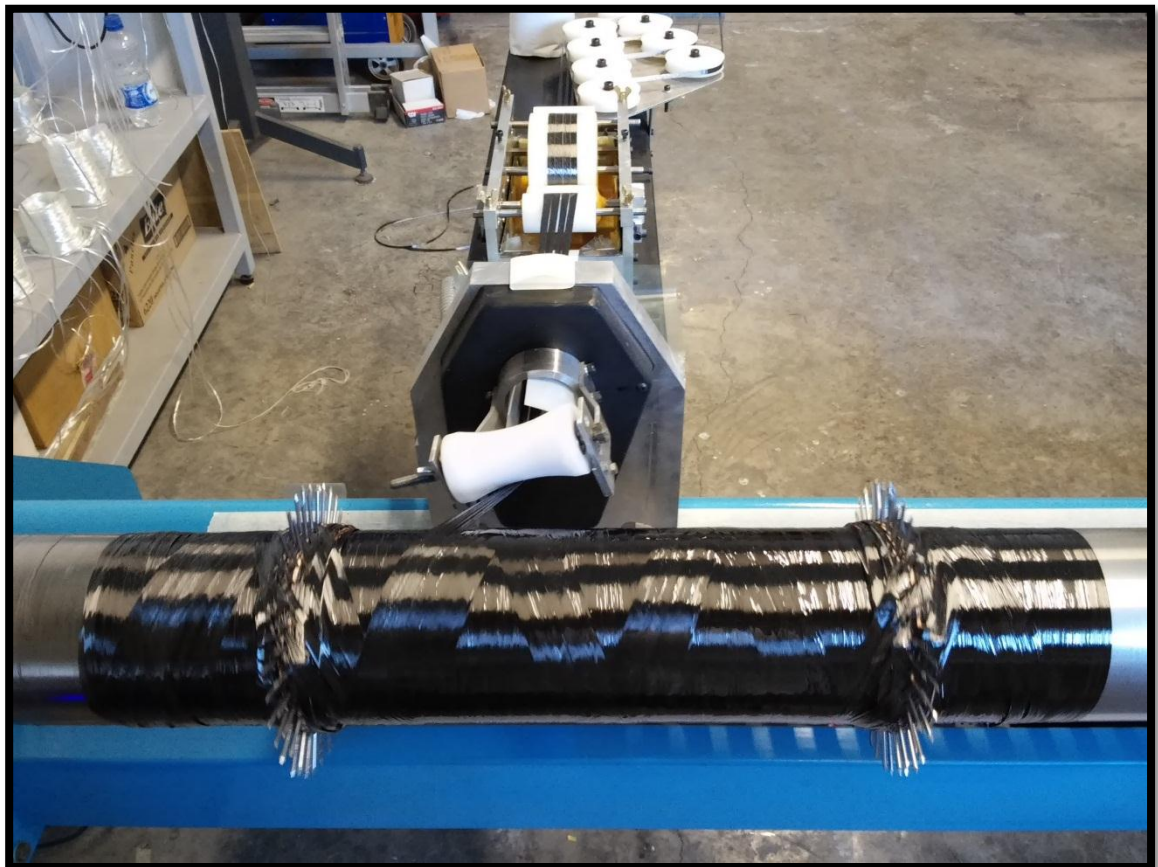


Figura 4.9 - Laminado de capa con ángulo de 70 grados

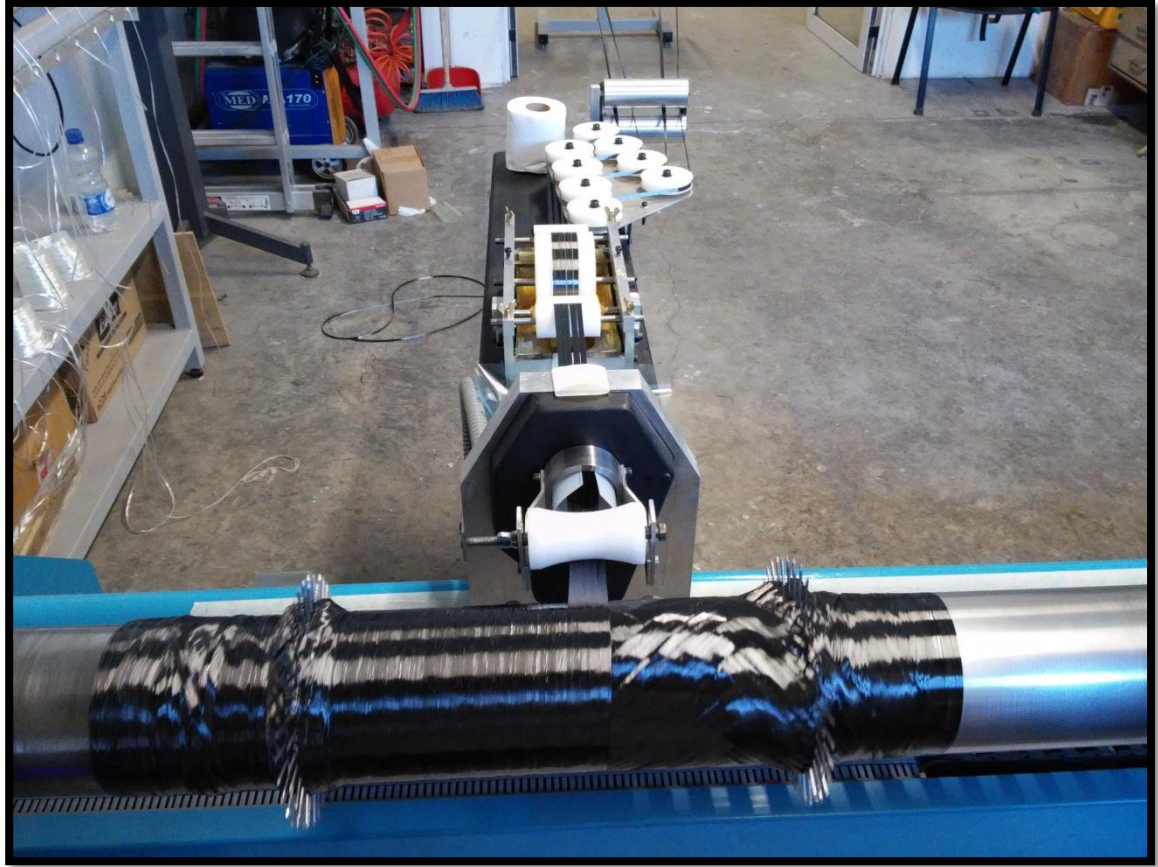


Figura 4.10 - Laminado de capa con ángulo de 87 grados

Cuando la máquina finaliza todas las capas se corta la banda de fibras que no llegaron al mandril y el tubo ya está listo para el curado.

4.2.3 - Curado y desmolde

Una vez finalizado el laminado se remueve el mandril de la máquina y se lo lleva al horno para el curado. El curado por lo general se realiza en dos etapas. En la primera la resina todavía no geló por lo tanto el mandril debe mantenerse rotando sobre su eje longitudinal para que la resina no gotee por gravedad. En la segunda la resina ya se encuentra gelada por lo que se puede detener la rotación y se aumenta la temperatura del horno con el objetivo de aumentar la Tg de la resina.



Figura 4.11 - Horno de curado



Figura 4.12 - Mandril con tubo terminado dentro del horno de curado

Una vez finalizado el curado se remueve el mandril con el tubo del horno y se lo lleva al extractor de tubos. El extractor de tubos es una estructura que posee un malacate que tira del mandril y lo fuerza a pasar por una ranura circular, la cual tiene un diámetro que permite que pase el mandril pero no el tubo. De esta forma el mandril pasa por la ranura pero el tubo queda trabado, por lo que el mandril se desliza fuera del tubo.



Figura 4.13 - Extractor de tubos

4.3 – Caracterización de tubulares

4.3.1 – Determinación de densidad

La densidad es una propiedad muy importante en todos los materiales compuestos, ya que una de sus ventajas con respecto a otros tipos de materiales radica en su baja densidad. Además, la densidad es una propiedad que se puede utilizar para calcular el volumen de fibra de un componente.

La densidad de un sólido se puede determinar por la técnica de picnometría, procedimiento que está detallado en la norma ASTM D 792 y se basa en el desplazamiento de un volumen de líquido cuando se agrega la muestra dentro del picnómetro.

4.3.2 – Determinación del espesor promedio por capa

En todo laminado es importante conocer el espesor que ocupa cada capa para evaluar los parámetros de procesamiento. Sin embargo debe tenerse en cuenta que, en tubos fabricados por *filament winding*, el espesor de la capa depende del ángulo de laminado. Por lo tanto se debe considerar el ángulo al comparar los espesores promedios de tubos diferentes.

Una forma de obtener el espesor promedio de un tubular es medir con un calibre el espesor de pared y dividirlo por la cantidad de capas que posee. Otra forma es medir el diámetro exterior con una cinta Pi, y como el diámetro interior coincide con el diámetro del mandril, con ambos se puede obtener el espesor de pared y dividirlo por la cantidad de capas.

4.3.3 – Determinación del volumen de fibra

Un parámetro muy relevante en el diseño y la fabricación de componentes de materiales compuestos es el volumen de fibra, ya que las propiedades mecánicas están fuertemente influenciadas por su valor.

Una forma para calcular el volumen de fibras consiste en medir la densidad del material compuesto y de sus componentes (fibra ρ_f y matriz ρ_m) por la técnica de picnometría. Además, permite tener en cuenta el efecto que produce la presencia de porosidad, utilizando la fracción volumétrica de poros V_p . Suponiendo que la densidad del compuesto (ρ_c) se comporta según la regla de las mezclas y despejando se llega a la siguiente ecuación:

$$V_f = \frac{\rho_c - \rho_m \cdot (1 - V_p)}{\rho_f - \rho_m}$$

Ecuación 4.1 – Volumen de fibras según regla de las mezclas

4.3.4 – Determinación del contenido de porosidad

El contenido de porosidad en un material compuesto es un parámetro muy importante ya que cuantifica la cantidad de poros introducidos en la etapa de conformado. Dichos poros pueden actuar como defectos mecánicos o aumentar la permeabilidad del material. Además,

en tubos obtenidos por filament winding es muy peligrosa la posible alineación de poros ya que pueden actuar como iniciadores de falla.

Para obtener su valor se deben preparar probetas de varias zonas del tubo y en varias direcciones. Se necesita pulir a espejo las superficies, observarlas en microscopio óptico y cuantificar el porcentaje de poros mediante un software de análisis de imagen.

4.4 – Estudio de los parámetros de proceso

En esta etapa del proyecto se fabricaron varios tubos de bajo espesor con el objetivo de estudiar el efecto de las distintas variables del proceso sobre las características del laminado. Se variaron los ángulos de laminado, los anchos de banda, la temperatura de la batea y la abertura de los escurridores. Durante el laminado se controló la impregnación de las fibras y la ubicación de las bandas sobre el mandril. Se fueron optimizando las variables de proceso en búsqueda de un menor nivel de defectos, los cuales se evaluaban mediante la realización de ensayos de caracterización sobre los tubos obtenidos. Como refuerzo se utilizaron fibras de carbono de módulo medio T700 de Toray (Japón). El sistema que se utilizó como matriz está compuesto por epoxi una resina epoxi (DGEBA Dow 383), un endurecedor tipo anhídrido (MTHPA Dicure 319 Distaltec) y un iniciador (amina).

Tubo 1:

Objetivos:

Este tubular se toma como punto de partida para evaluar cómo se relacionan las condiciones de operación con las propiedades mecánicas del tubo.

Condiciones de operación:

Se realizaron cuatro capas en total. Primero una a 30 grados seguida de otra a 85 grados, y se repitieron ambas capas. Se fijó el ancho de mecha en 20 mm. La abertura de los escurridores se dejó tal cual llegó la máquina del proveedor.

Caracterización y observaciones:

Ensayo	Resultado
---------------	------------------

Densidad	1,41 g/cm ³
Espesor promedio por capa	0,55 mm
Fracción volumétrica de fibras	0,39
Porosidad longitudinal	6,16 %
Porosidad transversal	5,17 %

Tabla 4.1 - Propiedades del tubular 1

Los valores de densidad y fracción volumétrica obtenidos fueron sustancialmente menores a los esperados. Por otro lado, la porosidad alcanzó un valor notable.

Conclusiones:

Durante el laminado se observó que en las capas con ángulo de 30 grados las bandas contiguas quedaban separadas, cuando en realidad no debería quedar ningún espacio entre bandas una vez que apoyan sobre el mandril, ya que esto generaría partes del tubo con menos capas de fibra. Esto no ocurrió en las capas con ángulo de 85 grados.

También se observó un deslizamiento de la primera capa que apoyaba sobre el mandril, generando zonas vacías en la cara interna del tubular.

Tubo 2:

Objetivos:

Solucionar el problema del espacio entre bandas en las capas con ángulo de 30 grados. Evitar el problema del deslizamiento sobre el mandril de la primera capa. Variar la apertura de los escurridores y evaluar sus efectos. Reducir la porosidad.

Condiciones de operación:

Se laminaron cinco capas con la siguiente secuencia: $\pm 85/\pm 30/\pm 85/\pm 30/\pm 85$. Para intentar solucionar el problema del espacio entre bandas en las capas con ángulo a 30 grados se disminuyó en el código-G el ancho de banda de 20 mm a 16 mm. Para evitar el deslizamiento de la primera capa se inició a laminar con un ángulo de 85 grados, ya que así se llena toda la superficie del mandril en una única pasada. También se añadió una quinta

capa con un ángulo alto esperando que ejerza presión sobre las capas anteriores y reduzca la porosidad. Durante el procesamiento se variaron las aberturas de los escurridores.

Caracterización y observaciones:

Ensayo	Resultado
Densidad	1,42 g/cm ³
Espesor promedio por capa	0,57 mm
Fracción volumétrica de fibras	0,39
Porosidad longitudinal	6,76 %
Porosidad transversal	4,20 %

Tabla 4.2 - Propiedades del tubular 2

Se observó un leve aumento en densidad y en fracción volumétrica de fibra. Sin embargo, los resultados fueron menores a los esperados por lo que se decidió seguir optimizando el procesamiento del tubular. Además, se observó una reducción en la porosidad transversal pero dicho valor sigue siendo considerable.

Conclusiones:

Con el nuevo ancho de banda ya no se observó espacio entre bandas, por lo tanto se determinó que 16 mm es el ancho de banda adecuado. Con la primera capa a 85 grados se solucionó el problema del deslizamiento.

Con respecto a la apertura de escurridores, al modificarla se observó cómo cambia notablemente la cantidad de resina con la que salen las fibras, pero no se pudo medir de ninguna forma la abertura.

Tubo 3:

Objetivos:

Fabricar un tubo que tenga un sobreespesor en ambos extremos. Controlar la apertura de los escurridores para intentar aumentar el contenido de fibras. Laminar una capa con un ángulo bajo para aumentar la resistencia longitudinal y así aproximarse al diseño real de componente.

Condiciones de operación:

Antes de comenzar el laminado se utilizó una galga de espesores para medir la apertura de los escurridores y se ajustaron las distancias entre el escurridor metálico y el rodillo grande, y entre el rodillo grande y el pequeño, ambas a 0,2 mm. El ancho de banda quedó en 16 mm. Se laminó con la siguiente secuencia: $\pm 87,13 / \pm 70 / \pm 42 / \pm 7 / \pm 87,21$. Todas las capas tienen un sobreespesor con ángulo de 87 grados.

Caracterización y observaciones:

Ensayo	Resultado
Densidad	1,35 g/cm ³
Espesor promedio por capa	0,38 mm
Fracción volumétrica de fibras	0,30
Porosidad longitudinal	-
Porosidad transversal	-

Tabla 4.3 - Propiedades del tubular 3

Se observó un brusco descenso en la densidad y la fracción volumétrica de fibra. Se cree que este resultado fue provocado por un incorrecto empaquetamiento de la fibra cuando se laminan ángulos bajos.

Conclusiones:

En la capa con ángulo de 7 grados las bandas quedaron separadas. Por lo tanto un ancho de banda de 16 mm seguía siendo muy alto para ángulos muy bajos.

Se pudo realizar un sobreespesor en los extremos correctamente.

Tubo 4:

Objetivos:

Determinar las mejores condiciones de procesamiento en cuanto a temperatura de la batea y abertura de escurridores.

Condiciones de operación:

Se realizaron tres tramos de 20 cm cada uno con condiciones distintas. En cada tramo se realizaron cinco capas a 87 grados y el ancho de banda fue 16mm. En el tramo A: 0,2 mm entre rodillos, 0,3 mm entre rodillo y escurridor, batea a 40⁰C. En el tramo B: 0,2 mm entre rodillos, 0,3 mm entre rodillo y escurridor, batea a 50⁰C. En el tramo C: al mínimo entre rodillos, 0,3 mm entre rodillo y escurridor, batea a 50⁰C.

Caracterización y observaciones:

Ensayo	Resultado en A	Resultado en B	Resultado en C
Densidad	1,50 g/cm ³	1,51 g/cm ³	1,51 g/cm ³
Espesor promedio por capa	0,39 mm	0,38 mm	0,34 mm
Volumen de fibra	-	-	-
Porosidad longitudinal	-	-	-
Porosidad transversal	-	-	-

Tabla 4.4 - Propiedades del tubular 4

Las mejores propiedades se obtuvieron con los parámetros utilizados en el tramo C.

Conclusiones:

Durante el procesamiento no se observaron cambios significativos en cuanto a la impregnación de las fibras entre el tramo A y el tramo B, por lo tanto se determinó que una temperatura de batea entre 40⁰C y 50⁰C es correcta para la resina utilizada. A pesar de que en el tramo C se obtuvieron las mejores propiedades, las fibras resultaron muy secas, ya que al disminuir la abertura entre los rodillos se les quita demasiada resina.

Finalmente se determinó que, con una abertura de 0.2 mm entre rodillos y 0.3 mm entre el rodillo y el escurridor, y con una temperatura de batea de 45⁰C, se obtiene una impregnación correcta para la resina utilizada.

Tubo 5:

Objetivos:

Obtener un tubo en el que todas las capas queden con la fibra bien ubicada, es decir que no quede espacio entre las bandas.

Condiciones de operación:

Se laminaron cinco capas con los siguientes ángulos: $\pm 87,13$ / ± 70 / ± 42 / ± 7 / $\pm 87,22$. El ancho de banda se mantuvo en 16 mm.

Caracterización y observaciones:

No se realizaron ensayos de caracterización en este tubular debido a que solo se buscaba evaluar el procesamiento y no los resultados. Todas las conclusiones fueron obtenidas de la etapa de laminado.

Conclusiones:

En la capa con ángulo de 7 grados las fibras no enganchaban bien en los pines, y si lo hacían no apoyaban bien en el mandril ya que la base de los pines tenía un espesor muy grande y formaba un escalón con el mandril. Además quedaba espacio entre las bandas. Finalmente se decidió remover esa capa y terminar de laminar este tubo sin ella.

También se observó que en las capas con ángulo de 87 grados una parte de la banda apoyaba sobre la banda anterior, cuando en realidad debería apoyar junto a la anterior sin dejar espacio pero tampoco superponiéndose. En la capa con ángulo de 42 grados las bandas quedaron bien ubicadas.

La conclusión que se obtuvo es que no se puede fabricar un tubo con capas a distintos ángulos utilizando solo un ancho de banda, ya que esto genera espacios superposición entre bandas contiguas. El ancho de banda debe variar si el ángulo de la capa cambia.

Tubo 6:

Objetivos:

Obtener un tubo en el que todas las capas queden con la fibra bien ubicada.

Condiciones de operación:

Se laminaron solo cuatro capas: una a 87 grados, dos a 7 grados y una final a 87 grados. Los anchos de banda fueron: 16 mm en la primera capa de 87 grados, 13 mm en la primera capa de 7 grados, 10 mm en la segunda de 7 grados y 22 mm en la última capa de 87 grados.

Para intentar solucionar el problema de que la fibra no enganche en los pines en la capa con ángulo de 7 grados se disminuyó la distancia del devanador al mandril a 45mm. Además la base de los pines se hizo de un plástico de menor espesor para que no se forme un escalón que separe a la fibra del mandril.

Para intentar que las bandas no queden separadas se probó con disminuir el ancho de banda en las capas a 7 grados. También se probó con aumentar el ancho de banda en la capa de 87 grados para evitar la superposición, ya que el ancho de banda es función del ángulo de laminado.

Caracterización y observaciones:

No se realizaron ensayos de caracterización en este tubular debido a las mismas razones que se explicaron en el tubo 5.

Conclusiones:

Con la nueva base de los pines se solucionó el problema de la separación entre el mandril y la banda cerca de los pines. Con la disminución de la distancia del devanador al mandril no hubo problemas para que la fibra enganche en los pines.

En la capa con ángulo de 7 grados y ancho de banda de 13 mm quedaba un pequeño espacio entre bandas pero con 10 mm se solucionó el problema. En la capa con ángulo de 87 grados y 16 mm de ancho de banda había superposición de bandas contiguas, pero con 22 mm de ancho de banda ya no había superposición y tampoco había espacio entre bandas.

Como el ancho de banda a utilizar para que las bandas contiguas queden juntas (sin espacio ni superponiéndose) depende del ángulo de laminado, se decidió que lo mejor es variar el ancho entre 10 mm para 7 grados y 22 mm para 87 grados de forma lineal para los ángulos intermedios según la siguiente fórmula: $10 \text{ mm} + 12 \text{ mm} * (\text{ang} - 7) / 80$

Tubo 7:

Objetivos:

Probar una nueva formulación de resina. Variar el ancho de banda en función del ángulo para mejorar la ubicación de las fibras.

Condiciones de operación:

Al sistema epoxi anhídrido se le agregó una carga para aumentar la resistencia a la microfisuración. El sistema quedó compuesto por epoxi (80%p/p DGEBA y 20%p/p DLR001) y amina (3DCM) en cantidad estequiométrica, más un 10% en masa total de cargas minerales

Se laminaron 5 capas con ángulos $\pm 86,06 / \pm 72 / \pm 32 / \pm 19 / \pm 86,18$. El ancho de banda se varió linealmente con el ángulo de laminado según la fórmula obtenida de la laminación del tubo 6. La temperatura de la batea se fijó a 40°C para evitar la gelación prematura de la resina.

Conclusiones:

La utilización del nuevo sistema dificultó considerablemente el procesamiento ya que la viscosidad de la resina aumentaba rápidamente a medida que avanza la reacción. Esto llevó a tener que estar ajustando constantemente la apertura de los escurridores durante el laminado.

Variar el ancho de banda en función del ángulo de laminado solucionó el problema de la ubicación de las fibras, ya que no se observó separación ni superposición en la bandas.

4.5 – Fabricación de tubulares para ensayos a presión

En esta parte del proyecto se fabricaron tubos con sobreespesores en los extremos para luego ser ensayados en pruebas hidráulicas y neumáticas. Durante un ensayo a presión al tubo se le colocan tapas, las cuales se unen al tubo mediante mordazas. Para reducir el efecto de las tensiones de agarre generadas por las mordazas se requieren más capas de material en los extremos del tubo que en el centro del mismo. Con el sobreespesor se

asegura que el tubo posea mayor resistencia en sus extremos, y que las rotura del mismo se produzca en la sección calibrada.

La secuencia de laminado utilizada para la obtención de estos tubulares fue provista por el grupo de materiales compuestos. La misma se obtuvo por métodos de elementos finitos y consiste en 25 capas con los siguientes ángulos: $\pm 86 / \pm 63 / \pm 34 / \pm 62 / \pm 86,16 / \pm 69 / \pm 52 / \pm 74 / \pm 34 / \pm 61 / \pm 50 / \pm 69 / \pm 19 / \pm 65 / \pm 86,4 / \pm 41 / \pm 32 / \pm 49 / \pm 72 / \pm 66 / \pm 86,53 / \pm 65 / \pm 23 / \pm 68 / \pm 86,61$. En las capas 1, 5, 15, 21 y 25 se realizaron dos capas de sobreespesor manteniendo el ángulo de la capa original. En el siguiente diagrama se muestran las diferentes capas del tubo y la influencia del sobreespesor.

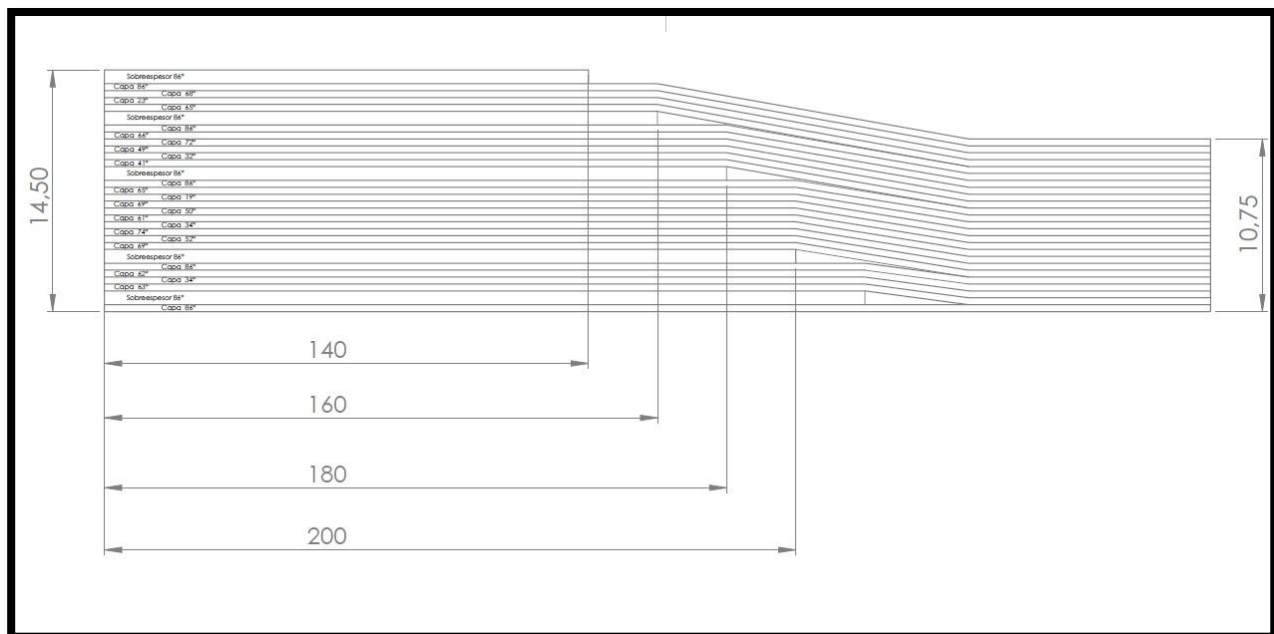


Figura 4.14 - Diagrama del sobreespesor

Se elaboraron un total de tres tubulares considerando las condiciones de proceso optimizadas en la etapa anterior. A continuación se muestran imágenes de uno de los tubulares obtenidos:



Figura 4.15 - Tubular con sobreespesor

5 - CONCLUSIONES

Sin duda el uso de recipientes a presión va a incrementarse a medida que la demanda de almacenamiento eficiente de gases aumente en el mundo. La tecnología de los recipientes metálicos ha evolucionado para que hoy en día su uso resulte altamente confiable, y lo mismo debe pasar con los recipientes de material compuesto. Si bien la tecnología de recipientes con *liner* está bastante avanzada y este tipo de tanques ya ha reemplazado a los metálicos en una gran variedad de aplicaciones, el mayor aumento en la eficiencia se logrará con tanques *linerless*, pero dichos recipientes todavía necesitan ser desarrollados para poder utilizarse masivamente. Los dos grandes desafíos que enfrenta la tecnología de los tanques tipo V son el método que se utilizará para fabricarlos y los modos de fallas que experimentan.

Luego de analizar en profundidad la normativa existente para tanques tipo III y IV, se pudo elaborar una propuesta de normativa para tanques tipo V. Para la misma se consideró que el principal modo de falla de este tipo de recipientes es la microfisuración, cosa que no ocurre en los recipientes con *liner*. Esto influyó directamente en lo que se propuso como requisitos de diseño, ya que los mismos apuntaban a evitar dicho modo de falla, y en los valores de presión de los ensayos de control de calidad, debido a que durante el mismo se debe evitar fisurar el recipiente. Por otra parte, la elección en cuanto a qué tipo de ensayos se debe someter al recipiente durante su calificación no fue sencilla, debido a que las normativas estudiadas presentaban muchas diferencias en cuanto a la exigencia de dichos ensayos. Esto se debió a que cada norma está pensada para que el recipiente sea utilizado en una aplicación específica y por lo tanto las normativas proponen los ensayos que consideran necesarios para que el recipiente no falle en las condiciones impuestas por cada aplicación.

En lo que respecta a la fabricación de tubulares se pudieron identificar cuáles son las variables principales del proceso y cómo influyen en las características de los tubos resultantes. Durante la fabricación de varios tubulares y luego de la realización de ensayos de caracterización se pudieron optimizar las variables del proceso, obteniendo tubos sin defectos apreciables. Finalmente se pudieron fabricar tubulares con una secuencia de laminado optimizada que se utilizaran para realizar pruebas hidráulicas. Es claro que para la

fabricación de un recipiente cerrado se deben resolver las dificultades con respecto a la utilización de un mandril removible y a las complicaciones geométricas del laminado de los casquetes, estos temas podrían ser estudiados en trabajos futuros.

6 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Coopersmith, J. The cost of reaching orbit: Ground-based launch systems. *Space Policy* 27: 77-80 (2011).
- [2] Mallick, K; Cronin, J; Ryan, K; Arzberger, S; Munshi, N; Paul, C; Welsh, J. An integrated systematic approach to linerless composite tank development. 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, 18 al 21 de abril de 2005, Austin, EEUU.
- [3] Mazumdar, S.K. *Composites Manufacturing. Materials, products, and process engineering*. Ed. CRC Press, Boca Raton, EEUU (2001).
- [4] Mallick, P.K. *Fiber-Reinforced Composites. Materials, manufacturing and design*. (3^a ed). Ed. Taylor & Francis, Boca Raton, EEUU (2007).
- [5] Gay, D. *Composite Materials. Design and applications*. CRC Press, Boca Raton (2003).
- [6] Hoa, S.V. *Principles of the Manufacturing of Composites Materials*. Ed. DEStech Publications, Lancaster, EEUU (2009).
- [7] Strong, A.B. *Fundamentals of Composites Manufacturing. Materials, methods and applications*. (2^a ed). Ed. SME, Dearborn, EEUU (2008).
- [8] Vasiliev, V.V. *Composite Pressure Vessels. Analysis, desing and manufacturing*. Ed. Bull Ridge Publishing, Blacksburg, EEUU (2009).
- [9] Red, C. Pressure vessels for alternative fuels, 2014-2023. *Composites Technology*, 20(6): 22-27 (2014).
- [10] Trudgeon, M. An overview of NGV cylinder safety standards, production and in-service requirements. (2005).
- [11] Ministerio de Industria de la República Argentina. *Catálogo de la oferta industrial argentina de equipos e instalaciones para Gas Natural Comprimido*. (2015).
- [12] Irani, R.S. Hydrogen Storage: High-Pressure Gas Containment. *MRS bulletin* (2002).