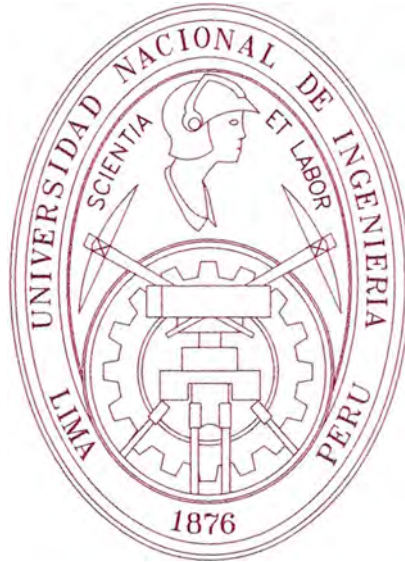


# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**“DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN TANQUE DE 300m<sup>3</sup> DE PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA BAJO LA NORMA ASME RTP-1 2005”**

### **INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO MECÁNICO**

**CHRISTIAN JORGE HINOSTROZA AQUINO**

**PROMOCIÓN 2009-I**

**LIMA-PERÚ**

**2013**

# ÍNDICE

	Pág.
<b>PRÓLOGO</b>	
<b>CAPÍTULO 1:</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1 ANTECEDENTES</b>	<b>2</b>
<b>1.2 OBJETIVO GENERAL</b>	<b>4</b>
<b>1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>4</b>
<b>1.4 JUSTIFICACIÓN</b>	<b>4</b>
<b>1.5 ALCANCE</b>	<b>5</b>
<b>1.6 LIMITACIONES</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO 2:</b>	
<b>CARACTERÍSTICAS DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE FRP</b>	
<b>2.1 DESCRIPCIÓN DEL TANQUE DE FRP:</b>	<b>7</b>
<b>2.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN</b>	<b>9</b>
<b>2.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TANQUE</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO 3:</b>	
<b>PROCESO DEL DISEÑO DE UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE FRP</b>	
<b>3.1 ETAPAS DEL DISEÑO DE UN TANQUE DE FRP</b>	<b>13</b>

**CAPÍTULO 4:****MARCO TEÓRICO**

<b>4.1 CONCEPTOS GENERALES DEL FRP</b>	<b>14</b>
4.1.1 Materiales compuestos	15
4.1.2 Plástico reforzado con fibra de vidrio FRP	21
<b>4.2 MATERIAS PRIMAS DEL FRP</b>	<b>22</b>
4.2.1 Fibras de Vidrio	22
4.2.2 Resinas	28
4.2.2.1 Características y Propiedades de las resinas	28
4.2.2.2 Tipos de resinas	31
4.2.2.3 Proceso de curado de la resina	37
4.2.3. Aditivos	38
<b>4.3 PROPIEDADES DE LOS LAMINADOS DE FRP</b>	<b>42</b>
4.3.1. Resistencia a la intemperie.	42
4.3.2. Resistencia al fuego	44
4.3.3. Resistencia química	46
<b>4.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL FRP</b>	<b>48</b>
4.4.1. Densidad, peso y espesor	48
4.4.2. Módulos y elongaciones	50
4.4.3. Resistencia al cizallamiento o corte	75
4.4.4. Relación de Poisson	76
4.4.5. Isotropía	76
4.4.6 Comparación entre acero y FRP	77
<b>4.5 MÉTODOS DE FABRICACIÓN EN FRP</b>	<b>79</b>
4.5.1 Los laminados	79
4.5.2 Laminado a pistola (Spray – Up)	82
4.5.3 Laminado manual (Hand lay – Up)	83
4.5.4 Laminado por enrollamiento (Filament winding)	84

<b>4.6 CONTROL DE CALIDAD DEL FRP</b>	<b>86</b>
<b>4.6.1 Inspección manual de los laminados de FRP</b>	<b>87</b>
<b>4.6.1.1. Fallas detectables con la inspección visual</b>	<b>87</b>
<b>4.6.2 Pruebas al FRP</b>	<b>91</b>
<b>4.6.2.1 Medición de la dureza</b>	<b>91</b>
<b>4.6.2.2 Prueba de acetonas</b>	<b>96</b>
<b>4.6.2.3 Prueba hidrostática</b>	<b>96</b>

## **CAPÍTULO 5:**

### **DISEÑO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE FRP**

<b>5.1.- Criterios de diseño para el cálculo estructural con FRP</b>	<b>98</b>
<b>5.1.1. Criterio de estabilidad</b>	<b>99</b>
<b>5.1.2 Criterio de resistencia</b>	<b>100</b>
<b>5.1.3 Criterio de deformación</b>	<b>106</b>
<b>5.2.- Selección de resina y barrera química</b>	<b>109</b>
<b>5.3.- Partes del tanque de FRP</b>	<b>116</b>
<b>5.4.- Tipos de laminado</b>	<b>117</b>
<b>5.5.- Cálculo de las partes del tanque de FRP</b>	<b>118</b>
<b>5.5.1 Cálculo del cuerpo cilíndrico</b>	<b>119</b>
<b>5.5.2 Cálculo de la tapa Toriesférica</b>	<b>122</b>
<b>5.5.3 Cálculo del fondo</b>	<b>125</b>
<b>5.5.4 Cálculo de los vendajes</b>	<b>126</b>
<b>5.6.- Bridas y boquillas</b>	<b>128</b>



**CAPÍTULO 6:****FABRICACIÓN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE FRP**

<b>6.1.- Fabricación de las partes del tanque de FRP</b>	<b>129</b>
<b>6.2.- Montaje y unión de los componentes del tanque de FRP</b>	<b>142</b>

**CONCLUSIONES****RECOMENDACIONES****BIBLIOGRAFÍA****PLANOS****ANEXOS**

## PROLOGO

Este informe tiene por finalidad presentar las características, diseño y fabricación de un tanque de almacenamiento, de 300 metros cúbicos de capacidad, fabricado con plástico reforzado con fibra de vidrio (FRP) bajo la norma ASME RTP-1, a fin de brindar una referencia para el estudio de estos tanques de FRP.

El contenido de este informe se ha dividido en 6 capítulos:

En el primer capítulo se explica en forma detallada los antecedentes, los objetivos y las limitaciones del presente trabajo, orientándolo a una descripción bastante simple.

En el segundo capítulo se describe de manera breve las características del tanque a diseñar, como los parámetros de diseño y dimensiones generales.

En el tercer capítulo se muestra de manera breve los pasos a seguir para el diseño del tanque de plástico reforzado con fibra de vidrio (FRP).

En el cuarto capítulo se muestra el marco teórico sobre el plástico reforzado con fibra de vidrio (FRP), características, propiedades mecánicas y fabricación.

En el quinto capítulo mostramos los cálculos necesarios para el diseño de las partes del tanque de FRP, mostrando criterios brindados por el estándar ASME RTP-1.

En el sexto capítulo se explica en forma breve los procesos de fabricación de cada parte del tanque de FRP.

El trabajo contiene en la parte final, las conclusiones y recomendaciones, así como los planos del tanque de FRP además de la bibliografía utilizada para el desarrollo del mismo.

# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

Los tanques de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) o fiberglass reinforced plastic (FRP) han sido usados por largos años para el almacenamiento de productos químicos que podrían corroer o interactuar con los tanques hechos de materiales no plásticos. Los productos iniciales estaban hechos para los procesos químicos e industrias de blanqueamiento de la pulpa donde las dificultades encontradas con la corrosión de tanques de metal y los costos elevados, llevaron a buscar tanques alternos como los tanques de fibra de vidrio. La industria de los tanques de FRP fue adicionalmente fortalecida cuando se desarrollaron las resinas viniléster, las cuales permitían el uso de tanques de FRP en medios ambientes muy agresivos.

El peso ligero y la alta resistencia de los tanques de FRP han conducido a un incremento en su uso en industrias donde la resistencia química no es tan crítica como en el almacenamiento de combustibles, productos químicos poco corrosivos o agua. Estos mercados son muy extensos y necesitan de tanques de diversos tamaños y características de servicio.

En la actualidad en el Perú, diferentes tipos de industrias optan por el uso de equipos de FRP en sus procesos, tales como tanques de FRP y tuberías o

ductos de FRP. Estos equipos son aplicables tanto en procesos industriales y mineros como plantas de fundición, plantas de refinerías, plantas de sulfatos, etc., así como plantas de procesos alimenticios como pesqueras. También debido a las legislaciones actuales que obligan a tratar los efluentes antes de ser desechados, se está difundiendo con mayor frecuencia, el uso de estos equipos en plantas de tratamientos de efluentes domésticos en centros poblados y campamentos mineros.

La ingeniería del FRP en el Perú así como la industria del FRP actualmente no es muy desarrollada ni difundida, son pocas las empresas que se dedican a este rubro y que son relativamente jóvenes en lo que a experiencia se refiere, a comparación de países como Brasil o Chile que tienen más años desarrollando la industria del FRP así como su ingeniería en diseños y procesos de fabricación.

## **1.2 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y fabricar un tanque de 300m<sup>3</sup> de capacidad con plástico reforzado con fibra de vidrio en base a la norma ASME RTP-1.

## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Diseñar las partes del tanque de almacenamiento utilizando los criterios de diseño para el plástico reforzado con fibra de vidrio brindados en la norma ASME RTP-1.
2. Fabricar las partes del tanque de almacenamiento bajo los procesos y criterios de fabricación brindados por la norma ASME RTP-1.
3. Realizar el montaje final de todas las partes para la obtención del tanque de 300 m<sup>3</sup> de almacenamiento.

## **1.4 JUSTIFICACIÓN**

La creciente demanda de equipos de FRP y mayor uso en la industria nacional, requiere de mejorar los conocimientos técnicos para el diseño y procesos de fabricación de los equipos de FRP.

En este informe, se darán a conocer los estándares y normas para un adecuado diseño de los tanques de FRP, así como del proceso de fabricación y laminado, con el fin de brindar una guía para el diseño y fabricación de los tanques de FRP.

## 1.5 ALCANCES

Este trabajo presenta el procedimiento de diseño de un Tanque Vertical de FRP con fondo plano, montado sobre una superficie rígida y totalmente plana, y sometido a presión hidrostática del fluido contenido.

Este informe abarca:

- Establecimiento de las condiciones de diseño del tanque incluyendo capacidad, fluido a contener y sus características químicas, temperatura de operación, presión de operación, cabe resaltar que estos datos son conocidos y nos limitaremos a diseñar y calcular el tanque para estas condiciones
- Determinación del diámetro y altura del tanque, el cual depende fundamentalmente de las condiciones del proceso, es decir, la capacidad del tanque.
- Selección de los materiales y proceso de fabricación.
- Especificación técnica de bridas y conexiones que se incluirá en el tanque.
- Cálculo de los espesores de las paredes del cuerpo cilíndrico, las tapas inferior y superior y los accesorios de conexión (bridas, manholes, etc.)
- Elaboración del plano de fabricación del tanque de FRP, indicando secuencia de laminado, espesores y materia prima.
- Proceso de fabricación de cada componente del tanque y la unión mediante vendajes de FRP del cuerpo cilíndrico con los demás componentes.

- Descripción de los procedimientos de movimiento, traslado y montaje del tanque de FRP.

## 1.6 LIMITACIONES

El presente trabajo se limita al diseño de un tanque vertical de FRP bajo presión hidrostática del fluido contenido, cualquier otro tipo de tanque de FRP necesita sus propias consideraciones de diseño y expresiones para el cálculo de sus espesores, los cuales no se incluye en este informe.

El informe no incluye:

- Determinación de las condiciones de operación del proceso en el que trabajara el tanque, las cuales nos indican las condiciones de diseño.
- Cálculo para otros tipos de tanques diferentes al tanque vertical, como tanques cisternas enterrados, tanques horizontales, tanques de cuerpo rectangular, tanques con fondos cónicos soportados sobre estructuras metálicas, ductos o tuberías de FRP, para estos casos revisar la norma ASME RTP-1, la cual brinda los criterios de diseño para estos equipos.
- Cálculo de la base de concreto y pernos de anclaje.
- No profundiza en la preparación y curado de la resina y sus aditivos.
- No profundiza en el proceso de fabricación, se limita a presentar las etapas principales del proceso y la obtención del producto final.
- No indica el procedimiento para la programación de las maquinas usadas para el laminado por enrollamiento continuo (Filament Winding), el cual es necesario para obtener el ángulo de enrollamiento que da las propiedades que tendrá el laminado de FRP.

## CAPITULO II

### CARACTERÍSTICAS DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE FRP

#### 2.1 DESCRIPCIÓN DEL TANQUE DE FRP

El presente informe presenta el diseño y fabricación de un tanque vertical de FRP para almacenamiento de agua a temperatura ambiente y presión atmosférica.

El tanque vertical de FRP es conformado por tres partes principales:

- *Un cuerpo cilíndrico:* Según sus dimensiones este puede ser construida en una o más secciones, y también puede ser fabricado por el método de laminado manual (Hand Lay-Up) o por el laminado en máquina de enrollamiento continuo (Filament Winding)
- *Un fondo:* Según las dimensiones del tanque puede ser un fondo plano con forma de disco o un fondo plano tipo tazón con una pequeña porción de pared cilíndrica que se unirá al cuerpo cilindro, esta parte es fabricada por método de laminado manual (Hand Lay –Up) sobre un molde.
- *Una tapa:* Estas se pueden incluir o no según sea las necesidades del proceso, las tapas pueden ser planas, semiesféricas o toriesfericas, al igual que el fondo las tapas son fabricadas por el método de laminado manual (Hand Lay-Up).

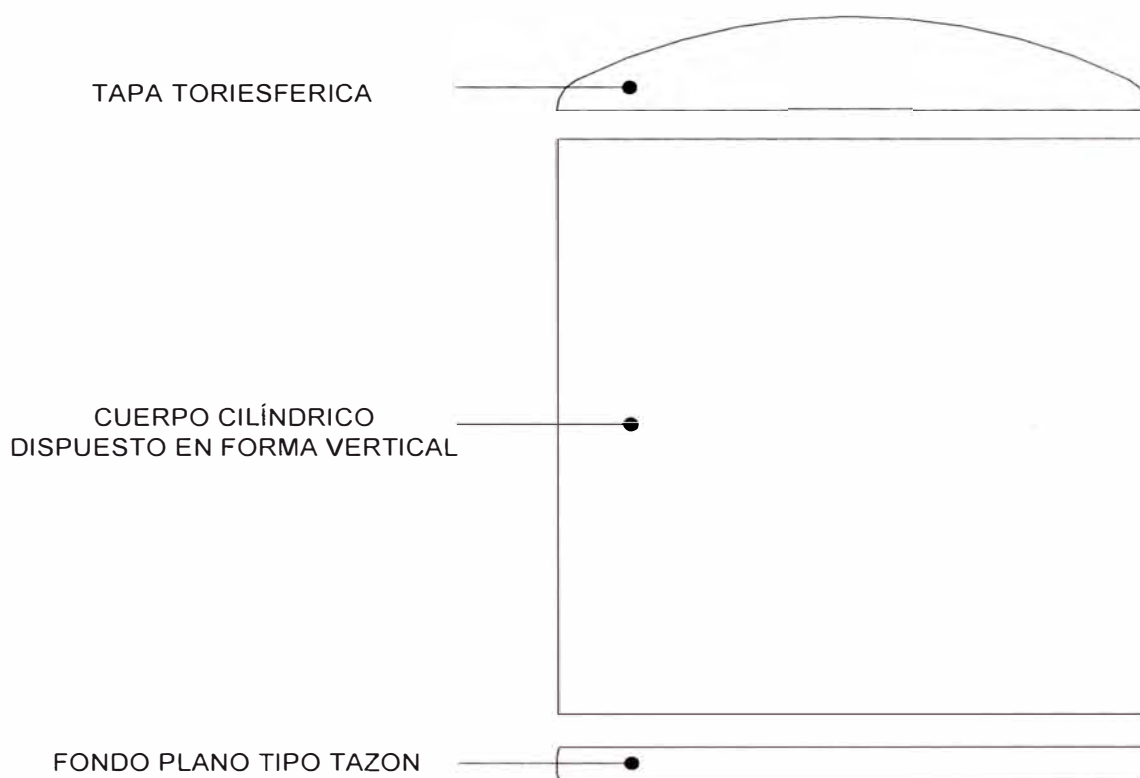


Estas partes se fabrican en forma independiente para luego ser unidas por medio de soldadura de FRP (vendajes de fibra de vidrio)

En nuestro caso el tanque será diseñado con las siguientes características:

- Cuerpo cilíndrico
- Tapa Toriesférica
- Fondo plano tipo tazón

La figura 2.1 presenta las partes principales que forman el tanque de FRP y sus características.



**Figura 2.1** PARTES PRINCIPALES DEL TANQUE DE FRP

## 2.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Las condiciones de operación y parámetros para el diseño del tanque de FRP son los siguientes:

- Capacidad del tanque: 300 m<sup>3</sup>
- Producto contenido: Agua
- El peso específico del producto contenido: 1000 kg/m<sup>3</sup>;
- Presión de diseño: Atmosférica
- Temperatura de diseño: 30 ° C.
- Velocidad del viento: 150 km/hr.
- Factor Zona sísmica : 4

## 2.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TANQUE DE FRP

Las dimensiones generales del tanque de FRP se determinan directamente de la capacidad, en este caso 300 metros cúbicos, y de otros factores como disponibilidad de espacio para su montaje, matrices (moldes) para su fabricación y transporte hacia su destino final.

En nuestro caso seleccionamos las siguientes dimensiones para el diseño del tanque:

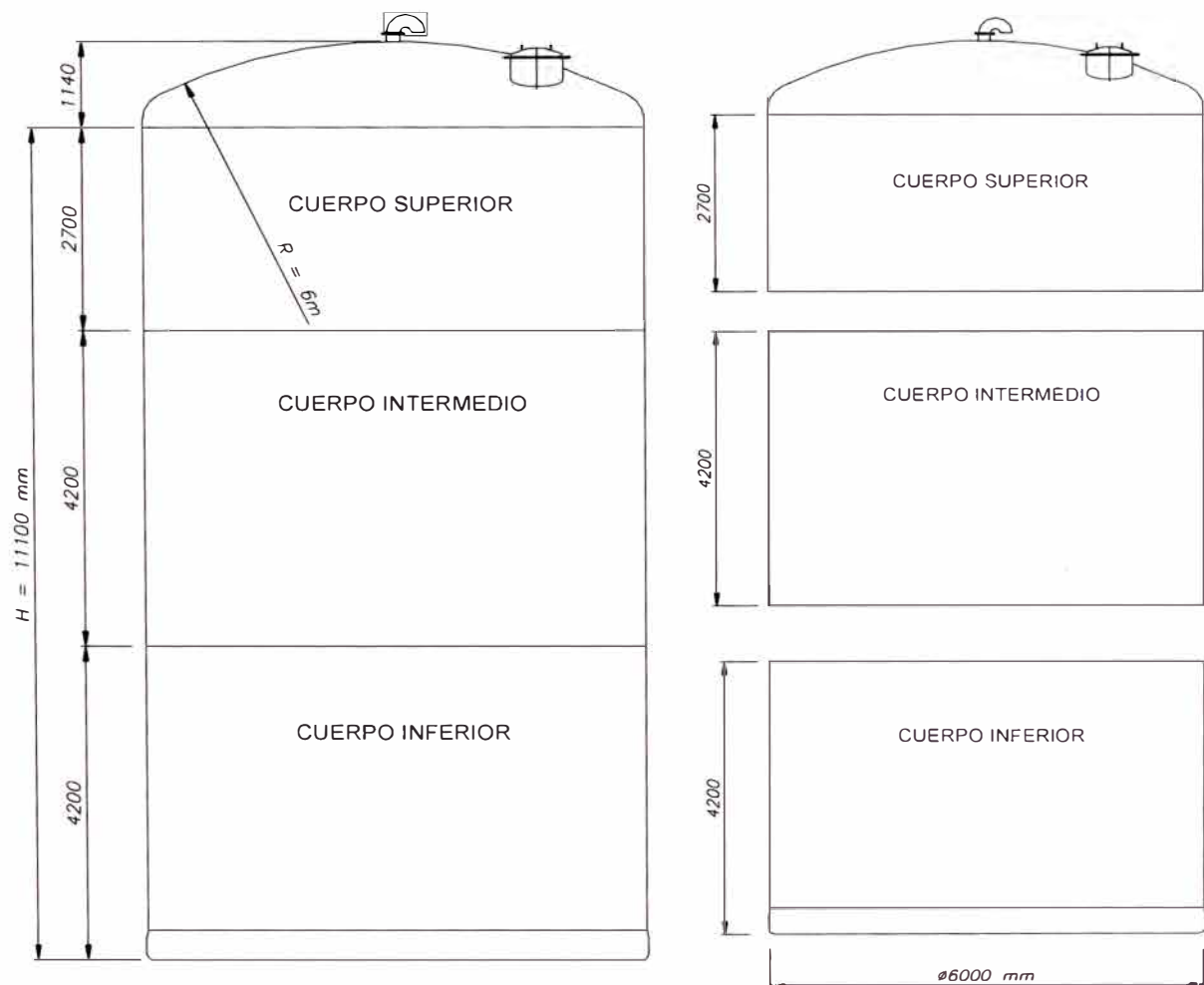
- Diámetro : 6m
- Altura : 11,1m

Debido a que un cilindro de 6m de diámetro por 11,1m de alto sería muy complicado su traslado desde el taller de fabricación hacia su destino final, se

fabrican secciones de cilindros más cortas las cuales sean posibles de trasladar, para finalmente realizar el trabajo de unión de las partes en campo.

En nuestro caso dividiremos el cilindro en tres cuerpos, dos de 4,2 metros de alto y uno de 2,7 metros de alto.

La figura 2.2 muestra las dimensiones generales del tanque y los tres cuerpos que se fabricaran y que luego se unirán para obtener el tanque.



**Figura 2.2** DIMENSIONES GENERALES DEL TANQUE DE FRP

Otros elementos que consideraremos para el diseño del tanque de FRP son los siguientes:

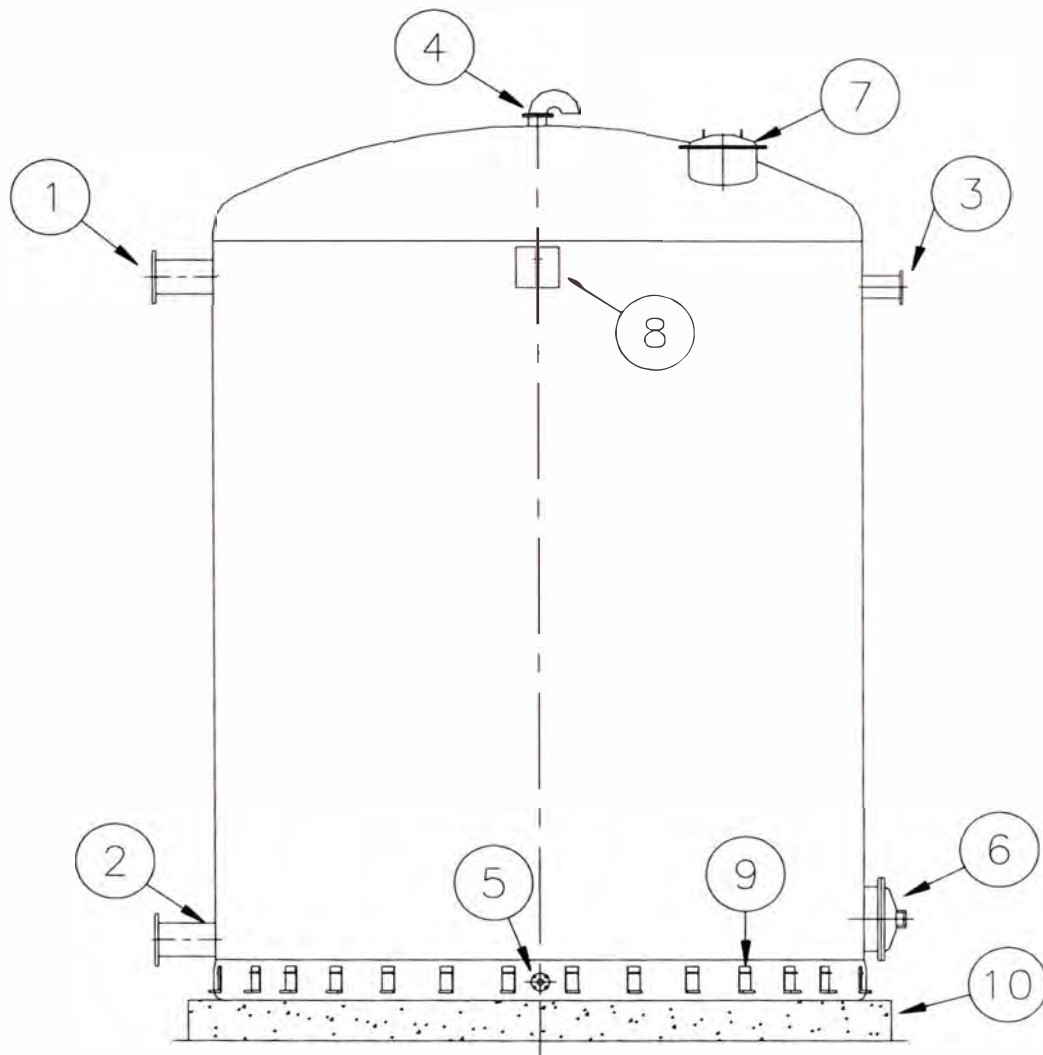
- Brida de Ingreso o carga del tanque
- Brida de Salida o descarga del tanque
- Brida de Rebose
- Brida de Venteo (Importante en tanques atmosférico)
- Brida de purga
- Silletas o platinas de anclaje
- Orejas de Izaje
- Manholes (Entradas hombre)

En la tabla 2.1 se muestra el listado de elementos que se incluirán en el diseño y fabricación del tanque de FRP.

**Tabla 2.1.** LISTADO DE ELEMENTOS DEL TANQUE DE FRP.

LISTADO DE ELEMENTOS		
ITEM	DESCRIPCION	MATERIAL
1	INGRESO	FRP
2	DESCARGA	FRP
3	REBOSE	FRP
4	VENTEO	FRP
5	PURGA	FRP
6	MANHOLE SUP. C/ TAPA	FRP
7	MANHOLE LAT. C/ TAPA	FRP
8	OREJAS DE IZAJE	ACERO A36
9	PLATINAS DE ANCLAJE	ACERO A36
10	BASE DE TANQUE	CONCRETO

En la figura 2.3 se muestra el esquema de los elementos del tanque de FRP así como su ubicación según el listado mostrado en la tabla 2.1.



**Figura 2.3** ELEMENTOS DEL TANQUE DE FRP SEGÚN EL LISTADO DE LA TABLA 2.1

## CAPITULO III

### PROCESOS DEL DISEÑO DE UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE FRP

#### 3.1 ETAPAS DEL DISEÑO DE UN TANQUE DE FRP

En la figura 3.1 se muestra las etapas del proceso de diseño de un tanque de FRP y las cuales se verán con mayor detalle a lo largo del informe.



**Figura 3.1** DIAGRAMA DE LAS ETAPAS DE DISEÑO DE UN TANQUE DE FRP.

## **CAPITULO IV**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **4.1 CONCEPTOS GENERALES DE FRP**

EL FRP son las iniciales de Fibreglass Reinforced Plastics o Plástico Reforzado con fibra de vidrio (PRFV).

El FRP (o PRFV) es un material compuesto (composite), en donde la matriz está compuesta de una resina de plástico termoestable, y el refuerzo es fibra de vidrio. En el Perú, a este tipo de productos se les llama comúnmente "fibra de vidrio", mientras que en otros países de la región el material es llamado "Plástico Reforzado"

La matriz plástica es la que se encarga de dar la resistencia química, y puede ser de diferentes tipos, entre los cuales figuran las resinas Poliéster (Ortoftalicas e isoftalicas), Epoxi Vinilésteres, etc.

El refuerzo de fibra de vidrio aporta la resistencia mecánica deseada a la resina. Este refuerzo tiene una alta resistencia y le brinda la rigidez y estabilidad necesaria al compuesto.

Los productos de FRP ofrecen:

- La posibilidad de curado a temperatura ambiente.
- No es necesario aplicar presión para la transformación y moldeo.
- Obtención de gran número de diferentes formas.
- Posibilidad de moldeo de piezas grandes y complejas a precios competitivos a pequeñas y medias escalas de producción.

Además de las siguientes características:

- Excelente estabilidad dimensional.
- Excelente resistencia a ambientes químicamente agresivos
- Excelentes propiedades mecánicas.
- Excelentes propiedades eléctricas.

#### **4.1.1. Materiales compuestos**

Se entiende por materiales compuestos aquellos formados por dos o más materiales distintos sin que se produzca reacción química entre ellos.

Un material compuesto es aquel que cumple con las siguientes condiciones:

1. Consta de dos o más materiales físicamente distintos y separables mecánicamente.
2. Puede fabricarse mezclando los distintos materiales de tal forma que la dispersión de un material en el otro pueda hacerse de manera controlada para alcanzar unas propiedades óptimas.



3. Las propiedades son superiores, y posiblemente únicas en algún aspecto específico, a las propiedades de los componentes por separado.

El último punto es aquel que impulsa a científicos e investigadores, a crear y construir nuevos materiales compuestos, ya que si no se cumpliera este último punto no habría razón para formar un material compuesto.

En todo material compuesto se distinguen dos componentes:

- *la **MATRIZ***, componente que se presenta en fase continua, actuando como ligante
- *el **REFUERZO***, en fase discontinua, que es el elemento resistente.

Ejemplos sencillos y conocidos por todos de materiales compuestos son el hormigón y los neumáticos. Aquí, sin embargo, nos centraremos en el estudio de los llamados MATERIALES COMPUESTOS AVANZADOS, que son los que se utilizan para la fabricación de elementos estructurales.

### **Clasificación**

Una primera clasificación es la que analiza el tipo de matriz, distinguiéndose los siguientes tipos:

- materiales compuestos de *matriz* METÁLICA o MMC (METAL MATRIX COMPOSITES),
- materiales compuestos de *matriz* CERÁMICA o CMC (CERAMIC MATRIX COMPOSITES),
- materiales compuestos de *matriz* de CARBÓN

- materiales compuestos de **matriz ORGÁNICA** o **RP (REINFORCED PLASTICS)** y dentro de estos, son los más utilizados:

los CFRP (CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS) o materiales compuestos de fibra de carbono con matriz orgánica,

los GFRP (GLASS FIBER REINFORCED PLASTICS) o materiales compuestos de fibra de vidrio con matriz orgánica.

En lo que a los *refuerzos* se refiere, los hay de dos tipos:

- *FIBRAS*, elementos en forma de hilo en las que la relación  $L/D > 100$ ,
- *CARGAS*, el resto, utilizadas en elementos de poca responsabilidad estructural.

Tal y como se han resaltado, los materiales compuestos más utilizados son los de matriz orgánica y refuerzos en forma de fibras. En los siguientes apartados se analizan con más detalle ambos tipos de componentes.

### **Matrices orgánicas**

Antes de describir los distintos tipos de matrices orgánicas, conviene repasar cuales son las funciones que debe cumplir la matriz. Estas son:

- Dar estabilidad al conjunto, transfiriendo las cargas al refuerzo.
- Proteger al refuerzo del deterioro mecánico y químico.
- Evitar la propagación de grietas.

Para todo ello, se debe dar una buena adherencia entre la matriz y el refuerzo.

Las matrices orgánicas (más vulgarmente conocidas como plásticos) pueden ser:

- TERMOPLÁSTICOS, usadas en aplicaciones de bajos requisitos, aunque se están empezando a emplear termoplásticos avanzados para altas prestaciones.
- ELASTÓMEROS, utilizadas en neumáticos y cintas transportadoras,
- DUROPLÁSTICOS o TERMOESTABLES, las más empleadas en materiales compuestos de altas prestaciones.

Entre los duro plásticos (termoestables), también denominados **RESINAS** (todos ellos necesitan un proceso de curado para alcanzar su estructura reticulada) encontramos los siguientes tipos de materiales para matrices:

- EPOXIS, que son las de uso más general en altas prestaciones, con una temperatura máxima de uso en torno a los 170°.
- BISMALEIMIDAS (BMI), para altas temperaturas (hasta 250°), utilizada, por ejemplo en los bordes de ataque de las alas del Eurofighter-2000.
- POLIAMIDAS (P1), también para aplicaciones de altas temperaturas, en el entorno de los 300°.
- FENOLICAS, resistentes al fuego. Utilizadas, por ejemplo, en mamparas contra incendios y paneles interiores de aviones.
- POLIÉSTERES, poco usados por sus bajas características mecánicas. Además, absorben mucha agua y se contraen al curar.

- CIANOESTERES, utilizadas en aplicaciones radioeléctricas (antenas), ya que presentan baja absorción de humedad y buena "tangente de pérdidas" (característica radioeléctrica de los materiales).

## Fibras

Los principales tipos de fibras utilizados como refuerzo, en lo que al material que las compone se refiere, son:

- FIBRAS DE VIDRIO, de gran resistencia a tracción, duras, resistentes a los ataques químicos y muy flexibles.

Se elaboran a partir de la sílice (del 50% al 70% de su composición) y se le añaden otros componentes en función de las propiedades deseadas, distinguiéndose:

VIDRIO-E, para aplicaciones generales.

VIDRIO-S, para mayor resistencia y rigidez.

VIDRIO-C, para estabilidad química.

VIDRIO-M, para muy alta rigidez.

VIDRIO-D, para muy baja constante dieléctrica.

- FIBRAS DE CARBONO, de muy alta resistencia y rigidez, por la estructura cristalográfica del grafito. Se distinguen los siguientes tipos:

De muy alto módulo (para aplicaciones que requieran rigidez, 500 GPa de Módulo elástico)

De alto módulo (400 GPa)

De módulo intermedio (300 GPa)

De alta resistencia (200 GPa)

- FIBRAS CERÁMICAS, de cuarzo o sílice. Flexibles y con muy bajo alargamiento y gran resistencia la choque térmico. Se utilizan en estructuras radio transparentes.
- FIBRAS ORGÁNICAS, obtenidas a partir de polímeros.

La más utilizada es el KEVLAR. De DUPONT (**POLIARAMIDA**) de fibras con las siguientes características:

muy rígidas,

coeficiente de dilatación térmica longitudinal nulo,

baja densidad,

radio transparente,

con excelente resistencia al impacto.

- FIBRAS DE BORO.
- FIBRAS METÁLICAS, de aluminio, acero y titanio, más densas que las anteriores, y de elevado coste.

#### 4.1.1. Plástico reforzado con fibra de vidrio FRP.

El plástico reforzado con fibra de vidrio es un material compuesto por dos materiales fundamentales: un refuerzo de fibras de vidrio y una matriz constituida por la resina. Esta última es un aglomerante perfecto para el refuerzo, ya que nos asegura la participación simultánea de todos los filamentos, siendo además una barrera excelente frente a los agentes químicos y ambientales. La fibra de vidrio debe proporcionar la armadura necesaria para lograr la resistencia mecánica precisa para soportar tanto la presión interna como las cargas externas en las condiciones enterradas.

El refuerzo de fibra de vidrio, provee al compuesto:

- Resistencia mecánica.
- Estabilidad dimensional.
- Resistencia al calor.

La resina plástica aporta:

- Resistencia química dieléctrica.
- Comportamiento a la intemperie.

Este material compuesto tiene una alta resistencia a la corrosión por lo que es muy utilizado en obras industriales para fluidos que producen este efecto como lo son los ácidos.

Podemos decir también que una de sus ventajas es que es de bajo peso por lo que facilita su transporte e instalación, además de una menor necesidad de mantenimiento.

## 4.2 MATERIAS PRIMAS DEL FRP

### 4.2.1. FIBRAS DE VIDRIO

Las fibras de vidrio actúan como refuerzo de las resinas poliéster o viniléster, aumentando considerablemente las propiedades mecánicas de los laminados, principalmente la resistencia al impacto y el módulo de elasticidad. Las fibras de vidrio están disponibles en varios tipos:

- ***Roving para enrollamiento (Filament Winding)***

Estos rovings son provistos en bobinas de 25 a 28 kg, con los filamentos rigurosamente paralelos y agrupados en una única mecha, para asegurar el máximo aprovechamiento de las características de refuerzo. Son tratados superficialmente para rápida impregnación y buena compatibilidad con resinas epoxi, poliéster y viniléster.

Los rovings para enrollamiento son provistos en varias densidades lineales, expresados en g/km (**Tex**).

Los **texes** más comunes son:

740 g/km

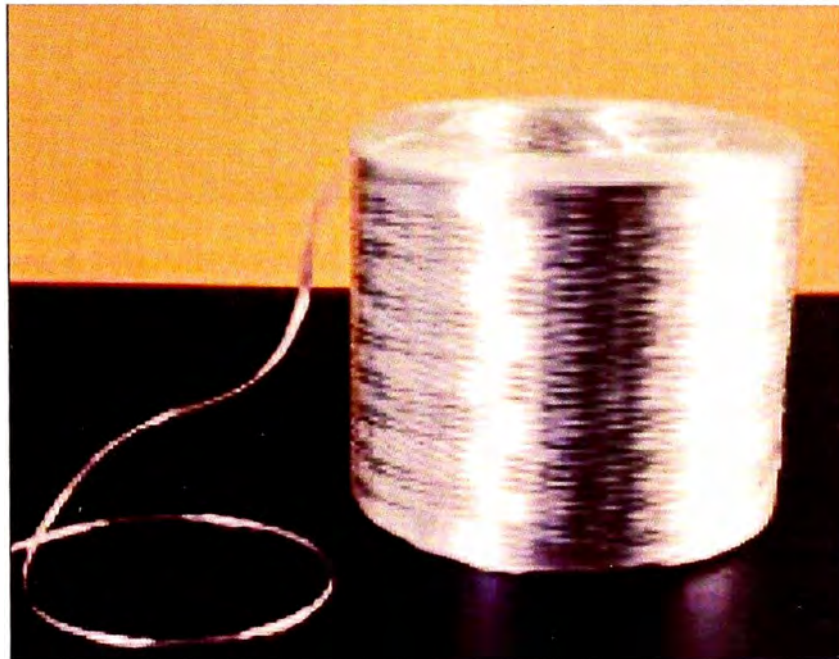
1100 g/km

2200 g/km

Estos rovings son utilizados para fabricación por enrollamiento o fabricación de tejidos. Las estructuras laminadas manualmente con

tejidos, o por enrollamiento, son anisotrópicos, esto significa que sus propiedades dependen de la dirección en las que estas son medidas.

La imagen 4.1 muestra la presentación comercial de un rollo de Roving para para enrollamiento (filament winding)



**Figura 4.1** ROVING PARA ENROLLAMIENTO (FILAMENT WINDING)

- ***Roving para laminado a pistola (Spray -up)***

Estos rovings son provistos en bobinas de 23 kg, con los filamentos agrupados en varias mechas distintas. Su principal característica es la facilidad de corte y dispersión. Como los rovings de enrollamiento, el de laminación a pistola también es tratado superficialmente para compatibilidad con resinas epoxi, poliéster y viniléster.

La figura 4.2 muestra la presentación comercial de un rollo de roving para la minado a pistola (Spray Up).





**Figura 4.2** ROVING PARA LAMINADO A PISTOLA (SPRAY-UP)

- ***Manta para laminado manual (Hand Lay-up)***

Comúnmente conocidas como “Mat”, estas mantas son provistas en rollos de 60kg, como 1.40m de ancho y en diferentes gramajes:

Mat 450 (450g/m<sup>2</sup>)

Mat 300 (300g/m<sup>2</sup>)

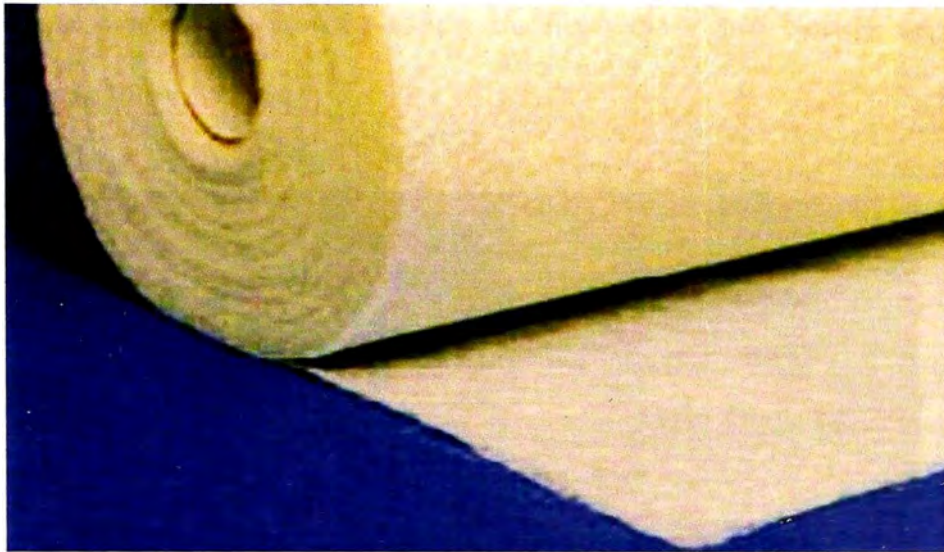
Mat 225 (225g/m<sup>2</sup>)

Son producidas con fibras de vidrio cortadas (5cm de longitud), ligadas con poliéster bisfenólico de alta inercia química.

Las mantas con ligante bisfenólico son compatibles con resinas epoxi, poliéster y viniléster.

Los laminados construidos con mantas son isotrópicos.

La figura 4.3 muestra el rollo de la manta de fibra de vidrio picada (Mat).



**Figura 4.3** MANTAS DE VIDRIO PICADO (MAT 450)

- **Tejido (Woven Roving)**

Los tejidos de fibra de vidrio son provistos en rollos de 60kg, con 1.40 m de longitud y en los siguientes gramajes:

600 g/m<sup>2</sup>

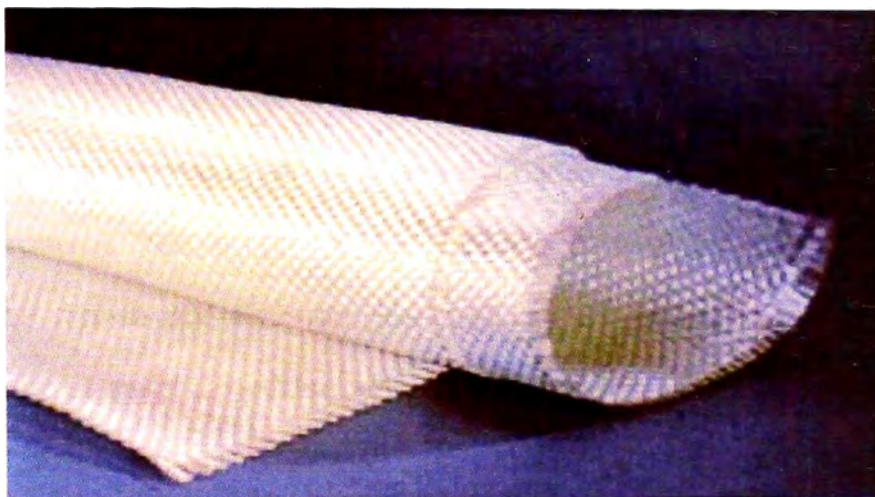
880 g/m<sup>2</sup>

Son obtenidos tejiendo los rovings para enrollamiento.

Los rovings aumentan considerablemente la resistencia al impacto y otras propiedades mecánicas de los laminados. Son compatibles con resinas epoxi, poliéster y viniléster.

Los laminados construidos con tejidos de 600 g/m<sup>2</sup> son anisotrópicos, en cambio los laminados construidos con tejidos de 880 g/m<sup>2</sup> son isotrópicos.

La figura 4.4 muestra la tela tejida de fibra de vidrio donde se puede observar los hilos tejidos



**Figura 4.4** TELA TEJIDO CON HILOS DE FIBRA DE VIDRIO (WOVEN ROVING)

- ***Fibras de vidrio Molidas***

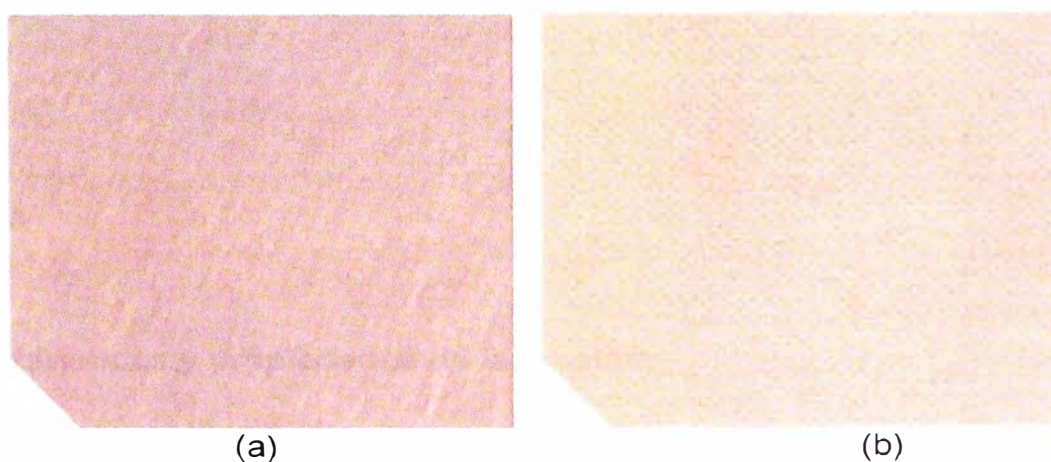
Molidas en molinos de bolas o de martillo, estas fibras tienen la apariencia de polvo blanco. Son fácilmente incorporadas a las resinas para hacer masas plásticas usadas para llenar grietas y cavidades.

- ***Velo Superficial***

El propósito del velo de superficie, también denominado estera emergente o tejido de superficie, es proporcionar un refuerzo al forro interior enriquecido con resina de una barrera anticorrosiva que evita rajaduras y grietas. El segundo propósito es evitar el desprendimiento de fibras de las capas estructurales que se encuentran en la superficie del laminado, que podría permitir que se produzca el drenaje del ambiente en el interior del laminado.

El tipo primario de velo de superficie que se usa en aplicaciones anticorrosivas es el velo de vidrio "C". Sin embargo, en aplicaciones donde el velo de vidrio "C" no es adecuado, se pueden usar otros tipos de velo hechos de fibras de carbón o poliéster termoplástico.

Por lo general, se recomienda el **velo de vidrio "C"** para los ambientes más corrosivos. Sin embargo, se prefiere el velo sintético en algunos ambientes, como por ejemplo, los que contienen compuestos de flúor. Se prefiere el **velo Sintético** en otros ambientes que se señalan en la guía de selección de resinas. Cuando se usa el velo sintético con resinas menos flexibles, como por ejemplo, las resinas poliéster, se recomienda un tipo de velo sintético no poroso para minimizar la tensión en el sistema. Con sistemas de resinas más flexibles, como por ejemplo, las resinas de viniléster pueden usarse tanto los velos sintéticos porosos como los no porosos. A continuación la imagen 4.5 muestra ambos velos superficiales descritos anteriormente.



**Figura 4.5** VELO SUPERFICITA (a) VELO DE VIDRIO TIPO "C" (b) VELO SINTÉTICO NEXUS

En ambientes severos, se recomiendan múltiples capas de velo; sin embargo, debe tenerse cuidado. En aplicaciones que requieran velo sintético en un ambiente químico, se puede colocar una capa de velo de vidrio C debajo del velo sintético. Existen para minimizar la retención de aire y ayudar a que la laminación por rodillo sea más fácil.

A menudo, el velo de carbón se usa en ambientes abrasivos. Cuando se le utiliza de manera adecuada, este velo ha demostrado que proporciona una mejor resistencia a la abrasión que el velo "C" o el velo Sintético. También se usa el velo de carbón para proporcionar un forro conductor para el control de la electricidad estática. Para aplicaciones en las que la conductividad no es conveniente, se debería reconsiderar el uso del velo de carbón. Los velos hechos con otros tipos de vidrios, como por ejemplo, el "A" y el "ECR" se usan con menos frecuencia en la industria anticorrosiva pero pueden aceptarse en algunas aplicaciones. Se debería realizar pruebas minuciosas en el ambiente específico antes de usar el velo "A" y "ECR".

## **4.2.2. Resinas**

### **4.2.2.1. Características y propiedades de las resinas**

Las resinas son plásticos que están constituidos por polímeros. El plástico es un compuesto de elevado peso molecular que está formado por moléculas gigantes y en menor porcentaje algunas de bajo peso molecular. Cuando estos compuestos presentan una estructura definida, con

repetición de cadenas elementales reciben el nombre de polímeros y aquellos de bajo peso molecular se denominan monómeros. Podemos decir entonces que “los polímeros son moléculas lineales o ramificadas, formadas por la repetición indefinida de grupos funcionales simples (monómeros) que se componen básicamente de C,H,O,N”. El número de veces que se repite un monómero en la formación de una molécula grande se denomina grado de polimerización. Cuando el grado de polimerización es bajo, se obtienen líquidos a temperatura ambiente, como aceites sintéticos y ceras, ahora si el grado de polimerización aumenta se logra un material sólido a temperatura ambiente.

Existen dos métodos para formar polímeros:

- Polimerización por adición:

En este proceso los monómeros se unen sin que las moléculas pierdan átomos. Por este método se sintetizan por ejemplo: el polietileno, acrílicos y poliestireno.

- Polimerización por condensación:

En la polimerización por condensación los monómeros se unen con la eliminación simultánea de átomos o grupos de éstos. Algunos ejemplos son: los poliésteres, las poliamidas y polietilenos.

Los polímeros se conocen como resinas sintéticas para así diferenciarlas de aquellas naturales como el ámbar.

Los plásticos se extraen de distintas materias de la naturaleza, los polímeros se extraen de derivados del petróleo, carbón o gas natural.



Los plásticos después de ser calentados se clasifican en dos grupos:

- **Termoplásticos:** estos plásticos se ablandan por calentamiento y vuelven a su estado inicial por enfriamiento lo cual es reversible. Entre los más conocidos tenemos: PVC, polietileno, polipropileno, poliestireno, etc.
- **Termoestables:** cuando estos plásticos se calientan (están en estado líquido) sus grandes moléculas se vuelven más grandes y después que se solidifican no pueden volver a su estado líquido inicial, si se calienta nuevamente estas se carbonizan. Las resinas pertenecen a los termoestables.

Algunas características de las resinas pueden ser:

- Tienen un bajo peso, su peso específico se encuentra dentro de 0.9 y 1.8 g/cm<sup>3</sup>.
- Son excelentes aislantes eléctricos para corriente alterna y continua, es por esto que son ampliamente utilizados como dieléctricos.
- Tienen una gran resistencia a la corrosión.
- Poseen una apariencia atractiva.
- Su resistencia mecánica es elevada.

Es un buen aislante térmico, los plásticos son malos conductores del calor.

- Poseen propiedades adhesivas.

La mayoría de las resinas contribuye poco a la capacidad de carga de los materiales compuestos, pero sí lo hace con la tenacidad, mientras más

dúctil sea la resina la tenacidad aumentará. La función de la resina es la de distribuir las cargas de una fibra a otra, así cuando una fibra se rompe una resina dúctil distribuye mejor las cargas a todas las fibras no solo a la adyacente. Lo que quiere decir que el laminado resistirá más fibras rotas aumentando la tenacidad del material compuesto. Esto lo podemos ver en la tabla 4.1 donde se hace mención de las propiedades mecánicas de la resina.

**Tabla 4.1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS RESINAS [8]**

Tipo de resina	Resistencia a tracción, MPa	Módulo de elasticidad a tracción, GPa	Deformación, %
Epóxicas	103-172	4.83-6.21	2.0
Polyimide	48-83	2.76-3.32	1.73-3.2
Poliéster	21-83	2.76-4.14	1.4-4.0
Termoplasticos	76-103	2.21-4.83	5-10

#### 4.2.2.2. Tipos de resina

Existan tres grandes grupos de resinas que son usadas generalmente en la industria de plásticos reforzados, las resinas de poliéster, las resinas epoxi y resinas viniléster.

- **Resinas poliéster**

Los poliésteres pueden ser saturados e insaturados. En los primeros se encuentra el grupo de las fibras textiles, como ejemplo podemos nombrar una fibra comúnmente llamada Dacrón, y los insaturados que son entrecruzados mezclándolos con un monómero. Las resinas de poliéster insaturado son aquellas a las cuales nos referiremos.



*Propiedades y características importantes de las resinas de poliéster:*

La principal característica de las resinas de poliéster es la propiedad de polimerizar bajo ciertas condiciones. Por acción de un catalizador, el poliéster y el monómero copolimerizan por sus grandes grupos insaturados para dar una resina dura y tridimensional. La reacción de la resina al polimerizar es exotérmica, para grandes espesores la mala conductividad térmica de la resina la puede llevar a elevadas temperaturas, lo que daña la calidad del material.

Las resinas de poliéster aún con los catalizadores no endurecen, o lo hacen lentamente y por debajo de 10°- 15°C.

Las resinas de poliéster insaturado son materiales de baja viscosidad que pueden mezclarse con gran cantidad de materiales de relleno y de refuerzo, pueden contener hasta un 80% en peso de fibra de vidrio. Cuando curan tienen una notable resistencia mecánica, de 172 a 344 MPa, al impacto y química.

*Aplicaciones importantes:*

Estas resinas se utilizan para hacer paneles de automóviles y piezas de carrocería, para los cascos de barcos pequeños y en la industria de la construcción para paneles y componentes del baño, como bañeras. También su uso abarca tubos, tanques, y conductos donde se requiere buena resistencia a la corrosión.

- ***Resinas epoxi***

Las resinas epoxis provienen de materiales termoestables que no generan productos de reacción durante el curado (entrecruzamiento) y por ello tienen poca contracción al curar.

Se parecen en la forma de trabajar a las de poliéster como en su proceso de curado, pero su comportamiento es diferente, a temperatura ambiente la dosificación de catalizadores es mayor y este no se desprende, sino que entra a formar parte de la reacción química integrándose en la molécula resultante. “Los agentes de curado usados con las epoxidicas no siempre actúan como catalizadores, como sucede con los poliésteres, sino que pueden entrar realmente en la reacción del curado y, por tanto, tener efectos bien marcados en las propiedades finales”.

*Propiedades y características importantes de estas resinas:*

El bajo peso molecular de las resinas no curadas en estado líquido les confiere una movilidad molecular excepcionalmente alta durante el proceso. Esta propiedad permite a la resina epoxi líquido empapar rápida y completamente las superficies. Esta acción de mojado es importante para los epoxis utilizados como materiales de refuerzo y adhesivos.

Además de la habilidad de mojado es importante para el encapsulado eléctrico. La gran reactividad de los grupos epoxídicos con los agentes de curado como las aminas proporciona un alto grado de

entrecruzamiento y produce gran dureza, resistencia mecánica y química. Puesto que no se generan productos de desecho durante la reacción del curado, la contracción durante el endurecimiento es pequeña.

Entonces es importante destacar las siguientes propiedades y características.

No se desprenden gases durante su endurecimiento.

El material no se contrae una vez terminado el proceso de endurecimiento.

Tienen buena adhesión sobre los materiales.

Poseen buenas propiedades mecánicas y como aislante eléctrico.

No humedecen los paños de fibras tan rápido como las de poliéster y su curado es más lento.

Tienen un elevado grado de tixotropía.

Tienen un buen comportamiento ante el agua, al ataque químico, resistencia a la abrasión, y una absorción de agua mejor que las resinas de poliéster, además de una resistencia ambiental.

“Una de las principales ventajas de estas resinas sobre las de poliéster, es su baja contracción (1-2%), que puede reducirse hasta prácticamente cero mediante la adición de cargas”.

Una desventaja que tienen las resinas epoxi es su precio elevado por sobre el de las de poliéster.

### *Aplicaciones importantes:*

La aplicación de estas resinas es muy variada y extensa, como en revestimientos protectores y decorativos por su buena adhesión y resistencia mecánica y química, en especial en revestimientos de latas y bidones, imprimaciones de automóviles, revestimiento de cables. También son utilizadas en la industria eléctrica como aisladores de alto voltaje, conmutadores y encapsulados de transistores, por ser un buen aislante dieléctrico, su baja contracción en el curado, resistencia ambiental, en especial la humedad y su buena adhesión. Además se utilizan para laminados y como matriz en materiales de plástico reforzado con fibra de vidrio.

- ***Resinas viniléster***

Las resinas viniléster han sido diseñadas y fabricadas para satisfacer los requisitos críticos de los plásticos reforzados. Por su excepcional resistencia a la corrosión, las resinas viniléster son especialmente indicadas para usos industriales bajo las más severas condiciones. Si se produce una rotura química es la resina, generalmente la que es atacada.

Las resinas viniléster tienen insuperables ventajas comparadas con materiales convencionales, una resistencia química y propiedades físicas superiores a las de poliéster, propiedades de manipulación superiores a las resinas de poliéster y epoxi. Entre las ventajas más destacadas se encuentra, la insuperable resistencia a la corrosión, en ambientes ácidos, bases y solventes orgánicos.

*Algunas de sus características y propiedades son:*

- Alta resistencia al impacto
- Alta resistencia a la fatiga
- Alta resistencia mecánica aliada a un bajo peso
- Excelentes propiedades de aislación térmica y eléctrica

*Aplicaciones importantes:*

Sus aplicaciones principales están en las plantas químicas, tuberías, tanques de almacenamiento y otros donde se requiera una alta resistencia química.

A continuación se muestra en la tabla 4.2 un listado de las resinas viniléster equivalentes preparadas por tres de los fabricantes más importantes de resina (Ashland, Reichhold y Basf).

**Tabla 4.2** TABLA COMPARATIVA DE RESINAS VINILÉSTER POR FABRICANTES [8]

ASHLAND	ASHLAND	REICHHOLD	BASF
Hetron 922	Derakane Momentum 441-350	Dion Ver 9100	Palatal A 430
Hetron FR 992	Derakane Momentum 510-350	Dion Ver 9300	Palatal A 430 FR
Hetron 980	Derakane Momentum 470	Dion Ver 9480 NP	Palatal A 440

#### 4.2.2.3. Proceso de curado de la resina

El proceso de curado de las resinas comienza con la adición del catalizador y en algunos casos hasta que se alcanza una temperatura mínima, la que puede disminuirse en presencia de un acelerante.

La polimerización o proceso de curado ocurre por la formación de radicales libres (electrones sin aparear) que comienzan a entrelazarse produciendo una reacción exotérmica, es decir, liberan gran cantidad de calor. A medida que la temperatura aumenta, también lo hace la producción de radicales libres. El aumento de temperatura puede producir daños al material, como grietas y decoloraciones; por eso debe manejarse muy bien la adición del acelerante, lo que puede depender de factores como la temperatura en la cual se esté trabajando, además de la humedad y otros.

Podemos considerar tres etapas para llevar a cabo el proceso de curado:

- **Gelificación:** proceso en el cual la resina cambia su estado de líquido fluyente a un gel blando.
- **Endurecimiento:** etapa en donde la resina cambia de un gel blando a un material endurecido que se puede extraer del molde.
- **Maduración o curado final:** corresponde a la fase en donde la resina adquiere sus propiedades mecánicas y químicas completas.

### 4.2.3. Aditivos

Los aditivos se utilizan para obtener una propiedad requerida o determinada.

- **Inhibidores:**

Los inhibidores evitan una polimerización anticipada de las resinas prolongando el tiempo de transformación en el endurecimiento. Estos inhibidores ya se encuentran en la resina, pero pueden ser adicionados también antes de su catalización.

Los inhibidores son aquellos que aseguran una conservación suficiente de la resina cuando está almacenada.

Retardan la polimerización de la resina catalizada el tiempo suficiente para poder realizar las operaciones de moldeo.

Limitan la elevación de la temperatura provocada por la reacción exotérmica de la polimerización, prolongando la duración de esta reacción.

Regularizan la fabricación de la resina para evitar que la reacción de polimerización no complique la reacción de policondensación o polimerización por condensación.

*Inhibidores estabilizantes:*

Estos inhibidores evitan la polimerización hasta que desaparecen, ya sea por el catalizador o por otro tipo de reacción.

### *Inhibidores retardadores:*

Retardan la polimerización al igual que los inhibidores estabilizantes, pero además estos interfieren de forma permanente.

- **Catalizadores:**

Son agentes para el curado de resinas a distintas temperaturas en combinación con Acelerantes específicos. Este proceso de curado consiste en la transformación de la resina de estado líquido viscoso a un estado retículo tridimensional sólido.

Los catalizadores se agregan a la resina en el momento de la preparación para su utilización. La función de los catalizadores es la de producir radicales libres que provoquen la iniciación de la polimerización. Estos radicales aparecen en la resina por descomposición de un peróxido o de un hidroperóxido orgánico, ya sea, por reacción con otro cuerpo llamado promotor o acelerante, o por acción de radiación, o por aportación de energía térmica.

La polimerización de las resinas es más rápida a la luz del sol, ya que las ondas cortas producen radicales libres en la resina y provocan la iniciación de la polimerización.

Los peróxidos orgánicos son altamente inflamables y en algunos casos no contienen aire.

Los catalizadores más usados son los peróxidos de metil-etil cetona (MEKP) y los peróxidos de benzoilo.



En la tabla 4.3 se muestran los equivalentes catalizadores (MEKP) más utilizados en la industria de dos fabricantes de peróxidos (Atofina y Akzo Nobel).

**Tabla 4.3** TABLA COMPARATIVA DE PERÓXIDOS [8]

ATOFINA	AKZO NOBEL
Luperox K-1	Butanox M-50
Luperox K-12	Butanox LPT
Luperox ANS-50	Lucidol BT-50

- **Acelerantes:**

Son compuestos que se agregan a las resinas, para acelerar la descomposición del peróxido catalizador, permitiendo la formación de radicales libres, lo que dará inicio a la reacción química de endurecimiento.

La función de los acelerantes es la de reforzar la acción de los catalizadores y permitir polimerizar a temperaturas menos elevadas, se añade a la resina al momento de su utilización. Se recomienda no mezclar el acelerante con el catalizador, ya que tiene una reacción violenta y puede provocar una explosión.

Existen principalmente dos tipos de acelerantes, los acelerantes de cobalto y los acelerantes de dimetilanilina (DMA), los primeros se utilizan con peróxidos de metil-etil cetona y los segundos con peróxidos de benzoilo.

- **Agente superficial:**

Agente de superficie fabricado a base de parafina disuelta en monoestireno, capaz de eliminar la pegajosidad superficial de productos expuestos al aire. Su utilización en proporción dependerá del tipo de resina a utilizar.

- **Desmoldante:**

Agentes de uso general utilizados como medio para desmoldar piezas fabricadas a base de resinas. La aplicación de este agente se realiza directamente sobre el molde.

- **Agentes tixotrópicos:**

Son compuestos de forma coloidal de densidad muy baja que entregan a la resina propiedades tixotrópicas, con el objeto de ser aplicadas sobre superficies verticales o muy inclinadas sin sufrir deslizamiento hasta su gelificación.

- **Monoestireno:**

Monómero reactivo líquido utilizado como medio diluyente de resinas. Su adición dependerá de la temperatura de trabajo y campo de aplicación requerida de la resina.

### 4.3 PROPIEDADES DE LOS LAMINADOS DE FRP

Todos los materiales se deterioran cuando son expuestos a la acción agresiva del medio ambiente. En el caso de la fibra de vidrio FRP, los agentes agresivos pueden atacar la resina, las fibras y la interface vidrio-resina.

Los principales síntomas de degradación son:

Amarillamiento

Pérdida de brillo

Disminución de traslucidez

Fisuramiento

Afloramiento de las fibras de vidrio

Pérdidas de propiedades mecánicas

En esta sección se describe el comportamiento de los laminados en presencia de ambientes agresivos como intemperies, fuego y productos químicos.

#### 4.3.1. Resistencia al intemperie

Los principales agentes del intemperie son las lluvias, los vientos, las oscilaciones térmicas y principalmente la radiación ultravioleta.

Los rayos solares de alta energía y pequeñas longitudes de onda (Ultravioletas), son absorbidos por el poliéster causando ruptura de las ligaciones moleculares y tornando la resina quebradiza y amarillada con el pasar del tiempo. Este proceso puede ser reducido a través de medidas

protectoras adecuadas, como el uso de absorbedores de rayos UV, pintura periódica de la superficie expuesta y el uso de pigmentos de alta solidez.

Los absorbedores UV, como su propio nombre indica, absorben preferencialmente estas radiaciones, disipando su energía. Muy usadas para estas finalidades son las hidroxibenzofenonas. Estos absorbedores se descomponen y pierden su función protectora después de 2 o 3 años de uso.

Las lluvias, vientos y oscilaciones térmicas actúan de modo relativamente correlacionado, como explicamos seguidamente. La resina absorbe humedad y se hincha, sometiendo el laminado a tensiones superficiales. Las oscilaciones térmicas aumentan estas tensiones y acentúan el surgimiento de pequeñas microfisuras en la superficie del laminado. Estas microfisuras absorben más humedad, repitiendo el ciclo y reduciendo el brillo original de la pieza. El viento remueve pequeñas partículas que se sueltan como escamas de la superficie y deposita suciedad (polvo, hollín) en las fisuras, reduciendo aún más el brillo y la traslucidez original.

Los rayos ultravioletas, como las lluvias, afectan apenas la apariencia superficial del laminado sin perjudicar significativamente sus características estructurales. En estos casos, la apariencia original del laminado puede ser restaurada a través del lijado de la superficie seguidamente del pintado.

Otro fenómeno que reduce la traslucidez de los laminados es la separación entre las fibras y el poliéster, causada por la penetración de agua o solvente en la interface vidrio-resina, haciendo que las fibras aparezcan blanqueadas. Este puede ser evitado de una manera bien simple, proveyendo de una capa

de resina libre de fibras sobre la estructura. Esta capa de resina no reforzada (comúnmente llamada gelcoat) reduce la ocurrencia de fibras blancas.

Debe ser recordado también que cuanto más avanzado es el grado de curado de la resina, menor es el número de instauraciones no polimerizadas y mejor es su resistencia a las intemperies. El sistema de curado (catalizador y acelerador) también tiene influencia en las aplicaciones donde el color de la resina es importante. Por ejemplo, el sistema BPO-DMA da origen a laminados amarillados que pueden ser objetables para algunas aplicaciones. La tonalidad amarilla resultante del DMA es más acentuada cuando el laminado es expuesto a los rayos solares.

Finalizando volvamos a insistir en la construcción adecuada del laminado. El fabricante debe tomar cuidado para impedir el desprendimiento de las fibras de vidrio en la superficie, siendo para esto construida una capa externa rica en resina (Gelcoat), para asegurar protección contra las intemperies.

Cuando están expuestos a las intemperies, los laminados sufren a penas deterioración cosmética, sin presentar pérdidas apreciables de propiedades mecánicas.

#### **4.3.2. Resistencia al fuego**

Uno de los puntos importantes en la evaluación de laminados es su capacidad de auto-extinción o no propagación de llamas. Diremos que un laminado es resistente al fuego o retardante de llamas, cuando esté presente baja velocidad de esparcimiento de llamas en presencia de la

fuerza de calor, y rápida supresión de las llamas cuando esta fuente es removida.

El poliéster, como la mayoría de los compuestos orgánicos contiene carbono e hidrogeno, que queman con facilidad, liberando gran cantidad de humo. Como la composición atómica del poliéster es similar a la de la madera y del papel, los productos de combustión son también similares. Debe ser observado que estos productos dependen no solamente de la composición del material combustible, mas también de las condiciones de quema. Habiendo grande disponibilidad de oxígeno, los principales productos de la combustión de los plásticos, madera y papel son gas carbónico y agua, En atmosferas pobres de oxígeno, son observados grandes cantidades de monóxido de carbono y humo. Si nitrógenos, cloro y flúor estuvieran presentes en las resinas, entonces estas también estarán presentes en los gases liberados.

Existen varios artificios que permiten al fabricante de las resinas y también al laminador obtener laminados clasificables como auto-extinguibles. Los más usados son el uso de **tintas intumescentes**, **trióxido de antimonio**, **alúmina trihidratada** (también conocida como alúmina hidratada) y **compuestos alógenos**.

Para que la combustión se sustente, son necesarias tres condiciones. En primer lugar es requerido el suministro ininterrumpido de calor, en general, proveniente de la propia reacción de quemado. Además de esto, es necesaria la presencia del combustible (en nuestro caso, el propio poliéster) y de oxígeno. Faltando cualquiera de estas condiciones, la quema deja de

ocurrir. Los sistemas empleados para dar características auto-extinguibles a los laminados abordan el problema de manera coherente con estas condiciones.

Por ejemplo, los compuestos halogenados usados en conjunto con el trióxido de aluminio forman, en la quema, una capa gaseosa de haluro de antimonio que aísla el material combustible (poliéster) del oxígeno, dificultando el esparcimiento de las llamas. Las tintas intumescentes, cuando calientan, hinchan y forman un colchón gaseoso aislante que desempeñan esencialmente la misma función. Estos dos sistemas dificultan el acceso del oxígeno al combustible (poliéster), dando como resultado una combustión incompleta que genera una gran cantidad de humo.

#### **4.3.3. RESISTENCIA QUÍMICA**

Los plásticos reforzados no son afectados por la corrosión electrolítica, como acontece con los metales. La degradación química de los plásticos reforzados es causada por absorción de solventes o ataque químico al polímero o las fibras de vidrio. Esta degradación es medida por la pérdida de propiedades mecánicas, variación de peso y cambio en la apariencia del laminado en contacto con el medio corrosivo, conforme el ensayo ASTM C-581.

Se define corrosión como deterioración del material en contacto con los ambientes agresivos, los plásticos reforzados pueden ser “corroídos” de dos maneras. En la primera, que podemos llamar “corrosión física”, no ocurre

reacción química entre el polímero, las fibras de refuerzo y el ambiente. La estructura molecular del polímero y la integridad de las fibras son preservadas en este caso, siendo la degradación resultante de la simple absorción de solventes por el laminado. Este tipo de degradación es reversible y, una vez eliminados los solventes, el laminado readquiere sus propiedades originales. En la segunda ocurre ataque químico a la matriz polimérica y/o a las fibras de vidrio. La “corrosión química” es irreversible y el laminado atacado no readquiere sus propiedades originales al ser retirado del medio agresivo.

La absorción de solventes por los poliésteres – que caracteriza la corrosión física – puede ser estimada “a priori” por el grado de compatibilidad o similitud entre ellas. Esta compatibilidad es expresada por los parámetros de solubilidad del polímero y el solvente. Cuanto menor fuera la diferencia entre estos parámetros de solubilidad mayor es la similaridad entre ellas y mayor es la absorción. Los solventes absorbidos por el laminado actúan como plastificantes de poliéster, reduciendo su dureza y propiedades mecánicas. Una vez curadas, las resinas poliésteres no son solubilizadas por solventes. Estas apenas penetran en ellas, hinchándolas, sin solubilizarlas. El punto de saturación es alcanzado rápidamente, de modo que es posible saber, con ensayos de inmersión de corta duración, el grado de absorción del solvente y sus efectos en las propiedades de los laminados. Muy usado para estas finalidades es el ensayo ASTM C-581, en el cual cuerpos de probeta con 2,5mm de espesor son inmersos en ambientes y retirados periódicamente para su observación. Este ensayo permite al fabricante saber si determinada resina puede o no ser usada en contacto con este o aquel solvente.



Algunas resinas resisten mejor a determinados solventes que otras, dependiendo de sus parámetros de solubilidad.

La corrosión química acontece cuando el ambiente agresivo ataca grupos reactivos en la molécula de poliéster. Estos puntos susceptibles al ataque químico son constituidos principalmente por las instauraciones no polimerizadas (C =C) y por los grupos éster. Las insaturaciones son fácilmente oxidadas, en cuanto los grupos éster pueden ser hidrolizados o saponificados. Otros puntos susceptibles de ataque son los grupos terminales hidroxilo y carboxilo.

#### 4.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL FRP

##### 4.4.1. Densidad, peso y espesor

La densidad de los laminados depende de las densidades y espesores de los materiales que entran en su composición, la densidad del laminado puede ser calculada utilizando la ecuación 4.1:

$$d = \frac{100}{\frac{\%vidrio}{d_v} + \frac{\%resina}{d_r} + \dots} \dots \dots \dots ec (4.1)$$

Dónde:

$d_v$	=	Densidad de la fibra de vidrio
$d_r$	=	Densidad de la resina
%vidrio	=	Cantidad en peso de fibra de vidrio
%vidrio	=	Cantidad en peso de resina

Las densidades de la fibra de vidrio y la resina son consideradas respectivamente iguales a 2,60 g/cm<sup>3</sup> y 1,20 g/cm<sup>3</sup>. Supongamos como ejemplo que se desea conocer la densidad de un laminado con 30% fibra de vidrio y 70% de resina. Reemplazando los valores en la ecuación 4.1 obtenemos para el laminado el siguiente resultado:

$$d = \frac{100}{\frac{30}{2,60} + \frac{70}{1,20}} = 1,43 \text{ g/cm}^3$$

El peso del laminado es dado por la ecuación 4.2:

$$P = A \cdot d \cdot t \dots \dots \dots \text{ec (4.2)}$$

Siendo el peso P expresado en kg, el área A en m<sup>2</sup>, la densidad d en g/cm<sup>3</sup> y el espesor t en mm. Un laminado con 10 m<sup>2</sup> de superficie, 3mm de espesor y 1.43 g/cm<sup>3</sup> de densidad pesa:

$$P = 10 \times 1.4 \times 3 = 42,9 \text{ kg}$$

El contenido de vidrio en los laminados construidos con fibras picadas puede ser supuesto igual a 30%. Así, una capa construida con mantas de 450 g/m<sup>2</sup> tiene 1050 g/m<sup>2</sup> de resina, como nos indica la siguiente expresión.

$$\frac{450}{30} \times 70 = 1050 \text{ g/m}^2$$

La densidad de este laminado con 30% de vidrio, es igual a 1,43 g/cm<sup>3</sup> como ya se vio. Por lo tanto, el espesor por capa de laminado con mantas de 450 g/m<sup>2</sup> es:

$$t = \frac{P}{A \cdot d} = \frac{0,45 + 1,05}{1 \times 1,43}$$

$$t = \frac{1,50}{1,43} = 1.0 \text{ mm}$$

Así, los laminados construidos con mantas de 450 g/m<sup>2</sup> tienen espesor de 1.0 mm por capa, con un contenido de 30% de vidrio.

#### 4.4.2. Módulos y Elongaciones

Para un mismo contenido de vidrio, los laminados construidos con fibras continuas tienen propiedades mecánicas, en la dirección de las fibras, superiores a las construidas con fibras picadas. Es sabido que los laminados construidos con fibras picadas tiene las mismas propiedades mecánicas en cualquier dirección en el plano de su laminación (isotropía planar), en cuanto a los producidos con fibras continuas tienen propiedades diferentes, conforme a la dirección considerada (anisotropía).

Para que el ingeniero pueda especificar estructuras de FRP adecuadas a sus necesidades, es necesario que sepa estimar las propiedades mecánicas de este material. Esto puede ser hecho con modelos simples, que permiten hacer esta estimación a partir de las propiedades de las fibras de vidrio y de las resinas, así como del contenido y disposición de los refuerzos (fibras) en el laminado.

La tabla 4.4 muestra valores considerados típicos para los poliésteres y las fibras de vidrio. El módulo de elasticidad de las fibras depende de su composición. Para el vidrio tipo E, este módulo puede ser considerado igual a 730.000 kg/cm<sup>2</sup>. La elongación en la ruptura de las fibras, así como su

resistencia a la tracción, dependen del proceso de fabricación, variando en los intervalos mostrados en la tabla. La elongación a la ruptura y la resistencia a la tracción de los poliésteres dependen de su composición

**Tabla 4.4** TABLA DE PROPIEDADES TÍPICAS DE LA RESINA POLIÉSTER Y LA FIBRA DE VIDRIO

	POLIÉSTER	FIBRAS DE VIDRIO
Módulo de Elasticidad $E$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	30.000 - 40.000	730
Elongación a la rotura $\epsilon\%$	1,4 - 4,0	1,2 - 2,5
Resistencia a la Tracción $\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	400 - 700	8.700 - 18.000
Relación de Poisson $\mu$	0.33	0.22
Densidad $\rho$ (Kg/cm <sup>3</sup> )	1,10 - 1,20	2,60

Las resinas poliéster y viniléster cubren un rango amplio de propiedades mecánicas. La elongación a la rotura de estas resinas pueden variar desde 1.0% (resinas rígidas) hasta 4.0% (resinas flexibles) La elongación máxima y la resistencia de las fibras de vidrio son influenciados por el proceso de fabricación.

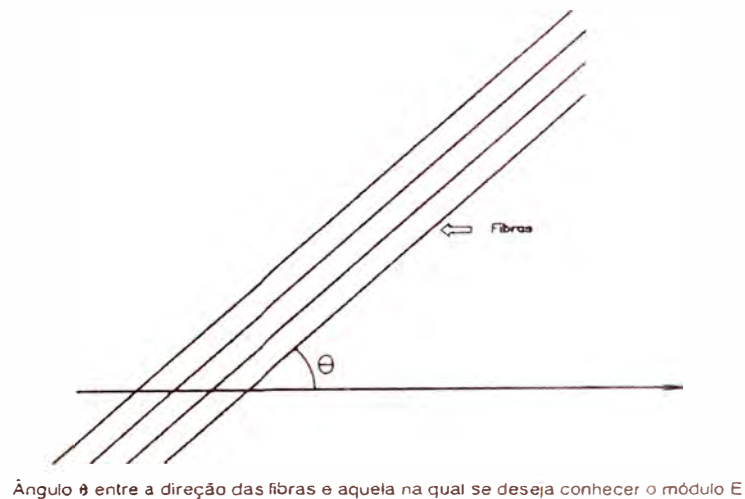
El módulo de tracción del laminado de FRP, es extremadamente importante para cálculo estructural. El módulo de tracción, puede ser estimado por la ecuación 4.3.

$$E = k \cdot V_v \cdot E_v + (1 - V_v) \cdot E_r \dots \dots \dots ec \quad (4.3)$$

Dónde:

E	=	Modulo de tracción del laminado de FRP
Vv	=	Cantidad de vidrio por volumen
Ev	=	Modulo de tracción de las fibras de vidrio
Er	=	Módulo de tracción de la resina poliéster
K	=	Coefficiente de aleatoriedad de las fibras

El coeficiente de aleatoriedad K lleva en consideración la disposición de las fibras de vidrio en el laminado. Para fibras picadas, dispuestas aleatoriamente en las capas,  $K = 3/8$ . Para fibras continuas,  $K = \cos^2 \theta$ , siendo  $\theta$  el ángulo entre el eje de las fibras y la dirección en la cual se desea conocer el módulo de elasticidad. La figura 4.6 muestra esta situación.



**Figura 4.6** ANGULO ENTRE EJE DE LAS FIBRAS Y LA DIRECCIÓN QUE SE MIDE SUS PROPIEDADES

Para estimar las propiedades mecánicas de los laminados de FRP la única información que nos hace falta es el contenido volumétrico de las fibras de vidrio ( $V_v$ ), que normalmente no es dado. El contenido volumétrico puede ser calculado a partir de la contenido por peso (esto sí es obtenido del proceso de fabricación) y de las densidades de las fibras y de la resina, también conocidas. La ecuación 4.4 nos permite realizar el cálculo de  $V_v$ .

$$V_v = \frac{\frac{\% \text{ Vidrio por peso}}{d_v}}{\frac{\% \text{ Vidrio por peso}}{d_v} + \frac{\% \text{ Resina por peso}}{d_r}} \dots \dots \dots ec (4.4)$$

Continuando con el ejemplo del laminado con 30% de fibras de vidrio (en peso), reemplazamos valores en la ecuación 4.4 para conocer su contenido volumétrico de vidrio  $V_v$ . Entonces  $d_v$  es la densidad de vidrio tipo "E", igual a 2,60 g/cm<sup>3</sup> y  $d_r$  es la densidad de la resina curada, que suponemos igual a 1,20 g/cm<sup>3</sup>.

$$V_v = \frac{\frac{0.30}{2.60}}{\frac{0.30}{2.60} + \frac{0.70}{1.20}} = 0.17 (17\%)$$

Ahora que sabemos calcular el contenido volumétrico de fibras, podemos estimar las propiedades mecánicas de los laminados. Las de interés para cálculo estructural son:

E	=	Módulo de tracción
E'	=	Módulo de flexión
$\mu$	=	Relación de Poisson
$\tau$	=	Resistencia al cizallamiento

A continuación, mostramos como calcular los módulos de elasticidad de los laminados construidos con:

- Laminado con fibras picadas (Mats)
- Laminado con fibras tejidas (Telas)
- Laminado con fibras continuas por enrollamiento (Filament Winding)
- Laminado combinado de fibras picadas y tejidas
- Laminado combinado de fibras enrolladas y picadas

#### A) Módulos de laminados de Fibras picadas

Las fibras picadas son distribuidas aleatoriamente en capas paralelas a la superficie de cada lámina (aleatoriedad planar). En esta situación, o módulo de tracción de laminado puede ser estimado por la ecuación (4.5):

$$E = k.V_v.E_v + (1 - V_v).E_r \dots \dots \dots ec. (4.5)$$

$$E = \frac{3}{8}.V_v.E_v + (1 - V_v).E_r \dots \dots \dots ec. (4.6)$$

Dónde:

- E : módulo de elasticidad de (tracción) del laminado
- K=3/8 : coeficiente de aleatoriedad planar con fibra picada
- V<sub>v</sub> : Cantidad de vidrio por volumen
- E<sub>v</sub> : módulo de elasticidad de las fibras de vidrio
- E<sub>r</sub> : módulo de elasticidad de la resina

Como ejemplo, estimaremos el módulo de tracción de un laminado con contenido 30% de fibras de vidrio picadas.

Primeramente calculamos el contenido volumétrico de vidrio haciendo uso de la ecuación 4.4 (pag 53).

$$V_v = \frac{\frac{0.30}{2.60}}{\frac{0.30}{2.60} + \frac{0.70}{1.20}} = 0.17$$

El módulo de tracción es obtenido aplicando la ecuación 4.6 mostrada en la pag. 54 y utilizando los siguientes valores:

$$V_v = 0.17, \quad E_v = 730\,000 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{y} \quad E_r = 30\,000 \text{ kg/cm}^2.$$

$$E = \frac{3}{8} \cdot (0.17) \cdot (73000) + (1 - 0.17) \cdot (30000) = 70000 \text{ kg/cm}^2$$

El módulo de flexión se calcula con la ecuación 4.7 y es igual al 85% del módulo de tracción:

$$E' = (0.85) \cdot (E) = 60000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \dots \dots \dots \text{ec (4.7)}$$

Estos valores están bien aproximados de los encontrados en la práctica.

## B) Módulos de laminados de Fibras tejidas

Los tejidos o “woven rovings”, como también son conocidos, son suministrados en dos presentaciones (tipo de fabricación).



600 g/m<sup>2</sup> - Con 2,3 rovings tex 740 por cm en la trama y 2 rovings tex 2200 por cm en la urdimbre. Cada capa de este tejido tiene 1 mm de espesor.

880 g/m<sup>2</sup> - Con 2 rovings tex 2200 por cm en la trama en la urdimbre. Cada capa tiene 1 mm de espesor.

La urdimbre y la trama son los hilos que formal la tela, como se muestra en la figura 4.7, con disposición respecto al eje del rollo de tela.



**Figura 4.7** TRAMA Y URDIMBRE DEL TEJIDO

El tejido de 600 g/m<sup>2</sup> es desbalanceado, teniendo  $2.3 \times 740 = 1\,700$  g/km x cm de fibras en la trama y  $2 \times 2200 = 4400$  g/km x cm en la urdimbre. Por lo tanto, en estos tejidos, 28% de las fibras se orientan en la dirección de la trama e 72% en la dirección de la urdimbre. En cambio los tejidos con 880 g/m<sup>2</sup> son balanceados, con la mitad de las fibras colocadas en la trama y la otra mitad en la urdimbre. La urdimbre es la dirección de enrollamiento del rollo de tejido. La trama es la dirección transversal, al largo del rollo.

Las propiedades mecánicas de los laminados construidos con tejidos serán estimadas para una dirección cualquiera haciendo un ángulo  $\theta$  con la trama.

- Para el tejido con 600 g/m<sup>2</sup>

$$E_{\theta} = (\cos^2\theta \cdot 0,28) \cdot V_v \cdot E_v + (\sin^2\theta \cdot 0,72) \cdot V_v \cdot E_v + (1 - V_v) \cdot E_r \dots \dots ec. (4.8)$$

- Para el tejido con 880 g/m<sup>2</sup>

$$E_{\theta} = \left(\cos^2\theta \cdot \frac{1}{2}\right) \cdot V_v \cdot E_v + \left(\sin^2\theta \cdot \frac{1}{2}\right) \cdot V_v \cdot E_v + (1 - V_v) \cdot E_r \dots \dots \dots ec. (4.9)$$

Para conocer el contenido volumétrico de vidrio en el laminado es necesario tener el contenido por peso, que puede ser calculado por el gramaje de los tejidos y por el espesor por capa. Para esto empleamos las siguientes expresiones.

$$P = A \cdot d \cdot t \dots \dots \dots ec. (4.10)$$

$$d = \frac{100}{\frac{\%vidrio}{2.60} + \frac{\%resina}{1.20}}$$

Dónde:

- P = Peso del laminado en kg
- A = Área del laminado en m<sup>2</sup>
- t = Espesor del laminado en mm
- d = Densidad del laminado en g/cm<sup>3</sup> (de la ec. 4.1)

Aplicando estas relaciones para una capa de tejido de A=1m<sup>2</sup> y t=1mm:

Tejido con 600 g/m<sup>2</sup>

$$0,6 + R = (1) \cdot (d) \cdot (1)$$

$$d = \frac{1}{\frac{0,6}{(0,60 + R) \cdot 2,60} + \frac{R}{(0,60 + R) \cdot 1,20}}$$

Tejido con 880 g/m<sup>2</sup>

$$0,88 + R = (1) \cdot (d) \cdot (1)$$

$$d = \frac{1}{\frac{0,88}{(0,88 + R) \cdot 2,60} + \frac{R}{(0,88 + R) \cdot 1,20}}$$

Donde R es la cantidad de resina por capa por m<sup>2</sup>, A = 1 m<sup>2</sup> y t = 1 mm

$$0,60 + R = d$$

$$0,88 + R = d$$

$$d = 0,60 + R = \frac{0,60 + R}{\frac{0,60}{2,60} + \frac{R}{1,20}}$$

$$d = 0,88 + R = \frac{0,88 + R}{\frac{0,88}{2,60} + \frac{R}{1,20}}$$

Resolviendo obtenemos:

$$R = 0,88 \text{ (880 g/m}^2 \text{ de resina)}$$

$$R = 0,76 \text{ (760 g/m}^2 \text{ de resina)}$$

Conociendo la cantidad de resina requerida para laminar 1 m<sup>2</sup> de tejido la cantidad de vidrio es:

$$\% \text{Vidrio por peso} = \frac{600}{600 + 800}$$

$$\% \text{Vidrio por peso} = \frac{880}{880 + 7600}$$

$$\% \text{Vidrio por peso} = 0,41 \text{ (41\%)}$$

$$\% \text{Vidrio por peso} = 0,54 \text{ (54\%)}$$

Los contenidos de vidrio por volumen pueden ser calculados ahora.

Ahora si podemos reemplazar los valores de los contenidos de vidrio y los módulos de elasticidad en las expresiones para hallar E<sub>θ</sub>.

- Para el tejido con 600 g/m<sup>2</sup>.

$$E_{\theta} = (70000 \cdot \text{sen}^2 \theta + 70000) \text{kg/cm}^2$$

- Para el tejido con 880 g/m<sup>2</sup>.

$$E_{\theta} = 140000 \text{ kg/cm}^2$$

De los resultados observamos que los laminados construidos con tejidos balanceados, con 880 g/m<sup>2</sup>, tiene propiedades mecánicas isotrópicas (iguales en cualquier dirección), como los construidos con fibras picadas. En cambio los construidos con tejidos de 600 g/m<sup>2</sup> tienen propiedades marcadamente diferentes en la trama y en la urdimbre. En la trama ( $\theta = 0$ ) el módulo de tracción de estos laminados es 70.000 kg/cm<sup>2</sup> mientras que en la urdimbre ( $\theta = 90^\circ$ ) este módulo es 140.000 kg/cm<sup>2</sup>. Por lo tanto las estructuras laminadas con tejidos de 600 g/m<sup>2</sup> son anisotrópicas. En la laminación, estos tejidos son posicionados de tal modo que las tensiones principales actúen siguiendo las direcciones principales de anisotropía. Así es que, al ser construido el cuerpo cilíndrico de los tanques verticales para almacenamiento de fluidos, los tejidos de 600 g/m<sup>2</sup> son posicionados con la trama orientada siguiendo a la dirección axial (menos forzada estructuralmente) y la urdimbre siguiendo la dirección circunferencial, donde las tensiones son mayores.

La tabla 4.5 muestra los módulos de tracción en la trama y en la urdimbre para los tejidos de 600 g/m<sup>2</sup> e 880 g/m<sup>2</sup>.

**Tabla 4.5** TABLA DE MÓDULOS DE TRACCIÓN DE LOS TEJIDOS DE FIBRA DE VIDRIO

Gramaje del Tejido	Módulo en la Trama (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo en la Urdimbre (Kg/cm <sup>2</sup> )
600	70.000	140.000
880	140.000	140.000

### C) Módulos de laminados de fibras enrolladas

Las propiedades mecánicas de los laminados contruidos por enrollamiento pueden ser estimadas conociendo el ángulo de enrollamiento de las fibras continuas, el contenido de vidrio y la composición del laminado.

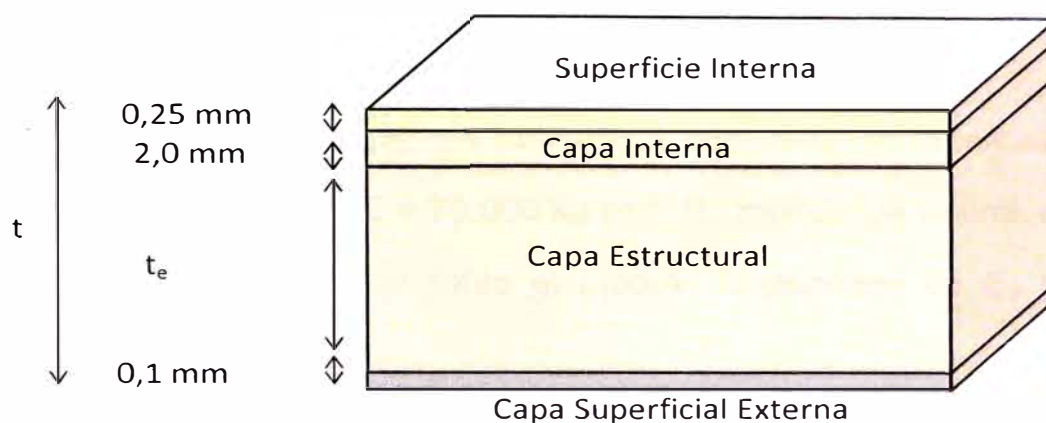
La figura 4.8 (pag. 60) muestra una construcción típica de estos laminados y sus espesores.

El espesor de la estructura es obtenida sumando los espesores de los diversos laminados que forman la estructura.

$$t = 0.25 + 2.00 + t_e + 0.1 \text{ mm} \quad \dots \dots \dots \text{ec. (4.11)}$$

$$t = t_e + 2.35 \text{ mm}$$

La distribución de los espesores se puede observar en la figura 4.8.



**Figura 4.8** CONSTRUCCIÓN TÍPICA DE LAMINADOS CON FIBRA ENROLLADA

De modo análogo, el módulo de elasticidad a la tracción es también obtenido sumando las contribuciones de los diversos laminados.

$$E = \frac{t_e}{t} \cdot E_e + \frac{2,00}{t} \cdot E_i + \frac{0,35}{t} \cdot E_r \quad \dots \dots \dots ec. (4.12)$$

Reemplazando la ecuación 4.11 en 4.12 obtenemos:

$$E = \frac{t - 2,35}{t} \cdot E_e + \frac{2,00}{t} \cdot E_i + \frac{0,35}{t} \cdot E_r \quad \dots \dots \dots ec. (4.13)$$

Dónde:

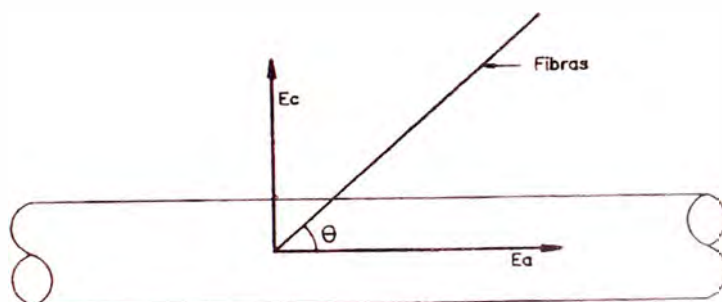
- E = módulo de elasticidad del laminado
- $t_e$  = espesor del laminado estructural
- t = espesor total del laminado
- $E_e$  = módulo de elasticidad del laminado estructural
- 2,00 = espesor del laminado intermediario (mm)
- $E_i$  = módulo del laminado intermediario
- 0,35 = espesor de laminado interno (0,25 mm) mas el del laminado externo (0,10mm)

$E_r$  = módulo de la resina

El laminado intermediario es construido con 30% de fibras de vidrio picadas. Por lo tanto,  $E_i = 70.000 \text{ kg/cm}^2$ .  $E_r$ , módulo da resina, es igual a  $30.000 \text{ kg/cm}^2$ . Por lo tanto el módulo  $E$  depende de  $E_e$  y de el espesor  $t$ .

El módulo  $E_e$  puede ser estimado conociendo el contenido y el ángulo de enrollamiento de las fibras continuas en el laminado estructural. Como los laminados enrollados son anisotrópicos, es necesario expresar  $E_e$  en función del ángulo de enrollamiento " $\theta$ ", para las direcciones axial y circunferencial de la estructura.

La figura 4.9 muestra las fibras continuas enrolladas haciendo ángulo  $\theta$  con la dirección axial.



**Figura 4.9** Angulo de enrollamiento del hilo de fibra de vidrio

Dónde:

$E_a$  = módulo en la dirección axial

$E_c$  = módulo en la dirección circunferencial

$\theta$  = ángulo de enrollamiento

Los módulos de tracción axial y circunferencial para este tipo de laminado estructural se calculan con las ecuaciones 4.14 y 4.15 respectivamente:

$$(E_e)_{axial} = E_{ea} = \cos^2\theta \cdot V_{CV} \cdot 730000 + \frac{3}{8} \cdot V_{PV} \cdot 730000 + (1 - V_{CV} - V_{PV}) \cdot E_r$$

.....ec. (4.14)

$$(E_e)_{circunf} = E_{ec} = \sin^2\theta \cdot V_{CV} \cdot 730000 + \frac{3}{8} \cdot V_{PV} \cdot 730000 + (1 - V_{CV} - V_{PV}) \cdot E_r$$

.....ec. (4.15)

En las expresiones mostradas,  $V_{CV}$  y  $V_{PV}$  son los contenidos volumétricos de fibras continuas y picadas, respectivamente, en el laminado estructural. Conociendo el módulo de tracción del laminado estructural, el módulo E (módulo de elasticidad del laminado) puede ser establecido en función del espesor total t (ecuación 4.13 pág. 61).

A continuación se presenta dos casos típicos como ejemplo:

a) Vamos construir una tabla de módulos para laminados construidos con fibras continuas y picadas (hoop-chop) con las siguientes condiciones:

- *Laminado interno* con 1 velo de superficie y 0,25 mm de espesor.
- *Laminado intermedio* con 30% de fibras picadas e 2,00 mm de espesor



- *Laminado estructural* con 40% de fibras continuas, 20% de fibras picadas e 40% de resina. El ángulo de enrollamiento es supuesto igual a 90°.
- *Laminado externo* con 0,1 mm de espesor.

Enfocando nuestra atención en el laminado estructural, los contenidos volumétricos de vidrio lo calculamos utilizando la ecuación 4.4 tanto para las fibras continuas y las fibras picadas como se muestra a continuación:

$$V_{CV} = \frac{40}{\frac{40}{2.60} + \frac{\frac{20}{2.60}}{\frac{20}{2.60}} + \frac{40}{1.20}} = 0.28 \quad \dots \dots \dots ec. (4.16)$$

$$V_{PV} = \frac{20}{\frac{40}{2.60} + \frac{\frac{20}{2.60}}{\frac{20}{2.60}} + \frac{40}{1.20}} = 0.14 \quad \dots \dots \dots ec. (4.17)$$

Reemplazando los valores obtenidos de las ec. (4.16 y 4.17) en las ecuaciones 4.14 y 4.15, se obtienen los módulos axial y circunferencial del laminado estructural tejido con fibra de vidrio continua (Donde  $\theta = 90^\circ$ )

$$(E_e)_{axial} = \cos^2\theta \cdot 0.28 \cdot 730000 + \frac{3}{8} \cdot 0.14 \cdot 730000 + (1 - 0.28 - 0.14) \cdot 30000$$

$$(E_e)_{axial} = 0 + 38000 + 17000 \cong 55000 \frac{kg}{cm^2} \quad \dots \dots \dots Ec. (4.18)$$

$$(E_e)_{circunf} = \sen^2\theta \cdot 0.28 \cdot 730000 + \frac{3}{8} \cdot 0.14 \cdot 730000 + (0.58) \cdot 30000$$

$$(E_e)_{circunf} = 204000 + 38000 + 17000 \cong 260000 \frac{kg}{cm^2} \quad \dots \dots \dots ec. (4.19)$$

Por lo tanto los módulos axial y circunferencial del laminado total (laminado con fibra de vidrio + laminado de fibra picada + laminado interno) lo obtenemos utilizando las ecuaciones 4.12 y 4.13 de la pág. 61:

$$E_a = \frac{t - 2.35}{t} \cdot 55000 + \frac{2.00}{t} \cdot 70000 + \frac{0.35}{t} \cdot 30000$$

$$E_a = 55000 + \frac{20000}{t} \cong 55000 \frac{kg}{cm^2} \quad \dots \dots \dots ec. (4.20)$$

$$E_c = \frac{t - 2.35}{t} \cdot 260000 + \frac{2.00}{t} \cdot 70000 + \frac{0.35}{t} \cdot 30000$$

$$E_c = 260000 - \frac{460000}{t} \frac{kg}{cm^2} \quad \dots \dots \dots ec. (4.21)$$

De los resultados obtenidos, vemos que el módulo axial ( $E_a$ ) se aproxima a 55 000 kg/cm<sup>2</sup> para cualquier espesor, en cambio el módulo circunferencial ( $E_c$ ) de los laminados hoop-chop varía con el espesor total de la estructura.

A continuación se presenta en la tabla 4.6 pág. 66, los módulos de tracción para varios espesores de laminado por enrollamiento con un ángulo de 90°.

**Tabla 4.6** TABLA DE MÓDULOS DE TRACCIÓN DE ENROLLAMIENTO  
CON ÁNGULO DE ENROLLAMIENTO IGUAL 90°

t (mm)	E <sub>c</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )	E <sub>c</sub> . t (Kg/cm <sup>2</sup> . mm)	E <sub>a</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )
4,5	157.000	710.000	
5,0	168.000	840.000	
5,5	176.000	970.000	
6,0	183.000	1 100.000	
6,5	189.000	1 230.000	
7,0	194.000	1 360.000	
7,5	198.000	1 490.000	
8,0	202.000	1 620.000	
8,5	205.000	1 750.000	
9,0	208.000	1 880.000	
9,5	211.000	2 010.000	
10,0	214.000	2 140.000	55.000
10,5	216.000	2 270.000	
11,0	218.000	2 400.000	
11,5	220.000	2 530.000	
12,0	221.000	2 560.000	
12,5	223.000	2 790.000	
13,0	224.000	2 920.000	
13,5	225.000	3 050.000	
14,0	227.000	3 180.000	
14,5	228.000	3 310.000	
15,0	229.000	3 400.000	

Módulos de tracción circunferencial (E<sub>c</sub>) y axial (E<sub>a</sub>) para estructura "hoop-chop" con 40% de fibras continuas, 20% de fibras picadas y ángulo de enrollamiento  $\theta = 90^\circ$ .

Dónde:

- t : espesor del laminado
- E<sub>c</sub> : Módulo de tracción circunferencial
- E<sub>a</sub> : Módulo de tracción axial

Los módulos de flexión pueden ser tomados igual al 85% de los respectivos módulos de tracción.

- b) Vamos ahora a presentar un ejemplo con enrollamiento helicoidal, suponiendo el laminado estructural con 70% de vidrio continuo y 30% de resina. El ángulo de enrollamiento es  $54,75^\circ$ . Los laminados interno, intermediario y externo son como se describió en el caso anterior.

El contenido volumétrico de vidrio en el laminado estructural. de la ecuación 4.4, se obtiene:

$$V_v = \frac{\frac{70}{2.60}}{\frac{70}{2.60} + \frac{30}{1.20}} = 0.52 \quad \dots \dots \dots ec. (4.22)$$

Los módulos axial y circunferencial para este laminado, reemplazando el resultado de ec. 4.22 en las ecuaciones 4.14 y 4.15, son respectivamente: (Ángulo de enrollamiento de  $\theta = 54.75^\circ$ )

$$(E_e)_{axial} = \cos^2(54.75) \cdot 0.52 \cdot 730000 + (0.48) \cdot 30000$$

$$(E_e)_{axial} = 140000 \frac{kg}{cm^2} \quad \dots \dots \dots ec. (4.23)$$

$$(E_e)_{circunf} = \sen^2(54.75) \cdot 0.52 \cdot 730000 + (0.48) \cdot 30000$$

$$(E_e)_{circunf} = 267000 \frac{kg}{cm^2} \quad \dots \dots \dots ec. (4.24)$$

Sustituyendo estos valores en las ecuaciones 4.12 y 4.13 para los módulos del laminado total, obtenemos:

$$E_a = \frac{t - 2.35}{t} \cdot 140000 + \frac{2.00}{t} \cdot 70000 + \frac{0.35}{t} \cdot 30000$$

$$E_a = 140000 - \frac{180000}{t} \frac{kg}{cm^2} \dots \dots \dots ec. (4.25)$$

$$E_c = \frac{t - 2.35}{t} \cdot 267000 + \frac{2.00}{t} \cdot 70000 + \frac{0.35}{t} \cdot 30000$$

$$E_c = 260000 - \frac{480000}{t} \frac{kg}{cm^2} \dots \dots \dots ec. (4.26)$$

Como vemos, los módulos axial y circunferencial de este tipo de estructura dependen del espesor total del laminado. La tabla 4.7 muestra los módulos para varios espesores tabulados de las ecuaciones 4.25 y 4.26.

**Tabla 4.7** TABLA DE MÓDULOS DE TRACCIÓN DE ENROLLAMIENTO CON ÁNGULO DE ENROLLAMIENTO IGUAL 54.75°

t (mm)	Ec (Kg/cm <sup>2</sup> )	Ec . t (Kg/cm <sup>2</sup> . mm)	Ea (Kg/cm <sup>2</sup> )	Ea . t (Kg/cm <sup>2</sup> . mm)
4,5	157.000	710.000	100.000	450.000
5,0	168.000	840.000	104.000	520.000
5,5	176.000	970.000	107.000	590.000
6,0	183.000	1 100.000	110.000	660.000
6,5	189.000	1 230.000	112.000	730.000
7,0	194.000	1 360.000	114.000	800.000
7,5	198.000	1 490.000	116.000	870.000
8,0	202.000	1 620.000	117.000	940.000
8,5	205.000	1 750.000	118.000	1 010.000
9,0	208.000	1 880.000	120.000	1 080.000
9,5	211.000	2 010.000	121.000	1 150.000
10,0	214.000	2 140.000	122.000	1 220.000
10,5	216.000	2 270.000	122.000	1 290.000
11,0	218.000	2 400.000	123.000	1 360.000
11,5	220.000	2 530.000	124.000	1 430.000
12,0	221.000	2 560.000	125.000	1 500.000
12,5	223.000	2 790.000	126.000	1 570.000
13,0	224.000	2 920.000	126.000	1 630.000
13,5	225.000	3 050.000	127.000	1 710.000
14,0	227.000	3 180.000	127.000	1 780.000
14,5	228.000	3 310.000	127.000	1 840.000
15,0	229.000	3 400.000	128.000	1 920.000

Módulos de tracción circunferencial (Ec) y axial (Ea) para estructuras enrolladas con 70% de fibras de vidrio continuas y ángulo de enrollamiento  $\theta = 54,75^\circ$ .

- c) Para completar las estructuras encontradas en la práctica, vamos a construir ahora la tabla de módulos para laminados enrollados con 70% de fibras continuas y ángulo de enrollamiento  $\theta = 70^\circ$ . Los laminados interno, intermediario y externo permanecen como ya se describió.

Como vimos en el ejemplo anterior, el contenido volumétrico de vidrio en el laminado estructural es 52%. Por lo tanto de las ecuaciones 4.14 y 4.15 tenemos:

$$(E_e)_{axial} = \cos^2(70^\circ) \cdot 0.52 \cdot 730000 + (0.48) \cdot 30000$$

$$(E_e)_{axial} = 58000 \frac{kg}{cm^2} \quad \dots \dots \dots ec. (4.26)$$

$$(E_e)_{circunf} = \sin^2(70^\circ) \cdot 0.52 \cdot 730000 + (0.48) \cdot 30000$$

$$(E_e)_{circunf} = 350000 \frac{kg}{cm^2} \quad \dots \dots \dots ec. (4.26)$$

Reemplazando los resultados de las ecuaciones 4.26 y 4.25 en las ecuaciones 4.12 y 4.13 obtenemos los módulos del laminado total:

$$E_a = \frac{t - 2.35}{t} \cdot 58000 + \frac{2.00}{t} \cdot 70000 + \frac{0.35}{t} \cdot 30000$$

$$E_a = 58000 - \frac{14000}{t} \cong 60000 \frac{kg}{cm^2} \quad \dots \dots \dots ec. (4.27)$$

$$E_c = \frac{t - 2.35}{t} \cdot 350000 + \frac{2.00}{t} \cdot 70000 + \frac{0.35}{t} \cdot 30000$$

$$E_c = 350000 - \frac{670000}{t} \frac{kg}{cm^2} \quad \dots \dots \dots ec. (4.28)$$

A continuación se presenta en la tabla 4.8 los valores de los módulos para diferentes espesores de este laminado tabulados en base a las ecuaciones 4.27 y 4.28.

**Tabla 4.8** TABLA DE MÓDULOS DE TRACCIÓN DE ENROLLAMIENTO CON ÁNGULO DE ENROLLAMIENTO IGUAL 70°

t (mm)	Ec (Kg/cm <sup>2</sup> )	Ec . t (Kg/cm <sup>2</sup> . mm)	Ea (Kg/cm <sup>2</sup> )
4,5	200.000	300.000	
5,0	216.000	1 080.000	
5,5	228.000	1 250.000	
6,0	238.000	1 430.000	
6,5	246.000	1 600.000	
7,0	254.000	1 780.000	
7,5	260.000	1 950.000	
8,0	266.000	2 130.000	
8,5	271.000	2 300.000	
9,0	275.000	2 480.000	
9,5	279.000	2 650.000	
10,0	283.000	2 830.000	60.000
10,5	286.000	3 000.000	
11,0	289.000	3 180.000	
11,5	291.000	3 350.000	
12,0	294.000	3 530.000	
12,5	296.000	3 700.000	
13,0	298.000	3 880.000	
13,5	300.000	4 050.000	
14,0	302.000	4 230.000	
14,5	303.000	4 400.000	
15,0	305.000	4 580.000	

Módulos de tracción circunferencial (Ec) y axial (Ea) para laminados enrollados con 70% de fibras de vidrio continuas y ángulo de enrollamiento 70°.

Los módulos de flexión pueden ser tomados igual al 85% de los respectivos módulos de tracción.

#### D) Módulos de laminado Combinación de mantas y tejidos

El laminado estructural de tanques verticales cilíndricos construidos manualmente combina mantas y tejidos. Los tejidos son usados porque, tienen mejores propiedades mecánicas que las mantas, permiten al fabricante reducir el espesor del laminado y disminuir el costo de materiales y mano de obra directa. Los tejidos deben ser intercalados entre las mantas para no perjudicar la resistencia al cizallamiento inter laminar de la estructura.

La figura 4.10 muestra una secuencia de laminado típica con mantas (M) y tejidos (T), donde puede ser observado que el laminado interno es construido con velo superficial (V) seguido de por lo menos dos mantas (M) que caracterizan el laminado intermedio. La última capa (externa) debe ser construida con manta para que el tejido no quede expuesto a las intemperies o a cualquier otro ambiente agresivo.



**Figura 4.10** CONSTRUCCIÓN TÍPICA DE UN LAMINADO MANUAL



La ecuación 4.29 es usada para calcular el módulo de tracción de los laminados para este tipo de lamiando a partir de los módulos de las capas de mantas (M) y tejidos (T).

$$E = \frac{(t_m) \cdot (E_m) \cdot (M) + (t_t) \cdot (E_t) \cdot (T) + 0.35 \cdot E_r}{M \cdot t_m + T \cdot t_t + 0.35} \dots \dots ec. (4.29)$$

Dónde:

E	-	módulo de tracción para el laminado
$t_m$	-	espesor de cada capa de manta (mat)
M	-	número de capas de manta (mat)
$t_t$	-	espesor de cada capa de tejido (tela)
T	-	número de capas de tejido (tela)
$E_m$	-	módulo de tracción de las mantas
$E_t$	-	módulo de tracción de los tejidos
0,35 mm	-	espesor de resina no reforzada (0,25 mm de el laminado interno y 0,10 mm del laminado externo).
$E_r$	-	módulo de tracción de la resina

El módulo de flexión es extremadamente sensible a la posición relativa de las mantas y tejidos dentro de la estructura. Así, no podemos presentar una expresión simple para estimarla sin que sea conocida la disposición de cada capa de refuerzo dentro del laminado. Suponiendo que la estructura será construida bien balanceada, esto es, apenas con mantas (poco común) o con intercalado de mantas y tejidos (usual),

podemos sugerir que el módulo de flexión será igual a 85% de la tracción como se muestra en la ecuación 4.30.

$$E' = 0.85 \cdot E \quad \dots \dots \dots ec. (4.30)$$

Los valores siguientes son usados en la ecuación 4.29 para calcular el módulo de elasticidad de laminados compuestos con mantas y tejidos,

$E_r$	-	30.000 kg/cm <sup>2</sup>
$t_m$	-	1,0 mm (manta de 450 g/m <sup>2</sup> , 30% de vidrio)
$E_m$	-	70.000 kg/cm <sup>2</sup> (30% de vidrio)
$t_t$	-	1,0 mm (tejido de 600 g/m <sup>2</sup> )
$(E_t)_{axial}$	-	70.000 kg/cm <sup>2</sup> (tejido de 600 g/m <sup>2</sup> con la trama en la dirección axial).
$(E_t)_{circnf}$	-	140.000 kg/cm <sup>2</sup> (tejido de 600 g/m <sup>2</sup> con el urdimbre en la Dirección circunferencial)

Como sabemos, los módulos de los laminados cilíndricos son designados por lo subíndice "a" cuando tomados en la dirección axial y "c" cuando nos referimos a la dirección circunferencial.

Así reemplazando en la ecuación 4.29 tenemos:

- Cálculo de módulo axial con la ec. (4.29) y el valor de  $(E_t)_{axial}$

$$E_a = \frac{(1.0) \cdot (70000) \cdot (M) + (1.0) \cdot (70000) \cdot (T) + 0.35 \cdot 30000}{(1.0)M + (1.0)T + 0.35}$$

$$E_a = \frac{(70000) \cdot M + (70000) \cdot T + 10500}{M + T + 0.35} \cong 70000 \frac{kg}{cm^2} \dots ec. (4.31)$$

- Cálculo de módulo axial con la ec. (4.29) y el valor de  $(E_t)_{circunf}$

$$E_c = \frac{(70000) \cdot M + (140000) \cdot T + 10500}{M + T + 0.35} \text{ kg/cm}^2$$

$$E_c = \frac{\left(70000 + 70000 \cdot \frac{T}{M+T}\right) \text{ kg}}{\text{cm}^2} \dots\dots\dots \text{ec. (4.32)}$$

En las expresiones vistas, M y T son el número de capas de mantas (mats) y tejidos (telas), respectivamente en el laminado total. La tabla 2.9 muestra algunos laminados típicos para tanques verticales cilíndricos con los respectivos módulos de elasticidad.

**Tabla 4.9** MÓDULOS DE ELASTICIDAD PARA LAMINADO COMBINADO DE MANTAS Y TELAS DE FIBRA DE VIDRIO (MAT Y TELA)

CONSTRUCCIÓN	t (mm)	Ea    (Kg/cm <sup>2</sup> )	Ec (Kg/cm <sup>2</sup> )	Ec . t (Kg/cm <sup>2</sup> .mm)
VMMTM	4.35		87.000	378.000
VMMM TM	5.35		84.000	450.000
VMMTMTM	6.35		93.000	590.000
VMMM TMTM	7.35		90.000	660.000
VMMTMTMTM	8.35		96.000	800.000
VMMM TMTMTM	9.35		93.000	870.000
VMMTMTMTMTM	10.35		98.000	1 010.000
VMMM TMTMTMTM	11.35		95.000	1 070.000
V + 7M + 5T	12.35		99.000	1 220.000
V + 8M + 5T	13.35	70.000	96.000	1 280.000
V + 8M + 6T	14.35		100.000	1 430.000
V + 9M + 6T	15.35		9.000	1 500.000
V + 9M + 7T	16.35		100.000	1 630.000
V + 10M + 7T	17.35		98.000	1 700.000
V + 10M + 8T	18.35		101.000	1 850.000
V + 11M + 8T	19.35		99.000	1 915.000
V + 11M + 9T	20.35		101.000	2 055.000
V + 12M + 9T	21.35		100.000	2 130.000
V + 12M + 10T	22.35		101.000	2 250.000

Módulos y espesores de laminados con mantas de 450g/m<sup>2</sup> y tejidos de 600 g/m<sup>2</sup>. Los tejidos son laminados con la trama en dirección axial.

El espesor total del laminado en mm es:

$$t = M + T + 0,35 \dots\dots\dots \text{ec. (4.33)}$$

Donde M y T son, respectivamente, el número de capas de mantas y de tejidos.

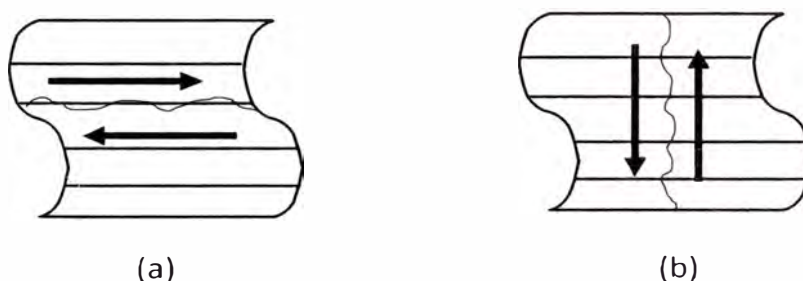
Los módulos de flexión son tomados iguales a 85% de los respectivos módulos de tracción.

#### 4.4.3. Resistencia al cizallamiento o corte

Los laminados de FRP pueden ser sometidos a dos tipos de corte.

- Cizallamiento o corte interlaminar, entre capas.
- Cizallamiento o corte perpendicular a las capas

La figura 4.9 muestra los dos tipos de cizallamiento:



**Figura 4.11** (A) CIZALLAMIENTO INTERLAMINAR (B) CIZALLAMIENTO PERPENDICULAR.

La resistencia al cizallamiento o corte interlaminar húmeda debe ser bien distinguida de la seca. En el caso húmedo ocurre cuando una capa de refuerzo es laminada sobre otra aun húmeda, esto es, no curada. En el caso seco la laminación es hecha sobre laminado seco, curado.

En seguida, mostramos las tensiones de cizallamiento o corte a la rotura para laminados típicos.

Resistencia al cizallamiento interlaminar seco..... 50 kg/cm<sup>2</sup>

Resistencia al cizallamiento interlaminar húmedo..... 200 kg/cm<sup>2</sup>

Resistencia al cizallamiento perpendicular..... 800 kg/cm<sup>2</sup>

#### 4.4.4. Relación de poisson

La relación de Poisson para laminados de FRP varía entre 0.25 y 0.33. En este informe, consideramos los siguientes valores para las expresiones donde aparecen estas relaciones, siendo  $\mu_c$  y  $\mu_a$  las relaciones de Poisson circunferencial y axial, respectivamente, valores obtenidos del libro FIBERGLASS X CORROSAO de A. Carvalho, capítulo 8: Propiedades Mecánicas página 180.

$$\mu \quad - \quad 0,25$$

$$1-\mu^2 \quad - \quad 0,94$$

$$1 - \mu_a \cdot \mu_c \quad - \quad 0,94$$

Estas expresiones aparecen en algunas fórmulas usadas para el dimensionamiento estructural de laminados, como veremos en los capítulos siguientes.

#### 4.4.5. Isotropía

El termino isotropía es aquí entendido como aplicable apenas en el plano de las capas que componen el laminado. Tal vez sería más correcto hablar en

"isotropía planar", significando que las propiedades del laminado en la dirección perpendicular a las capas difieren de las tomadas en el plano definido por ellas.

Los laminados reforzados con tejidos balanceados (880 g/m<sup>2</sup>) o fibras picadas son considerados isotrópicos. Los demás refuerzos (tejido 600 g/m<sup>2</sup>, rovings continuos) producen laminados anisotrópicos, esto es, con propiedades mecánicas variando conforme a dirección considerada.

#### **4.4.6. Comparación Entre Acero Y FRP**

Del punto de vista estructural, el poliéster reforzado con fibra de vidrio FRP difiere del acero en cuatro aspectos:

El primero es que los laminados de poliéster reforzados con fibras de vidrio pueden ser anisotrópicos, en cuanto las chapas de acero son isotrópicas. Esto complica un poco las expresiones usadas para hacer el dimensionamiento estructural del FRP, mas no impide que los cálculos puedan ser hechos de forma sencilla con calculadoras electrónicas de bolso.

El segundo punto de diferencia es que, el acero tiene propiedades mecánicas bien definidas, las de FRP dependen de sus espesores de laminado y de posiciones relativas de los refuerzos dentro de ella. Esto realmente es un complica los cálculos estructurales. El hecho de que las propiedades mecánicas de las laminaciones de FRP dependieran de sus espesores, torna necesaria el uso de métodos de aproximaciones sucesivas - ensayo y error - para hacer el dimensionamiento. Además de esto, la posición de las capas de refuerzo tiene una marcada influencia en el módulo

de flexión que deberá, a rigor, ser tabulada en función del espesor del laminado. En este informe estamos simplificando un poco las cosas, considerando que el módulo de flexión es igual al 85% del de tracción y, por lo tanto, independiente de la posición de las capas.

El tercer punto de diferencia es respecto a la magnitud de los módulos de elasticidad. El módulo de tracción de las láminas de FRP cubre un rango muy amplio, desde 70.000 kg/cm<sup>2</sup> (30% de fibras picadas) hasta 300.000 kg/cm<sup>2</sup> (70% de fibras enrolladas), en cuanto que para el acero este módulo es 2.100.000 kg/cm<sup>2</sup>. Por lo tanto el módulo de elasticidad del acero es mucho mayor que el del FRP.

El cuarto punto de diferencia es referente a las elongaciones admisibles. Para el FRP es fundamental que la elongación no exceda el máximo admisible, en cuanto al acero, por ser un material dúctil, no está sujeto a esta limitación. El acero admite deformaciones plásticas localizadas, mas no es calculado para trabajar así. Las estructuras de acero son dimensionadas para trabajar dentro del rango de proporcionalidad, de la misma manera que las de FRP. La diferencia es que el acero puede acomodar eventuales concentraciones de tensiones con deformaciones plásticas, en cambio el FRP no puede. En cuanto a las magnitudes de elongación máximo admitido para los dos materiales, podemos decir que el FRP lleva ventaja. Las estructuras de acero son dimensionadas para una elongación máxima de 0,07%, en cuanto a las de FRP pueden admitir deformaciones de hasta 0,25%. El hecho de que el FRP pueda trabajar con mayores elongaciones (en comparación al acero) compensa un poco su deficiencia en cuanto al bajo módulo de elasticidad. Sin embargo, la diferencia entre los módulos de

los dos materiales es tan grande que los equipamientos de FRP dimensionados para resistir los esfuerzos de trabajo tienen espesores, no mínimo, igual a 2 veces a los del acero.

$$t_{FRP} = \frac{(E \cdot \varepsilon_{adm})_{ACERO}}{(E \cdot \varepsilon_{adm})_{FRP}} \cdot t_{ACERO} \dots \dots \dots ec. (4.34)$$

Reemplazando los valores respectivos en la ec. 4.35 obtenemos:

$$t_{FRP} = \frac{(2100000) \cdot (0.07)}{(300000) \cdot (0.25)} \cdot t_{ACERO}$$

$$t_{FRP} = 2 \cdot t_{ACERO} \dots \dots \dots ec. (4.35)$$

La conclusión mostrada es válida para el costado cilíndrico de equipamientos sometidos a presión interna y corresponde a la condición más favorable para el FRP. Las estructuras cilíndricas, en este caso, son sometidas apenas a esfuerzos de tracción.

## 4.5 MÉTODOS DE FABRICACIÓN EN FRP

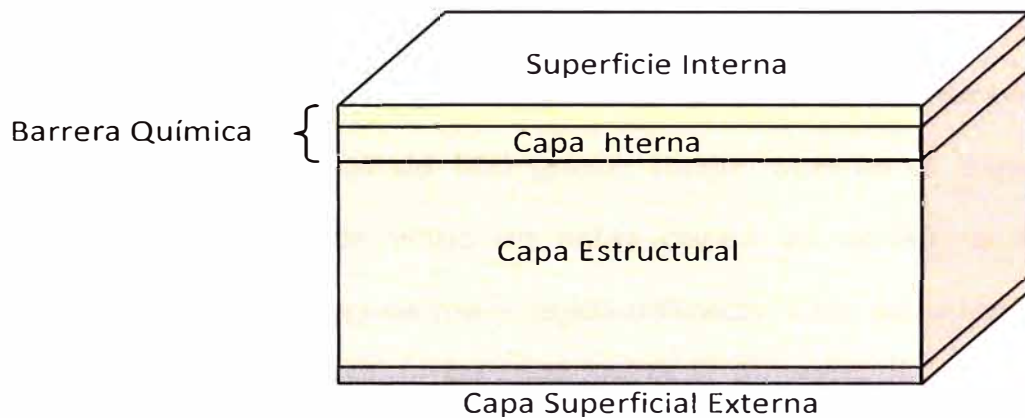
### 4.5.1. Los laminados

Con el objeto de tener una óptima resistencia química, todos los laminados están compuestos de una superficie interior, una capa estructural y una capa superficial externa. La combinación de las capas que componen la superficie interna y capa interior es generalmente conocida como "**Barrera Química**" y se considera que está contribuye a aumentar tanto la resistencia química como estructural del laminado.



- **Superficie Interna:** Esta superficie es la que está expuesta al ambiente corrosivo y está compuesta de resina reforzada con un velo de vidrio "C" o un velo sintético "Nexus". Esta capa tiene un espesor de 0,25 a 0,50 mm., con una relación aproximada de resina de vidrio, 90/10 por peso, para otorgar una máxima resistencia a la corrosión.

La figura 4.12 muestra la distribución de las capas que conforman los laminados compuestos de FRP.



**Figura 4.12** COMPOSICIÓN DEL LAMINADO DE FRP

- **Capa Interna:** Esta porción del laminado está compuesta de capas múltiples de refuerzo de fibra de vidrio de hebra cortada (chopped strand mat). En las construcciones standard se utilizan dos capas de fibra de vidrio de hebras cortadas de 450 gr/m<sup>2</sup> (Mat. 450) saturadas con resina, produciendo así un espesor de 2,16 a 2,38 mm, con 22 a 32% de vidrio. En ambientes de corrosión moderada es posible utilizar una sola capa de fibra de vidrio de hebra cortada (mat) mientras que en ambientes más severos puede ser necesario utilizar más de dos capas.

Barreras químicas con un espesor de 4,5 a 6,25 mm, son usualmente aplicadas a torres de blanqueo y estructuras expuestas al cloro, hipoclorito o a otros ambientes en los cuales se anticipa la existencia de un ataque de elementos químicos. En estas situaciones una porción de la barrera química se "sacrifica" y no se considera como parte estructural.

- **Capa Estructural:** Esta capa es la parte estructural principal del laminado y está diseñada para resistir las cargas causadas por presiones, vientos, sismos u otras condiciones. En este laminado se alternan capas de fibra de vidrio de hebra cortada (chopped strand) y malla tejida (woven roving) de 800 gr/m<sup>2</sup>, hasta, obtener el espesor requerido. El contenido de vidrio en estas capas es de 30 a 45% dependiendo de la cantidad de malla tejida utilizada. Esta capa también puede estar compuesta por un refuerzo de fibra de vidrio de filamento enrollada (filament winding) la cual es enrollada helicoidalmente sobre el mandril, obteniéndose contenidos de vidrio de 55 a 70% en peso.
- **Capa Superficial Externa:** Esta capa consiste en un recubrimiento de resina pura formulada con el objeto de eliminar la acción inhibidora del aire, obteniéndose un curado total en toda la superficie. Contiene además absorbedores de rayos ultravioleta o pigmentados para minimizar la degradación del laminado por la acción de la luz solar. Si la superficie del laminado ha de ser expuesta a un ambiente corrosivo, es posible agregar una capa de velo o una capa de fibra de vidrio de hebra cortada sobre la capa estructural para mayor protección.

#### 4.5.2. Laminado a pistola (spray-up):

Este método es una variante un poco más sofisticada del laminado manual (Hand Lay-Up) que se describe más adelante. En este caso, una pistola a presión provista de un cortador, corta las fibras (Rovin para enrollamiento) en fragmentos cortos y los dispara entre la resina pulverizada. La resina y el vidrio cubren así el molde y son entonces laminados manualmente con un rodillo metálico para eliminar el exceso de resina y asegurar que toda la fibra esté saturada de resina, esto se describe con más detalle en la parte de laminado manual. Este vidrio cortado es utilizado en reemplazo de las hebras de fibra cortada (chopped strandmat) en muchos de los productos manufacturados mediante moldeo manual.

La figura 4.13 muestra el proceso de laminado a pistola, ahí se puede ver la pistola que proporciona la mezcla de fibra, resina y catalizador sobre el molde.

#### Laminación por Aspersión

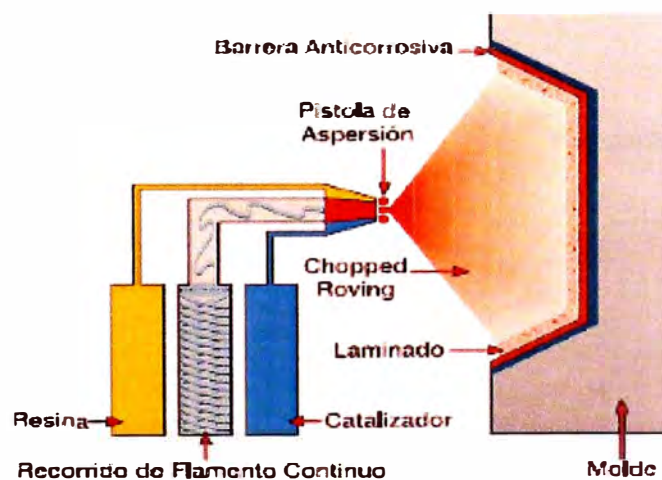


Figura 4.13 LAMINADO A PISTOLA (SPRAY-UP)

### 4.5.3. Laminado manual (hand lay – up):

Este método de construcción de laminados consiste en la aplicación de múltiples capas de fibra de vidrio (mat), malla tejida (woven roving) y telas de vidrio no tejidas, las cuales se saturan con resina se superponen hasta obtener el espesor deseado. Cada capa de vidrio es colocada sobre el molde y a continuación se impregna con resina. La saturación del vidrio con la resina se obtiene mediante un rodillo que es presionado manualmente sobre la capa de vidrio, eliminando así el aire atrapado entre las fibras, dando como resultado final un laminado denso y resistente. Las propiedades físicas dependerán de la cantidad de malla tejida, tejido unidireccional y/u otro refuerzo utilizado.

En la figura 4.14 se muestra el proceso de laminado manual, donde se colocan la resina junto con las capas de fibra sobre el molde para finalmente uniformizarlos mediante el uso del rodillo metálico.

#### Laminación por Rodillo

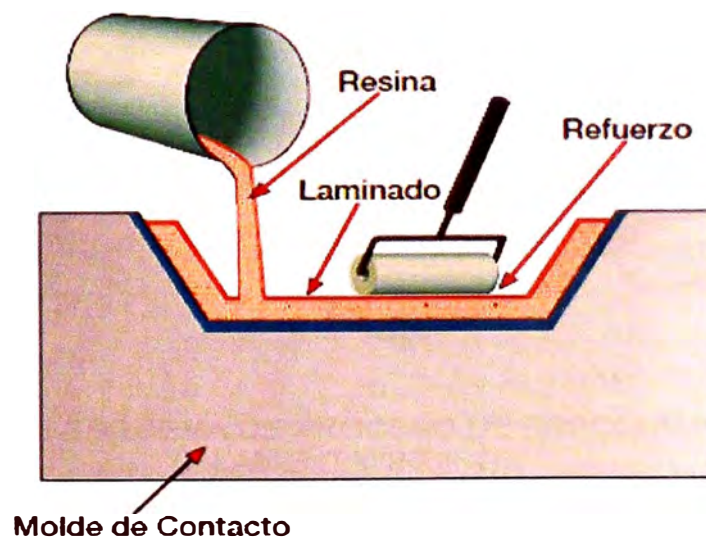


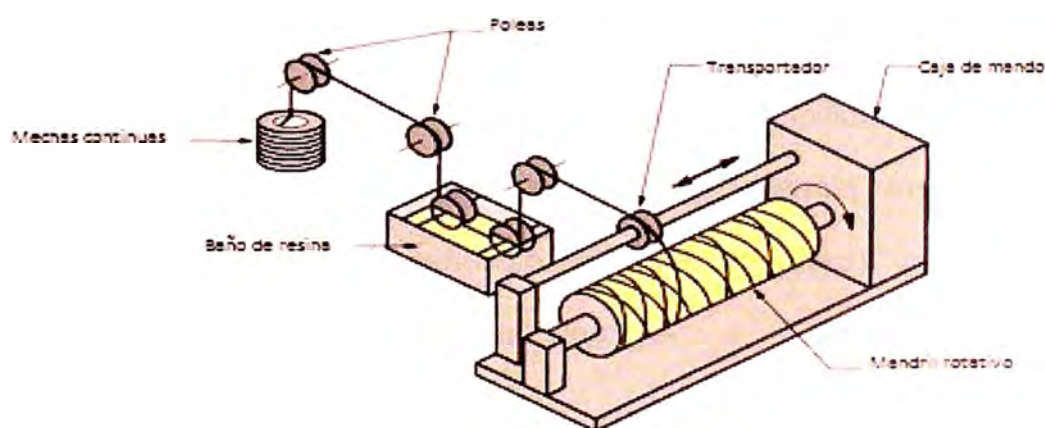
Figura 4.14 LAMINADO MANUAL (HAND LAY -UP)

#### 4.5.4. Laminado por enrollamiento (filament winding)

Proceso para moldear, en general, cuerpos huecos cilíndricos. El refuerzo aplicado es roving continuo, el cual es alimentado a través de una batea de impregnación de resina, y enrollado sobre el molde según muestra la imagen 4.15 y 4.16 siguiente. Cuando se han aplicado las suficientes capas, se produce el curado a temperatura ambiente o en estufa. Luego se desmolda.

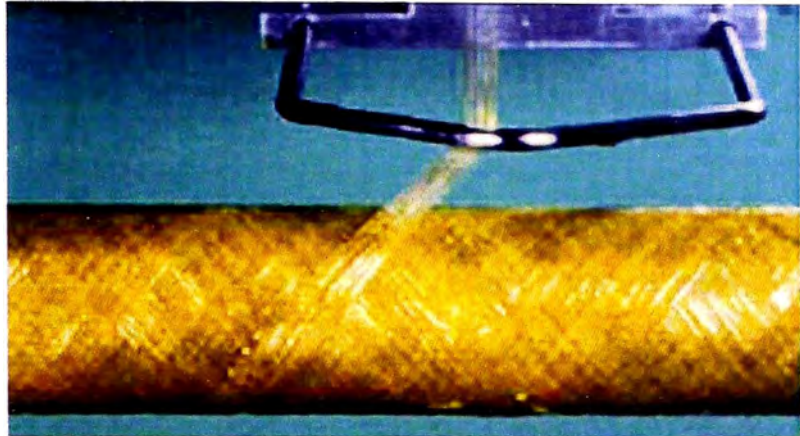
La figura 4.15 se muestra el proceso de laminado por enrollamiento donde se puede observar todos los elementos que participan en el proceso desde el rollo de hilo de fibra de vidrio donde inicia el proceso, pasando por la tina donde se impregna de resina hasta su enrollamiento, en la matriz cilíndrica, en forma helicoidal.

## Enrollado de filamentos



**Figura 4.15** ESQUEMA DE PROCESO DE ENROLLAMIENTO (FILAMENT WINDING)

En la figura 4.16 se muestra como la banda de hilos de fibra de vidrio se va enrollando formando en el cuerpo cilindro de FRP.



**Figura 4.16** LAMINADO DE CUERPO CILÍNDRICO POR ENROLLAMIENTO (FILAMENT WINDING)

Los moldes o mandriles son estructuras metálicas, y forman la superficie interior de la pieza. Los de menores diámetros son cilindros huecos de acero o aluminio y para facilitar el desmolde se fabrican con un ángulo de salida (5°). Para los mayores se utilizan estructuras metálicas colapsables. La superficie plana cilíndrica puede ser también metálica o de PRFV.

Las mayores virtudes de este proceso son: la posibilidad de orientar el refuerzo continuo permite impartir elevada resistencia en la dirección requerida, con alto tenor de refuerzo (55-70% en peso), y es factible la producción continua en equipos especiales.

## 4.6 CONTROL DE CALIDAD DEL FRP

En este capítulo veremos varios aspectos importantes sobre la calidad del producto, de ello depende el tiempo de vida de la junta y por ende minimizar costos.

Las juntas de resina epoxi viniléster reforzada con fibra de vidrio se deben de inspeccionar para evitar fallos posteriores en las juntas, los métodos usados para inspeccionar las juntas de FRP son los ensayos no destructivos (también llamado END, o en sus siglas en inglés NDT de *non destructive test*).

Los ensayos no destructivos “son aquellas que determinan la utilidad, la capacidad de servicio o calidad de una parte o material, sin limitar su utilidad”.

Se puede definir también como “...a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales”.

Los ensayos no destructivos que se pueden aplicar a los plásticos reforzados con fibra de vidrio son:

Inspección visual

Medición de dureza

Prueba hidrostática

Ultrasonido

Rayos X



#### 4.6.1. Inspección visual de los laminados de FRP

La visión es uno de los elementos claves para el éxito de una buena fabricación de los equipos de FRP, esta nos dirá en base a ejemplos reales o imágenes si el laminado que se está realizando o finalizando cumple con los estándares de calidad. Es recomendable en la inspección de tener una apropiada iluminación ya sea natural o artificial para poder examinar el laminado adecuadamente. En la inspección de los laminados de FRP lo más importante es la visual junta con la prueba de dureza.

Antes, durante y terminada la fabricación del laminado de FRP la persona que está realizando el laminado debe aplicar la inspección visual para lograr arreglar antes los defectos posibles.

La interpretación del inspector nos dirá si el laminado evaluado es aceptado o rechazado, estos criterios de aceptabilidad o rechazo son dados por una especificación u orden técnica en los que se fijan los límites, tamaños, números y orientación si los fallos o discontinuidades son inadmisibles o aceptados.

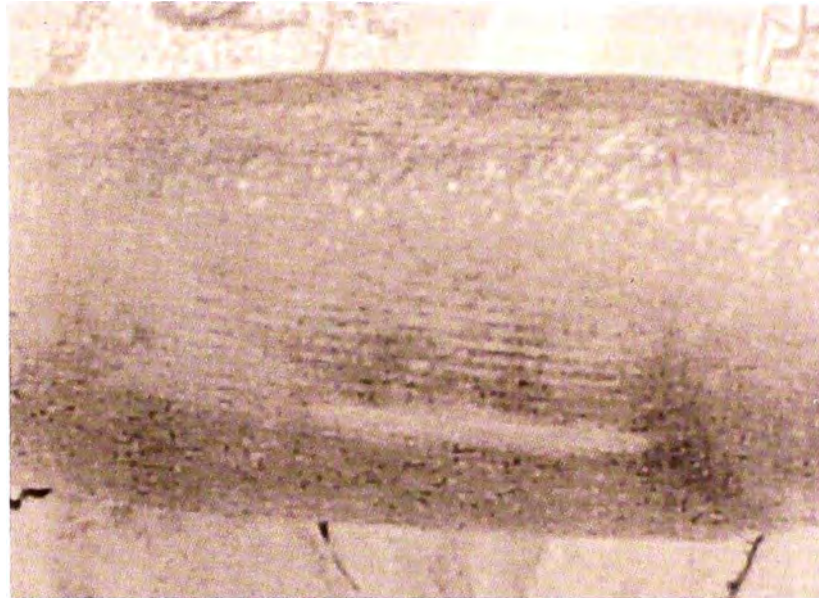
##### 4.6.1.1. Fallas detectables con la inspección visual

Aquí veremos unos ejemplos de fallas o defectos comunes que pueden encontrarse al momento de realizar, terminar o reparar un laminado de FRP.

- a) *Burbujas de aire o vacíos*: estos son encontrados entre las capas de laminación, ver figura 4.17, se deben a unas posible burbujas que quedan luego de ser mezclado abruptamente, una superficie sucia o

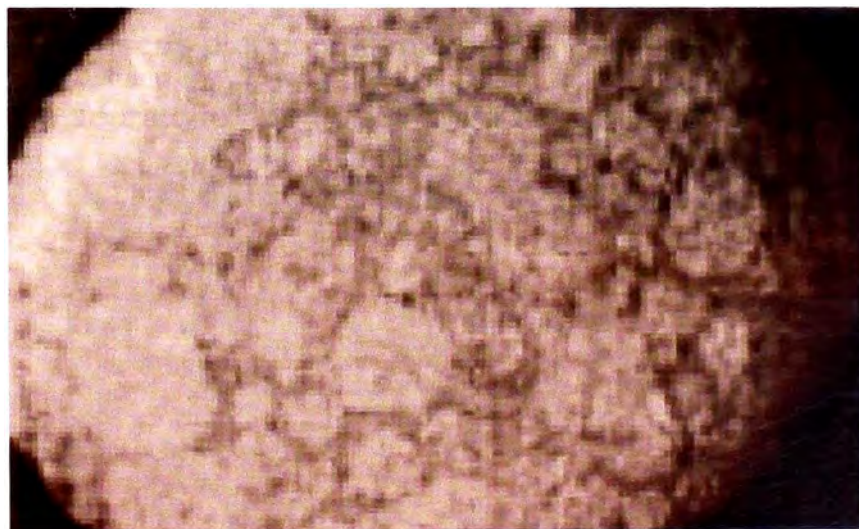


durante la laminación no se pasó el rodillo aireador para eliminar el aire encapsulado en la laminación.



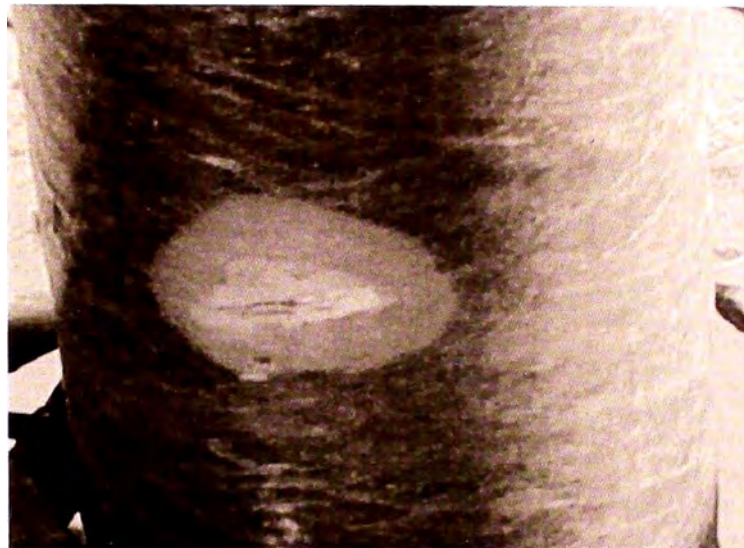
**Figura 4.17** BURBUJAS DE AIRE O VACÍOS

- b) *Ampollas*: son redondeadas y a veces puntiagudas, con una pequeña elevación en la superficie de la laminación, ver figura 4.18, puede ser ocasionado por un rápido tiempo de curado, humedad en la resina o en la fibra.



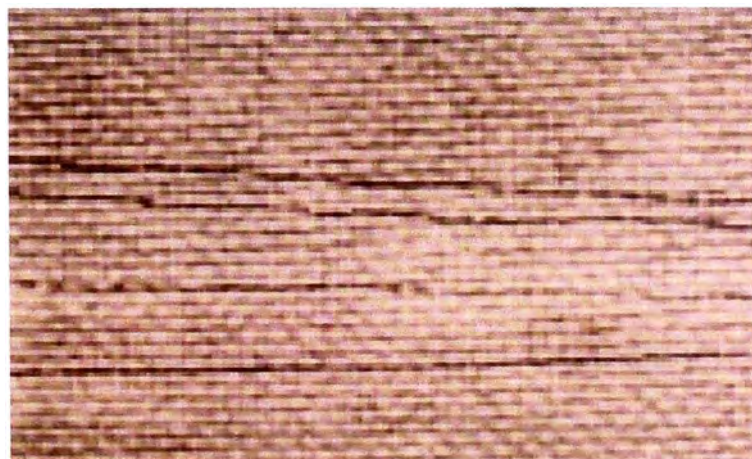
**Figura 4.18** AMPOLLAS EN EL LAMINADO DE FRP

- c) *Rajadura* por impacto: es una grieta que se mira en el laminado causado por un impacto en producción, montaje o mala operación del equipo, ver figura 4.19, esto puede variar de tamaño según la intensidad del impacto.



**Figura 4.19** RAJADURA POR IMPACTO

- d) *Resquebrajadura*: son pequeñas rajaduras que se mira en el laminado que puede ser debido a pequeños impactos, fatiga por cambios de temperatura bruscos o encogimiento de la resina, la figura 4.20 muestra la resquebrajadura que aparece en medio del laminado.



**Figura 4.20** RESQUEBRAJADURA

- e) *Separación de capas*: a esta falla se le conoce también como “delaminación”, una de las causas posibles es por la poca impregnación de resina entre las láminas o capas del refuerzo, superficie sucia o no se logró remover una buena cantidad de aire atrapado entre las capas de laminación. La figura 4.21 muestra la fibra de vidrio libre producto de la separación de capas.



**Figura 4.21** SEPARACIÓN DE CAPAS

- f) *Ojo de pescado*: es una pequeña concentración en forma globular que no ha sido bien mezclado con el material, se puede identificar en la superficie del laminado donde es transparente. Se debe probablemente por una superficie sucia de la laminación o un objeto extraño.
- g) *Puntos o áreas secas*: son lugares que se muestra sin impregnarse con resina, se puede observar con facilidad por la falta de resina en el tejido de fibra de vidrio.
- h) *Elevaciones*: son protuberancias que se ven comúnmente en forma cónica, se produce comúnmente por exceso de resina.

- i) *Orificios pequeños*: son pequeños hoyos que se forman en la capa externa del laminado, esto se debe a pequeñas burbujas que emergen debido a la mezcla de la resina o por la misma reacción exotérmica.
- j) *Acumulación de resina*: se produce por un exceso de resina en un área localizada, esto se debe por la falta del rodillo aireador o mal uso.
- k) *Rayones*: marcas o rayas que se generan debido al mal manejo del material que pueden ser desde simples superficiales hasta surcos en la tubería.
- l) *Arrugas*: se presenta cuando una o más láminas de fibra de refuerzo están mal colocadas al momento de laminar.

#### **4.6.2. Pruebas al FRP**

Luego de ser inspeccionado visualmente, para asegurar que la junta cumpla con las condiciones esperadas, se le somete a pruebas de ensayos no destructivos, si es necesario, para cerciorarse de su buena manufactura y secado.

##### **4.6.2.1. Medición de la dureza**

La dureza es “la resistencia de un material a ser rayado o perforado (identación) por un agente penetrante”, también se le puede definir como “la resistencia a la penetración local, al rayado, al maquinado, al desgaste o abrasión y a la fluencia del material”. Para conocer si la resina está endureciendo se puede revisar por medio de una prueba de dureza. La



propiedad de dureza nos indica si la resina se ha completado de curar o polimerizar.

Entre los métodos más comunes para medir la dureza se pueden mencionar:

- a) Dureza Brinell: este método se ejecuta forzando una esfera endurecida para penetrar en la superficie del material a una fuerza ya definida, luego se mide el diámetro de la huella que dejó después de la prueba.
- b) Dureza Rockwell: este se determina con la profundidad de penetración que deja al ejercer una fuerza por medio de un indentador que puede ser una esfera de acero con un diámetro en particular o un diamante cónico de punta esférica que se le llama "Brale".
- c) Dureza Vickers: esta es semejante a la dureza Brinell ya que se expresa el resultado en términos de la presión originada bajo el indentador. El indentador tiene forma de diamante que está colocado tal que forma una pirámide de base cuadrada.
- d) Dureza barcol: se determina por medio de un aparato portátil que ejerciendo fuerza en él desciende un indentador de acero (tipo punta) al material y por medio de un marcador enseñará la resistencia a ser penetrado esto en escala barcol.

La dureza Brinell, dureza Vickers, dureza Rockwell y dureza barcol especial para los materiales no metálicos, estos se van a diferenciar uno

del otro por la forma o diseño de la herramienta que se usa o el penetrador, en qué condiciones se aplica la carga y su específica forma de determinar la dureza.

#### **4.6.2.1.1. DUREZA BARCOL**

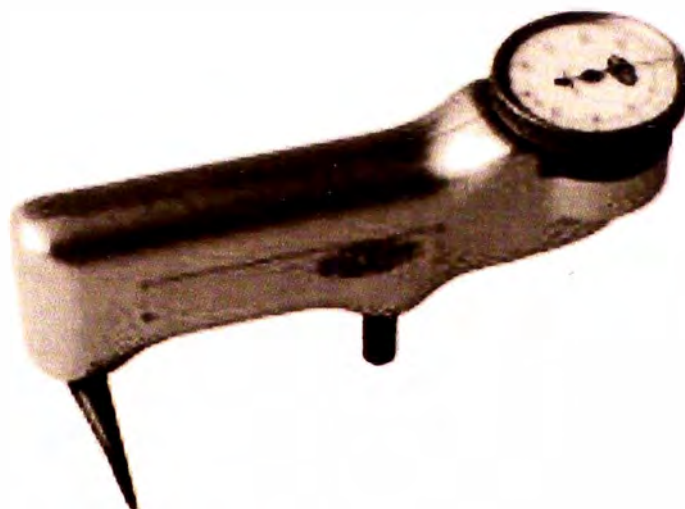
Esta se realiza por medio de un aparato o equipo llamado barcol, este aparato está diseñado para tomar lecturas de dureza para materiales como no tan duros, como por ejemplo, aluminio, metales suaves, plásticos, fibra de vidrio, hule y cuero.

#### **4.6.2.1.2. DESCRIPCIÓN DEL MEDIDOR BARCOL**

Este aparato tiene la cualidad de ser pequeño, portátil y de uso fácil, no se necesita de experiencia para su uso, es de fácil aplicación y rápida lectura, no pesa mucho por lo que lo hace un aparato apto para inspeccionar los laminados en taller y en el lugar de trabajo de campo, que puede ser en grandes alturas o en lugares confinados.

Los valores del medidor barcol están dados con un rango de 0 a 100, siendo 100 el más duro, este nos dirá el grado de curado de la resina.

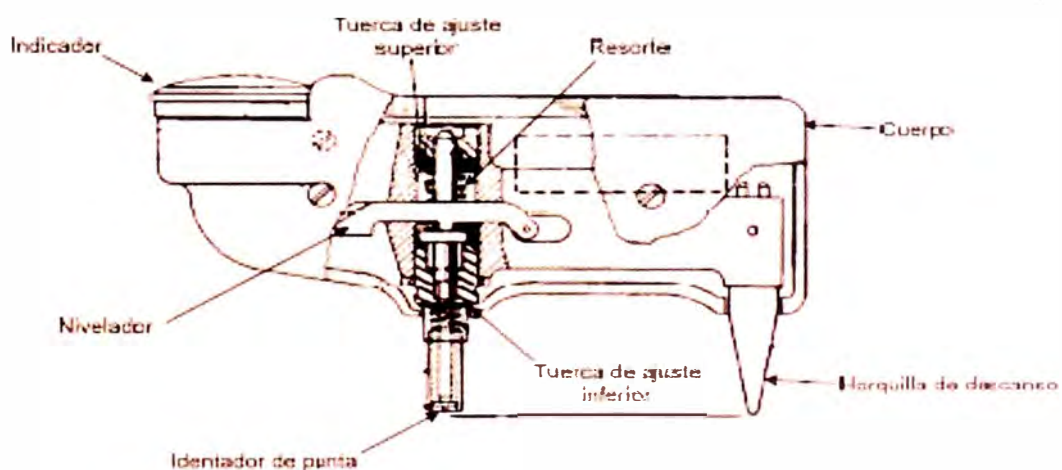
En la figura 4.22 se muestra el medidor Barcol, el cual es de tamaño compacto y de fácil uso.



**Figura. 4.22** MEDIDOR DE DUREZA BARCOL

El indentador o medidor barcol tiene una forma que se adapta a las manos, sus partes principales consta del indicador, el indentador de punta, la horquilla de descanso y el cuerpo.

La figura 4.23, muestra las partes internas del medidor de Barcol.



**Figura. 4.23** ESQUEMA DEL MEDIDOR DE DUREZA BARCOL

#### 4.6.2.1.3. USO DEL MEDIDOR BARCOL

El modo de usar este instrumento mecánico es sumamente sencillo, se utiliza colocando el instrumento en el material que se va a probar su dureza, se debe de colocar el instrumento en la misma superficie plana para asegurar una lectura eficaz sin error por mal manejo. Asegurarse de no tomar las lecturas a especímenes de no menos de 1/16 de pulgada de espesor.

Para revisar un laminado específicamente se debe de usar la norma que aplica, esta es la norma ASTM D2583, este es el método usado para determinar la dureza barcol a las plásticos reforzados o no reforzados con fibra de vidrio, nos indica que colocando el material debajo del aparato se le presiona uniforme-mente al espécimen hasta que el marcador nos de la lectura más alta, la profundidad de la penetración nos dará el valor barcol

Se recomienda cuando se presione el aparato se haga uso de la horquilla de descanso como pivote para mejor toma de lectura, en materiales muy blandos puede darnos una lectura alta y luego descender por la naturaleza de los materiales blandos.

La resina epoxi vinil-éster con marca Derakane recomienda realizar de 10 a 12 lecturas con el barcol, luego se rechaza la lectura más baja y más alta, para después sacar un promedio para obtener el valor de dureza del laminado dado en medida barcol.



#### **4.6.2.2. Prueba de acetona**

Esta prueba sirve para revisar si el laminado con resina está completamente curada, se debe realizar cogiendo una bola de algodón saturada de acetona, esta es colocada en la superficie del laminado por 30 segundos, ya pasado el tiempo remover el algodón con acetona y luego revisar el lugar que se colocó.

Si la superficie de la laminación se encuentra pegajosa después de haber sido removido el algodón se debe considerar que la laminación no está todavía curada. Esta prueba es significativa solo cuando es hecha en la capa o lámina contra la corrosión, esta no es aplicable en la capa externa ya que no está protegida por la inhibición del aire.

#### **4.6.2.3. Prueba hidrostática**

Esta prueba es una de las más usadas a nivel industrial y sirve para verificar que las tuberías, tanques o equipos que van a estar sometidos a presión sean evaluados por cualquier defecto previo a su funcionamiento para evitar cualquier fuga.

Este ensayo se realiza para las tuberías y tanques de plástico reforzado con fibra de vidrio luego de haber pasado por la inspección visual y la prueba de dureza del laminado, estas se basan regularmente según normas internacionales ASME sea B31.1 código para tuberías de industrias de poder (generadoras, plantas geotérmicas, plantas industriales y sistemas de calentamiento o enfriamiento) y el B31.3 para tuberías de

procesos (refinerías de petróleo, químicos, textil, planta de papel, plantas criogénicas o cualquier planta de procesos).

Antes de realizar la prueba hidrostática se debe dejar el tanque sellada herméticamente, si hay bridas involucradas colocarles bridas ciegas con sus respectivos empaques de prueba, si hay accesorios tales como válvulas, flujómetro, coladeras o cualquier otro tipo de accesorio se recomienda removerlos y sustituirlos por tapas ciegas temporales.

Luego el tanque es llenado con el fluido que por lo regular se usa agua, hasta su capacidad de diseño. Toda el agua derramada o salpicada en tanque y el área circundante debería ser secada. El tanque entonces deberá quedarse con el agua para un mínimo de 2 horas y revisado por aparición de fugas.

## **CAPITULO V**

### **DISEÑO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE FRP**

#### **5.1 CRITERIOS DE DISEÑO PARA EL CÁLCULO ESTRUCTURAL CON FRP**

Los laminados de FRP son dimensionados usando los conceptos y expresiones de la teoría de elasticidad para materiales anisotrópicos. Esta teoría presupone la existencia de proporcionalidad entre las tensiones y las deformaciones, lo que es perfectamente aceptable para el FRP en condiciones normales de uso. Eventuales desproporcionalidades entre tensiones y deformaciones ocurren solamente en altas condiciones, después del surgimiento de las primeras micro fisuras en el laminado y fuera, por lo tanto, de su rango de trabajo.

La teoría de la elasticidad proporciona el método para hacer el dimensionamiento estructural. En cuanto a los criterios para el dimensionamiento, estos son libres, siendo escogidos de acuerdo con resultados obtenidos en ensayos de laboratorio, o conforme la preferencia y experiencia previa del calculista. Los criterios de cálculo establecen si el laminado debe trabajar próximo a su límite de resistencia, con pequeño coeficiente de seguridad, o poco exigido, con un gran coeficiente de seguridad. A través de los criterios de cálculo, el ingeniero establece el valor de la tensión

o elongación admisibles. En esta parte del informe se trata de los criterios para cálculo estructural de laminados en contacto con ambientes agresivos.

Los laminados de FRP son calculados estructuralmente por tres criterios.

### 5.1.1. Criterio de estabilidad

Este criterio lleva en consideración el hecho plenamente conocido de que las estructuras de FRP en general son muy flexibles y, por eso, sujetas a colapsos (pandeo) cuando son sometidas a esfuerzos de compresión. La falla por pandeo (flambagem) puede ocurrir con la estructura sometida a tensiones muy inferiores a la resistencia del material. Los equipamientos de FRP sometidos a esfuerzos de compresión deben ser cuidadosamente analizados usando la metodología apropiada.

EL criterio de estabilidad establece que la carga de compresión que colapsa a la estructura, conocida como carga crítica, debe ser por lo menos igual a 4 veces la actuante. Para esclarecer, vamos a suponer un recipiente cilíndrico de FRP dimensionado para trabajar con presión interna de 5 kg/cm<sup>2</sup>, pudiendo eventualmente ser sometido a presión negativa (vacío) de 0,5 kg/cm<sup>2</sup>. El cálculo de este recipiente para presión interna, positiva, de 5 atm no implica que éste será adecuado para la presión externa, negativa, de 0,5 kg/cm<sup>2</sup>. En este caso, es necesario también calcular el recipiente para resistir la presión externa crítica. EL factor de seguridad para el pandeo (flambagem) es definido como:

$$FS = \frac{\textit{Presión Crítica}}{\textit{Presión Actuante}} \dots\dots\dots ec. (5.1)$$

Como el criterio de cálculo para estabilidad determina que el factor de seguridad debe ser mayor o igual a 4, la presión crítica debe ser por lo menos igual a 4 veces a presión externa actuante

$$P_{cri} = 4 \cdot 0.5 = 2 \frac{kg}{cm^2} \dots \dots \dots ec. (5.2)$$

Por lo tanto este recipiente debe ser dimensionado para resistir no solamente la presión interna de 5 kg/cm<sup>2</sup>, más también la externa, negativa de 2 kg/cm<sup>2</sup>. Las estructuras de FRP son particularmente susceptibles a inestabilidades elásticas debido a su bajo módulo de flexión de los plásticos reforzados.

### 5.1.2. Criterio de resistencia

Este criterio determina que las tensiones no deben exceder los valores admisibles para el laminado. Las tensiones admisibles son establecidas dividiendo las tensiones de ruptura por el factor de seguridad.

$$Tension\ Admisible = \frac{Tension\ de\ ruptura}{Factor\ de\ seguridad} \dots \dots \dots ec. (5.3)$$

Las tensiones de ruptura de los laminados sometidos a tracción, flexión o compresión son obtenidas a través de ensayos realizados en probetas de prueba estandarizadas. Conocidas las tensiones de ruptura, las admisibles son establecidas por el factor de seguridad escogido. La norma inglesa BS 4994 establece que el coeficiente de seguridad para los laminados que

trabajan en contacto con ambientes agresivos debe ser calculado por la expresión.

$$FS = 3 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \dots \dots \dots ec. (5.4)$$

Donde el coeficiente 3 y el factor de seguridad residual y los factores K1 a K5 son relacionados al proceso de laminación y las condiciones de uso de la estructura, como mostramos en seguida.

- El factor K1 depende del proceso de laminación, siendo los valores siguientes sugeridos por la BS 4994 (British Standard), valores obtenidos del libro FIBERGLASS X CORRASAO del autor brasileño A. CARVALHO:

Laminación manual. ....	1,5
Enrollamiento (filament winding). ....	1,5
Laminación a pistola.....	3,0

- El factor K2 lleva en consideración a la pérdida de resistencia del laminado como resultado del ataque físico (solventes) o químico del medio agresivo. Los valores siguientes son sugeridos,

Valores obtenidos del libro FIBERGLASS X CORRASAO del autor brasileño A. CARVALHO:

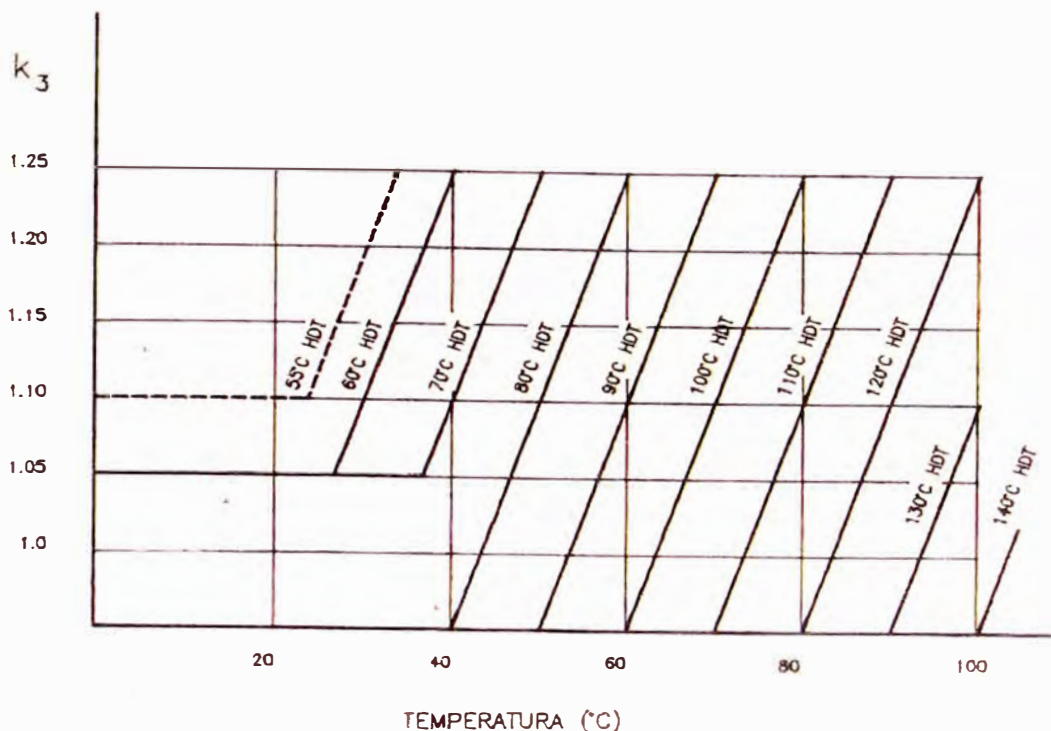
Laminado interno termoplástico.....	1,2
Laminado interno termoestable (poliéster).....	1,2 - 2,0

### Nota 1

La Norma BS 4994 dice que (British Standard), para los equipamientos contruidos con laminado interno de poliéster, el coeficiente K2 debe variar entre 1,2 y 2,0. La interpolación entre estos valores es hecha suponiendo  $K2 = 2,0$  para las peores condiciones de uso del equipamiento, aquellas donde el ambiente causa reducción del 50% en la resistencia del laminado a la flexión, conforme a la norma ASTM C-581. De la misma manera, las condiciones del ambiente que ocasionan pérdida de 17% en la resistencia a la flexión corresponden a  $K2 = 1.2$ .

- El factor K3 tiene en consideración la influencia de la temperatura en las propiedades mecánicas del laminado. La reducción de estas propiedades mecánicas con la elevación de la temperatura depende del contenido y de la distribución de las fibras de vidrio, como también de la resina usada en la laminación. Este hecho es llevado en cuenta por la norma inglesa conforme a figura 5.1, donde HDT es el punto de termodistorción de la resina y T es la temperatura de trabajo.

En la figura 5.1 se muestra la gráfica donde se puede obtener el valor de K3 conociendo del valor de la temperatura de trabajo (T) y el punto de termodistorcion de la resina (HDT).



**Figura 5.1** FACTOR K3 EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE USO (T) DEL EQUIPAMIENTO Y DEL PUNTO DE TERMODISTORCIÓN (HDT) DE LA RESINA.

El diagrama de la figura 5.1 puede ser expresado en forma analítica por las expresiones:

$$K_3 = \frac{T}{80} - \frac{HDT}{80} + 1.5 \dots\dots\dots ec. (5.5)$$

$$K_3 \geq 1.0 \dots\dots\dots ec. (5.6)$$

$$T \leq HDT - 20 \dots\dots\dots ec. (5.7)$$

Donde es claro que el factor K3 no puede ser inferior a 1.0 ni superior a 1.25 y la máxima temperatura de uso es limitada a 20°C debajo del punto de termodistorción de la resina. La norma BS 4994 no hace



referencia a la influencia del contenido y de la distribución de las fibras en la retención de las propiedades mecánicas de los laminados en altas temperaturas.

- El factor K4 considera el efecto de cargas cíclicas en el laminado, siendo los valores siguientes sugeridos para el cálculo. (Valores obtenidos del libro FIBERGLASS X CORROSAO de A. Carvalo)

Hasta 1.000 ciclos.....	1.1
1.000 a 10.000 ciclos.....	1.4
10.000 a 100.000 ciclos.....	1.7
100.000 a 1.000.000 ciclos.....	2.0

La resistencia de los laminados a la fatiga depende del contenido y de la distribución de las fibras, así como de la resina usada.

- El factor K5 considera la influencia de la temperatura de trabajo y del grado de cura de la resina. (Valores obtenidos del libro FIBERGLASS X CORROSAO de A. Carvalo)

Laminado postcurado.....	1.1
Laminado no postcurado, $T \leq 45^{\circ}\text{C}$ .....	1.3
Laminado no postcurado, $T > 45^{\circ}\text{C}$ .....	1.5

Vamos aplicar las recomendaciones inglesas a un caso práctico. De acuerdo con estas recomendaciones, un equipamiento construido con resina viniléster sintetizada con bisfenol A ( $\text{HDT} = 100^{\circ}\text{C}$ ), laminado manualmente, sin postcurado, trabajando a temperatura de  $80^{\circ}\text{C}$  y sometido a lo largo de su

vida a 1.000.000 de esfuerzos cíclicos, debe ser calculado con factor de seguridad igual a:

$$FS = 3 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \dots \dots \dots ec. (5.5)$$

Dónde:

K1 = 1,5 (laminado manual)

K2 = 2,0 (suponemos la peor condición por falta de información)

K3 =  $\frac{80}{80} - \frac{100}{80} + 1.5 = 1.25$  ( $T = 80^\circ C$ ,  $HDT = 100^\circ C$ ) .. (5.6)

K4 = 2,0 (1.000.000 de ciclos)

K5 = 1,5 (laminado sin postcurado; temperatura de trabajo mayor de  $45^\circ C$ )

Así, reemplazando en la ecuación 5.5 el factor de seguridad para este caso es.

$$F.S. = 3 \cdot 1.5 \cdot 2.0 \cdot 1.25 \cdot 2.0 \cdot 1.5 = 33.75$$

Realmente, un factor de seguridad grande. Si el equipamiento fuera postcurado y si consideráramos  $K_2 = 1.2$  para deterioración química, volviendo a reemplazar en la ecuación 5.5 el factor de seguridad sería:

$$F.S. = 3 \cdot 1.5 \cdot 1.2 \cdot 1.25 \cdot 2.0 \cdot 1.1 = 14.85$$

Si, además de esto, la estructura fuera sometida a, un máximo, 1.000 esfuerzos cíclicos en su vida, entonces de la ecuación 5.5 tenemos:

$$F.S. = 3 \cdot 1.5 \cdot 2.0 \cdot 1.25 \cdot 1.1 \cdot 1.1 = 8.17$$

EL criterio de resistencia comete una grave injusticia al no considerar la influencia de la flexibilidad de la resina en el factor de seguridad. La deficiencia de este criterio es aparente cuando recordamos que, si la resistencia de los laminados es controlada por las fibras, el surgimiento de las primeras microfisuras y delaminaciones es controlado por la resina. Así, al ignorar la flexibilidad de las resinas, el criterio de resistencia no discrimina entre ellas y perjudica las más flexibles, cuyos laminados pudieran ser calculados con tensiones admisibles mayores que los hechos con resinas rígidas. EL criterio de deformación, presentado en seguida, elimina esta dificultad y es mejor que el criterio de resistencia para hacer cálculo estructural de equipos de FRP.

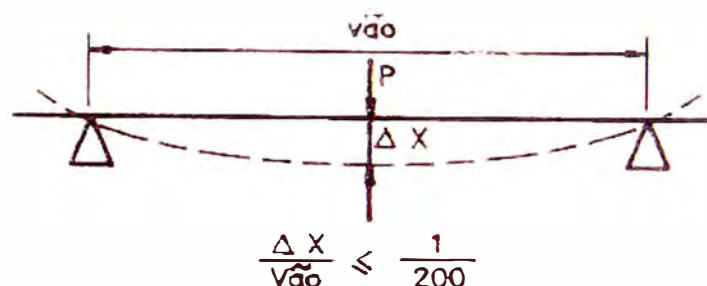
### 5.1.3. Criterio de deformación

Las estructuras de FRP son muy flexibles y se deforman con facilidad cuando son sometidas a esfuerzos de tracción, flexión o compresión. Esto acontece porque el módulo de elasticidad de los plásticos reforzados son muy bajos comparado con los metales. El acero, por ejemplo, tiene un módulo de elasticidad igual a 2.100.000 kg/cm<sup>2</sup> en cambio el FRP presenta un módulo de elasticidad entre 50.000 a 300.000 kg/cm<sup>2</sup>. Este bajo módulo de elasticidad, combinado con pequeñas espesores de pared, hace que las

estructuras de FRP sean mucho más flexibles y susceptibles a deformaciones que las de acero. Para cumplir satisfactoriamente sus funciones estructurales, los equipamientos construidos en FRP deben ser dimensionados para trabajar con deformaciones bajas de valores previamente establecidos. Estas deformaciones, que no deben ser excedidas con la estructura en uso, forman los criterios de dimensionamiento por deformaciones.

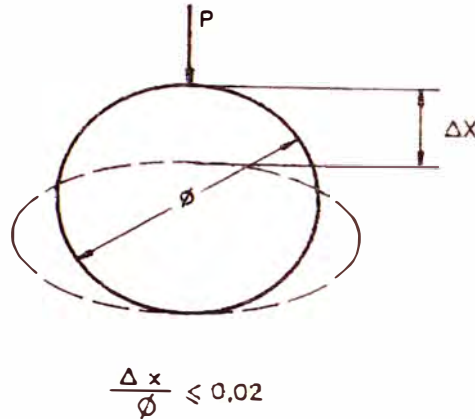
Muchas veces, las deformaciones se mantienen bajo ciertos límites para que la estructura en uso no cause mala impresión. Así, los equipamientos sometidos a cargas laterales son dimensionados para que no presenten flechas (deformaciones) superior a 1/200 de su menor dimensión. De la misma forma, las estructuras cilíndricas circulares deben trabajar de modo que no ovalicen más que 2% de su diámetro, cuando comprimidas lateralmente por fuerzas perpendiculares a su generatriz.

En la figura 5.2 se muestra la deflexión máxima en una estructura cargada lateralmente donde la deflexión máxima no debe exceder 1/200 de la longitud menor.



**Figura 5.2** DEFLEXIÓN MÁXIMA PARA CARGAS APLICADAS DIRECTAMENTE SOBRE LA ESTRUCTURA

La figura 5.3 presenta la ovalización máxima obtenida en cuerpos cilíndricos, el cual no debe exceder el 2% del diámetro



**Figura 5.3** OVALIZACIÓN MÁXIMA DE CUERPOS CILÍNDRICOS.

A pesar de, en algunos casos, las deformaciones serán limitadas por fundamentos estéticos, el criterio fundamental en cualquier situación es la elongación máxima admisible. El problema se resume, por lo tanto, en establecer esta elongación admisible. Ya sabemos que los laminados sometidos a esfuerzos externos se deforman y que a mayores esfuerzos, mayores son las deformaciones. Aumentando los esfuerzos y las deformaciones, el laminado comienza a emitir signos (emisiones acústicas) indicativos de microfisuramiento y delaminaciones. Ensayos de corto plazo nos dicen cuando estas microfisuras se inician en el laminado y así podemos conocer, en función de tipo de resina, contenido y distribución de las fibras de vidrio, las elongaciones indicativas del inicio de la deterioración. Estas elongaciones son indicativos de condiciones límite. Ellas nos dicen cuando los problemas comienzan a aparecer, mas no informan cual es la elongación admisible para a estructura en uso.

Como vimos en el capítulo 4, las elongaciones en que se manifiestan las primeras microfisuras dependen del tipo de resina, de la adherencia de las fibras y también del contenido y distribución de las fibras en el laminado.

La tabla 5.1 muestra las elongaciones de las resinas en la rotura, junto con los de las primeras microfisuras en laminados contruidos con 30% de fibras picadas. Muestra también los valores sugeridos para las elongaciones admisibles según las normas ASTM D-3299 y BS 4994.

**Tabla 5.1** COMPARACIÓN DE VARIAS SUGERENCIAS PARA ELONGACIONES ADMISIBLES.

ELONGACIÓN DE LA RESINA %	ELONGACIÓN DEL LAMINADO EN LAS PRIMERAS MICROFISURAS %	ELONGACIONES ADMISIBLES SUGERIDAS %	ELONGACIONES ADMISIBLE BS 4994 %	ELONGACIONES ADMISIBLE ASTM D-3299 %
1,40	0,30	0,08	0,14	0,10
2,00	0,50	0,13	0,20	0,10
3,00	0,80	0,20	0,20	0,10
3,80	1,00	0,25	0,20	0,10

## 5.2 SELECCIÓN DE LA RESINA Y BARRERA QUÍMICA

La selección de la resina y de la barrera química adecuada para la fabricación del tanque de FRP es importante, ya que en esta etapa se verifica si es posible usar el FRP como material adecuado para el proceso donde operara el tanque a diseñar.

La selección del sistema de resinas depende del proceso químico y el ambiente donde quedará expuesto el equipo, de las especificaciones y preferencias del usuario final, o de las recomendaciones del fabricante.

Es habitual que el usuario indique el sistema de resinas y el diseño del laminado para una aplicación en particular. Esto puede basarse en experiencias anteriores, o en recomendaciones del fabricante de resinas, del proveedor de productos químicos o del fabricante del equipo. El fabricante siempre debe verificar el origen de la selección y la aceptabilidad de sistemas alternos.

Cuando el cliente depende de la recomendación del fabricante, es importante recabar todos los detalles de la aplicación y el proceso.

La siguiente información quedar claramente definida:

- El nombre común y, cuando sea posible, el nombre químico. Por ejemplo, ácido muriático es el nombre común del ácido clorhídrico. Este tipo de información suele encontrarse en la Hoja de Seguridad del agente.
- La concentración de cada uno de los componentes químicos.
- El peso específico de cada solución o mezcla química.
- El pH, si es un sistema acuoso.
- El rango normal de temperatura de operación. Debe conocerse todo aumento previsible de temperatura a causa de las alteraciones en el proceso, o de otras condiciones anormales.
- La temperatura máxima de uso (que no es lo mismo que la temperatura máxima de diseño).

- Los valores de presión o vacío. En el caso de los tanques, es importante saber si el llenado será por presión, como en el caso de los camiones cisterna.
- Cuando corresponda, debe indicarse el uso en procesos alimenticios y farmacéuticos.
- El tiempo de exposición al agente, si esta no es continua. En ciertos casos inusuales, el período de exposición previsto es breve. Por ejemplo, el laminado solo soporta salpicaduras ocasionales.
- La descripción del proceso, cuando en el tanque se lleva a cabo una reacción, como la neutralización.
- Si es necesario contar con protección ignífuga, y la clasificación de dispersión de llama y los requisitos para el humo.

Normalmente, a partir de la información de la sección anterior es posible seleccionar una resina adecuada. La temperatura indicada en la guía es el valor máximo al que la resina ha exhibido un comportamiento adecuado en el laboratorio, en otro proceso similar o en el campo. Actualmente, existen ensayos de cupones en curso, y a solicitud del cliente es posible ensayar los ambientes que no han sido probados anteriormente. La durabilidad no debe interpretarse como la conservación plena de todas las propiedades visuales y físicas, sino más bien como una expectativa de rendimiento de una estructura diseñada y fabricada correctamente. La exposición a temperaturas elevadas durante breves lapsos no afecta la integridad del producto, siempre que no se supere la temperatura de distorsión por calor de la resina curada. Sin embargo,



deben conocerse la máxima temperatura del proceso y el tiempo de exposición a tal temperatura.

La resistencia de las resinas a los ambientes químicos indicados en las guías son determinados según las normas ASTM C581 y ASME/ANSI RTP-1 “Equipos de plástico termoestable reforzado resistentes a la corrosión”.

La lista no es válida para mezclas de agentes distintos, a menos que se tenga las recomendaciones del fabricante de resinas.

Precaución: Muchas aplicaciones y procesos químicos enumerados en la guía hacen referencia a las NOTAS de la columna adyacente al producto químico.

Esas notas forman parte de las recomendaciones, y deben cumplirse estrictamente.

Las notas indican las aplicaciones que requieren velos (tipo de barrera química), sistemas de curado, construcción de revestimientos, espesores o postcurado diferentes. Cuando no se indica el uso específico, el diseñador debe consultar con el fabricante de resina.

A continuación se presenta la tabla 5.1, en la que se muestra un ejemplo de las tablas de resistencia química de las resinas, del fabricante AOC – Vipel, en esta tabla se muestran varios tipos de compuestos químicos y sus concentraciones, la selección se hace por la concentración del compuesto y la temperatura de operación máxima. En la parte superior la tabla muestra varios tipos de resina según código del fabricante (F701 – Isoftalica, F010 Vinilester, F085 – Novolac), esto varía según cada fabricante.

**Tabla 5.2** TABLA DE RESISTENCIA QUÍMICA DE RESINAS AOC – VIPEL Y LISTA DE NOTAS DE RECOMENDACIÓN DE LA TABLA DE RESISTENCIA QUÍMICA.



CONCENTRACIONES Y TEMPERATURA MÁXIMA DE EXPOSICIÓN CONTINUA, EN GRADOS FAHRENHEIT

QUÍMICO	CONC., %	NOTAS	F010	F007	F080	F083	F085	F086	F282	K190	F701	F707	F764	F774	F737	Cubierta y Ducto
			K022	F015	K023	K095	TEMPERATURA	K733								
HIDRÓXIDO DE CALCIO	ALL	<b>2</b>	180	120	160		100	180		NR	NR	NR	NR	NR	NR	80
HIPOCLORITO DE CALCIO, pH >11, CLORO ACTIVO <13%		<b>2,7,8,9,10</b>	180		160	160	100	160		NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
NITRATO DE CALCIO	ALL		200	200	210	210	210	210	210	210	180	130	160			
SULFATO DE CALCIO	ALL		200	200	210	210	210	210	210	210	160	130	180			
SULFITO DE CALCIO	ALL		200	180	200	200	200	200	200							
TIOSULFATO DE CALCIO	ALL		120	120	120	180	180	180			90	90	90			
LICOR DE CAÑA DE AZÚCAR Y AGUA DULCE	ALL	<b>12</b>	180	180	180	180	200	180	180	180	120	60	100			
ÁCIDO CAFÉICO	100		180	150	160	160	180	180	180	180	140	80				

La siguiente lista muestra las notas especiales que hay que tener en cuenta en cada caso de compuesto de la tabla de resistencia química

#### Notas


- 1 Se recomienda usar velo sintético
  - 2 Se recomienda usar doble velo sintético
  - 3 Se recomienda usar doble velo de vidrio C
  - 4 Se recomienda usar doble velo de vidrio C. El espesor de la barrera de resistencia química (velo más fibras de vidrio en trozos) debe ser ≈ 5 mm.
  - 5 Para mejorar la vida útil, se recomienda usar velo de carbono.
  - 6 Se recomienda usar vidrio resistente a los ácidos (ECR) en la capa de vidrio en trozos detrás del velo
  - 7 Para mejorar la vida útil, se recomienda usar los sistemas de curado BPO/DMA o BPO/DEA.
  - 8 Para mejorar la vida útil, se recomienda aplicar un poscurado.
  - 9 Satisfactorio hasta la temperatura máxima estable del componente.
  - 10 Comuníquese con el Jefe de Productos Resistentes a la Corrosión (página 3)
  - 11 Se recomienda usar Vipel® F701 en lugar de Vipel® F764 o F774.
  - 12 Los únicos productos aptos según las normas de la FDA y el USDA son F010, F007, F013, F015, F701, F764, F774 y F737.
  - 13 Se recomienda usar Vipel® F013 en lugar de F010
- NR No se recomienda.  
 "ALL" En la columna de concentración, se refiere a las concentraciones en agua.  
 "100" En la columna de concentración, se refiere al químico puro.

En la lista de notas se indica el tipo de velo (de vidrio tipo C o sintético) y el número de capas que se debe usar para ciertos compuestos químicos, también nos indica el espesor de la barrera química, en caso no indique nada asumir la barrera química estándar con un velo de vidrio tipo "C" y 2 capas de

fibra de vidrio picada tipo Mat 450, con lo cual la barrera química tiene 2.6 mm de espesor aproximadamente.

Para el caso del tanque que vamos a diseñar, las condiciones de operación se muestran en el capítulo 2, el fluido a contener es agua de mar a una temperatura ambiente, observamos en el cuadro siguiente que todas las resinas están cumplen por encima con la temperatura de operación, esto debido a que el agua de mar no es un compuesto muy agresivo.

En este caso la selección de la resina lo hacemos por el costo, siendo el orden del costo de las resinas, de menor a mayor, como se muestra a continuación:

- Resina Ortoftalica
  - Resina Isoftalica
  - Resina Vinilester
  - Resina Novolac
- 


Aumenta el costo

Por lo tanto para el tanque de agua de mar que se está diseñando, procederemos a seleccionar la resina y barrera química adecuada según se muestra en la tabla 5.3, obteniendo:


- resina:
  - Polyester Isoftalica (F701)
- Barrera Química:
  - 1 capa de velo de vidrio tipo "C"
  - 2 capas de fibra de vidrio tipo manta picada (mat 450)

La tabla 5.3 muestra la selección de la resina, donde ubicamos el compuesto que se va a contener en el tanque de FRP y luego seleccionamos el tipo de resina en base a la temperatura de operación máxima, en nuestro caso temperatura también cumple tanto con resinas isoftálicas y viniléster pero seleccionamos la isoftálica por costos.

**Tabla 5.3 SELECCIÓN DE LA RESINA EN LA TABLA DE RESISTENCIA QUÍMICA.**



**Vipel.**  
CORROSION  
RESISTANT RESINS



**AOC**  
World Leader in Resin Technology

CONCENTRACIONES Y TEMPERATURA MÁXIMA DE EXPOSICIÓN CONTINUA, EN GRADOS FAHRENHEIT

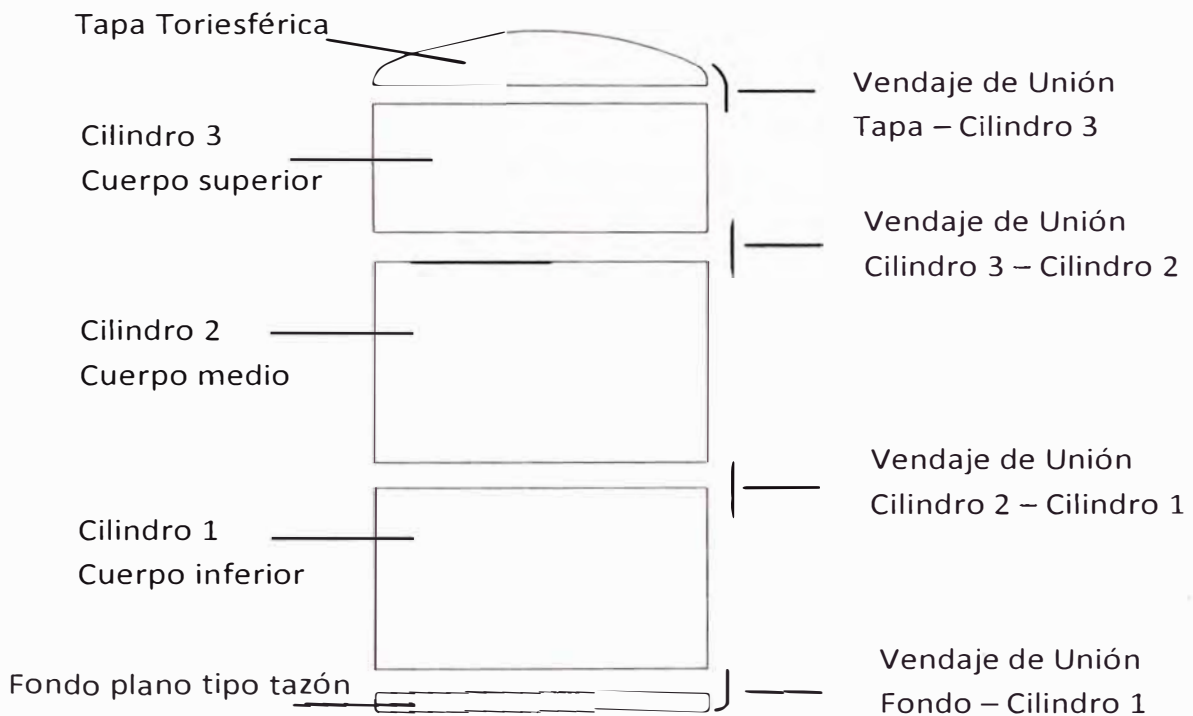
QUÍMICO	CONC. %	NOTAS	F010	F007	F083	F085	F282	K190	F701	Cubierta y Ducto	
			F013	F015	F083	F086	K095	F707	F764		F774
			TEMPERATURA								
CLORURO DE VINILO	100		NR				NR	NR	90		
VINIL TOLUENO	100		NR	80	80	80	120	NR	80	NR	NR
AGUA DESTINADA	100		180	180	180	180	180	180	180	180	180
AGUA DESMINERALIZADA	100		180	180	180	180	180	180	180	150	120
AGUA DESTILADA	100		180	180	180	180	180	180	180	150	120
AGUA DE MAR	100		180	180	180	180	180	180	180	150	120
AGUA DE LA CONDENSACIÓN DE VAPOR	100		180	180	180	180	180	180	180	150	120
WHISKY								110	NR	90	NR

Para el caso del agua de mar, la tabla no indica notas para alguna consideración especial en la barrera química por lo que se considerara una barrera química estándar de una capa de velo de vidrio tipo C y dos capas de fibra de vidrio picado (Mat 450)

### 5.3 PARTES DEL TANQUE DE FRP

En esta sección mostramos las partes del tanque que serán diseñadas y calculadas para obtener sus espesores y secuencias de laminado.

A continuación en la figura 5.4, se muestra las partes principales del tanque de FRP para agua de mar.



**Figura 5.4** PARTES PRINCIPALES DEL TANQUE DE FRP QUE SE CALCULARAN.

La norma ASME – RTP-1, en su sección 3 muestra los criterios para diseñar las partes de un tanque de FRP.

## 5.4 TIPOS DE LAMINADO

Cada parte del tanque es fabricado en forma individual y se utilizan diferentes tipos de laminado para cada caso.

La norma ASME RTP-1 muestra tres tipos de laminados a utilizar en la fabricación de tanques de FRP.

- Laminado tipo I:  
Laminado compuesto solamente de capas de mantas de fibra de vidrio (mat) y es hecho manualmente.
- Laminado tipo II:  
Laminado compuesto de mantas de fibra de vidrio (mat) y telas tejidas (tela) intercaladamente obteniendo mejores características mecánicas de laminado, y también es hecho manualmente.
- Laminado tipo X:  
Compuesto con las fibras continuas para enrollamiento, este tipo de laminado se hace en máquina, por lo que también es conocido laminado en máquina.

En la fabricación del tanque se mostraran laminados compuestos de estos tres tipos de laminado.

A continuación se presenta la tabla 5.4 donde se muestra un resumen de las abreviaturas a utilizar para designar los laminados, esto ayudara a facilitar la designación de las secuencias de laminado para el cálculo así como en la elaboración de planos de fabricación.

**Tabla 5.4** DESIGNACIÓN DE LOS LAMINADOS Y SUS COMPONENTES.

DESIGNACIÓN	ESPECIFICACIÓN
S	Velo Sintético
V	Velo de vidrio tipo C
M	Mat 450 (manta de fibra picada 450 g/m <sup>2</sup> )
m	Mat 300 (manta de fibra picada 300 g/m <sup>2</sup> )
T	Tela 880 (Tela tejida de hilos fibra 880 g/m <sup>2</sup> )
R	Hilo de vidrio para enrollamiento (filament winding)
VMM	Barrera química con velo de vidrio
SMM	Barrera química con velo sintético
MMMMM + MMMMM	Laminado tipo I
MTMTM + MTMTM	Laminado tipo II
MTMTM + m + 2R + m	Laminado tipo X

## 5.5 CALCULO DE LAS PARTES DEL TANQUE DE FRP

En esta parte del informe procederemos a calcular los espesores de las partes del tanque de FRP.

Los siguientes estándares que brindan los criterios para diseño de tanques de FRP son el ASME RTP-1, ASTM D-3299 y ASTM D-4097, los cuales nos darán las pautas para el diseño del tanque.

### 5.5.1. Calculo del cuerpo cilindro

El mínimo espesor requirió de la pared del cuerpo cilíndrico en cualquier nivel fluido será determinado usando la siguiente fórmula, pero no será menos que 1/4in.

$$t = \frac{\gamma \cdot H \cdot D}{2 \cdot Su/F} \dots \dots \dots ec. (5.6)$$

Dónde:

t = Espesor de la pared (in)

H = Altura del fluido (in)

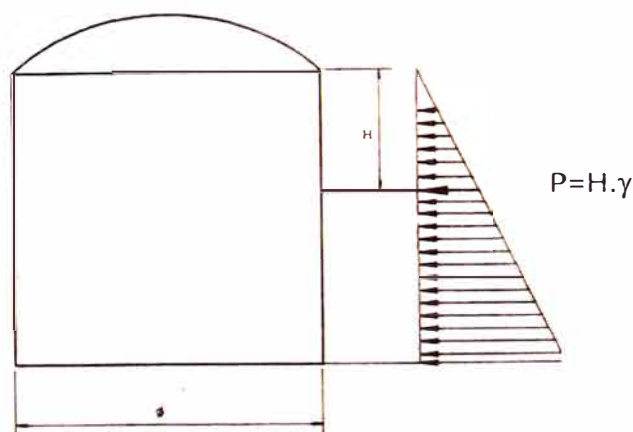
Su = Esfuerzo de rotura a la tensión (Esfuerzo último) del laminado (psi)

$\gamma$  = Peso específico del contenido (lb/in<sup>3</sup>)

D = Diámetro del tanque (in)

F = Factor de seguridad (según RTP -1: F = 10)

La figura 5.5 muestra la distribución de la presión del fluido sobre las paredes del tanque en función a la altura.

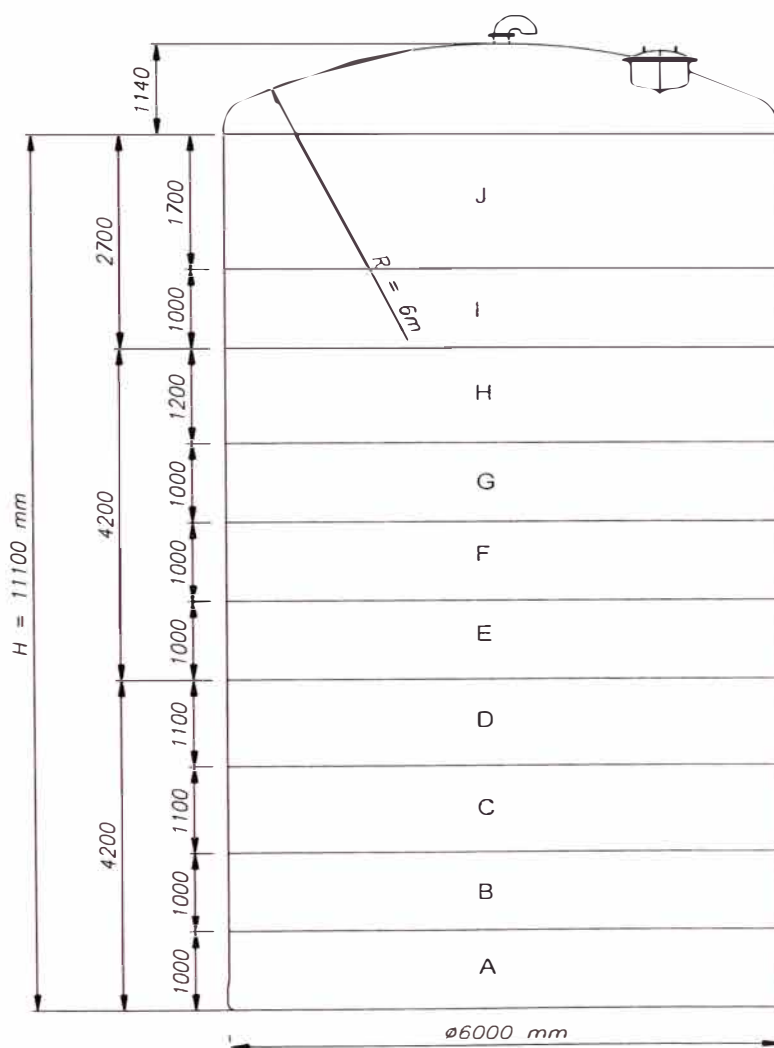


**Figura 5.5** DISTRIBUCIÓN DE LA PRESIÓN SOBRE LAS PAREDES DEL CUERPO CILÍNDRICO DEL TANQUE.



Debido a que la presión sobre las paredes del tanque varía con la altura, en la parte superior no se necesita tanta resistencia como en la parte inferior, es decir las paredes del cilindro inferior soportarán mayor presión, es por eso que para el cálculo de los espesores de la pared se divide en secciones para de esa manera cálculo de los espesor.

Para el diseño del tanque de agua de mar, procedemos a dividir el cilindro en secciones de aproximadamente un metro de alto, como se muestra en la siguiente imagen.



**Figura 5.6** DIVISIÓN DEL CILINDRO EN SECTORES PARA EL CÁLCULO DE ESPEORES.

A continuación la tabla 5.5, muestra los espesores obtenidos para el cuerpo cilindro y sus secuencias de laminado, según la división mostrada en la figura 5.6 son:

**Tabla 5.5** ESPESORES Y SECUENCIAS DE LAMINADO PARA CUERPO CILÍNDRICO.

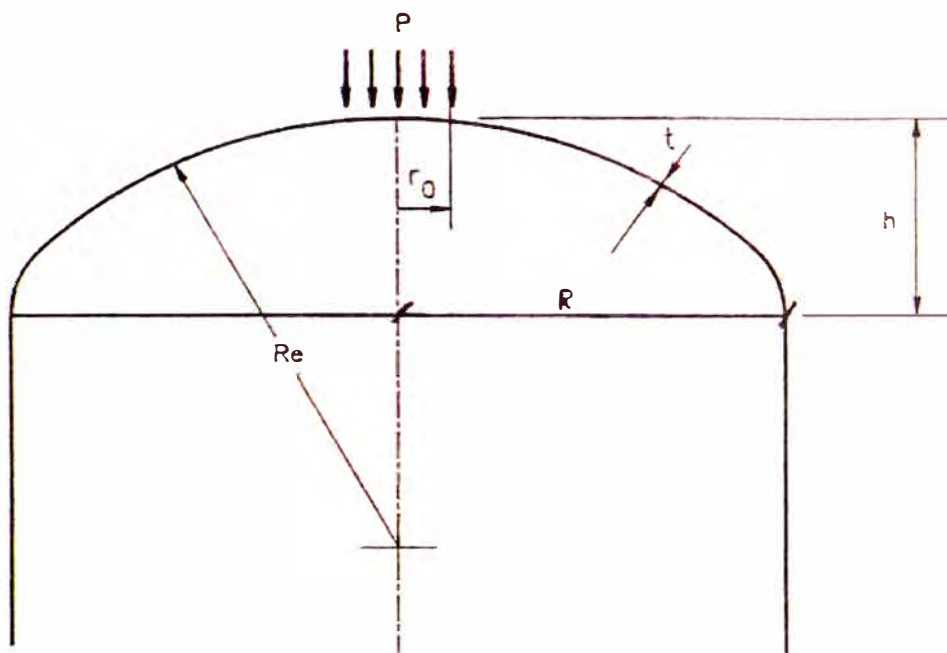
Sector		t (mm)	Laminacion
CILINDRO 3	J	9.3	BQ + 3M + 1T + m + 2R + m
	I	10.3	BQ + 3M + 2T + m + 2R + m
CILINDRO 2	H	14.3	BQ + m + 5R + m + 3R + m
	G	17.3	BQ + 2M + 1T + m + 5R + m + 3R + m
	F	19.3	BQ + 3M + 2T + m + 5R + m + 3R + m
	E	21.3	BQ + 5M + 2T + m + 5R + m + 3R + m
CILINDRO 1	D	24.8	BQ + m + 5R + m + m + 5R + m + 3R + m
	C	27.8	BQ + 2M + 1T + m + 5R + m + m + 5R + m + 3R + m
	B	29.8	BQ + 3M + 2T + m + 5R + m + m + 5R + m + 3R + m
	A	31.8	BQ + 5M + 2T + m + 5R + m + m + 5R + m + 3R + m

### 5.5.2. Cálculo de la tapa Toriesférica.

El cálculo de la tapa toriesférica se presenta en el ASME RTP-1, en el párrafo 3A-340, es el caso de una tapa sin presión interna, sometido solamente a su propio peso, donde indica.

La tapa tiene que ser diseñada para soportar la carga de 250lb en un área de 16 in<sup>2</sup>, presentando una deflexión máxima de 0.5% del diámetro del cilindro o 0.5in.

La figura 5.7 muestra el esquema con la geometría de la tapa toriesférica y la aplicación de la carga según indica la norma ASME RTP1.



**Figura 5.7** GEOMETRÍA DE LAS TAPAS TORIESFERICAS.

Bajo este criterio, el autor A. Carvalho, presenta las siguientes expresiones para obtener el espesor de la tapa, ya que la norma RTP-1 no brinda una expresión directa para calcular el espesor.

El espesor de la tapa debe cumplir con ambos criterios:

- a) Para satisfacer el criterio de hundimiento máximo:

$$t = \sqrt{0.18 \cdot A \cdot \frac{Re}{R}} \quad \dots \dots \dots ec. (5.7)$$

- b) Para satisfacer el criterio de elongación máxima:

$$t = \sqrt{0.51 \cdot B + 0.76 \cdot C} \quad \dots \dots \dots ec. (5.8)$$

Dónde:

t	=	Espesor de la tapa
R	=	Radio del cilindro del tanque
Re	=	Radio de la parte esférica del cilindro
R <sub>0</sub>	=	5cm (Radio del área de aplicación de la carga)
h	=	Altura de la tapa.
P	=	110 kg (250lb)

Los coeficientes A, B y C de las ecuaciones 5.7 y 5.8 se encuentran en la tabla 5.6 las cuales son determinados con el parámetro "α" el cual es calculado con la ecuación 5.9.

**Tabla 5.6** TABLA DE COEFICIENTES EN FUNCIÓN DEL PARÁMETRO "α".

α	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
A	0,431	0,425	0,408	0,386	0,362	0,337	0,311	0,286
B	0,215	0,212	0,204	0,193	0,181	0,168	0,155	0,143
C	1,294	1,064	0,739	0,554	0,429	0,377	0,266	0,211

$$\alpha = \frac{9.20}{\sqrt{Re \cdot t}} \quad \dots \dots \dots ec. (5.9)$$

Aplicando para el cálculo de la tapa del tanque de  $300\text{m}^3$ , tenemos:

### Datos

$$R := 3\text{m}$$

$$R_e := 2R = 6\text{m}$$

$$t_a := 9\text{mm} \quad \text{Espesor asumido}$$

Hallamos el valor de  $\alpha$  de la ecuación 5.9

$$\alpha := \frac{9.20}{\sqrt{R_e \cdot t_a}} = 0.396 \cdot \frac{1}{\text{cm}}$$

Entonces de la tabla 5.6 y el valor de  $\alpha$  obtenemos los valores de A, B y C.

$$A := 0.408$$

$$B := 0.204$$

$$C := 0.739$$

Aplicando los criterios de diseño ecuaciones 5.7 y 5.8.

a) Criterio de Hundimiento (ec. 5.7)

$$t_1 := \sqrt{0.18 \cdot A \cdot \frac{R_e}{R}} = 0.383 \text{ cm}$$

b) Criterio de Elongaci

$$t_2 := \sqrt{0.51 \cdot B + 0.76 \cdot C} = 0.816 \text{ cm}$$

Entonces :

$$t := \max(t_1, t_2) = 0.816 \text{ cm}$$

$$t = 9\text{mm}$$

Del espesor calculado obtenemos la secuencia de laminado de la tapa, la cual se fabrica con laminado tipo II, ósea con mantas de fibra más telas

tejidas (MTMTM), entonces cada una de estas capas presenta aproximadamente 1mm de espesor, con lo cual tenemos el laminado de la estructura de la siguiente manera MTMTM MTMM (6M/3T), adicionalmente se agrega la barrera química (VMM) obteniendo finalmente:

- Laminado de Tapa toriesferica: **VMM + 6M/3T**
- Espesor total de la tapa: **11.6 mm**

### 5.5.3. Cálculo del fondo

Los tanques de fondo plano son totalmente apoyados sobre la base de concreto, toda la presión del contenido se transmite sobre la base plana hacia la base de concreto, por lo que es importante que la base sea completamente plana para evitar fallas.

El fondo plano no presenta un cálculo en particular para hallar su espesor, la RTP-1 y el ASTM D-3299 brindan una tabla de espesores recomendados según el diámetro, esta tabla solo nos da el espesor hasta un diámetro de 144in (3.7m). A continuación se presenta la tabla 5.7 correspondiente a los espesores de los fondos planos de FRP.

**Tabla 5.7** TABLA DE ESPESORES DE FONDOS PLANOS.

Diámetro (mm)	Espesor del Fondo (mm)
Hasta 1800	4.5
Entre 1800 y 3800	6.5
Mas de 3800	9.5

Para casos de mayor diámetro la RTP-1, indica en su párrafo 3A-260(c) se tiene que estimar de manera adecuada en base a los datos de la tabla 5.6.

Para el tanque de 300m<sup>3</sup> el espesor estimado es:

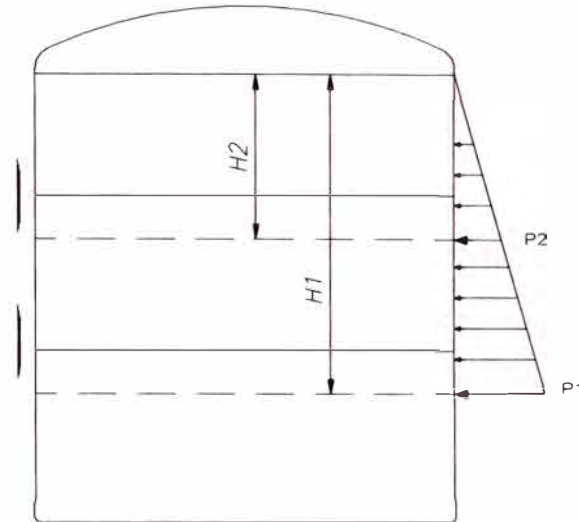
- Laminado del Fondo plano: VMM + 8M
- Espesor total de la tapa: 10.6 mm

Para el diámetro de 6m, le agregamos 1 mm de espesor, ya que esta parte no se encuentra esforzada, ya que todo el esfuerzo se transmite directamente a la base de concreto, cabe resaltar que esto siempre que en la fabricación tanto del fondo como de la base de concreto, se respeten la planitud y se encuentren totalmente en contacto, en caso contrario el fondo resistirá directamente la presión del fluido lo que lo hará fallar ya que no se calcula para tal fin.

#### **5.5.4. Cálculo de los vendajes**

El cálculo de los vendajes es similar al cuerpo cilíndrico, utilizando la ecuación 5.6 teniendo en cuenta que los vendajes se realizan con laminados manuales tipo II, el espesor se calcula utilizando la presión con la altura al sector que está por debajo de la unión como se puede observar en la siguiente figura 5.9.

La figura 5.9 muestra las presiones a utilizar para el cálculo de los espesores de los vendajes.



**Figura 5.8** PRESIONES PARA CÁLCULO DE VENDAJES

Los espesores obtenidos para los vendajes de los cuerpos cilíndricos se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 5.8** TABLA DE ESPESORES DE FONDOS PLANOS.

Vendaje	t (mm)	Laminacion
Cilindro 2 - Cilindro 3	15	BQ + 9M + 6T
Cilindro 1 - Cilindro 2	30	BQ + 18M + 12T



## 5.6 BRIDAS Y BOQUILLAS

Las bridas utilizadas en los tanques de FRP, son dimensionadas según muestra la siguiente tabla, la fabricación de las bridas son por medio de laminado manual tipo II.

La figura 5.10 y la tabla 5.9, muestran la geometría y dimensiones generales de las bridas de FRP utilizadas para conexiones de los tanques, estas bridas son dimensionadas según norma ASME B16.5

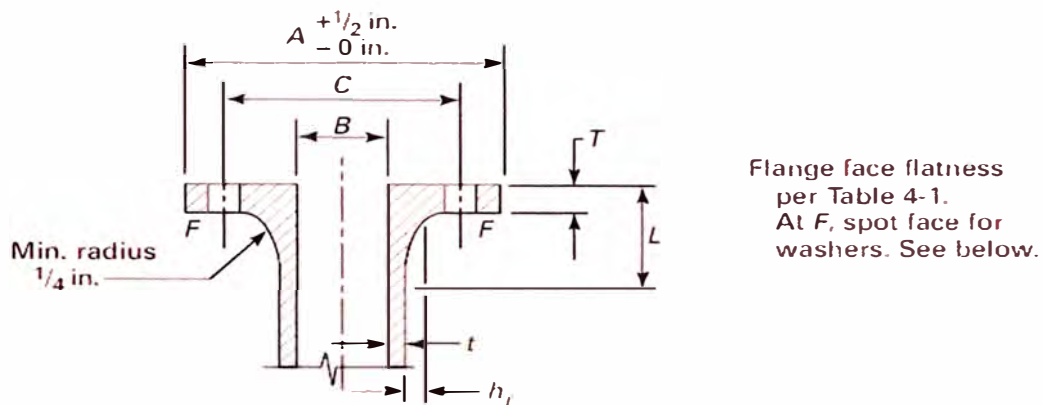


Figura 5.10 BRIDAS DE CARA PLANA CONSTRUIDAS CON FRP

Tabla 5.9 DIMENSIONES DE BRIDAS PARA TANQUES DE FRP

Size B, in.	A, in.	C, in. {Notes (1)-(3)}	Min. T, Type I Laminates, in.	Min. T, Type II Laminates, in.	Min. Hub Reinforcement, $h_1$ , in.	Min. $t$ , in.	Min. L, in.	No. of Bolts	Bolt Hole Diameter, in.	Bolt Diameter, in.	ANSI B18.22.1 Type A Narrow Washer Size (O.D.), in.	Bolt Torque, ft-lb
2	6	4 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	0.625	0.563	0.25	0.25	2 <sup>5</sup> / <sub>8</sub>	4	3/4	5/8	1 <sup>5</sup> / <sub>16</sub>	25
3	7 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	6	0.625	0.563	0.283	0.25	2 <sup>7</sup> / <sub>8</sub>	4	3/4	5/8	1 <sup>3</sup> / <sub>16</sub>	25
4	9	7 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	0.813	0.688	0.313	0.25	3 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	8	3/4	5/8	1 <sup>5</sup> / <sub>16</sub>	25
6	11	9 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	0.938	0.688	0.313	0.25	3 <sup>13</sup> / <sub>16</sub>	8	7/8	3/4	1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	25
8	13 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	11 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	1.125	0.813	0.375	0.25	4 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	8	7/8	3/4	1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	25
10	16	14 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	1.25	0.938	0.5	0.25	4 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	12	1	7/8	1 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	25
12	19	17	1.438	1.063	0.625	0.25	4 <sup>15</sup> / <sub>16</sub>	12	1	7/8	1 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	25
14	21	18 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	1.438	1.063	0.688	0.313	5	12	1 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>	1	2	30
16	23 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	21 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	1.563	1.188	0.813	0.313	5 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>	16	1 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>	1	2	30
18	25	22 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	1.625	1.25	0.75	0.375	5 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	16	1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	1 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>	2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	35
20	27 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	25	1.813	1.313	0.75	0.375	5 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	20	1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	1 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>	2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	35
24	32	29 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	2.125	1.5	0.813	0.438	5 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	20	1 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	2 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	40

## CAPITULO VI

### FABRICACIÓN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE FRP

#### 6.1 FABRICACIÓN DE LAS PARTES DEL TANQUE DE FRP

En esta parte se describirá en forma breve las etapas de la fabricación de las partes del tanque de 300m<sup>3</sup> de FRP.

- **Fabricación de Tapa Toriesférica**

La tapa toriesférica es fabricado sobre un molde que puede ser, madera, cemento, metálico o FRP, en este caso el molde es de FRP.

El proceso de laminación es manual tipo II, (combinación de mat 450 y tela de vidrio)

La figura 6.1 muestra el molde de FRP que se usara para fabricar la tapa toriesférica.

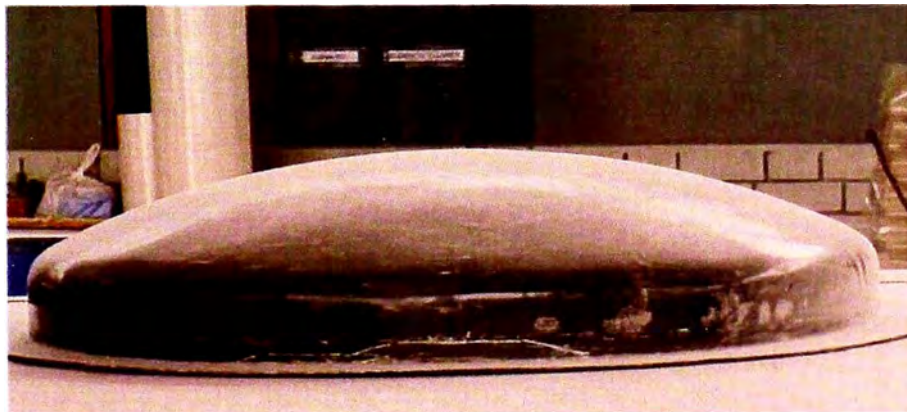


Figura 6.1 MOLDE DE FRP DE TAPAS TORIESFÉRICA.

Los moldes de FRP son recomendados ya que mejoran el acabado interno del equipo, pero también son más costosas por lo que son recomendables cuando se necesiten fabricar varias piezas.

El laminado inicia con la aplicación del desmoldante sobre el molde, seguidamente se inicia con la superficie interna (Velo superficial) y las capas según la secuencia de laminado.

En las figuras 6.2 y 6.3 y 6.4 se muestran el proceso de fabricación por laminado manual de la tapa toriesférica.



**Figura 6.2** APLICACIÓN DE LAS CAPAS DE MANTA DE FIBRA PICADA (MAT 450).

Debido al gran tamaño de la tapa, el laminador se ayuda de una plataforma para poder laminar la zona central.





**Figura 6.3** APLICACIÓN DE LA RESINA Y LAMINADO CON EL RODILLO METÁLICO PARA CONSEGUIR UN LAMINADO HOMOGÉNEO Y ELIMINAR BURBUJAS DE AIRE.

Si bien el proceso de laminado no es muy complicado, es importante supervisar y controlar las fallas de laminado ya que el material no es recuperable y se puede tener pérdidas económicas considerables.



**Figura 6.4** TAPA TORIESFÉRICA DE FRP OBTENIDA

- **Fabricación de fondo plano tipo tazón**

En este caso se usará un molde de madera según muestra la figura 6.5, estos moldes son mayormente usados cuando se tiene que fabricar el molde por primera vez a partir de los planos, la madera es fácil de trabajar para obtener las geometrías deseadas, la superficie del molde tiene que ser masillada y pulida para obtener una superficie continua y lisa en los equipos a fabricar.

El inconveniente de los moldes de madera es que se deterioran con el uso y hay que preparar la superficie para cada fabricación, por lo que es recomendable fabricar un molde de FRP a partir del molde de madera cuando se va a fabricar varias unidades de un equipo.



**Figura 6.5** TAPA TORIESFÉRICA DE FRP OBTENIDA

El proceso de laminación es similar que el de la tapa toriesférica, proceso manual pero en este caso es de tipo I, ósea el laminado es

solamente con mantas de fibra picada (Mat 450), esto es porque estructuralmente el fondo cumple la función de transmitir el peso del fluido a la base de concreto, mas no de resistir el peso como los cuerpos cilíndricos y los vendajes.

La figura 6.6 muestra el proceso de laminación del fondo plano de FRP, que al igual que en el caso de la tapa, los laminadores se ayudan de una plataforma para poder acceder a la parte central.



**Figura 6.6 FONDO PLANO TIPO TAZÓN**

Otro aspecto a cuidar en el proceso de laminado es la reacción exotérmica generada en el proceso de curado, el cual genera el calentamiento de las capas laminadas, si el espesor de las capas laminadas es demasiado, este calor puede llegar a quemar las capas laminadas de FRP con lo cual perdería sus propiedades mecánicas y el laminado se desearía, es por eso que solo se recomienda laminar aproximadamente 5 mm de laminado continuo (5 capas aproximadamente) dejando curar para luego continuar con las capas



restantes, esto es algo que no permite tener una producción continua del laminado de FRP.

La figura 6.7 muestra el fondo plano obtenido después del proceso de laminado y desmoldado.



**Figura 6.7 FONDO PLANO DE FRP OBTENIDA**

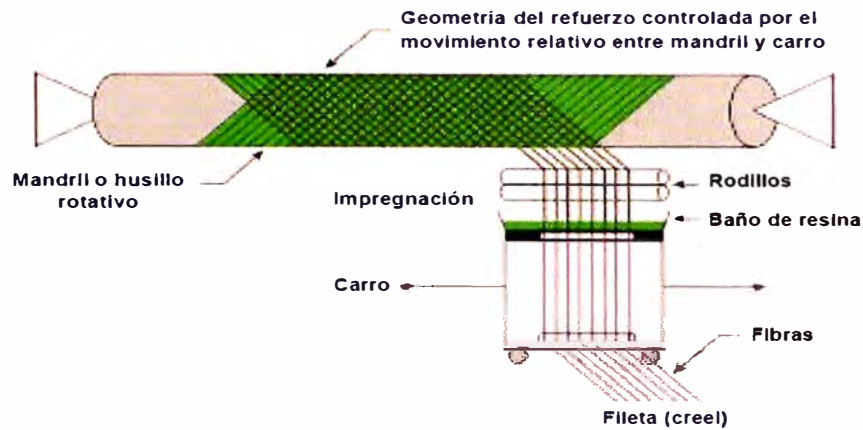
- **Fabricación de Cuerpo cilíndrico**

La fabricación del cuerpo cilíndrico se hace por el proceso de enrollamiento Filament winding, para esto se necesita de una máquina de tejido para filament winding.

Esta máquina consta de una matriz cilíndrica de metal, donde se enrollará los hilos de fibra de vidrio para formar el cuerpo cilíndrico, y de un carro de tejido que se encargara de tejer el hilo.

La siguiente imagen muestra un esquema del funcionamiento de la maquina filament winding.

A continuación la figura 6.8 muestra el sistema básico de las máquinas de enrollamiento de filamentos de fibra de vidrio “Filament winding”.



**Figura 6.8** ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA DE ENROLLAMIENTO “FILAMENT WINDING”

Tanto la máquina como el carro de tejido constan de estructuras metálicas con un sistema de transmisión que sincroniza el movimiento de rotación de la matriz con el movimiento de traslación del carro de manera que se forme el ángulo de tejido adecuado.

En la figura. 6.9 se muestra la estructura de una máquina para el tejido del cilindro de diámetro igual a 6m para los tanques de agua de mar.

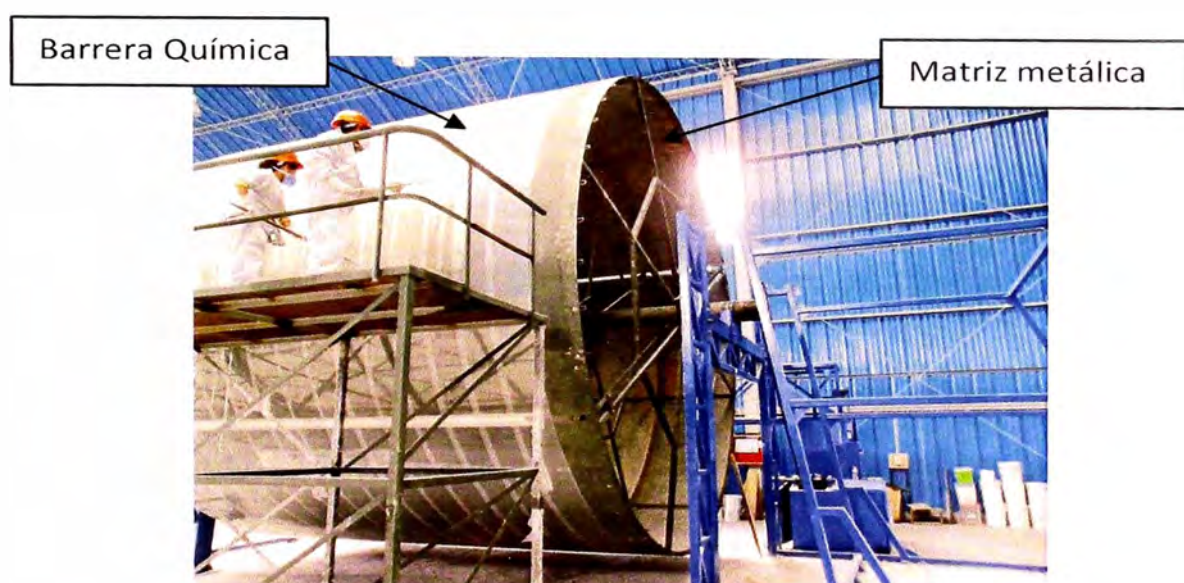


**Figura 6.9** ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA DE LA MAQUINA PARA TEJIDO POR ENROLLAMIENTO (FILAMENT WINDING)



Al igual que en el caso de la tapa y el fondo, el laminado del cilindro comienza con el laminado de la superficie interna (Barrera química) que está compuesta de velo superficial y dos capas de mat 450 por lo que su laminado se hace de manera manual sobre la matriz.

La figura 6.10 muestra el laminado de la barrera química de manera manual, son las primeras capas del cilindro de FRP.



**Figura 6.10** LAMINADO DE BARRERA QUÍMICA (SUPERFICIE INTERNA), LAMINADO DE FORMA MANUAL.

Luego del laminado de la barrera química se procede a laminar la parte estructural de la pared del cilindro, en este caso laminado consta de la combinación de laminado por enrollamiento y laminado manual.

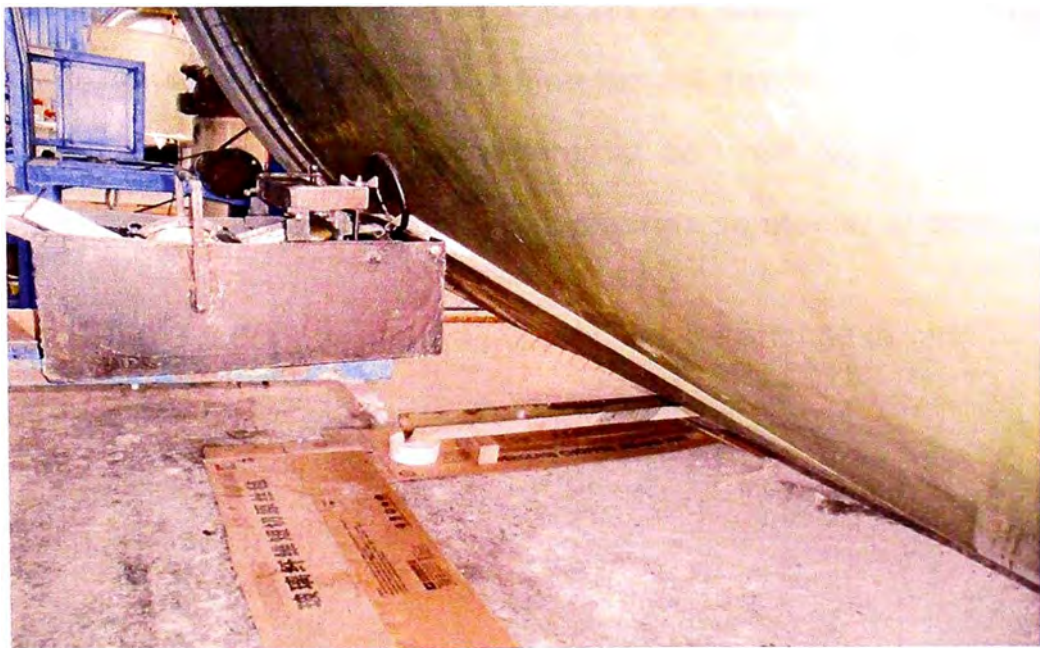
La tabla 6.1 muestra la secuencia de laminado del cilindro número 3.

**Tabla 6.1** SECUENCIA DE LAMINADO DEL CILINDRO 3.

	Sector	t (mm)	Laminacion
CILINDRO 3	J	9.3	BQ + 3M + 1T + m + 2R + m
	I	10.3	BQ + 3M + 2T + m + 2R + m

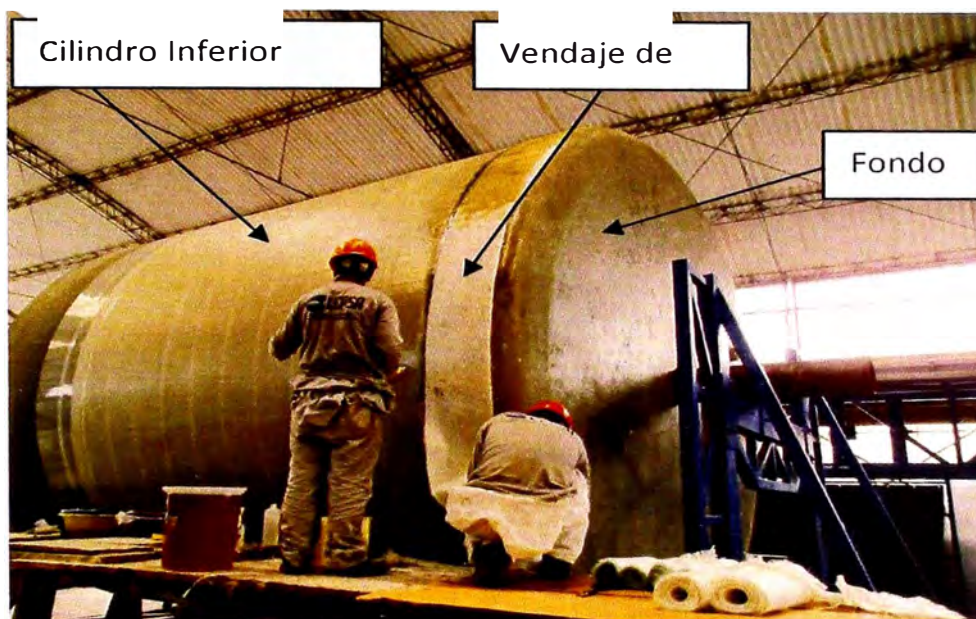
Según la secuencia de laminado del cilindro 3 mostrado en la tabla 6.1, el cilindro está dividido en dos sectores, ambos sectores presentan el laminado de la barrera química y el enrollamiento ( $m + 2R + m$ ) eso significa que luego del laminado de la barrera química se procederá a enrollar ( $R = 1$  capa con hilo de fibra de vidrio que cubra todo el cilindro esto no se cumple necesariamente con una vuelta de enrollamiento), entonces en nuestro caso  $2R$  serán dos capas de hilo que cubran los dos sectores (todo el cilindro 3) para completar los espesores de cada sector se usa el laminado manual tipo II (Mat con tela). Esto se repite para los cilindros 1 y 2, que por ser de mayor espesor tiene más capas con hilos de fibra de vidrio.

La figura 6.11 muestra la bandeja de resina donde pasan los hilos de fibra de vidrio y se impregna de resina para luego pasar a hacer enrollados en el cilindro.



**Figura 6.11** LAMINADO POR ENROLLAMIENTO DEL CILINDRO (FILAMENT WINDING).

En el caso del cilindro superior e inferior, estos cilindros se vendan a la tapa y fondo respectivamente en la máquina de enrollamiento, la figura 6.16 muestra el proceso de vendaje de la tapa con el cilindro 1.

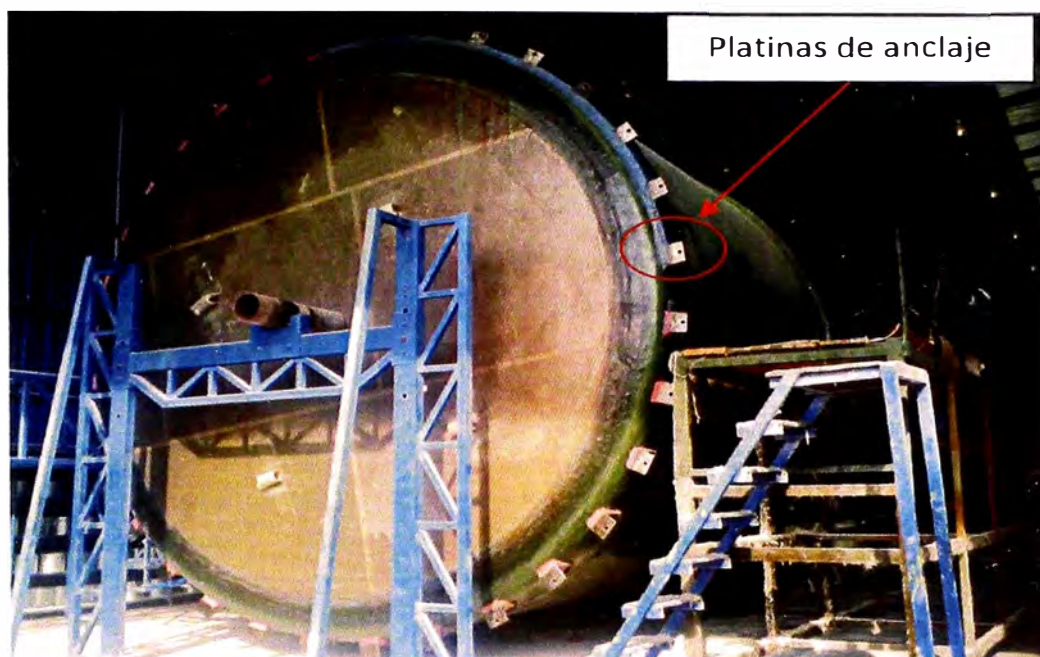


**Figura 6.12** UNIÓN DE FONDO CON CILINDRO1.

Además en el cilindro inferior se colocan las silletas de anclaje, para esto primeramente se presentan y fijan las silletas con masilla sobre la pared del cilindro, para finalmente laminar con hilo de vidrio enrollado todas las platinas, quedando así estas platinas sujetadas al cilindro.

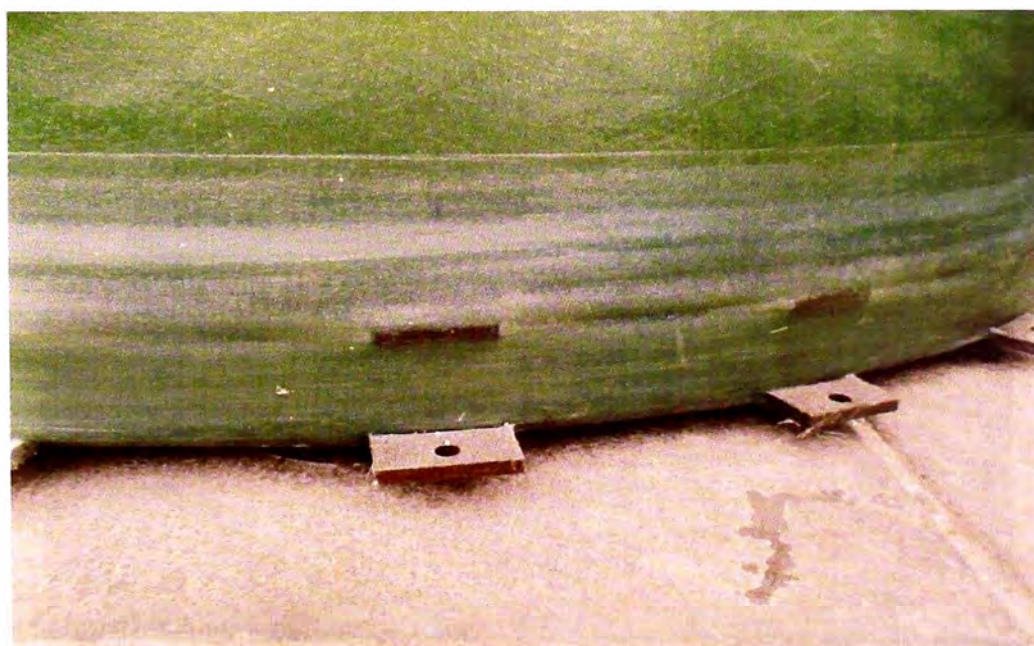
Las figuras 6.13 y 6.14 muestran las platinas de anclaje laminados en el cilindro inferior.





**Figura 6.13** INSTALACIÓN DE SILLETAS DE ANCLAJE, PRESENTACIÓN Y FIJADO CON MASILLA.

La figura 6.14 muestra las platinas laminadas este laminado de platinas se realizó mediante enrollamiento de hilos.



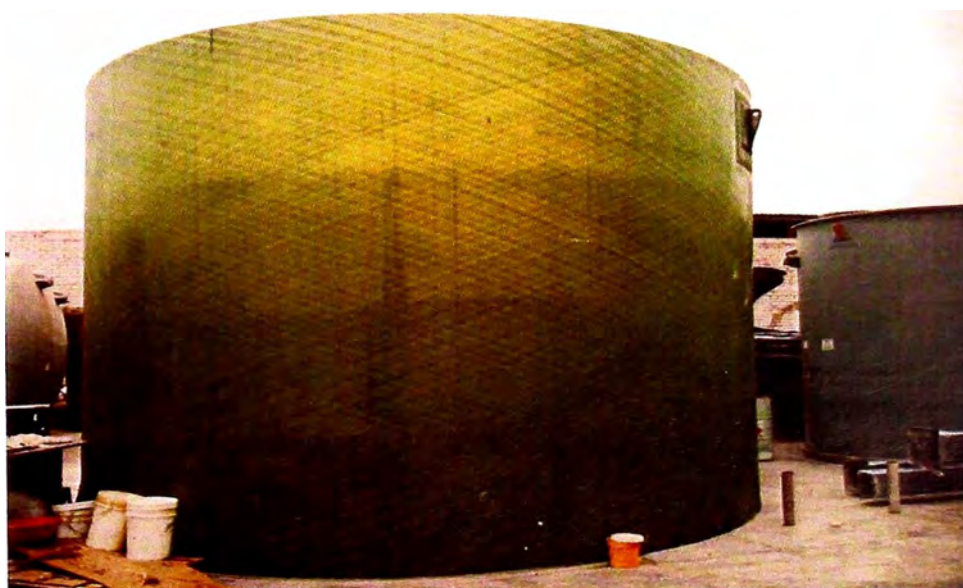
**Figura 6.14** SILLETAS DE ANCLAJE DESPUÉS DEL LAMINADO.

A continuación en las figuras 6.15, 6.16 y 6.17 se muestran los cilindros terminados, en ellos se pueden observar la dirección del tejido de los hilos.



**Figura 6.15** CILINDRO 3 CON TAPA TORIESFÉRICA.

En la figura 6.16 se puede observar el cilindro intermedio, el cual está listo para pintura, los extremos están cortados sin rebabas.



**Figura 6.16** CILINDRO 2, CUERPO INTERMEDIO.



La figura 6.17 muestra el cilindro inferior, ahí se puede observar en la parte superior las rebabas del proceso de tejido, estas rebabas se cortaran para tener un borde uniforme.



**Figura 6.17** CILINDRO 1 CON FONDO PLANO

- **Fabricación de Bridas**

Las bridas para las boquillas del tanque se fabrican mediante laminado manual en matrices metálicas según mostramos en la siguiente imagen. La figura 6.18 muestra las matrices para la fabricación de las bridas, las cuales son fabricadas por laminado manual hasta obtener los espesores adecuados.

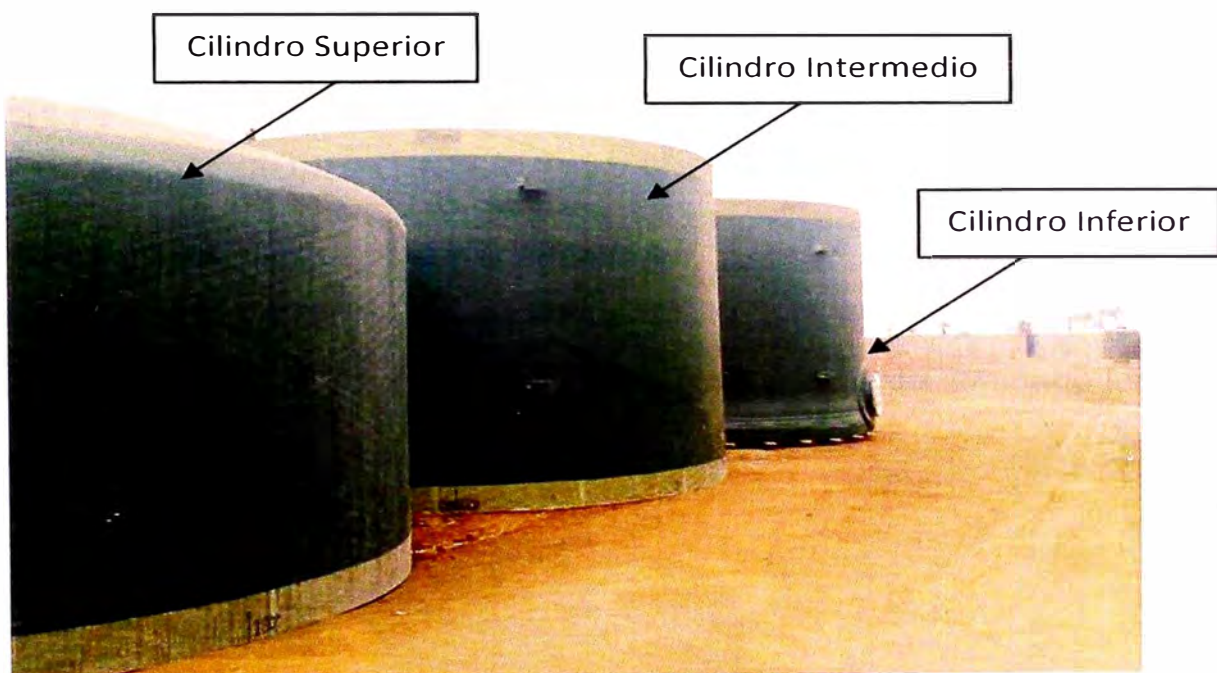


**Figura 6.18** MATRICES DE ACERO PARA FABRICACIÓN DE BRIDAS DE FRP

## 6.2 MONTAJE Y UNIÓN DE LOS COMPONENTES DEL TANQUE DE FRP

Para el montaje de los tres cilindros del tanque de FRP se realiza ubicando el cilindro 1 (cuerpo inferior) en la base de concreto, previamente fabricada, donde se colocan las silletas de anclaje a los pernos de anclaje de la base quedando fijada así el cilindro inferior.

La figura 6.19 muestra los tres cuerpos cilindros listos para ser unidos y vendados entre sí para formar el tanque, esto se realizara sobre su posición final de montaje para evitar traslados posteriores.



**Figura 6.19** LOS TRES CILINDROS DEL TANQUE DE 300M<sup>3</sup> PARA INSTALACIÓN.

La figura 6.20 muestra, el izaje de los cilindros, los cuales se hizo con uso de dos grúas debido al tamaño de los cilindros del tanque.



**Figura 6.20** CILINDRO INFERIOR FIJADO SOBRE LA BASE DE CONCRETO Y MONTAJE DEL CILINDRO INTERMEDIO SOBRE EL CILINDRO INFERIOR.

Una vez montado y alineado los dos cilindros se procede hacer el vendaje de unión de los cilindros en forma manual, según secuencia de laminado indicada en la tabla 5.8, como se muestra en la figura 6.21.



**Figura 6.21** VENDAJE DE LOS CILINDRO 1 Y 2, LAMINADO MANUAL.



A continuación se muestra en la figura 6.22 el montaje del tercer cilindro, se puede observar crucetas de fierro en la parte abierta del cilindro, esto para evitar la deformación del cilindro y facilitar el alineamiento para el vendaje.



**Figura 6.22** MONTAJE DEL CILINDRO SUPERIOR.

La figura 6.23 muestra el vendaje del cilindro superior, también se observa por seguridad la grúa permanece sujeta al cilindro.



**Figura 6.23** VENDAJE DE LOS CILINDROS 2 Y 3.

Finalmente en la figura 6.23 se presenta el tanque terminado, donde se puede observar el tanque instalado con sus partes unidas y vendadas, después de que los vendajes de unión y se produzca su curado procedemos a pintar las uniones y zonas que necesiten con lo que se culminaría la instalación del tanque.



**Figura 6.23** CILINDRO DE 300M3 DE FRP INSTALADO.

## CONCLUSIONES

Después de culminar el desarrollo del informe de suficiencia se ha llegado a las siguientes conclusiones.

1. Se logró diseñar y fabricar el tanque de FRP bajo la norma ASME RTP-1, utilizando y ajustando sus criterios de cálculo para un tanque de diámetro 6m con 300m<sup>3</sup> de capacidad.
2. Los espesores de la tapa puede ser estandarizados, al igual que el caso de los fondos, para cada diámetro en el caso de los tanques de presión hidrostática, ya que su cálculo solo depende de su geometría y la carga que es la misma en todos los casos.
3. Es importante conocer y estimar correctamente las propiedades de los laminados compuestos con los que se fabricara el tanque, ya que de estas propiedades dependerán los espesores a obtener en los cálculos, una mala estimación de las propiedades químicas pueden originar espesores de laminado inadecuados
4. Si bien la norma RTP-1 presenta algunas limitaciones para el cálculo de tanques de grandes dimensiones, se pueden diseñar y fabricar equipos de FRP grandes como el tanque de 300m<sup>3</sup>, teniendo como base los criterios que brinda la norma y cuidado los aspectos de ingeniería adecuados como factores de seguridad, cargas de sismo, viento entro otros.

5. El montaje de los tanques de FRP son relativamente sencillos debido a su bajo peso y sistema de unión, pero es un proceso que se debe controlar ya que un mal laminado del vendaje puede ocasionar fallas del tanque.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda para el adecuado diseño, fabricación y funcionamiento del tanque de FRP:

1. Verificar la resistencia química de la resina según el compuesto a contener, así como temperaturas de operación en caso no exista el contenido en las tablas consultar con los fabricantes de resina y proveedores.
2. Para el cálculo se recomienda probar con espesores asumidos, calcular los valores de sus propiedades mecánicas y luego comprobar con los valores admisibles de deformaciones y resistencia, hallados con los factores de seguridad, hasta obtener el espesor mínimo que cumpla con las condiciones
3. En la secuencia de laminado tipo II (mat 450 con tela tejida) es importante siempre colocar una capa de tela tejida en medio de dos capas de manta de fibra picada (mat), nunca se debe tener una capa de tela en el extremo de una secuencia de laminado.
4. De igual manera que con las capas de telas tejidas, sucede con las capas de hilo enrollado, se tiene que colocar siempre en medio de dos capas de manta de fibra picada, normalmente se usan mantas de fibra picada de 300g/m<sup>2</sup> (mat 300)
5. En el caso de montajes de 3 cuerpos como el tanque de 300m<sup>3</sup> que se vio en el informe, se recomienda primero hacer la unión del cuerpo intermedio con el superior, para luego estos dos cuerpos juntos montarlo sobre el cuerpo inferior, con esto se realiza un trabajo de unión a menos altura y con menos riesgo para

el personal y también se requiere de menor cantidad de andamios optimizando los costos de montaje.

6. Antes de realizar el montaje, verificar la planitud tanto de la base de concreto como del fondo plano del tanque, en caso no se cumpla esto, el fondo del tanque no se apoyara completamente en el fondo lo que originara que el vendaje del fondo con cilindro se esfuerce pudiendo fallar.
7. Para un buen funcionamiento de los tanques de FRP es necesario verificar que el venteo no este obstruido o sellado, ya que el vacío creado por el fluido succionado por bombas ocasionará la rajadura de la pared cilíndrica, para que un tanque de FRP trabaje con presión de vacío, se tienen que reforzar con anillos rigidizantes.
8. Para estimar tiempos de fabricación, es importante considerar que se puede laminar como máximo entre 5 a 6 mm de espesor de pared para evitar sobrecalentamientos por el curado de la resina, por lo cual se tiene que considerar un tiempo de espera de curado cada 5 o 6 mm de laminado.

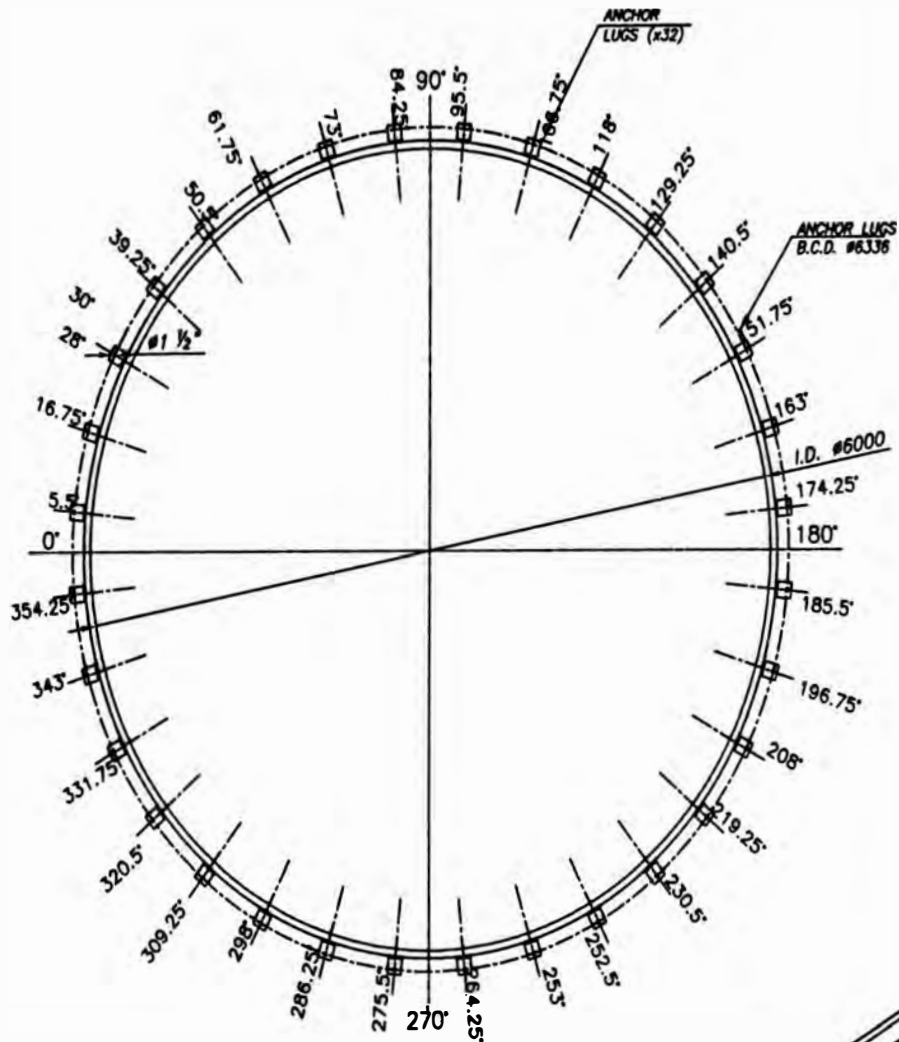
## BIBLIOGRAFÍA

- [1] American Society of Mechanical Engineer - ASME  
ASME RTP-1: Reinforced Thermoset Plastic Corrosion Resistant Equipment
- [2] Fiberglass x Corrosao  
ANTONIO CARBALHO.
- [3] Composite Polymers: Guía para la Fabricación de compuestos con resina - ASHLAND
- [4] Guía para la fabricación de compuestos FRP  
VIPEL
- [5] Guía de resinas Vipel resistentes a la corrosión  
VIPEL
- [6] Guía de Fabricación de tuberías y accesorios de FRP  
EXFIBRO
- [7] Manual de Ingeniería y Resistencia Química  
DOW PLÁSTICOS

## PLANOS

- Plano1 : Vista General del Tanque
- Plano2 : Fabricación del Tanque vertical de 300m<sup>3</sup> de FRP
- Plano3 : Distribución de pernos de anclaje
- Plano4 : Detalle de Orejas de Izaje
- Plano5 : Detalle de silletas de anclaje





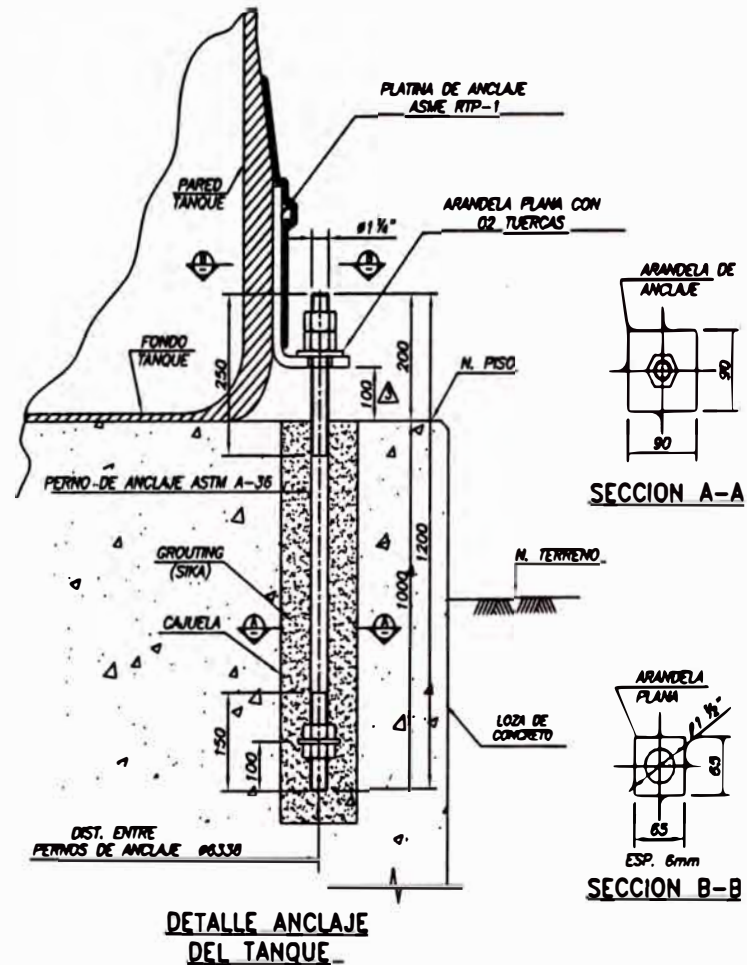
**UBICACION DE ANCLAJES TANQUE**

- NOTAS:**  
 RECOMENDACIONES IMPORTANTES PARA LA INSTALACION DEL TANQUE:  
 - VERIFICAR LA NIVELACION DE TODA LA SUPERFICIE DE LA BASE.  
 - VERIFICACION DE LA PLANITUD DE LA SUPERFICIE DE LA BASE.



**ISOMETRICO PLATINA DE ANCLAJE**

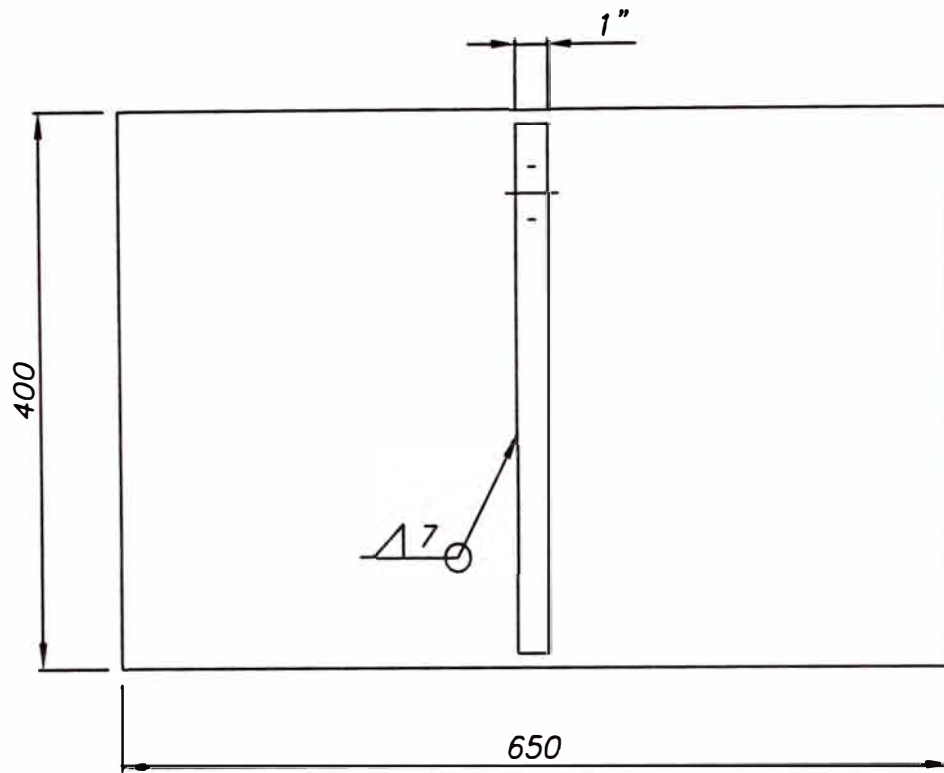
s/r



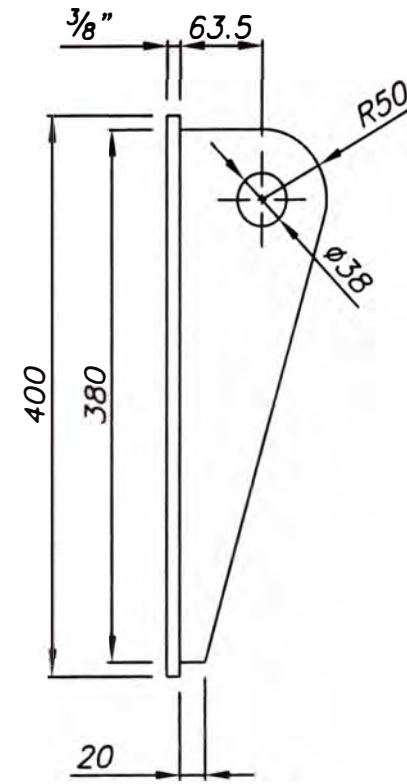
**DETALLE ANCLAJE DEL TANQUE**

s/r

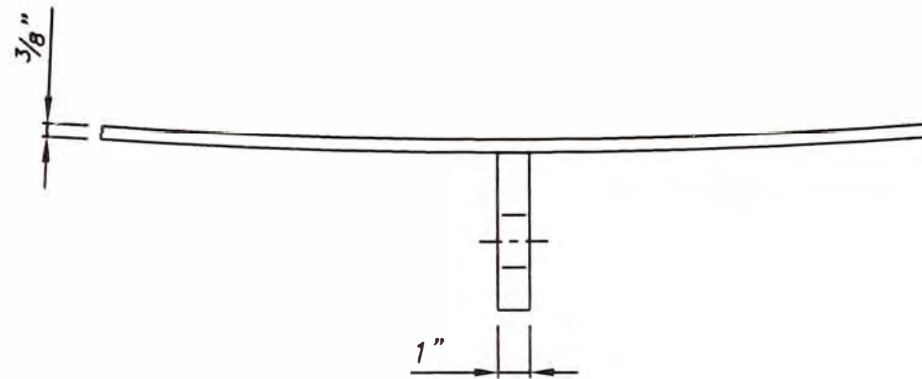
DISEÑO DE TANQUE VERTICAL PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA DE MAR CON FRP		
Universidad Nacional de Ingeniería INFORME PARA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL		
PLANO 3 : DISTRIBUCIÓN DE PERNOS DE ANCLAJE		
Alumno: Christian Hinojosa Aquino	Código: 20022060k	Plano: 3 / 5
Asesor: Ing. Pedro Escudero Vega	03 / 05 / 2013	



ELEVACION



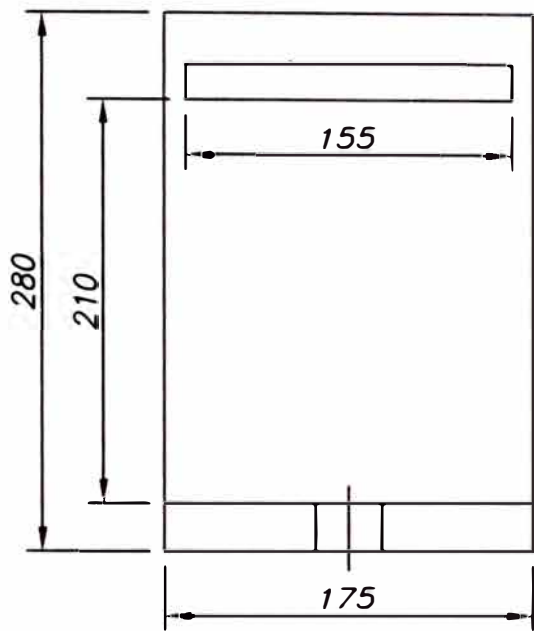
LATERAL



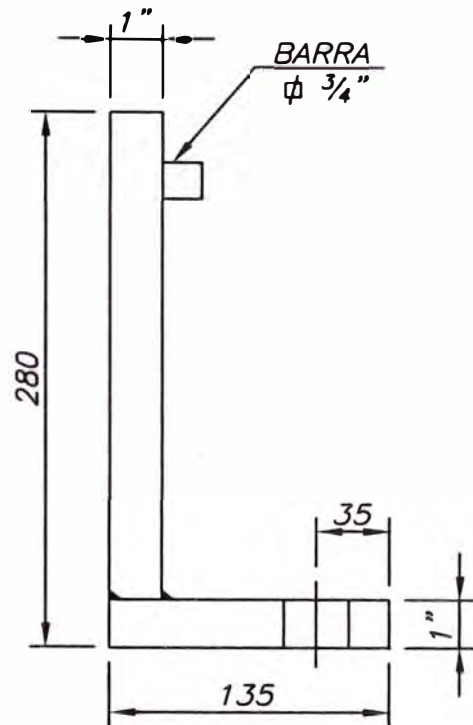
PLANTA

CANTIDAD : 02 UNIDADES  
 MATERIAL : ACERO ASTM A36  
 ACABADO : LIMPIEZA MECANICA

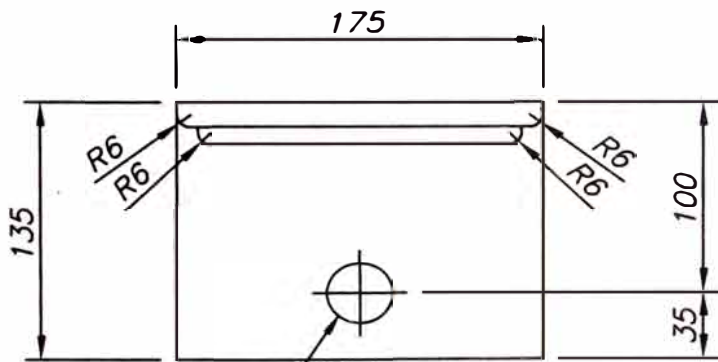
DISEÑO DE TANQUE VERTICAL PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA DE MAR CON FRP		
Universidad Nacional de Ingenieria INFORME PARA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFECIONAL		
PLANO 4 : DETALLE DE OREJAS DE IZAJE		
Alumno: Christian Hinostroza Aquino	Código: 20022060k	Plano:
Asesor: Ing. Pedro Escudero Vega	03 / 05 / 2013	4 / 5



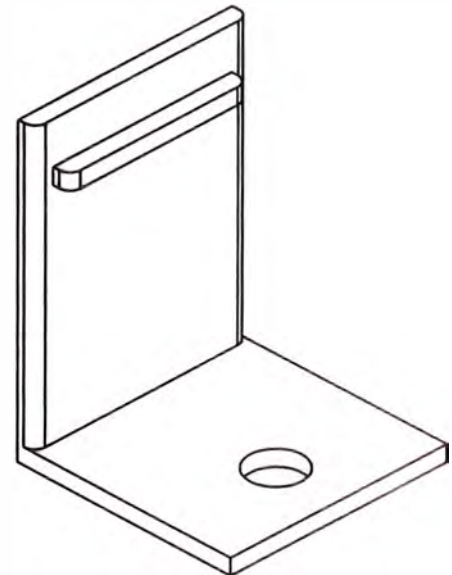
ELEVACION



LATERAL



PLANTA  
AGUJERO  
1 1/4"  $\phi$



ISOMETRICO

CANTIDAD : 32 UNIDADES  
MATERIAL : ASTM A36

DISEÑO DE TANQUE VERTICAL PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA DE MAR CON FRP

Universidad Nacional de Ingeniería  
INFORME PARA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFECIONAL

PLANO 5 : DETALLE DE SILLETAS DE ANCLAJE

Alumno: Christian Hinostraza Aquinol

Código: 20022060k

Plano:

Asesor: Ing. Pedro Escudero Vega

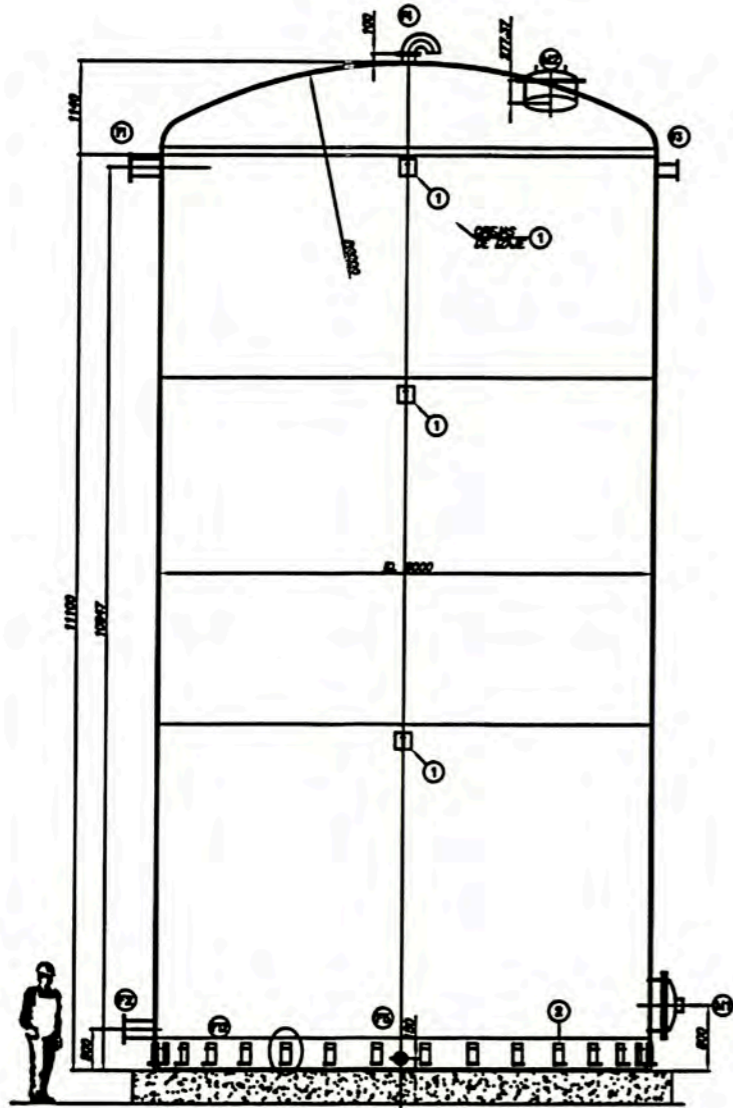
03 / 05 / 2013

5 / 5

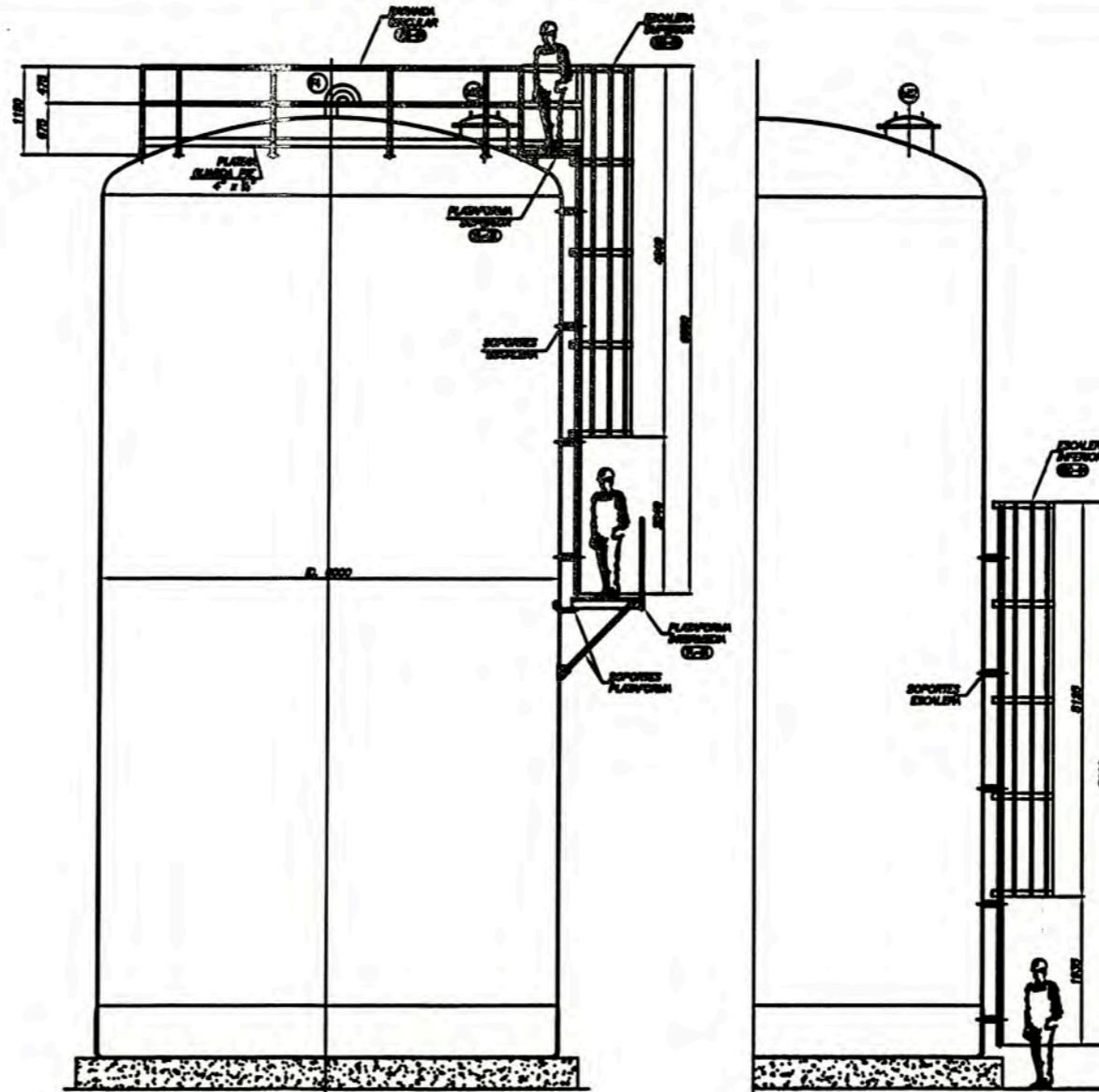
## ANEXOS

Anexo A: Composición de Laminado tipo I ASME RTP-1	Pag. 153
Anexo B: Composición de Laminado tipo II ASME RTP-1	Pag. 154
Anexo C: Propiedades de los Laminados ASME RTP-1	Pag. 155
Anexo D: Normas de Fabricación Aplicables al FRP	Pag. 156-157
Anexo E: Extracto de Norma ASME RTP-1 – 2005	Pag. 158-162
Anexo F: Tabla de resistencia química de las Resinas	Pag. 163-168



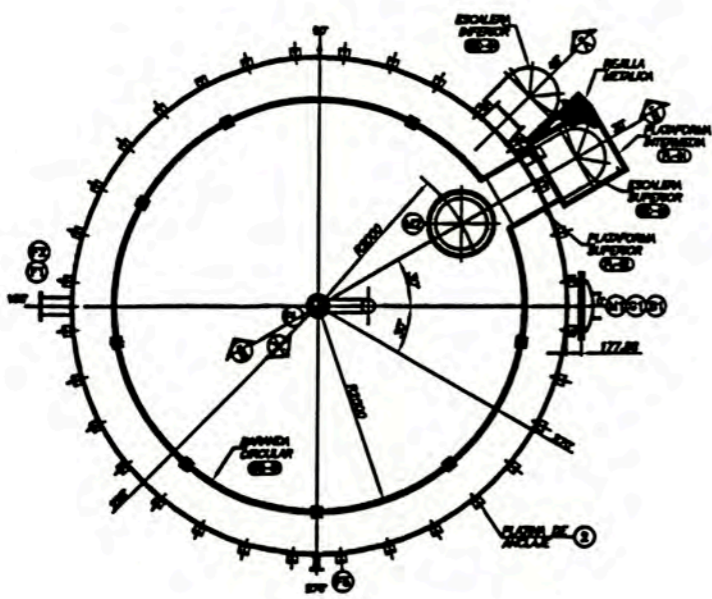


ELEVACION

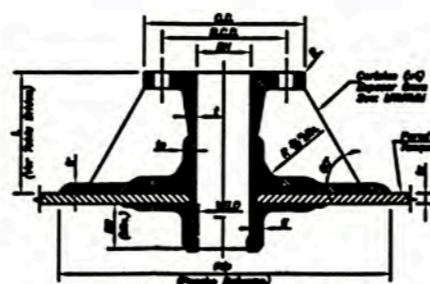


SECCION B-B

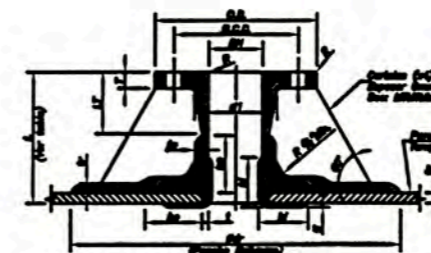
SECCION A-A



PLANTA



DETALLE INST. BRIDAS PENETRANTES



DETALLE INST. BRIDAS TÍPICO MANIO

Tabla de instalación de bridas según ASME RTP-1 2000 - STYLE A - TYPE II (ANSI B16.5 - 50 PSI)

BRIDA	D.I. (Pulg.)	O.D. (Pulg.)	R.O.D. (Pulg.)	Núm. Perfor.	Di. Perfor. (Pulg.)	Di. Perfor. (mm)	T (mm)	L (mm)	L <sub>1</sub> (mm)	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)	d <sub>3</sub> (mm)	d <sub>4</sub> (mm)	d <sub>5</sub> (mm)	d <sub>6</sub> (mm)	Peso (Kg)	Peso (Lb)	
F1	8"	13 1/2"	11 1/2"	8	7/8"	22.2	10	8.5	78	233	2.5	78	8.0	78	80	25	150	330
F2	8"	13 1/2"	11 1/2"	8	7/8"	22.2	10	8.5	78	233	2.5	78	8.0	78	80	25	150	330
F3	8"	11"	9 1/2"	8	7/8"	22.2	10	4.8	64	177	2.5	78	8.0	78	300	8.0	25	550
F4	8"	11"	9 1/2"	8	7/8"	22.2	10	4.8	64	177	2.5	78	8.0	78	300	8.0	25	550
F5	8"	11"	9 1/2"	8	7/8"	22.2	10	4.8	64	177	2.5	78	8.0	78	300	8.0	25	550
M1	24" (Int.)	32"	29 1/2"	20	3/4"	19.0	32	9.8	138	630	2.8	78	8.0	78	1500	88.0	25	180
M2	24" (Ext.)	32"	29 1/2"	20	1/2"	12.7	10	6.5	138	630	2.8	78	8.0	78	1500	8.0	25	550

**MATERIAS PRIMAS PARA FRP**

RESINA : ISOFTALICA  
 VIDRIO : VELO DE VIDRIO TIPO C DE 30 grs./m2  
 VIDRIO : MAT MULTIDIRECCIONAL, VIDRIO TIPO "ECR" DE 450 grs./m2  
 MAT MULTIDIRECCIONAL, VIDRIO TIPO "ECR" DE 300 grs./m2  
 TEJIDO BIDIRECCIONAL, VIDRIO TIPO "ECR" DE 800 grs./m2  
 FILAMENTOS CONTINUOS, VIDRIO TIPO "E" DE 2200 TEX.  
 GELCOAT ISOFTALICO DE TERMINACION  
 (CON AGENTES TOXOTROPICO Y UV)

COLOR DE TERMINACION : POR DEFINIR MILPO  
 NORMA DE FABRICACION : ASTM 3299  
 BARRERA QUIMICA (BQ) : VMM (2.5 mm)

**ESPECIFICACIONES**

PRESION DE DISEÑO : HIDROSTATICA  
 PRESION DE OPERACION : HIDROSTATICA  
 TEMPERATURA DE OPERACION : AMBIENTE  
 DENSIDAD : 1,000 Kg/m3

**PESO FRP DEL EQUIPO**

CUERPO 1 : 1,614 kg  
 CUERPO 2 : 3,002 kg  
 CUERPO 3 : 5,496 kg  
 PESO TOTAL EQUIPO VACIO : 10,112 kg

**LISTADO DE BRIDAS**

BRIDA	D.I. (Pulg.)	CANT.	DESCRIPCION	MATERIAL
F1	8"	1	INGRESO	FRP
F2	8"	1	SALIDA	FRP
F3	8"	1	REBORD	FRP
F4	8"	1	VENED	FRP
F5	8"	1	PUNA	FRP

**LISTADO DE ELEMENTOS**

BRIDA	CANT.	DESCRIPCION	DIMENSIONES	OBSERVACIONES	MATERIAL
1	8	OREANS DE EDAL	VER DETALLE	LAMBINDO AL TANQUE	ASB
2	32	PLABMS DE ANCLAE	VER DETALLE	LAMBINDO AL TANQUE	ASB
3	1	PLACA DE IDENTIFICACION	100 x 220mm	LAMBINDO AL TANQUE	ALUMINIO

DISEÑO DE TANQUE VERTICAL PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA DE MAR CON FRP

Universidad Nacional de Ingeniería

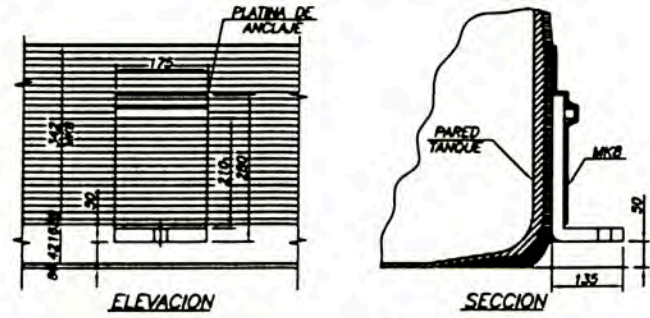
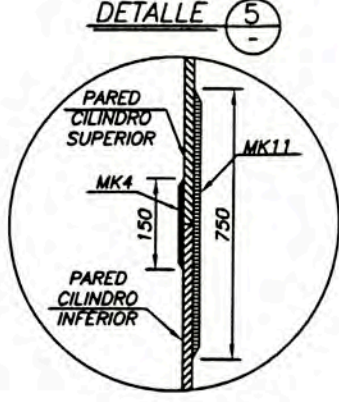
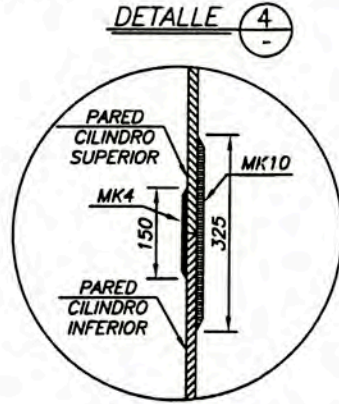
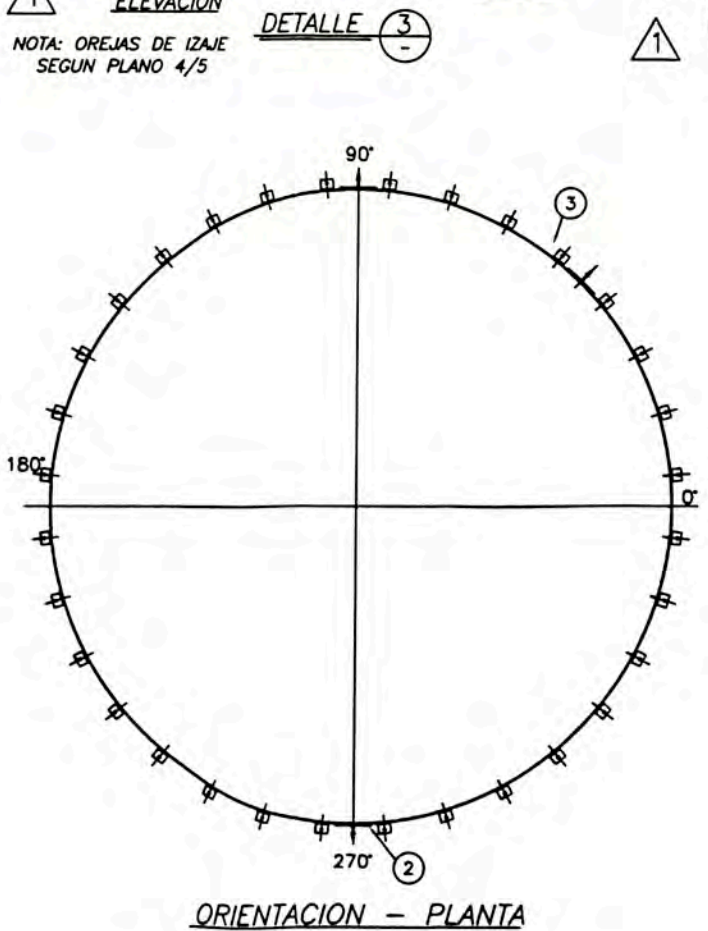
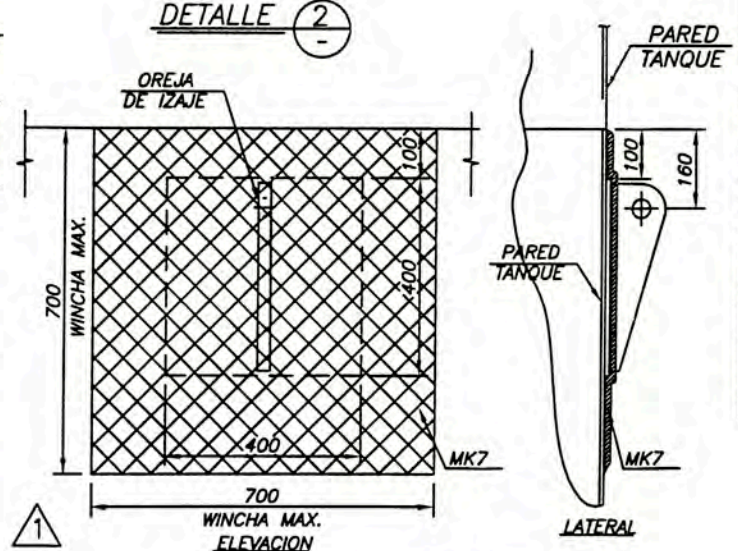
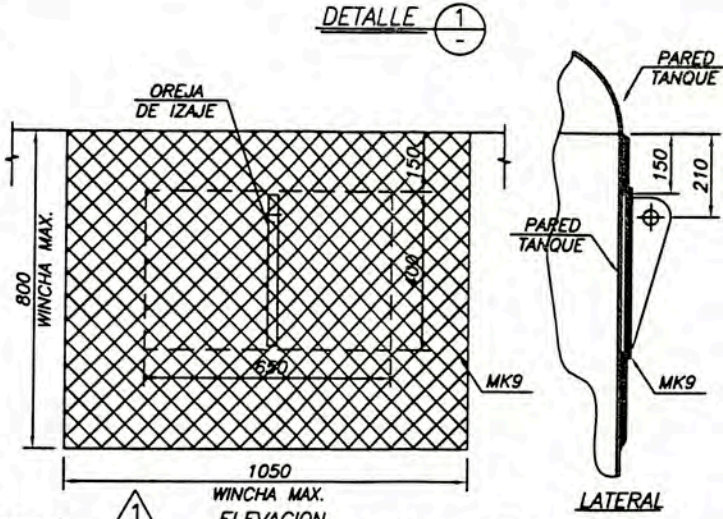
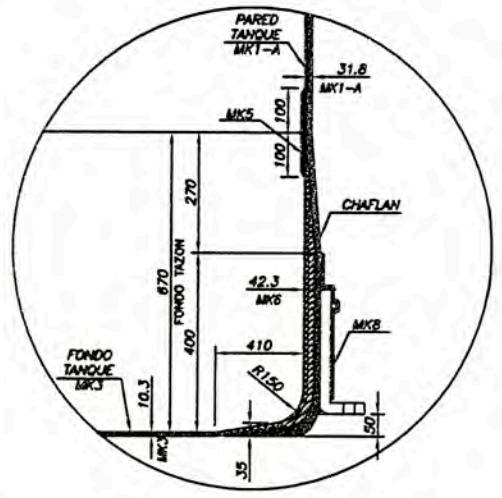
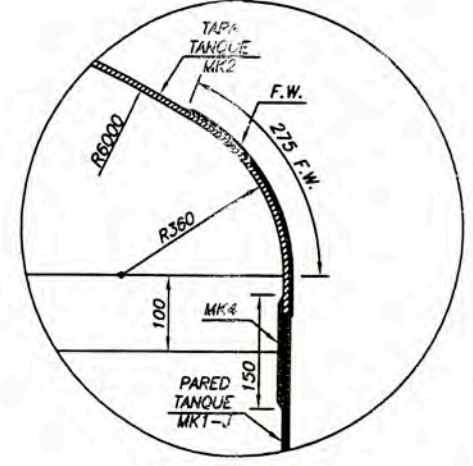
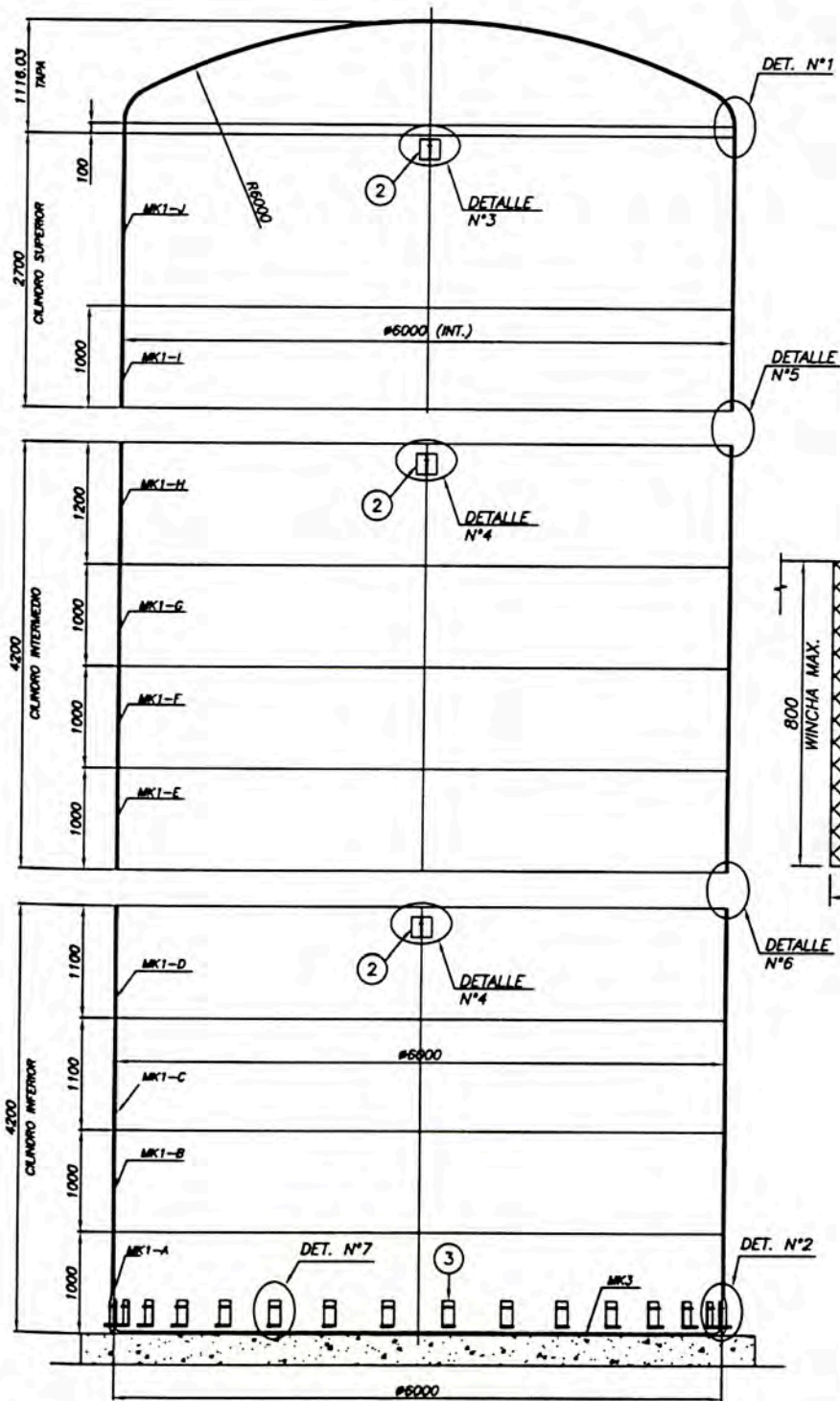
INFORME PARA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL

PLANO 1: DETALLES GENERALES DEL TANQUE

Alumno: Christian Miroslava Aquino Código: 20022080k Plano: 1/2

Aesor: Ing. Pedro Escudero Vega 08 / 08 / 2013





**MATERIAS PRIMAS PARA FRP**

RESINA : ISOFALICO (BARRERA QUIMICA)  
 ISOFALICO (ESTRUCTURA)  
 ISOFALICO (GELCOAT)  
 VIDRIO : VELO DE VIDRIO TIPO C DE 30 grs./m2 (V)  
 VIDRIO : MAT MULTIDIRECCIONAL, VIDRIO TIPO "EGR" DE 450 grs./m2 (M)  
 MAT MULTIDIRECCIONAL, VIDRIO TIPO "EGR" DE 300 grs./m2 (M)  
 TEJIDO BIDIRECCIONAL, VIDRIO TIPO "EGR" DE 800 grs./m2 (T)  
 FILAMENTOS CONTINUOS, VIDRIO TIPO "E" DE 2200 TEX. (F.W.)  
 GELCOAT ISOFALICO DE TERMINACION (CON AGENTES TIXOTROPICO Y UV)  
 ADITIVOS: MEKP  
 COBALTO AL 6%  
 AGENTE HUMECTANTE BYK 560  
 AGENTE DESARRANTE BYK 555  
 INHIBIDOR ULTRAVIOLETA TINUVIN 320  
 ADITIVO DE SUPERFICIE AGENTE S (POKSFINICO)  
 AGENTE TIXOTROPICO AEROSIL 200  
 COLOR DE TERMINACION : VERDE RAL 6005  
 ANGULO DE TEJIDO : 65°  
 BARRERA QUIMICA (BQ) : VMM (2.5 mm)

**LISTADO DE ELEMENTOS**

MARCA	DESCRIPCION	CANT.	DIMENSIONES	OBSERVACIONES	MATERIAL
1	PLACA DE IDENTIFICACION	1	190 x 220mm	LAMINADO AL TANQUE	ALUMINIO
2	OREJAS DE IZAJE	8	VER DETALLE	LAMINADO AL TANQUE	A36
3	PLATINAS DE ANCLAJE	32	VER DETALLE	LAMINADO AL TANQUE	A36

**TABLA DE SECUENCIAS DE LAMINADO**

MARCA	ESPEZURAS	SECUENCIA
MK1-A	31.8	BQ + 5M/2I + m + 5R + m + 5R + m + 5R + m
MK1-B	29.8	BQ + 3M/2I + m + 5R + m + 5R + m + 5R + m
MK1-C	27.8	BQ + 2M/1I + m + 5R + m + 5R + m + 5R + m
MK1-D	24.8	BQ + m + 5R + m + 5R + m + 5R + m

MK1-E	21.3	BQ + 5M/2I + m + 5R + m + 3R + m
MK1-F	19.3	BQ + 3M/2I + m + 5R + m + 3R + m
MK1-G	17.3	BQ + 2M/1I + m + 5R + m + 3R + m
MK1-H	14.3	BQ + m + 5R + m + 3R + m

MK1-I	10.3	BQ + 3M/2I + m + 2R + m
MK1-J	9.3	BQ + 3M/1I + m + 2R + m

MK2	11.3	BQ + 6M/3T
MK3	10.3	BQ + 8M
MK4	2.3	VMM (Wincha Min. 75mm / Max. 150mm)
MK5	3.3	VMM (Wincha Min. 100mm / Max. 200mm)
MK6	42.3	MK3 + 20M/12T
MK7	14.0	9M/5T (Wincha 600x600mm)
MK8	21.0	14R
MK9	18.0	10M/6T (Wincha 700x950mm)
MK10	15.0	9M/8T (Wincha Min. 125mm / Max. 325mm)
MK11	30.0	18M/12T (Wincha Min. 325mm / Max. 750mm)

**DISEÑO DE TANQUE VERTICAL PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA DE MAR CON FRP**

Universidad Nacional de Ingeniería  
 INFORME PARA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL  
 PLANO2 : FABRICACIÓN DE TANQUE DE FRP

Alumno: Christian Hinostraza Aquino	Código: 20022060k	Plano:
Asesor: Ing. Pedro Escudero Vega	08 / 08 / 2013	2 / 2



## ANEXO A

## [A] COMPOSICIÓN DE LAMINADO TIPO I ASME RTP-1

ASME RTP-1-2005

REINFORCED THERMOSET PLASTIC  
CORROSION RESISTANT EQUIPMENT

Table 2A-1 Standard Laminate Composition Type I

Nominal Thickness, in. [Notes (1), (2)]	Sequence of Plies																		Drafting Symbols
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
0.18	V	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	V2M
0.23	V	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	V3M
0.27	V	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	V4M
0.31	V	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	V5M
0.35	V	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	V6M
0.40	V	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	V7M
0.44	V	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	V8M
0.48	V	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	V9M
0.53	V	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	V10M
0.57	V	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	V11M
0.61	V	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	V12M
0.66	V	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	V13M
0.70	V	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	V14M
0.74	V	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	V15M

## GENERAL NOTES:

- Thicknesses above 0.74 in. nominal can be used by adding additional plies of mat.
- Actual thickness and glass content of each sequence of plies shall be established by each Fabricator based on his or her design basis laminate.
- Corrosion barrier (plies 1, 2, and 3) shall gel and exotherm before structural plies are added.
- Structural lay-up may be interrupted at intervals long enough to exotherm in accordance with Fabricator's procedure.
- A weight equivalent layer or layers of chopped strand glass or mat may be used in place of layers of 1.5 oz mat.

## NOTES:

(1) Nominal thickness is calculated as follows:

$$V = 10 \text{ mil surface mat (veil)} = 0.010 \text{ in./ply}$$

$$M = 1\frac{1}{2} \text{ oz/sq ft mat} = 0.043 \text{ in./ply}$$

(2) This information is based on historical data and may not reflect all laminates made today. Laminates made today are often thinner and have a higher glass content than noted in the Table. The Table should be used for establishing minimum glass plies per nominal laminate thickness. Ply thicknesses should be based on design basis laminates.

ANEXO B

[B] COMPOSICIÓN DE LAMINADO TIPO II ASME RTP-1

REINFORCED THERMOSET PLASTIC  
CORROSION RESISTANT EQUIPMENT

ASME RTP-1-2005

Table 2A-2 Standard Laminate Composition Type II

Nominal Thickness, in. [Notes (1), (2)]	Sequence of Plies																				Drafting Symbols
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
0.22	V	M	M	M	R	M	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	V,2M,MRM
0.29	V	M	M	M	R	M	R	M	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	V,2M,2(MR)M
0.37	V	M	M	M	R	M	R	M	R	M	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	V,2M,3(MR)M
0.41	V	M	M	M	R	M	R	M	R	M	M	...	...	...	...	...	...	...	...	...	V,2M,3(MR)M,M
0.49	V	M	M	M	R	M	R	M	R	M	M	R	M	...	...	...	...	...	...	...	V,2M,3(MR)M,MRM
0.56	V	M	M	M	R	M	R	M	R	M	M	R	M	R	M	...	...	...	...	...	V,2M,3(MR)M,2(MR)M
0.64	V	M	M	M	R	M	R	M	R	M	M	R	M	R	M	R	M	...	...	...	V,2M,3(MR)M,3(MR)M
0.68	V	M	M	M	R	M	R	M	R	M	M	R	M	R	M	R	M	M	...	...	V,2M,3(MR)M,3(MR)M,M
0.76	V	M	M	M	R	M	R	M	R	M	M	R	M	R	M	R	M	M	R	M	V,2M,3(MR)M,3(MR)M,MRM

GENERAL NOTES:

- (a) Thicknesses above 0.76 in. nominal can be used following pattern established for 0.76 in. thick laminate.
- (b) Actual thickness and glass content of each sequence of plies shall be established by each Fabricator based on his or her design basis laminate.
- (c) Corrosion barrier (plies 1, 2, and 3) shall gel and exotherm before structural plies are added.
- (d) Structural lay-up may be interrupted long enough to exotherm between adjacent "MM" plies. If required by fabrication procedure, location of exotherm plies may be changed by shifting plies 10 and 17 within the laminate body or by splitting an "M" ply into weight-equivalent layer(s).
- (e) A weight equivalent layer or layers of chopped strand glass or mat may be used in place of layers of 1.5 oz mat.

NOTES:

- (1) Nominal thickness is calculated as follows:
  - V = 10 mil surface mat (veil) - 0.010 in./ply
  - M = 1 1/2 oz/sq ft mat - 0.043 in./ply
  - R = 24 oz/sq yd woven roving - 0.033 in./ply
- (2) This information is based on historical data and may not reflect all laminates made today. Laminates made today are often thinner and have a higher glass content than noted in the Table. The Table should be used for establishing minimum glass plies per nominal laminate thickness. Ply thicknesses should be based on design basis laminates.



ASME RTP-1-2005

REINFORCED THERMOSET PLASTIC  
CORROSION RESISTANT EQUIPMENT

**Table 2A-3 Minimum Values of Flat Laminates**

Nominal Thickness, in.	Type	Ultimate Tensile Strength, psi [Note (1)]	Tensile Modulus, psi [Note (1)]	Ultimate Flexural Strength, psi [Note (2)]	Flexural Modulus, psi [Note (2)]
All	I	$9.0 \times 10^3$	$1.00 \times 10^6$	$16.0 \times 10^3$	$0.70 \times 10^6$
0.22	II	$12.0 \times 10^3$	$1.30 \times 10^6$	$19.0 \times 10^3$	$0.80 \times 10^6$
0.29	II	$13.5 \times 10^3$	$1.40 \times 10^6$	$20.0 \times 10^3$	$0.90 \times 10^6$
0.37 and above	II	$15.0 \times 10^3$	$1.50 \times 10^6$	$22.0 \times 10^3$	$1.00 \times 10^6$

GENERAL NOTE: The tabulated values remain unchanged up to 180°F. Above that temperature, measured properties may decrease.

NOTES:

(1) ASTM D 638 at 73°F or ASTM D 5083 at 73°F.

(2) ASTM D 790 at 73°F.

## ANEXO 4

### [D] NORMAS DE FABRICACIÓN APLICABLES AL FRP

## Métodos de Fabricación

#### Normas de Fabricación

La fabricación del equipo de PRFV se rige por diversas normas que proporcionan pautas y requisitos para los métodos de composición, rendimiento, construcción, diseño y prueba de tales equipos. La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM), la Oficina Nacional de Normas (NBS) y la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) publican numerosas normas para la fabricación de diversos tipos de estructuras de PRFV. A continuación, se señalan algunas normas comunes:

1. **Norma ASTM C 581** - Método de Prueba para Resistencia Química de Resinas Termoendurecibles Usadas en Estructuras Reforzadas con Fibra de Vidrio.
2. **Norma ASTM C 582** - Especificación para Laminados de Plástico Reforzados para Estructuras Autoportantes para Uso en Ambientes Químicos.
3. **Norma ASTM D 2105** - Método de Prueba de Propiedades de Tracción Longitudinal de Tubos de Plástico Termofijo Reforzado.
4. **Norma ASTM D 2143** - Método de Prueba de Resistencia a la Presión Cíclica de Tubos de Plástico Termofijo Reforzado.
5. **Norma ASTM D 2310** - Clasificación de Tubos de Resina Termofija Reforzada Hechos a Máquina.
6. **Norma ASTM D 2517** - Especificación para Tubos y Accesorios de Presión de Gas de Resina Epóxica Reforzada.
7. **Norma ASTM D 2562** - Práctica para Clasificar Defectos Visuales en Partes Moldeadas de Plásticos Termofijos Reforzados.
8. **Norma ASTM D 2563** - Práctica para Clasificar Defectos Visuales en Partes del Laminado de Plástico Reforzadas con Fibra de Vidrio.
9. **Norma ASTM D 2924** - Método de Prueba de Resistencia a la Presión Externa de Tubos de Resina Termofija.
10. **Norma ASTM D 2925** - Método de Prueba de Desviación de Haz de Tubos de Plástico Termofijo Reforzado Bajo un Flujo de Paso Completo.
11. **Norma ASTM D 2992** - Método para Obtener Bases de Diseño Hidrostático para Tubos y Accesorios de Resina Termofija Reforzada.
12. **Norma ASTM D 2996** - Especificación para Tubos de Resina Termofija Reforzada con Enrollado de Filamentos.
13. **Norma ASTM D 2997** - Especificación para Tubos de Resina Termofija Reforzada Moldeada por Centrifugación.
14. **Norma ASTM D 3262** - Especificación para Tubos de Desagüe de Mortero de Plástico Reforzado.
15. **Norma ASTM D 3299** - Especificación para Tanques Resistentes a Químicos de Resina termoendurecible Reforzada con Fibra de Vidrio con Enrollado de Filamentos.
16. **Norma ASTM D 3647** - Práctica para Clasificar Formas de Pultrusión de Plástico Reforzado Según la Composición.
17. **Norma ASTM D 3917** - Especificación para Tolerancia Dimensional de Formas de Pultrusión de Plástico Reforzado con Vidrio Termofijo.
18. **Norma ASTM D 3918** - Definiciones de Términos Relacionados con Productos de Pultrusión Reforzados.

19. **Norma ASTM D 3982** – Especificación para Cascos de Resina Termofija Reforzada con Fibra de Vidrio y Moldeada a Presión de Contacto a Medida.
20. **Norma ASTM D 4021** – Especificación para Tanques de Almacenamiento de Petróleo Subterráneo de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio.
21. **Norma ASTM D 4350** – Método de Prueba de Índice de Corrosividad de Plásticos y Complementos.
22. **Norma ASTM D 4385** – Práctica para Clasificar Defectos Visuales en Productos de Pultrusión de Plástico Reforzado Termofijo.
23. **Norma ASTM D 5364** – Guía para el Diseño, Fabricación y Construcción de Forros para Chimeneas de Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio con Unidades a Base de Carbón.
24. **Norma NBS PS 15-69** – Producto Voluntario para Equipos de Procesos Resistentes a Químicos de Poliéster Reforzado y Moldeado por Contacto a Medida (Edición Agotada).
25. **ASME/ANSI RTP-1** – Norma Nacional Americana para Equipos Resistentes a la Corrosión de Plástico Termofijo Reforzado.

Las normas también se utilizan para clasificar propiedades de retardo en la reacción al humo y fuego de equipos de PRFV. A continuación se señalan las normas sobre incendios a las que por lo general se hace mayor referencia:

1. **Norma ASTM D 635** – Método de Prueba para el Índice de Combustión o Extensión y Tiempo de Combustión de Plásticos Autoportantes en Posición Horizontal.
2. **Norma ASTM D 2863** - Método de Prueba para Medir la Concentración Mínima de Oxígeno para Mantener la Combustión Tipo Vela de Plásticos (Índice de Oxígeno).
3. **Norma ASTM E 84** – Método de Prueba de Características de Combustión de la Superficie de Materiales de Construcción.
4. **Norma ASTM E 162** – Método de Prueba de Inflamabilidad de la Superficie de Materiales Usando Una Fuente de Energía Térmica.
5. **Norma ASTM E 662** – Método de Prueba de Densidad óptica Específica del Humo Generado por Materiales Sólidos.
6. **Norma ASTM E 906** – Método de Prueba de Índices de Emisión de Humo Visible y Caliente para Materiales y Productos.
7. **Norma UL 94** – Pruebas de Inflamabilidad de Materiales de Plástico para Partes de Dispositivos y Accesorios.

## ANEXO 5

## [E] EXTRACTO DE NORMA ASME RTP-1 – 2005 [1]

REINFORCED THERMOSET PLASTIC  
CORROSION RESISTANT EQUIPMENT

ASME RTP-1-2005

Part 3  
Design

## 3-100 SCOPE

Part 3 sets forth design formulas and rules for the use of contact molded and filament wound RTP materials for the fabrication of corrosion resistant vessels. It is limited to vessels that operate up to and including 15 psig internal pressure as measured at the top of the vessel. The limit on external pressure is 15 psig. The hydrostatic head resulting from the weight of internal contents, or external loading, shall be additive.

(a) Part 3 contains two separate subparts

(1) Subpart 3A, Design by Rules

(2) Subpart 3B, Design by Stress Analysis

(b) Subpart 3A or 3B methods may be used at the discretion of the registered Professional Engineer for all or any part of RTP vessels.

(c) If specific rules of Subpart 3A do not apply, Subpart 3B design methods shall be used. Rules and limitations in Subpart 3A only apply to Subpart 3A.

(d) For vessels with an internal diameter greater than 16 ft, any vessel with a noncircular cross section, and any vessel using obliterated shell sections, Subpart 3B design rules shall be used.

## 3-200 GENERAL

The following parameters are common to all RTP equipment:

(a) The heads of RTP vessels shall be fabricated by contact molded laminates.

(b) The cylindrical shells of RTP equipment may be fabricated by contact molding or filament winding.

(c) Contact molded or filament wound laminate thicknesses are calculated for internal loadings and external loadings in accordance with the rules and procedure in Subpart 3A or 3B.

(d) Laminates shall be selected so that imposed load(s) does not produce stresses or strains in excess of those specified in Subpart 3A or Subpart 3B, as applicable.

(e) Ultimate tensile strength and modulus values of all types of laminates may require reduction when temperatures above 180°F are encountered. See para. 2A-300 or 2B-200 for design temperatures above 180°F.

(f) The average thickness of any pressure-containing part of a vessel shall not be less than 0.22 in. The procedure to determine the thickness of such a part is specified

in para. 6-920(f)(2). The permissible thickness tolerance of such a part is specified in Subpart 2C.

(g) The minimum ultimate axial tensile strength shall be 9,000 psi for all laminate construction.

SUBPART 3A  
DESIGN BY RULES

## 3A-100 LOADINGS

As a minimum, the loadings to be considered in designing RTP vessels shall include the following:

(a) external and internal pressure, including the additional pressure resulting from the static head of the contents

(b) weight of the vessel and contents under operating conditions

(c) superimposed static loads from machinery, other vessels, insulation, personnel, or platforms

(d) attachments

(1) internal (baffles, weirs, packing, etc.)

(2) external (lugs, support rings, legs, skirts, etc.)

(e) dynamic, such as fluid agitation, subliquid surface jets

(f) environmental, such as snow, wind, and seismic loadings

(g) thermal expansion and stresses caused by thermal gradients or restrained expansion and

(h) any other combination of loads specified in the UBRS

## 3A-200 DESIGN FOR TOTAL INTERNAL PRESSURE

## 3A-210 Calculation of Minimum Thickness of Cylindrical Shells

(a) Contact molded construction is calculated as follows:

$$\begin{array}{ll} \text{Hoop Loading} & \text{Axial Loading} \\ t_h = \frac{PD_i}{2S_u/F} & t_a = \frac{N_{ax}}{S_u/F} \end{array}$$

where

$D_i$  = inside diameter, in.

$F$  = design factor = 10

$N_{ax}$  = axial force per circumferential inch of shell, lb/in.

$P$  = total internal pressure, psig (internal pressure plus hydrostatic head)

- $S_a$  = ultimate axial tensile strength, psi  
 $S_h$  = ultimate hoop tensile strength, psi  
 $t_a$  = total wall thickness, in., for axial stress  
 $t_h$  = total wall thickness, in., for circumferential stress

The shell thickness shall be the greater of  $t_a$  or  $t_h$  at the point considered by the calculation.

(b) Filament wound construction is calculated as follows:

$$t_h = \frac{\text{Hoop Loading}}{2(0.001E_h)} \quad \text{Axial Loading} \quad t_a = \frac{N_{ax}}{S_a/F}$$

where

$E$  = hoop tensile modulus

The shell thickness shall be the greater of  $t_a$  or  $t_h$  at the point considered by the calculation.

### 3A-220 Design of Cylindrical Shells Under Combined Axial Loads

**3A-221 Tensile Loads.** The thickness of shells under combined axial tensile loads shall be equal to the largest value for  $t$  as calculated below.

(a) Shells under internal pressure must meet the requirements of para. 3A-210.

(b) For shells under combined axial tensile operating loads,  $t$  shall be calculated as follows:

$$t = \frac{M_A}{\pi(D/2)^2(S_a/F)} + \frac{F_A}{\pi D(S_a/F)} + \frac{PD}{4(S_a/F)}$$

where

- $D$  = inside diameter, in.  
 $F$  = design factor = 10  
 $F_A$  = axial tensile force resulting from operating loads, lb  
 $M_A$  = bending moment resulting from operating loads, in.-lb  
 $P$  = internal pressure, psi  
 $S_a$  = ultimate axial tensile strength, psi

(c) For shells under combined axial tensile loads resulting from operating loads and wind, snow, or seismic loads,  $t$  shall be calculated as follows:

$$t = \frac{|M_A| + |M_B|}{\pi(D/2)^2(S_a/F)} + \frac{F_A + F_R}{\pi D(S_a/F)} + \frac{PD}{4(S_a/F)}$$

where

- $F$  = design factor = 5  
 $F_R$  = axial tensile force resulting from wind, snow, or seismic loads, lb  
 $M_R$  = bending moment resulting from wind, snow, or seismic loads, in.-lb

**3A-222 Compressive Loads.** The thickness of shells under combined axial compressive loads shall be equal

to the largest value for  $t$  as calculated below.

(a) Shells under external pressure must meet the requirements of para. 3A-310.

(b) For shells under combined axial compressive operating loads,  $t$  shall be the greater of  $t_1$  or  $t_2$  calculated as follows:

$$t_1 = \frac{M_A}{\pi(D/2)^2(S_a/F_1)} + \frac{|F_A|}{\pi D(S_a/F_1)} + \frac{P_e D}{4(S_a/F_1)}$$

$$t_2 = \left[ \left[ \frac{|M_A|}{\pi(D/2)^2} + \frac{|F_A|}{\pi D} + \frac{P_e D}{4} \right] \frac{F_2(D/2)}{0.3E_{eff}} \right]^{0.5}$$

where

- $D$  = inside diameter, in.  
 $E_{eff}$  = axial flexural modulus, psi  
 $E_{eff} = (E_{eff} E_{eff})^{0.5}$   
 $E_{eff}$  = hoop tensile modulus, psi  
 $F_A$  = axial compressive force resulting from operating loads, lb  
 $F_1$  = design factor = 10  
 $F_2$  = design factor = 5  
 $M_A$  = bending moment resulting from operating loads, in.-lb  
 $P_e$  = external pressure, psi  
 $S_a$  = ultimate axial tensile strength, psi

(c) For shells under combined axial compressive loads resulting from operating loads and wind, snow, or seismic loads,  $t$  shall be the greater of  $t_1$  or  $t_2$  calculated as follows:

$$t_1 = \frac{|M_A| + |M_B|}{\pi(D/2)^2(S_a/F_1)} + \frac{|F_A| + |F_B|}{\pi D(S_a/F_1)} + \frac{P_e D}{4(S_a/F_1)}$$

$$t_2 = \left[ \left[ \frac{|M_A| + |M_B|}{\pi(D/2)^2} + \frac{|F_A| + |F_B|}{\pi D} + \frac{P_e D}{4} \right] \frac{F_2(D/2)}{0.3E_{eff}} \right]^{0.5}$$

where

- $F_R$  = axial compressive force resulting from wind, snow, or seismic loads, lb  
 $F_1$  = design factor = 5  
 $F_2$  = design factor = 5  
 $M_R$  = bending moment resulting from wind, snow, or seismic loads, in.-lb

### 3A-230 Minimum Thickness of Torispherical Heads

The minimum thickness,  $t$ , of torispherical heads shall be calculated as follows:

$$t = \frac{MPR_c}{2(S_a/F)}$$

where

- $M = \frac{1}{4}[3 + (R_c/r)^{0.5}]$   
 $R_c$  = head crown radius, in.  $\leq D$



$S_u$  = ultimate tensile strength, psi  
 $r$  = head knuckle radius, in.  $\geq 0.06R_c$

For a torispherical head where  $R_c = D_1$  and  $r = 0.06R_c$ , the minimum thickness,  $t$ , reduces to

$$t = \frac{0.885PR_c}{S_u/F}$$

For torispherical heads subject to internal loading, the knuckle radius shall be externally reinforced in accordance with Fig. 4-1, sketch (a). The reinforcement thickness shall be equal to the thickness of the head as calculated above. The thickness of a joint overlay near the knuckle radius tangent line of a dished head contributes to the knuckle reinforcement. For torispherical heads *not* subject to internal loading, see Fig. 4-1, sketch (b).

### 3A-240 Minimum Thickness of Ellipsoidal Heads

The minimum thickness of ellipsoidal heads (2:1) shall be calculated as follows:

$$t = \frac{PD_1}{2S_u/F}$$

### 3A-250 Minimum Thickness of Toriconical Heads

(a) The minimum thickness of toriconical heads that have a half apex angle,  $\alpha$ , not greater than 60 deg shall be calculated as follows:

The thickness of the conical portion,  $t_c$ , of a toriconical head, where the knuckle radius is at least 6% of the inside diameter of the head skirt and not less than three times the knuckle thickness, shall be

$$t_c = \frac{PD_1}{2 \cos \alpha (S_u/F)}$$

where

- $D_1$  = inside diameter of the conical portion of a toriconical head at the point of tangency to the knuckle, measured perpendicular to the axis of the cone (see Fig. 3-1), in.
- =  $D_1 = 2r(1 - \cos \alpha)$
- $D_2$  = inside diameter of head skirt (see Fig. 3-1), in.
- $r$  = inside knuckle radius, in.
- $\alpha$  = one-half of the included (apex) angle of the cone at the centerline of the head

The thickness of the knuckle,  $t_k$ , shall be

$$t_k = \frac{0.5MPR_c}{S_u/F}$$

where

- $M = 0.25(3 + \sqrt{R_c/r})$
- $R_c = D_1/(2 \cos \alpha)$

and  $r \geq 3t_k$ . If not, change inside knuckle radius or use Subpart 3B.

For toriconical heads, compute the knuckle reinforcement length as follows:

$$L_c = \sqrt{\frac{D_1 t_c}{\cos \alpha}}$$

(b) Toriconical heads having a half apex angle,  $\alpha$ , greater than 60 deg shall comply with Subpart 3B.

(c) For toriconical heads subject to internal loading, the knuckle radius shall be externally reinforced in accordance with Fig. 4-1, sketch (a). The total reinforced knuckle thickness,  $2t_k$ , shall be calculated in accordance with the rule in para. 3A-250(a). The thickness of a joint overlay near the knuckle radius tangent line of a toriconical head contributes to the knuckle reinforcement. For toriconical heads not subject to internal loading, see Fig. 4-1, sketch (b).

(d) When Subpart 3A design rules are used, the secondary bond overlays shall be in accordance with para. 4-320.

(e) Openings for bottom nozzles in toriconical heads are limited to 10% of the toriconical head diameter. Openings greater than 10% require special consideration and stress levels must satisfy the limits of Subpart 3B.

### 3A-260 Minimum Thickness of Flat Bottom Heads

(a) The minimum thickness for fully supported flat bottom heads using Type I laminates, subject to hydrostatic pressure only, shall be as follows:

- (1) 0.27 in. for inside diameters  $\leq 72$  in.
- (2) 0.31 in. for inside diameters  $> 72$  in. to  $\leq 96$  in.
- (3) 0.40 in. for inside diameters  $> 96$  in. to  $\leq 144$  in.

(4) See para. 3A-260(c) for diameters over 144 in.

(b) The minimum thickness for fully supported flat bottom heads using Type II laminates, subject to hydrostatic pressure only, shall be as follows:

- (1) 0.22 in. for inside diameters  $\leq 72$  in.
- (2) 0.29 in. for inside diameters  $> 72$  in. to  $\leq 96$  in.
- (3) 0.37 in. for inside diameters  $> 96$  in. to  $\leq 144$  in.

(4) See para. 3A-260(c) for diameters over 144 in.

The thicknesses given in (1), (2), and (3) above have proven adequate to prevent damage during normal conditions associated with fabrication, handling, shipping, and installation.

(c) For inside diameters that exceed 144 in., design analysis shall be undertaken to establish a bottom thickness that will withstand the conditions in para. 3A-260(b) above without resultant damage.

(d) The radius of the bottom knuckle of a flat bottom vessel shall not be less than 1 in. if the diameter is 4 ft or less, and 1½ in. for diameters exceeding 4 ft. The minimum thickness of the radius section shall be equal to the combined thickness of the shell wall and the bottom. The reinforcement of the knuckle radius area shall

$$P_a = 0.36(E_f/F)(t/K_0 D_o)^2$$

For elliptical heads, compute the minimum thickness,  $t$ , as follows:

$$t = K_0 D_o (P_a / 0.36 E_f)^{0.5}$$

where

- $D_o$  = outside diameter of shell, in.  
 $E_f$  = flexural modulus of elasticity for head, psi  
 $K_0$  = factor depending on ellipsoidal head proportions as follows:

Major to Minor Axis Ratio	$K_0$
2.0	0.90
1.8	0.81
1.6	0.73
1.4	0.65
1.2	0.57
1.0	0.50

- $P_a$  = allowable external pressure, psi  
 $P_d$  = design external pressure, psi  
 $R_0$  = outside crown radius of head, in.

### 3A-330 Stiffening Rings

The required moment of inertia,  $I_s$ , of a circumferential stiffening ring for cylindrical shells under external pressure or internal vacuum shall not be less than that determined by the following formula:

$$I_s = PL_s D_o^3 / 24 E_h$$

where

- $D_o$  = shell outside diameter, in.  
 $E_h$  = hoop tensile modulus, psi  
 $F$  = design factor = 5  
 $I_s$  = moment of inertia, in.<sup>4</sup>, of stiffener and effective length of shell. The effective length of shell shall not be greater than the length of the shell under the ring plus no more than  $0.55(D_{st})^{0.5}$  on each side of the centroid of the ring. Portions of shell shall not be considered as contributing to more than one stiffening ring.  
 $L_s$  = one-half of the distance from the centerline of the stiffening ring to the next line of support on one side, plus one-half of the centerline distance to the next line of support on the other side of the stiffening ring, both measured parallel to the axis of the cylinder, in. A line of support is  
 (a) a stiffening ring that meets the requirements of this paragraph  
 (b) a circumferential line on a head at one-third the depth of the head from the head tangent line  
 (c) a cone-to-cylinder junction  
 $P$  = actual external pressure, psi

$t$  = wall thickness of shell, in. (nominal)

Typical half-round stiffener sizes and dimensions for different values of  $L_s$  are shown in Fig. 4-7. Other stiffener profiles meeting the required moment of inertia may be used.

### 3A-340 Top Head Loads

The top head, regardless of shape, shall be designed to support a 250 lb load on a 16 sq in. compact area without damage and with a maximum deflection of 0.5% of the shell diameter, or 0.5 in., whichever is less. For torispherical heads, this requirement can be satisfied by using the method presented in Appendix NM-11.

### 3A-350 Toriconical Heads

(a) For toriconical heads whose half apex angle,  $\alpha$ , is  $\leq 60$  deg, the maximum allowable external pressure between stiffening elements is computed by the following:

$$P_a = \frac{K(E_f/F)(D_o/L)[(t_c \cos \alpha)/D_o]^{2.5}}{1 - 0.45[(t_c \cos \alpha)/D_o]^{0.5}}$$

Also check for stress in the cone,  $S_c$ , as follows:

$$S_c = \frac{P_d D_c}{2t_c \cos \alpha}$$

The stress,  $S_c$ , must not exceed  $S_u/F$ .

For toriconical heads, compute the knuckle reinforcement length as follows:

$$L_c = \sqrt{\frac{D_o t_k}{\cos \alpha}}$$

The thickness of the knuckle,  $t_k$ , shall be

$$t_k = \frac{0.5 M P_d R_c}{S_u F}$$

where

- $D_c$  =  $D_i - 2r(1 - \cos \alpha)$ , in.  
 $D_i$  = inside diameter of the conical portion of a toriconical head at the point of tangency to the knuckle, measured perpendicular to the axis of the cone (see Fig. 3-1), in.  
 $D_o$  = maximum outside diameter at the large end of the conical segment between stiffening elements (see Fig. 3-1), in.  
 $E_{ac}$  = axial tensile modulus for the cone, psi  
 $E_{hc}$  = hoop tensile modulus for the cone, psi  
 $E_{rc}$  = resultant modulus for the cone, psi  
 $= (E_{ac} E_{hc})^{0.5}$   
 $F$  = design factor = 5  
 $K$  =  $4 - 0.75(E_{rc}/1,000,000)$   
 $L$  = conical segment slant height (see Fig. 3-1), in.  
 $M$  =  $0.25(3 + \sqrt{R_c/r})$



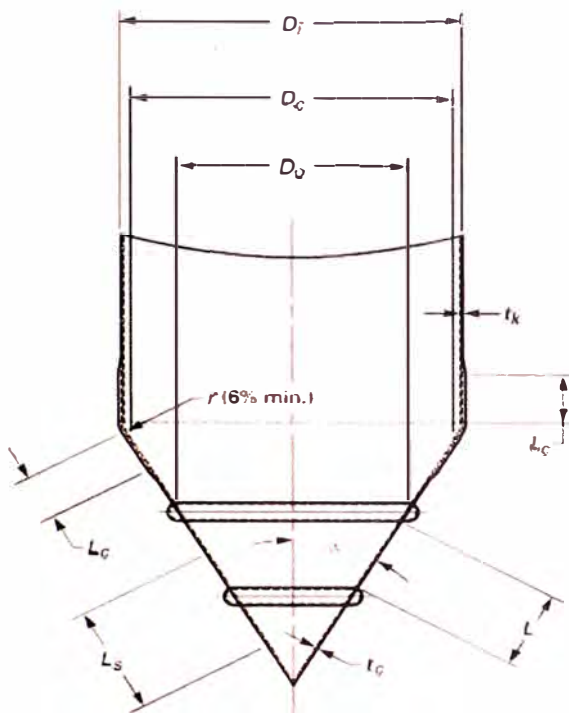


Fig. 3-1 Toriconical Head Dimensions

- $P_a$  = allowable external pressure, psi  
 $P_d$  = design external pressure, psi  
 $R_c = D_c / (2 \cos \alpha)$   
 $S_u$  = ultimate tensile strength, psi  
 $r$  = inside knuckle radius (see Fig. 3-1), in. (6% minimum and at least three times the knuckle thickness)  
 $t_c$  = cone thickness (see Fig. 3-1), in.  
 $t_k$  = knuckle thickness (see Fig. 3-1), in.  
 $\alpha$  = one-half the apex angle in toriconical heads and sections (see Fig. 3-1), deg

(b) When the half apex angle  $\alpha$  exceeds 60 deg, the toriconical head shall be designed in accordance with Subpart 3B.

(c) For toriconical heads subject to external pressure, the knuckle radius shall be externally reinforced in accordance with Fig. 4-1, sketch (a). The total knuckle thickness  $t_k$  shall be calculated in accordance with the rule in para. 3A-350(a). The thickness of a joint overlay near the knuckle radius tangent line of a toriconical head contributes to the knuckle reinforcement. For toriconical heads not subject to external or internal pressure, see Fig. 4-1, sketch (b).

(d) When Subpart 3A design rules are used, the secondary bond overlays shall be in accordance with para. 4-320.

### 3A-360 Stiffening Rings

The required moment of inertia,  $I_s$ , of a circumferential stiffening ring for conical shells under external pressure shall not be less than that determined by the following formula:

$$I_s = \frac{P_d L_s (D_c / \cos \alpha)^3 T}{24 E_{ts}}$$

where

- $E_{ts}$  = hoop tensile modulus for the stiffening ring, psi  
 $L_s$  = one-half of the conical segment slant distance from the centerline of the stiffening ring to the next line of support on one side, plus one-half of the conical segment slant distance from the centerline of the stiffening ring to the next line of support on the other side (see Fig. 3-1), in.  
 A line of support is  
 (a) a stiffening ring that meets the requirements of this paragraph  
 (b) a toriconical head-to-cylinder junction  
 (c) apex of a toriconical head

### 3A-400 SEISMIC, WIND, AND SNOW LOADINGS

#### 3A-410 Design Loadings

The loadings to be considered in designing vessels shall include seismic loads, wind loads, and snow loads, determined by vessel installation, location, and customer specification as defined in the UBRS. The effects of liquid sloshing in large vessels shall be considered. The design shall be certified by a qualified registered Professional Engineer experienced in the design of reinforced plastics.

#### 3A-420 Specifying Design Loadings

The magnitude and orientation of the forces enumerated in para. 3A-410 shall be as specified by the UBRS (see para. 1-200). Examples of codes and design calculations are shown in Appendix NM-3.

#### 3A-430 Assumed Design Loadings

The vessel design shall be analyzed under the following loading combinations:

- operating loads plus seismic load
- operating loads plus snow load
- operating loads plus wind load
- wind loads on an empty vessel

Seismic, wind, and snow loads are considered to act separately. The forces are not cumulative.

## ANEXO 6

## [F] TABLA DE RESISTENCIA QUÍMICA DE LAS RESINAS [7]

## RESISTENCIAS QUÍMICAS DE LAS RESINAS VINILÉSTER

Fuente: Manual de Ingeniería y Resistencia Química DOW PLÁSTICOS

AMBIENTE QUÍMICO	TEMPERATURA MÁXIMA RECOMENDADA EN CELSIUS			
	CONC %	VINILESTER VISCOSIDAD MEDIA	VINILESTER BASE NOVOLAK	VINILESTER RESISTENTE A INFLAMACIÓN
Aceite Combustible	100	82	99	82
Aceite de Coco	Toda	82	93	82
Aceite de Linaza	100	99	110	99
Aceite de Oliva	100	99	121	99
Acetato de Bario	Toda	82	82	
Acetato de Butilo	100	NR	27	NR
Acetato de Plomo	Toda	99	110	99
Acetona	100	NR	NR	NR
Ácido Acético	10	99	99	99
Ácido Arsénico	Toda	38	38	
Ácido Benceno Sulfónico	50	35	35	35
Ácido Benzoico	Saturado	99	99	99
Ácido Bórico	Toda	99	99	99
Ácido Bromídrico	62	38	38	38
Ácido Butírico	100	27	49	27
Ácido Cáprico	Toda	27	49	27
Ácido Cítrico	Toda	99	99	99
Ácido Clorhídrico y Orgánicos (6)(8)(13)		NR	NR	NR
Ácido Clorosulfónico	10	NR	NR	NR
Ácido Crómico	30	NR	NR	NR
Ácido Decanoico	Toda	38	38	38
Ácido 2,4		49	49	49
Diclorofenoxiacético (4)				
Ácido Esteárico	Toda	99	99	99
Ácido Fenol Sulfónico	65	NR	27	NR
Ácido Fórmico	98		38	
Ácido Fosfórico	85	99	99	99
Ácido Fosforoso	70	38	38	38
Ácido Ftálico	Toda	99	99	99
Ácido Gálico	Saturado		38	
Ácido Hipofosforoso	50	49	49	49
Ácido Láctico	Toda	99	99	99
Ácido Maleico	100	99	121	99
Ácido Nítrico	40	NR	27	NR
Ácido Oleico	Toda	99	93	99
Ácido Oxílico	Toda	99	99	99
Ácido Perclórico	30	38	38	38
Ácido Selenioso	Toda	99	99	99
Ácido Sulfúrico	25	99	99	99
Ácido Sulfúrico	75	38	49	38
Ácido Sulfúrico	93	NR	NR	NR
Ácido Sulfuroso	10	49	49	49

Ácido Tánico	Toda	99	99	99
Ácido Tartárico	Toda	99	99	99
Ácido Tolueno Sulfónico (6)	Toda	99	99	99
Ácido Tricloroacético	50	99	99	99
Ácido Yodídrico	40	65	65	65
Ácido Grasos	Toda	99	121	99
Acrilato de Butilo (12)	100	NR	27	NR
Agua Desionizada	100	82	82	82
Agua Destilada	100	82	82	82
Agua Salada	30	99	121	
Alcohol Alílico (12)	100	NR	NR	NR
Alcohol Amílico	Toda	49	99	49
Alcohol Benzílico	Toda	NR	38	NR
Alcohol Butílico	Toda	49	49	49
Alcohol de Polivinila	Toda	38	49	
Alcohol Etilico	95	27	38	27
Alcohol Furfúrico (12)	100	NR	NR	NR
Alcohol Isopropílico	Toda	49	49	49
Alcohol Láurico	100	65	82	65
Alcohol Butírico	100	NR	38	NR
Aluminato de Sodio	Toda	49	49	49
Anhídrido Acético	100	NR	38	NR
Azúcar de Maíz	Toda	110		
Baño de Cromo		54	54	54
Benceno (12)	100	NR	38	NR
Benzoato de Butilo	70		38	
Bicarbonato de Amonio	10	71	71	71
Bicarbonato de Potasio (1)	10	65	65	65
Bicarbonato de Sodio(1)	50	82	82	82
Bisulfito de Amonio	Saturado	99	99	99
Borato de Sodio	Saturado	99	99	99
Boro	100	99	99	99
Bromato de Amonio	43	71	71	
Bromato de Sodio	5	60	65	60
Bromo, gas húmedo	100	38	38	38
Bromuro de Amonio	43	71	71	
Bromuro de Bario	Toda	99	99	99
Bromuro de Calcio	Toda	99	99	99
Bromuro de Litio	Saturado	99	121	99
Carbón Activado		82	99	82
Carbonato: Bicarbonato de Sodio (1)	20:15	82	82	82
Carbonato de Amonio	Toda	65	65	65
Carbonato de Bario	Toda	99	121	99
Carbonato de Calcio	Toda	82	82	82
Carbonato de Litio (1)	Saturado	82	82	82
Carbonato de Magnesio	Toda	82	82	82
Carbonato de Potasio(1)	10	65	65	65
Carbonato de Potasio (1)	25	65	65	65
Carbonato de Sodio (1)	35	82	82	82
Cerveza		49		
1,1,1-Tricloroetano inhibido	100	38	49(7)	38
Cianuro de Bario	Toda	65	65	65
Cianuro de Cobre	Toda	99	99	99
Cianuro de Potasio y Oro	12	38	38	38

Cianuro de Sodio	50	99	99	99
Ciclohexano	100	49(7)	65(7)	49
Citrato de Cobalto	12	82	82	
Clorato de Calcio	Toda	99	121	10
Clorato de Sodio	50	99	99	99
Clorhidrato de Aluminio	50	99	99	99
Cloro: ácido clorhídrico, húmedo Clorobenceno	8-10	99	177	
	100	NR	38	NR
Cloroformo	100	NR	NR	NR
Clorotolueno	100	27	49(7)	38
Cloruro de Alilo	Toda	27	27	27
Cloruro de Aluminio	Toda	99	121	99
Cloruro de Amonio	Toda	99	99	99
Cloruro de Bario	Toda	99	99	99
Cloruro de Litio	Saturado	99	99	99
Cloruro de Magnesio	Toda	99	121	99
Cloruro de Manganeso	Toda	99	99	99
Cloruro de Níquel	Toda	99	99	99
Cloruro de Potasio	Toda	99	99	99
Cloruro de Sodio	50	38	39	38
Cloruro de Tionila		N	NR	N
Cloruro de Zinc	70	R	154	r
Cloruro Férrico	Toda	99	99	99
Cloruro Ferroso	Toda	99	99	99
Cloruro Mercúrico	Toda	99	99	99
Cromato de Sodio	50	99	99	99
Cumeno	100	27	49	27
Decanol	100	49	82	
Detergentes Orgánicos pH 12	100	65	82(11)	65
Detergentes Sulfatados	100	71	82	71
Dibrometa de Etileno	100	NR	NR	NR
Dibromofenol		NR	38	NR
Diclorobenceno	100	NR	49	NR
Dicloroetileno	100	NR	NR	NR
Dicloropropano	100	NR	38	NR
Diclorotolueno	100	27	49	27
Dicloruro de Etileno	100	NR	27	NR
Dicromato de Potasio	Toda	99	99	99
Dicromato de Sodio	100	99	99	99
Dietil Carbonato	100	NR	38	NR
DietilBenceno	100	38	65	38
2,4-D(Dimetilamina) DMA 4		49	65	49
Dimetil Formamida	100	NR	NR	NR
Dimetil Ftalato	100	65	82	65
Dióxido de Azufre, gas húmedo		99	121	99
Dióxido de Cloro, húmedo	Saturado	93	93	93
Dipropileno Glicol	100	82	99	82
Disulfuro de Carbono	100	NR	NR	NR
Divinibenceno	100	38	49(7)	38
Dodeceno	100	65	82	65
Electrolito de Cromo		54	54	54
Electrolito de Zinc		65	65	65

Ésteres de Ácidos grasos	100	82	82	82
Estireno	100	NR	49	NR
Etanol	50	38	65	38
Éter Dietílico	100	NR	NR	NR
Éter Etílico	100	NR	NR	NR
Etilbenceno	100	27	49	27
Fenol	88	NR	21	NR
Ferricianuro de Potasio	Toda	99	99	99
Ferricianuro de Sodio	Toda	99	99	99
Fluido Hidráulico	100	82	82	82
Fluor, Gas(1)		27	27	27
Fluoruro de Aluminio (1)(7)	Toda	27	27	27
Fluoruro de Sodio (1)	Toda	82	82	82
Fluoruro de Hidrógeno, vapor (1)		82	82	82
Fluoruros: Ácido clorhídrico (1)	30:10	49	49	49
Formaldehído (5)	Toda	65	65	65
Fosfato de Diamonio	65	99	99	99
Fosfato de Dipotasio	50	38	38	
Fosfato de Magnesio	Toda	49		
Fosfato de Sodio	10	99	99	99
Fosfato de Tributilo	100	49	60	49
Gasolina (5% Metanol)	100	49	49	49
Gasolina, aviación	100	82	82	82
Gasolina sin plomo, sin alcohol	100	49	65	49
Glicerina	100	99	99	99
Glicol	Toda	99	99	99
Glucosa	100	99	121	38
n-Heptano	100	99	99	99
Hexacloroetano (12)		NR	NR	NR
Hexano	100	71	71	71
Hidrazina	100	NR	NR	NR
Hidrosulfuro de Sodio	Toda	82	82	82
Hidróxido de Aluminio	100	82	82	82
Hidróxido de Amonio (1)	29	38	38	38
Hidróxido de Bario	Toda	65	65	65
Hidróxido de Calcio (1)	100	99	99	99
Hidróxido de Litio (1)	Saturado	82	82	82
Hidróxido de Magnesio	100	99	99	99
Hidróxido de Potasio (1)	45	82	82(11)	82
Hidróxido de Sodio (1)(12)	50	99	99(11)	82
Hipoclorito de Butilo	98	NR	NR	NR
Hipoclorito de Calcio (1)(2)(3) (5)(6)	Toda	82	65(11)	82
Hipoclorito de Litio (1)(2)(3) (5)(6)	Toda	82	65(11)	82
Hipoclorito de Sodio (1)(2)(3) (5)(6)	18	82	65(11)	82
Látex		49	49(7)	49
Látex Acrílico		49	49	49
Leche	100	99		
Licor Blanco (papel y celulosa)		93	82	93
Licor de Caña de Azúcar y Melaza	Toda	82		

Melaza	100	49		
Mercurio	100	99	121	99
Metanol	100	NR	38	NR
Metil Etil Cetona (6)(12)	100	NR	21	NR
Metilamina	100	NR	NR	NR
Monoclorobenceno	100	NR	38	NR
Monofosfato de Sodio	Toda	99	99	99
Nafta	100	82	99	82
Naftaleno	100	99	99	99
Nitrato de Aluminio	10	82	82	82
Nitrato de Amonio	Toda	99	121	104
Nitrato de Calcio	Toda	99	99	99
Nitrato de Cobalto (7)	15	49	49	
Nitrato de Cobre	Toda	99	99	99
Nitrato de Magnesio	Toda	99	99	99
Nitrato de Níquel	Toda	99	99	99
Nitrato de Plata	Toda	99	99	99
Nitrato de Potasio	Toda	99	99	99
Nitrato de Sodio	Toda	99	99	99
Nitrato de Zinc	Toda	99	121	99
Nitrato Ferroso	Toda	99	99	99
Nitrobenceno	100	NR	38	NR
Oxalato de Amonio	Toda	65		
Oxalato de Potasio	Toda	65		
Oxalato de Sodio	Saturado	99		
Óxido de Butileno	100	NR	NR	NR
Óxido de Etileno	100	NR	NR	NR
Óxido de Propileno	100	NR	NR	NR
Ozono	5	60	60	60
Palmitato de Isopropilo	100	99	110	99
Parafina Clorada	Toda	82	82	82
Percloroetileno	100	27	49	27
Perganmanato de Potasio	Toda	99	99	99
Peróxido de Hidróxido	30	65	65	65
Piridina	100	NR	NR	NR
Pirofosfato de Potasio	60	54	65	54
Querosén	100	82	82	82
Resina Fenol Folmaldeído	Toda	38	49	
Resina Urea Formaldehído	100	38	49	38
Salmuera	Toda	99	99	99
Salsa de Tomate		88		
Shoyo, condimento chino		38		
Silicato de Sodio	Toda	99		
Soda Caústica ( vea Hidróxido de Sodio)				
Solución de Cevada		74		
Solución de Cromo		49	65	49
Solución de Galvanización- Cianuro de Cadmio		82	82	82
Solución de Galvanización- Cianuro de Zinc (1)		82	82	82
Solución de Galvanización- Oro		38	38	38
Solución de Galvanización- Plata		82	82	82



Solución de Galvanización-Platino		82	82	82
Sulfato de Aluminio	Toda	99	121	99
Sulfato de Amonio	Toda	99	121	104
Sulfato de Anilina	Toda	99	99	99
Sulfato de Bario	Toda	99	121	99
Sulfato de Calcio	Toda	99	121	99
Sulfato de Cobre	Toda	99	121	99
Sulfato de Cromo	Toda	82	82	82
Sulfato de Dietilo	100	38	49	38
Sulfato de Etilo	100	38	38	38
Sulfato de Magnesio	Toda	99	121	99
Sulfato de Manganeso	Toda	99	99	99
Sulfato de Níquel	Toda	99	99	99
Sulfato de Potasio	Toda	99	99	99
Sulfato de Sodio	Toda	99	99	99
Sulfato de Zinc	Toda	99	121	99
Sulfato Férrico	Toda	99	99	99
Sulfato Ferroso	Toda	99	99	99
Sulfito de Amonio	Saturado	65	65	65
Sulfito de Calcio	Toda	82	82	82
Sulfito de Sodio	Toda	99	99	99
Sulfuro de Amonio	Saturado	49	49	
Sulfuro de Dimetilo	100	NR	27	NR
Sulfuro de Hidrógeno	5	82	177	82
Sulfuro de Hidrógeno	100	82	99	
Sulfuro de Sodio	Toda	99	99	99
Tartarato de Sodio	Toda	99	99	99
Tetracloro Etano	100	NR	49	NR
Tetracloro Etileno	100	27	49	
Tolueno	100	27	49	27
Tricloroetano	100	38	49	38
Tricloroetileno	100	NR	NR	NR
Tricloruro Fosforoso		NR	NR	NR
Urea	50	65	65	65
Vapor		99	104	
Vinagre	100	99	99	99
Vino (Azúcar y Alcohol)		32	32	
Xileno	100	27	49(7)	27
Yodo, cristales		100	65	65
Yodo, vapor	100	65	82	65
Zumo de Caña (Alcohol y Azúcar (1))		30	30	

- Utilizar doble velo sintético en la capa interna
- Se recomienda un postendurecimiento para aumentar la vida útil.
- Se recomienda el sistema de endurecimiento con peróxido benzoilo/dimetil anilina para aumentar el periodo de vida útil
- La recomendación es válida siempre y cuando el solvente utilizado para la difusión también sea el recomendado
- Satisfactoria hasta la máxima temperatura de estabilidad del producto.
- Consulte apoyo técnico adicional.
- Probablemente satisfactorio bajo temperaturas más elevadas, pero la temperatura indicada es la máxima recomendada según las informaciones disponibles.
- Se debe utilizar doble velo de superficie y barrera química de 5 MM
- Utilizar doble velo superficial
- Consultar si hubiera ácido sulfúrico presente.
- Utilizar resina a base Novolak de poca contracción en el endurecimiento.
- Si la operación se hace a niveles límites utilizar resina a base de Novolak de poca contracción en el endurecimiento.
- Se recomienda la manta tipo ECR en el laminado interno.

Según las normas ASTM C581