

## FILAMENT WINDING

### Introdução:

Estruturas cilíndricas de fibras de vidro podem ser produzidas em diâmetros desde alguns centímetros até 3,5 m, em várias cores e materiais, visando satisfazer as diversas condições de uso, que podem variar desde vácuo total até 2000 psi (pressão interna) para uma grande variedade de ambiente desde água até ácidos corrosivos em altas temperaturas.

Tamãna variedade de aplicações demanda vários processos de fabricação, cada um com seus méritos e deméritos que os qualificam economicamente para determinadas situações. Neste trabalho procuramos apresentar ao leitor os três processos básicos para fabricação de tubos ou tanques em fiberglass com ênfase especial no processo de “filament winding”.

### Filament Winding

Neste processo as fibras contínuas sob a forma de diversos fios paralelos (roving) são enroladas segundo uma hélice de passo regulável em um mandril rotatório. Estas fibras de reforço podem ser enroladas secas, a resina sendo aplicada sobre o mandril por meio de “spray” ou queda em cortina por gravidade, ou pré-impregnadas em resina. Em ambos os casos o ângulo de enrolamento (passo da hélice) pode ser controlado pela conjugação do movimento da cabeça alimentadora do roving com a velocidade de rotação do mandril.

Alguns fabricantes empregam “prepreg” (fibras de vidro pré-impregnadas por resina engrossada quimicamente para facilidade de manuseio e aplicação). Os “prepregs” permitem maiores velocidades de enrolamento (porque a resina não é atirada fora do mandril), permite controle na relação vidro-resina e minimiza abrasão das fibras de vidro. Por outro lado, os “prepregs” apresentam as desvantagens de serem mais caros e possuírem “shelf-life” (tempo máximo permissível no armazenamento) limitado.

Se a peça a ser moldada é cilíndrica de tal modo que possa ser separada do mandril, a indústria utiliza principalmente mandris metálicos (aço ou alumínio).

Em aplicações onde o volume de produção é pequeno, moldes mais baratos podem ser empregados, tais como madeira, gesso, etc.

### Cooperativismo em Materiais Compósitos

Para peças que não podem ser separadas mecanicamente de mandril, utiliza-se mandris colapsáveis ou solúveis (sal, areia agregada em PVC, etc.). Algumas companhias empregam mandris infláveis enquanto outras preferem mandris de resinas termoplásticas (PVC) que não são desmoldáveis, constituindo parte integrante da estrutura.

Em uma estrutura cilíndrica fabricada pelo processo de “filament winding” uma variável importante no processo é o ângulo de enrolamento dos filamentos de vidro no mandril. A fig. 2 nos apresenta uma dessas estruturas com ângulo de enrolamento  $\alpha$ , formado pelo eixo do tubo e os fios contínuos de vidro.

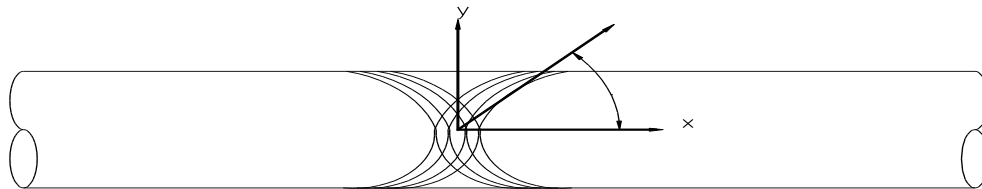


fig. 2

A fig. 3 nos apresenta uma estrutura em que as fibras são dispostas paralelamente entre si e formando um ângulo  $\alpha$  com a direção x ao longo do eixo da estrutura.

Desprezando a influência da matriz plástica, isto é, supondo que as cargas sejam suportadas apenas pela fibras de vidro, temos que a resistência do material varia conforme  $\cos^2 \alpha$ . A rigor, tal hipótese é válida apenas para  $\alpha$  menor que  $40^\circ$ , a partir do que a influência da resina passa a ser considerável.

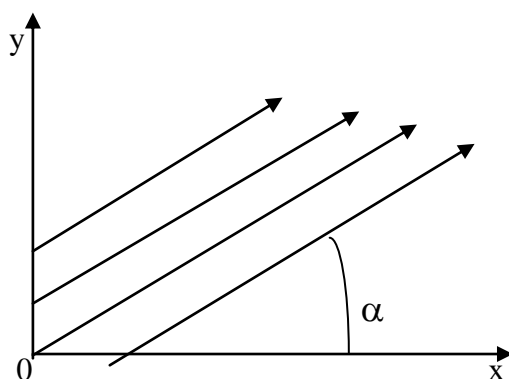


Fig. 3

Sendo  $\tau$  a resistência de material ao longo das fibras, obtemos os seguintes valores para  $\tau_x$  e  $\tau_y$  :

$$\tau_x = \tau \cos^2 \alpha$$

$$\tau_y = \tau \sin^2 \alpha$$

Sabendo que para um tanque submetido à pressão interna a tensão principal  $\tau_y$  é igual ao dobro da tensão principal  $\tau_x$ , para a obtenção de uma estrutura bem balanceada, os filamentos de reforço devem ser orientados segundo um ângulo tal que:

$$\begin{aligned}\tau_y &= 2 \tau_x \\ \tau \sin^2 \alpha &= \tau \cos^2 \alpha \\ \text{tg}^2 \alpha &= 2 \quad \therefore \alpha = 54,73^\circ\end{aligned}$$

Caso a estrutura seja submetida a solicitações internas circunferenciais (tanque cilíndrico vertical, tubulações pressurizadas com extremidade aberta, etc.):

$$\begin{aligned}\tau_x &= 0 \\ \tau_y &= \tau \quad \text{isto é, } \alpha = 90^\circ \text{ (enrolamento circunferencial)}\end{aligned}$$

Em se tratando de tanques horizontais sobre 2 apoios, sem pressão interna, geralmente o critério determinante da espessura da estrutura é flambagem axial devido a tensões de compressão na flexão e o ângulo de enrolamento  $\alpha$  deve ser o menor possível compatível com o processo visando aumentar o módulo de elasticidade axial.

Para aplicações da estrutura submetida à pressão externa (vácuo), supondo a estrutura infinitamente longa (caso contrário o problema se torna mais complicado devido à influência de anéis de reforço, tampas, etc.) a fórmula seguinte nos diz que a geometria da estrutura pode ser mais importante que suas propriedades mecânicas e neste caso o processo de moldagem manual pode se tornar mais econômico devido ao aumento de espessura com o emprego de materiais mais baratos.

$$P_{cr} = \frac{E x t^3}{4 (1 - \gamma^2) R^3}$$

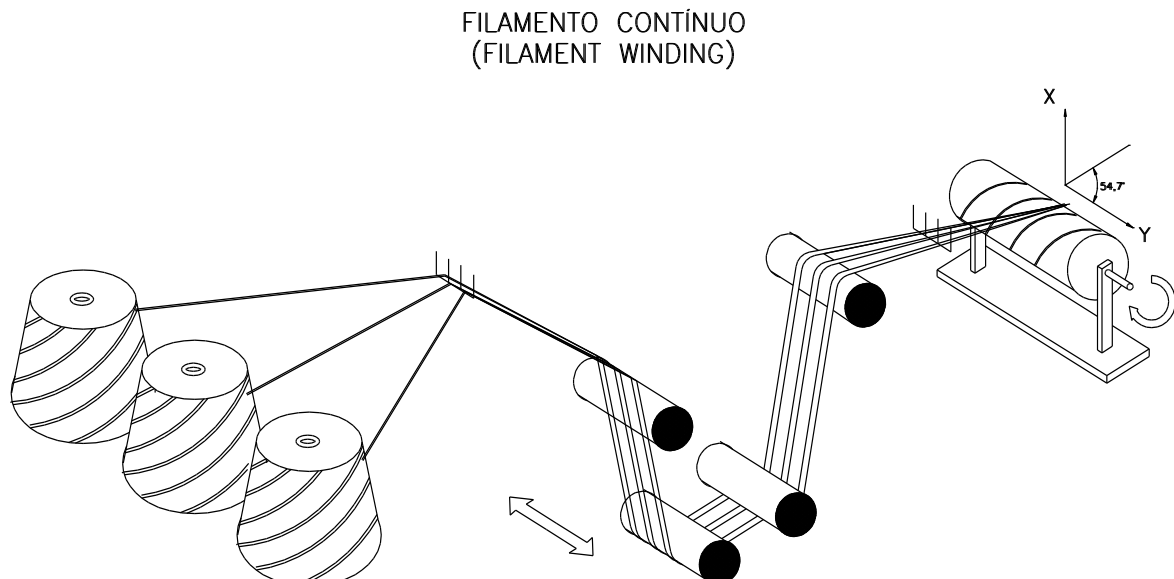
- $P_{cr}$  = pressão negativa crítica (flambagem)
- $E$  = módulo de elasticidade circunferencial
- $t$  = espessura
- $\gamma$  = relação de Poisson
- $R$  = raio da estrutura

Dependendo das condições de uso é mais econômico o aumento da espessura da estrutura (adição de carga, maior proporção de resina, etc.) por um processo de fabricação mais barato, do que o aumento do módulo de elasticidade pelo posicionamento circunferencial das fibras de vidro como no processo de “filament winding”.

## O Processo

A fig. 4 nos mostra esquematicamente o processo de “filament winding” helicoidal com as fibras sendo banhadas em resina antes do enrolamento.

A resina, para esta operação, deve ter viscosidade variando entre 500 e 1000 cps (dependendo da velocidade do processo, viscosidade até 1500 cps são aceitáveis) e são colocadas já catalisadas e aceleradas dentro de uma banheira; alguns fabricantes empregam resinas com um “pot life” de até 10 minutos, casos em que equipamentos especiais (normalmente misturadores estático) formulam e despejam resina na banheira na mesma razão em que a mesma é retirada pelos fios impregnados. Este procedimento minimiza perdas, permite velocidades de enrolamento mais elevadas e menores ciclos de moldagem. Apesar dessas vantagens, o procedimento que consiste em preparar lotes de resina com “pot life” longo para cada enrolamento ainda é bastante difundido.



No que aparentemente o consenso geral converge é que a distância da banheira ao mandril deve ser a menor possível (salvo quando se emprega resina diluída com monômero de estireno). Colocando-se a fonte de resina próxima ao mandril a impregnação do vidro é melhor e a tensão de enrolamento é diminuída.

Como regra geral recomenda-se que a tensão de enrolamento seja a menor possível para evitar (ou minimizar) que a resina seja forçada para fora dos fios pelas camadas posteriores, originando marcas dos fios enrolados na parede da estrutura bem como não homogeneidade na distribuição vidro-resina. Até pouco tempo atrás, recomendava-se o pré-tensionamento dos fios com o objetivo de eliminar a formação de catenária e posicionar os cabos paralelamente uns aos outros no mandril (lembramos que os fios são constituídos por diversos cabos que tendem a formar “barrigas” ou catenárias se não tensionados).



## Cooperativismo em Materiais Compósitos

Atualmente com o desenvolvimento dos rovings, formados por um único cabo, este problema não ocorre e a tensão de enrolamento pode ser mantida no mínimo suficiente para desenrolar, impregnar e posicionar os fios de reforço no mandril.

A matriz plástica de uma estrutura reforçada com fibras de vidro tem como finalidade o de estabilizar a fibras de vidro na posição desejada para que as mesmas possam reagir às cargas com maior eficiência. Além disso a resina transfere as cargas entre os filamentos, protege as fibras de vidro e é responsável pela resistência química da estrutura.

Como vimos, a viscosidade ideal da resina para o processo de “filament winding” deve estar compreendida entre 500 cps e 1000 cps. Se a viscosidade cair abaixo de 500 cps podem ocorrer problemas de escorrimento no mandril, com o conseqüente surgimento de regiões secas, além do controle da relação vidro-resina ser prejudicado.

Caso a viscosidade seja superior a 1000 cps, podem ocorrer problemas com bolhas de ar na estrutura, dificuldade de impregnação das fibras de vidro, baixo controle da relação vidro-resina e além disso, tensões excessivas são aplicadas no roving durante o enrolamento.

Para eliminação das bolhas de ar presas na estrutura talvez o melhor procedimento consista no emprego de rolos cilíndricos com geratrizes entalhadas formando saliências axiais banhados com resina de baixa viscosidade. Estes rolos são pressionados contra o mandril forçando a expulsão das bolhas de ar.

Recomenda-se que a resina empregada seja do tipo resiliente com alongamento à ruptura da ordem de 2% a fim de eliminar a probabilidade de trincas da estrutura. Também devemos levar em conta que a resistência química dos poliésteres diminuem com o aumento de sua flexibilidade. Na flexibilização da resina, recomendamos que resinas flexíveis sejam adicionadas à resina nas proporções recomendadas pelos fabricantes. Não recomendamos o emprego de flexibilizantes tais como DAP (diatil ftalato) que apesar de possuir um grupo vinil que poderia se interligar à matriz durante a cura, é muito diferente do poliéster tendo sua solubilidade potencialmente prejudicada e conseqüentemente se interligando muito pouco e prejudicando a resistência química da resina.

As resinas tipo poliéster apresentam a vantagem de possuírem boa resistência à corrosão (especialmente em ambientes ácidos), cura rápida e facilidade de manuseio.

Como desvantagem citamos o alto índice de encolhimento na cura e o fato de necessitarem ser flexibilizadas.

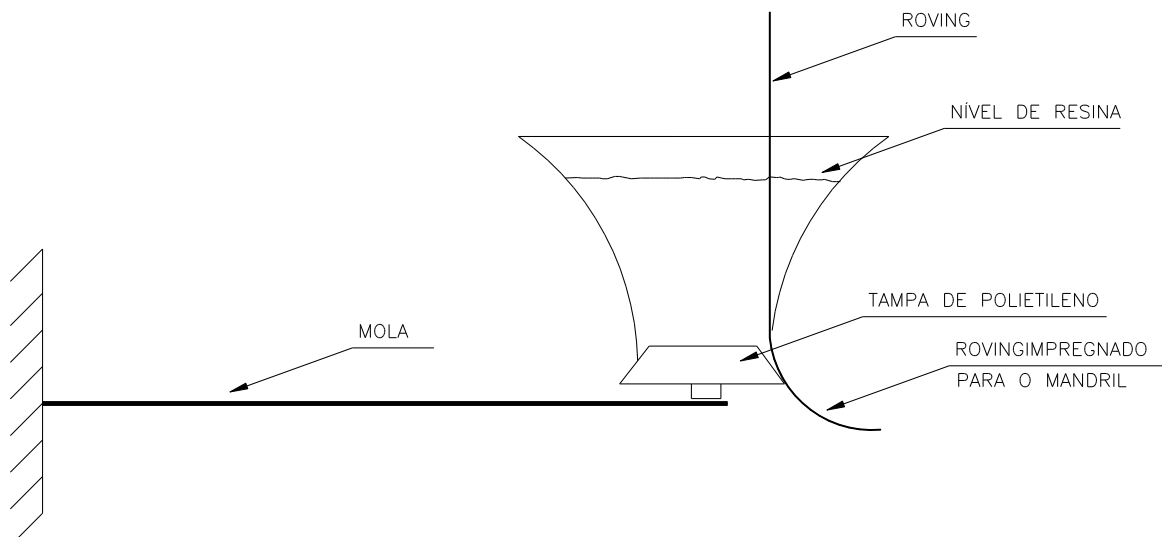
As resinas do tipo epoxy apresentam boa adesão às fibras de vidro (donde as melhores propriedades mecânicas), baixo encolhimento na cura, boa resistência química (principalmente em ambientes alcalinos) – mas são de cura lenta, de difícil manuseio e mais caras que as resinas poliéster.

A cura pode ser efetuada à temperatura ambiente ou à temperaturas elevadas, através do emprego de estufas (lâmpadas infra-vermelhas, ou ar quente), circulação de vapor dentro do mandril metálico, aquecimento do mandril por correntes de Foucault (método eletromagnético), etc.

## Os Sistemas de Impregnação

Existem vários sistemas de molhagem das fibras de reforço visando a simplicidade da operação, mínima degradação das fibras, melhor controle possível da relação vidro-resina e mínimo tensionamento do roving. As figuras seguintes comparam os diversos sistemas com suas vantagens e desvantagens.

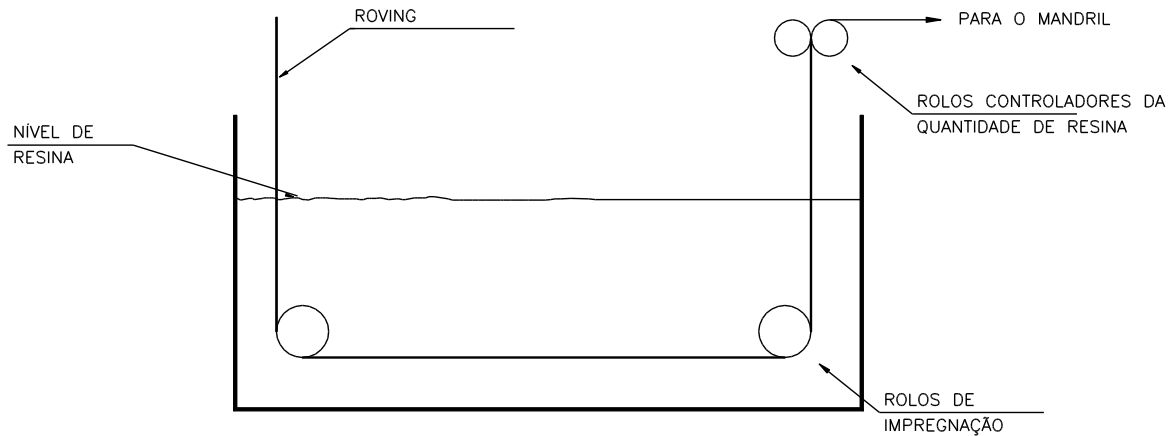
### Sistema de Funil



- Vantagens:
- Simplicidade
  - Não contém partes móveis
- Desvantagens:
- Pequena largura de faixa de reforço impregnado, o que prejudica a aparência da peça final.
  - Difícil colocação dos fios
  - Permite excesso de resina no mandril

### Sistema Banheira com Rolos

## Cooperativismo em Materiais Compósitos



SISTEMA BANHEIRA COM ROLOS

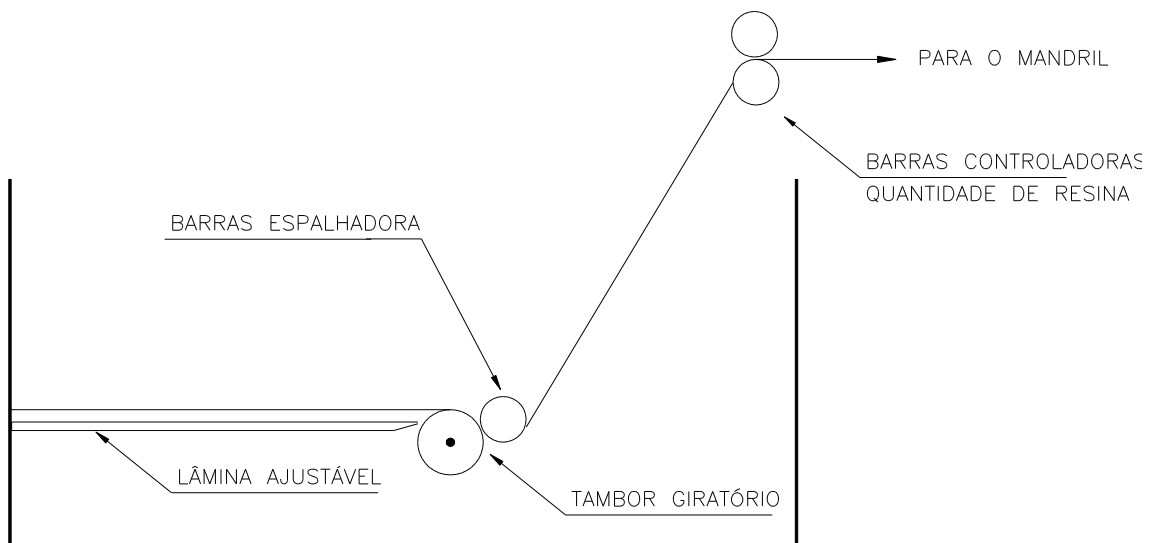
**Vantagens:**

- Maior tempo de imersão do roving, facilitando sua impregnação.
- Baixo tensionamento

**Desvantagens :**

- Difícil colocação dos fios através dos rolos.
- Filamentos quebrados, de difícil limpeza, embaraçam nos rolos.

### Sistema de Tambor





## Cooperativismo em Materiais Compósitos

### Vantagens:

- Excelente impregnação
- Não prejudica as fibras
- Fácil colocação dos fios
- Excelente controle da quantidade de resina

### Desvantagem:

- Possibilidade de embaraçamento
- Pode requerer acionador independente para tambor se a resina

tiver viscosidade muito alta.

## Defeitos e Correções

Abaixo listamos alguns problemas mais comuns do processo “filament winding” e suas prováveis causas e correções.

<b>PROBLEMA</b>	<b>CAUSA</b>	<b>CORREÇÃO</b>
Fios de Vidro Brancos na peça fabricada	<ul style="list-style-type: none"><li>- defeito na impregnação</li><li>- roving contaminado</li><li>- roving sem tratamento superficial</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- “Amacie” o roving por meio de barras ou rolos antes do banho na resina.</li><li>-O roving pode ser “amaciado” pelos rolos ou barras dentro da banheira.</li><li>-Aumente o percurso do roving dentro da banheira</li><li>-Diminua o tensionamento do roving antes do banho.</li><li>-Diminua a viscosidade da resina</li><li>-Aqueça o roving impregnado entre a banheira e o mandril.</li><li>-Teste o roving para conteúdo de umidade e tratamento superficial.</li><li>- Diminua a temperatura da estufa.</li></ul>





### Cooperativismo em Materiais Compósitos

PROBLEMA	CAUSA	CORREÇÃO
Bolhas de AR na estrutura	<ul style="list-style-type: none"><li>- ar dissolvido na resina</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Diminua tensão do roving</li><li>- Passe o roving através de barras estacionárias na banheira para facilitar a impregnação e eliminar o ar preso.</li><li>- Diminua a viscosidade da resina (adição de solvente ou aquecimento)</li><li>- Diminua a velocidade de enrolamento</li><li>- Aqueça o roving impregnado entre o mandril e a banheira.</li></ul>
Resina apresentando trincas paralelas ao roving	<ul style="list-style-type: none"><li>- Resina muito rígida.</li><li>- Ciclo de cura muito rápido</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Use resina mais flexível.</li><li>- Evite formação de regiões ricas em resina.</li><li>- Evite construir grandes espessuras com reforço unidirecional.</li><li>- Diminua o nível de catalização e/ou aceleração.</li><li>-Diminua a temperatura da estufa.</li></ul>
Áreas secas (brancas)	<ul style="list-style-type: none"><li>- Escorrimento da resina</li><li>- Vazios criados por cura diferencial (a parte externa de laminados espessos cura antes da interna)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Use agente tixotrópico na resina; gire o mandril durante a cura.</li><li>- Ajuste o ciclo de cura por meio de lâmpadas infravermelha, aquecimento do mandril, etc.</li><li>- Laminados muito espessos devem ser curados em etapas.</li></ul>
Excesso de resina na superfície da peça acabada.	<ul style="list-style-type: none"><li>- Relação vidro-resina muito baixa.</li><li>- Tensão no roving muito alta com as últimas camadas expulsando a resina para fora.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Faça ajustes na banheira para controlar a quantidade de resina.</li><li>- Diminua a tensão de enrolamento.</li></ul>

#### Bibliografia

Reichhold do Brasil – Mogi da Cruzes - SP