

2 Revisão da Literatura

2.1. Enrolamento Filamentar

Originalmente, as técnicas de fabricação de compósitos consistiam exclusivamente em trabalho manual. No início dos anos 50, com a diversidade e o volume de aplicação destes materiais tornando-se consideráveis, a indústria iniciou uma busca por formas de automatização e desenvolvimento de verdadeiros sistemas de produção [7].

O Enrolamento Filamentar foi originalmente desenvolvido como um método contínuo e barato para a fabricação de elementos cilíndricos. Com o desenvolvimento de máquinas e ferramentas mais versáteis, a fabricação de peças com geometrias mais complexas, e até mesmo assimétricas, tornou-se viável. A técnica abastece uma série de segmentos do mercado, incluindo a área automotiva, esportiva, aeroespacial e militar. Como exemplos de produtos fabricados pelo método podem-se citar tubos, vasos de pressão, tanques, eixos, mancais, seções de fuselagem de mísseis e raquetes de tênis [8].

A seleção correta da fibra e da resina favorece a otimização do elemento compósito fabricado. A principal função das fibras é a de resistir ao carregamento e fornecer a rigidez necessária ao compósito. Quase todos os reforços contínuos podem ser utilizados no enrolamento filamentar. As fibras de vidro são as mais utilizadas, sendo seguidas pelas de carbono e de aramida, cujos altos preços são compensados pelas suas excelentes propriedades. Outros tipos de fibras utilizadas como reforço incluem as de quartzo, de boro, de cerâmica, e fitas e arames metálicos. Os vários tipos de reforço podem ser misturados de forma a otimizar as propriedades do material compósito [8].

No enrolamento filamentar, um dispositivo móvel enrola fibras contínuas em torno de um mandril giratório, em um padrão controlado de forma a se obter estruturas ocas. O método permite a utilização de resinas termoplásticas e termofixas. As fibras podem ser pré-impregnadas (*towpreg*), ou passadas por um

banho de resina antes de serem aplicadas no mandril (enrolamento molhado), ou enroladas secas e depois imersas em resina, num segundo processo [9]. No caso deste trabalho utilizou-se o enrolamento molhado, que será, portanto, o apresentado. Esse método é o mais empregado por vários motivos: o custo de material é mais baixo, o tempo de enrolamento é menor se comparado com o das fibras pré-impregnadas e a formulação da resina pode ser modificada de forma a atender necessidades específicas de diferentes partes do produto [10].

2.1.1. Enrolamento Molhado

No enrolamento molhado, reforços contínuos na forma de mechas (fibras paralelas) impregnadas em resina são enrolados sobre um mandril rotatório. O mandril pode ser cilíndrico, esférico ou possuir qualquer outra forma que não possua reentrâncias [12].

As fibras contínuas, fornecidas em bobinas, são desenroladas e passam por um cabeçote alimentador que se movimenta paralelamente ao eixo do mandril rotatório sobre o qual elas são enroladas. Geralmente o alimentador de fibras é acoplado a uma banheira fixada a um carrinho que se movimenta sobre trilhos. A resina que impregna a fibra é colocada, devidamente acelerada e catalisada, nessa banheira. As fibras passam na banheira, são impregnadas pela resina e daí seguem para o cabeçote alimentador antes de serem enroladas. A Figura 1 ilustra o processo.

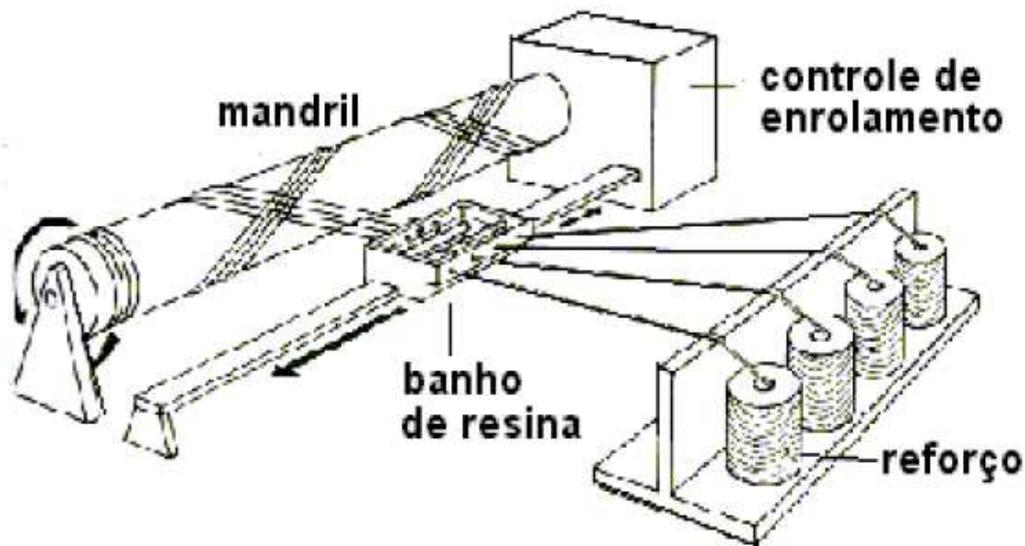


Figura 1 - Ilustração de um equipamento de Enrolamento Filamentar [13].

A técnica permite a variação da tensão nas fibras, do ângulo de enrolamento e da quantidade de resina em cada camada de reforço, até que a espessura desejada e a quantidade de resina do compósito sejam alcançadas. Várias peças podem ser fabricadas simultaneamente no mesmo equipamento, com precisão no ângulo das fibras e bom controle da quantidade de resina [12].

Durante o enrolamento, a tensão aplicada nas fibras gera pressão entre as camadas do compósito não-curado; esta pressão influencia na compactação e no volume de vazios do produto e contribui para uma mais completa utilização da resistência e rigidez das fibras de reforço. O mandril, que define a forma da peça, é removido após a cura se não for um elemento constituinte da estrutura [14].

Controlar o processo do Enrolamento Filamentar pode incluir a especificação da tensão na fibra, a pressão extra de compactação e parâmetros geométricos (configuração do reforço ao longo do comprimento e da espessura), entre outros. A configuração do reforço é determinada pelas necessidades do projeto do produto e pode ser alcançada com alta precisão [14].

A Figura 2 apresenta dois exemplos de tubos sendo fabricados por enrolamento filamentar.



Figura 2 - Elementos sendo fabricados por Enrolamento Filamentar.

2.1.2. Configuração do Enrolamento

A orientação do reforço é um fator decisivo na resistência das estruturas reforçadas por fibras. No Enrolamento Filamentar ela é determinada pela combinação entre a velocidade de giro do mandril e a velocidade de translação do carrinho. Numa mesma peça podem ser aplicadas camadas com diferentes ângulos de enrolamento; a combinação ideal depende da magnitude e da natureza do carregamento a que o elemento será submetido.

Sobre mandris cilíndricos, como os utilizados para a fabricação de tubos, as fibras podem ser enroladas com determinada angulação. Para cada rotação do mandril, a mecha de fibras é depositada a intervalos regulares de distância

longitudinal, chamada de passo do enrolamento. Existe uma relação direta entre o diâmetro do mandril, o ângulo de enrolamento e o passo. Fibras enroladas com passo igual a zero e fibras depositadas axialmente ao mandril encontram-se a 90 e 0 graus respectivamente [15].

2.1.2.1. Enrolamento Circunferencial

No enrolamento circunferencial, as fibras são depositadas lado a lado, o que resulta na cobertura completa do mandril com apenas um passe do carrinho. O passo do enrolamento circunferencial possui a mesma dimensão da largura de faixa, isto é, a largura da mecha de fibras. Um esquema é apresentado na Figura 3, onde se pode observar que os ângulos se aproximam de 90 graus [15].

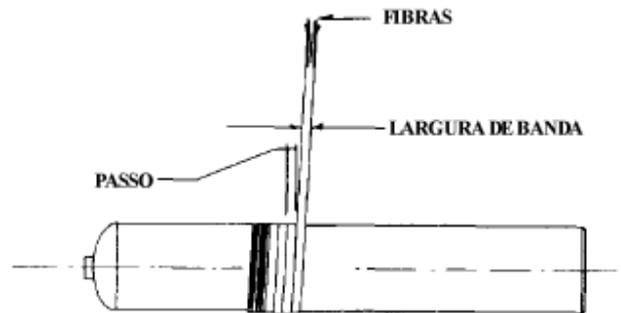


Figura 3 - Enrolamento circunferencial [15].

2.1.2.2. Enrolamento Helicoidal

No caso do enrolamento helicoidal, as fibras são depositadas com um ângulo que varia entre 5 e 80 graus [16]. Conforme observado na Figura 4, neste caso o passo do enrolamento é maior que a largura de banda [15].

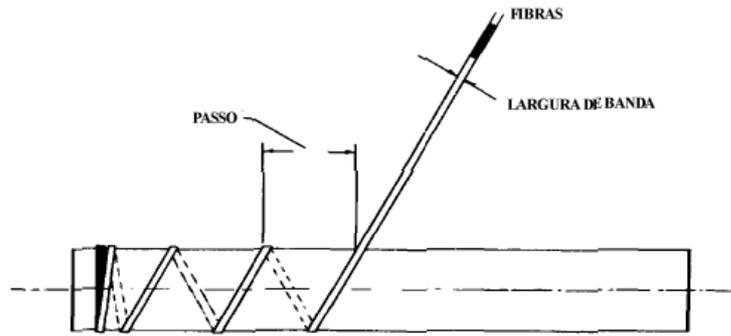


Figura 4 - Enrolamento helicoidal [15].

No enrolamento helicoidal, o carrinho se move sucessivamente de um lado para o outro, paralelamente ao mandril, parando em cada extremidade e iniciando o ciclo inverso. Pode ser visto pela Figura 5 que o enrolamento é tal que a cobertura completa do mandril somente é obtida após várias idas e vindas do carrinho [17].

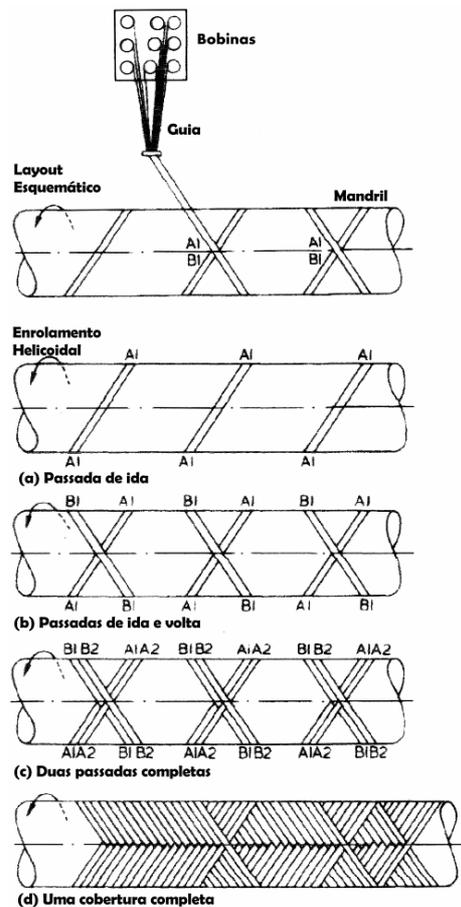


Figura 5 - As várias etapas do enrolamento helicoidal [17].

Esta configuração de enrolamento é usualmente utilizada para a obtenção de elementos com necessidade de resistência nas duas direções principais. Para o caso de vasos de pressão cilíndricos simples, por exemplo, o ângulo de enrolamento é determinado de forma a fornecer à estrutura uma resistência circunferencial que seja o dobro da longitudinal, satisfazendo a relação 2:1 das tensões [16].

2.1.2.3. Enrolamento Polar

Projetado especificamente para enrolar fibras sobre as extremidades das peças ou sobre esferas, este método se caracteriza pelo movimento relativo do carrinho em círculos em torno dos pólos do mandril, ao invés do movimento de ida e vinda paralelamente ao mandril. Este enrolamento pode ser obtido de duas maneiras: (a) pela rotação do carrinho em círculos em torno das extremidades do mandril, ou (b) pela rotação do mandril em torno de um eixo perpendicular ao eixo do próprio mandril, mantendo o carrinho estático conforme indicado na Figura 6 [16].

Quando o enrolamento molhado é utilizado, não é desejável que o carrinho com a resina seja a parte móvel do processo. Assim o esquema da Figura 6 deve ser o utilizado [17].

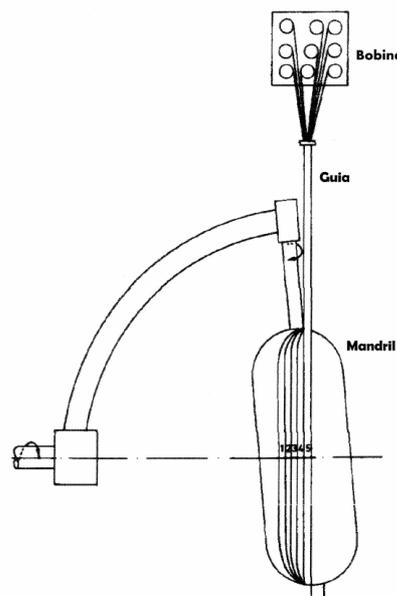


Figura 6 - Enrolamento polar [17]

2.1.3.

Variáveis do processo e exemplos de aplicação

Muitas são as variáveis envolvidas na fabricação de um elemento por Enrolamento Filamentar. A escolha da resina, da fibra, dos ângulos de enrolamento e de sua seqüência, do número de camadas e de suas espessuras, e da tensão aplicada na fibra, são exemplos de variáveis que devem ser estabelecidas durante o projeto da peça de forma a adequá-la à natureza e à severidade do carregamento ao qual será submetida durante sua vida em serviço. A determinação de cada uma destas variáveis nem sempre é uma tarefa simples, dependendo da utilização ou do desenvolvimento de metodologias de projeto específicas. Sua validação, por sua vez, pode necessitar de ciclos exaustivos de fabricação e testes.

A seguir, são apresentados alguns exemplos de estudos envolvendo o Enrolamento Filamentar:

- Camussi [18] propôs um sistema de fibra de vidro e matriz polimérica para a fabricação, por enrolamento filamentar, de “risers” para águas ultra-profundas. A busca pelo desenvolvimento de equipamentos em material compósito para a área offshore tem se tornado cada vez mais freqüente. O avanço da exploração para águas cada vez mais profundas tem aumentado a demanda por materiais de elevada resistência, leves e capazes de lidar com a hostilidade do ambiente submarino.
- D. Cohen [19] investigou a influência dos parâmetros do enrolamento molhado sobre a qualidade e a resistência de vasos de pressão de materiais compósitos. Existem diversas aplicações para os vasos de pressão nas quais os parâmetros de qualidade dos compósitos – como volume de vazios, distribuição da fibra e da matriz ao longo da espessura e espessura das camadas – são fatores críticos para adequação do produto.
- Sung K. [20] avaliou o efeito do ângulo de enrolamento nas propriedades ao longo da espessura e nas tensões residuais de anéis compósitos finos fabricados por enrolamento filamentar. Existe uma grande demanda por seções finas de compósitos reforçados por

fibras para elementos como disco de inércia para armazenamento de energia, cascos para submarinos e cascos monocoque para veículos de combate blindados.

Muitos outros estudos envolvendo o Enrolamento Filamentar vêm sendo realizados, e certamente o desenvolvimento e/ou o aprimoramento das técnicas de caracterização muito pode contribuir para a fabricação de novos produtos com maior qualidade e desempenho.