

COLEÇÃO PTC
DEVOLVER AO BALÇÃO DE EMPRÉSTIMO

IPEN / CNEN - SP
BIBLIOTECA
Produção Científica

MATERIAIS COMPOSTOS AVANÇADOS PARA FABRICAÇÃO DE TUBULAÇÕES PELO PROCESSO *FILAMENT WINDING*

Gerson Marinucci e Carlos Leonel Zapparoli Junior

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

Travessa R nº 400

05508.900-Cidade Universitária-Butantã

São Paulo

RESUMO

A técnica de *Filament Winding* é um método de fabricação de peças de revolução como por exemplo tubos, cilindros e eixos cardãs que consiste no enrolamento de filamentos de carbono, vidro ou Kevlar® em torno de um molde ou como se habitua a dizer, mandril.

Os filamentos são guiados por um eixo alimentador que está posicionado sobre um carro que percorre uma trajetória paralela ao eixo do molde (eixo longitudinal) e que contém o sistema de impregnação dos fios.

O ângulo de bobinagem desejado é obtido da ação coordenada de rotação do mandril com o movimento do carro permitindo assim que as fibras sejam posicionadas na direção das tensões principais

1-INTRODUÇÃO

Materiais Compostos Avançados têm seu emprego em projetos onde elevada resistência mecânica aliado a baixo peso específico são requisitos importantes na seleção do material, sendo obtidos pela associação de um elemento de reforço em uma matriz orgânica obtendo-se no produto final propriedades melhores que as fornecidas por esses elementos individualmente.

São usualmente empregados com reforço as fibras aramida, que tem como representante mais conhecido o Kevlar®; fibras de vidro, comercialmente de uso mais difundido e as fibras de carbono, sendo estas a que oferecem ao material a melhor relação resistência/peso específico e módulo de elasticidade/peso específico e por isso quase sempre selecionadas para componentes que requerem alta

performance como exige a indústria nuclear, a indústria aeronáutica-aeroespacial, veículos de competição e embarcações náuticas. Os reforços mencionados trabalham conjugados a materiais orgânicos que têm a função de proteger e ao mesmo tempo manter o correto posicionamento do elemento resistente dentro do material e ainda distribuir a carga recebida para tais reforços, sendo representados pelas resinas epoxi, poliéster, ester-vinilica, fenólica e Derakane®. A tabela 1[1] apresenta as propriedades dos principais materiais empregados na engenharia e nesta pode-se comparar os valores de densidade (ρ), tensão (σ), tensão específica (σ/ρ), módulo de elasticidade longitudinal (E) e módulo de elasticidade longitudinal específico (E/ρ) entre os mesmos, havendo destaque para as fibras de carbono. Para efeitos de cálculo no entanto deve-se considerar as frações volumétricas de fibra e de resina presentes no material composto uma vez que na tabela 1 as propriedades referem-se somente às fibras. Numa primeira aproximação, para determinação das propriedades mecânicas do material composto, costuma-se utilizar a chamada Regra da Mistura que leva em consideração a proporção relativa de cada material constituinte (fibra e resina) na estrutura do material. Foi dito primeira aproximação porque nessa equação existe as hipóteses de que haja perfeita ligação entre fibra e matriz, bem como ausência de vazios e que a matriz é considerada homogênea, isotrópica apresentando comportamento linear elástico, sendo portanto situações ideais.

Na fabricação de componentes estruturais produzidos de plástico reforçado (fiber reinforced organic matrix composites) cuidados devem ser tomados na escolha correta

do processo de fabricação. A qualidade do componente pode não ser atendida e o custo pode se tornar excessivo se procedimentos inadequados forem empregados. Na produção de tubos, cilindros e vasos de pressão de materiais compostos o processo mais consagrado é o denominado *filament winding* e neste a seleção adequada dos elementos constituintes do material, da geometria e da orientação do reforço permite a obtenção de produtos resistentes a corrosão e com capacidade de suportar esforços bastante elevados como, por exemplo, cilindros submetidos a altas pressões internas.

material	ρ (g/ml)	σ (MPa)	$\frac{\sigma}{\rho}$ x10	E (GPa)	$\frac{E}{\rho}$ x10
aço	7,80	1800	23	207	2,7
alumínio	2,63	620	24	73	2,8
berílio	1,82	1700	93	300	16,5
titânio	4,61	1900	41	115	2,5
f. vidro-E	2,54	3400	134	72	2,8
f. vidro-S	2,48	4800	194	86	3,5
f. carb.-HM	1,90	2300	121	377	19,8
f. carb.-HS	1,80	3300	183	233	12,9
Kevlar 29	1,40	2730	195	83	5,9
Kevlar 49	1,40	2730	195	130	9,3
boro	2,60	3500	135	420	16,2

Tabela 1-Propriedades mecânicas dos principais materiais de engenharia

2-A TÉCNICA DE FILAMENT WINDING

Um dos grandes benefícios que o engenheiro pode explorar ao projetar o material aqui apresentado é usufruir das propriedades que a fibra apresenta em sua direção longitudinal e o processo onde melhor se consegue tal situação é o denominado de *Filament Winding*.

Estruturas fabricadas por esse processo têm por objetivo conseguir a mais alta relação resistência-peso entre os materiais empregados para aplicações estruturais sendo, entretanto, necessário para alcançar esse resultado garantir que a orientação da fibra esteja na direção das tensões principais e ao mesmo tempo que se utilize a quantidade de reforço na matriz proporcional a magnitude dessas tensões. Como ilustração vale mencionar que dados obtidos de estruturas bobinadas a 45° não podem ser aplicados para projeto de um vaso de pressão onde um ângulo eventualmente maior seria o indicado. Além das diferenças geométricas, que são denominadas de variáveis dependentes[2], os dados obtidos de ensaios apresentarão diferenças daqueles obtidos teoricamente devido às inúmeras variáveis independentes sendo por isso lógico que resultados de testes experimentais devem ser qualificados antes que possam ser aplicados como valores para cálculo.

As variáveis independentes, as quais são função do processo, manuseio e tratamento térmico de polimerização da matriz devem ser controladas, registradas e levadas em consideração no projeto final. Qualquer alteração nas mesmas, tais como tensão de bobinagem, viscosidade e ciclo de cura da matriz, condições ambientais, orientação do reforço e quebra de monofilamentos podem afetar a qualidade do produto às vezes até de maneira considerável. Devido a essas variáveis que se adota um fator corretivo denominado de Fator de Eficiência [3] sendo esse fator determinado por cada fabricante sendo melhor ou pior em função do nível tecnológico em que o processo opera. Um exemplo onde tais variáveis são melhores controladas é o emprego de máquinas de última geração onde o processo é assistido por computador, o banho apresenta variações de temperatura muito pequenas e há controle na tensão do fio acrescentando-se também que o ambiente trabalha com temperatura e umidade sob níveis pré-estabelecidos e o tratamento térmico apresenta ciclos de cura repetitivos. Mesmo o sistema por onde os filamentos caminham são projetos modernos onde se evita ao máximo a quebra de monofilamentos o que poderia prejudicar a capacidade estrutural do reforço de suportar cargas elevadas. A técnica requer, quase sempre, equipamentos especialmente desenvolvidos para essa atividade cujo funcionamento automatizado possibilite um controle preciso da trajetória de deposição da fibra de acordo com as direções de máxima sollicitação.

Basicamente os processos empregados são identificados como: circunferencial (*hoop*), helicoidal e polar sendo usual em muitos trabalhos se optar pela composição dos mesmos. Na **bobinagem circunferencial** a fibra é depositada na posição normal em relação ao eixo de rotação do mandril, sendo que a maior parcela de resistência estrutural nesse caso encontra-se na direção circunferencial de tal forma que os filamentos fiquem submetidos a esforços de tração enquanto que na direção longitudinal há apenas a resistência relativa à matriz que é significativamente menor que a do reforço. Por sua vez a **bobinagem helicoidal** permite a deposição dos fios segundo um ângulo pré-determinado formado com o eixo de rotação do mandril de maneira que haja um balanceamento entre resistência circunferencial e longitudinal da peça dada a possibilidade de haver uma melhor distribuição das tensões que sollicitam a estrutura e que agem nos filamentos de reforço[3]. Na **bobinagem polar**, o mandril permanece estacionário enquanto que o eixo alimentador rotaciona inclinado de um ângulo pré-estabelecido em torno do eixo longitudinal do mandril o qual avança da banda ou largura da fibra a cada rotação completa do alimentador e deste modo os filamentos são posicionados de um extremo ao outro no mandril, obtendo-se preferencialmente elevada resistência na direção axial ou longitudinal.

O mandril de bobinagem deve atender certas exigências que não podem ser esquecidas na etapa de desenvolvimento do

ferramental de processo tanto no aspecto de concepção quanto na escolha correta do material a ser utilizado para sua fabricação. Fatores como forma, peso, acabamento superficial, bem como requisitos básicos de apresentar pequena flexão devido ao peso próprio, capacidade de suportar esforços de bobinagem e aos vários ciclos de cura a qual estará submetido ao longo de sua vida útil são os mais indicados para garantir a qualidade da peça bobinada.

Na fase final de preparação para início dos testes de bobinagem o mandril deve ser cuidadosamente desengraxado e posteriormente após algumas camadas de cera desmoldante executar polimento após a secagem de cada uma delas. Como última etapa um agente desmoldante líquido reconhecidamente eficiente deve ser aplicado garantindo-se que toda a superfície do mandril seja plenamente recoberta. Esse cuidado facilitará em muito a extração do componente que estará sendo fabricado evitando-se ações que poderão resultar em danos afetando a qualidade e o desempenho da peça como produto final, sendo a situação mais favorável aquela em que após completado o ciclo de polimerização da matriz a peça é "descolada" do mandril permitindo sua extração sem nenhum esforço. Tal condição no entanto não é conseguida facilmente dado o fato que durante as ligações químicas para que se realize a polimerização da matriz há contrações desse material na ordem de 9% para as resinas poliéster e 3% para as resinas epoxi havendo portanto uma clara tendência de a peça "agarrar" no mandril contribuindo assim para dificultar sua extração. Nesse ponto que recai mais uma vez a importância da correta seleção do material para fabricação do mandril, bem como a qualidade do acabamento superficial podendo-se com isso evitar tal fato.

A etapa de usinagem quando necessário para corte das extremidades que não serão aproveitadas deve ser feita utilizando-se disco de corte diamantado, pois dado o fato de o material ser abrasivo, especialmente os fabricados empregando-se fibra de carbono, discos ou mesmo ferramentas de usinagem fabricadas de aço rápido terão sua vida útil bastante reduzida obrigando a repetidas afiações elevando o custo operacional e portanto não compensando o custo inferior destes quando comparados com os diamantados.

Recomenda-se que os discos de corte trabalhem com rotações na faixa de 30 a 50 m/s e avanço lento o que garantirá qualidade no acabamento e ao mesmo tempo evitando-se eventuais microtrincas na estrutura do material.

3-CONCLUSÃO

A técnica apresentada é uma solução moderna para produção de tubos, cilindros, esferas e vasos de pressão podendo resultar em ótimas soluções técnicas para situações onde o metal tem desempenho comprometido por razões estruturais e/ou químicas (corrosão) podendo também, devido a baixa

densidade, especialmente quando comparado com os aços, contribuir para uma redução dos custos operacionais, transporte ou na instalação/montagem de uma planta industrial, por exemplo.

4- REFERÊNCIAS

- [1] Al-Qureshi, H.A. Composite Materials: Fabrication and Analysis, 3ed. São José dos Campos, s.ed., 1984.
- [2] Oleesky, S.S.; Mohr, J.G. Handbook of Reinforced Plastics. Van Nostrand Reinhold Company, 1964.
- [3] Correa, R. Tubos Estruturais em Material Composto para motores de foguetes: Estudos, Dimensionamento e Tecnologia de Fabricação. São José dos Campos, 1979. 164p-ITA.

SUMMARY

The filament wound technique is a method of manufacturing tubing, cylinders, driveshafts which consists essentially of winding carbon, glass or Kevlar[®] filaments on a mandrel.

This technique depends on the use of a roving guide and a impregnation system which are on a carriage shuttles that perform a movement parallel to the mandrel axis (longitudinal axis).

The desired helical angle is generated by the coordinated movement of a mandrel that rotates continuously and the carriage speed allowing that the fibers are layed on-axis loads.