**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

***PROJETO E ELABORAÇÃO DE UM DISPOSITIVO
PARA REMODELAGEM DE FIBRAS COMO
SUBSISTEMA DO PROCESSO DE ENROLAMENTO
FILAMENTAR***

Lucas Emanuel Soeira

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jonas de Carvalho

São Carlos
2009

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro LUCAS EMANUEL SOEIRA.

Dissertação defendida e julgada em 24/07/2009 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Associado **JOSÉ RICARDO TARPANI**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Dr. **PEDRO YOSHITO NORITOMI**
(Centro de Pesquisas Renato Archer/CenPRA)

APROVADO

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus amigos e familiares pelo suporte e amor durante todo esse período de elaboração e conclusão deste trabalho.

E agradeço a Deus por mais esse degrau galgado na longa trajetória da vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Jonas de Carvalho, pela amizade, paciência e dedicação em me orientar;

Ao M.Sc. Altibano Ortenzi Jr., pela colaboração e amizade;

À empresa OWENS CORNING pelo material aplicado aos ensaios realizados para este trabalho;

A CnPQ, pela bolsa concedida ao mestrado do SEM – USP São Carlos.

Aos meus pais, pelo amor, compreensão e conselhos.

Tiago, pela amizade.

Talita, cunhado e meu sobrinho.

Jorge e Karina, pelo apoio, amor e amizade.

Aos meus avós paternos, pelo apoio incondicional, e aos maternos (*in memorian*) a saudade.

Aos amigos, pelo companheirismo e força.

A Deus, pelo mistério da vida, amor e coragem.

“Se você quer transformar o mundo, experimente primeiro promover o seu aperfeiçoamento pessoal e realizar inovações no seu próprio interior.”

Dalai-Lama

“E assim, depois de muito esperar, num dia como outro qualquer, decidi triunfar....

Decidi ver cada dia como uma nova oportunidade de ser feliz....

Apreendi que de nada serve ser a luz se não vai iluminar o caminho dos demais....

Apreendi que os sonhos são somente para fazer-se realidade.

E desde aquele dia já não durmo para descansar....

Agora simplesmente durmo para sonhar.”

Walt Disney

RESUMO

SOEIRA, Lucas Emanuel (2009). “**Projeto e elaboração de um dispositivo para remodelagem de fibras como subsistema do processo de enrolamento filamentar**”. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

Essa dissertação trata da modelagem física de filamentos de fibras visando adequá-las a aplicações em equipamentos de enrolamento filamentar – *filament winding*. No decorrer do trabalho é abordada a criação do subsistema para condução e posicionamento dos fios que compõem as bobinas – *rovings*. São feitas análises por elementos finitos e realizados testes de bancada com os componentes mecânicos visando validar o subsistema como parte integrante das máquinas de *filament winding*. É estudada a forma de impregnação dos fios, a tensão e o grau de espalhamento dos fios no decorrer da sua passagem pelo sistema, o qual é composto por um conjunto de polias, um tracionador e um enrolador desses fios.

Palavras-chave: Compósitos. Enrolamento filamentar. Reforço Estrutural. FRP.

ABSTRACT

SOEIRA, Lucas Emanuel (2009). *Design and implementation of a remodeling fiber system to the filament winding process*. Dissertation (M.Sc.). Universidade de Sao Paulo. Sao Carlos, 2009.

This dissertation deals with the use of fiber reinforcements, in order to improve its appliance in filament winding machines. Throughout this work it is created a mechanism system to remodel the fiber filaments from rovings to the part that is been produced. Finite element analyses and experimental tests are performed to validate the system as part of the filament winding machines. Its is studied the impregnation characteristics, the tensioning and the spreading of the fibers along the designed system, which is composed by a set of pulleys and tensioners. The system is built and satisfactory results are obtained. The results obtained as well as proposals to improve the system are presented and the results discussed.

Keywords: Composites. Filament winding. Structural Reinforcement. FRP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Alguns arranjos de núcleos para sistemas sanduíche. – Fonte: HYPERSIZER (2008).	1
Figura 2 – Exemplos de materiais de núcleo para sistemas sanduíche. – Fonte: ECONCORE (2008).	1
Figura 3 – Quadro de fibras quanto à origem.	2
Figura 4 – Tipologia de fibras de vidro. - Fonte: OWENS CORNING (2009).	3
Figura 5 – Quadro de matrizes quanto à origem.	3
Figura 6 – Quadro dos principais processos de laminação.	5
Figura 7 – Esquema da primeira máquina de <i>filament winding</i> . – Fonte: BAXTER JR. (1965).	7
Figura 8 – Máquina de <i>filament winding</i> fabricando o invólucro de uma bateria – Fonte: ROSATO e GROVE (1964).	9
Figura 9 – Exemplo de uma máquina ATL. – Fonte: INGERSOLL (2008).	10
Figura 10 – Exemplo de uma máquina AFP. – Fonte: ELECTROIMPACT (2008).	10
Figura 11 ‘a’, ‘b’, ‘c’ – Padrões básicos de enrolamento: ‘a’ - <i>polar winding</i> , ‘b’ - <i>helical winding</i> e ‘c’ - <i>hoop winding</i>	12
Figura 12 – Exemplo de trajetória geodésica. – Fonte: JOHANSEN, <i>et. al.</i> (1998).	13
Figura 13 – Enrolamento da peça da Figura 12. – Fonte: JOHANSEN, <i>et. al.</i> (1998).	13
Figura 14 – Formação da ondulação no padrão de enrolamento helicoidal. - Fonte: ROUSSEAU, <i>et. al.</i> (1998).	15
Figura 15 – Configuração padrão ASTEB do vaso de pressão dentro da seção de testes e com <i>strain-gauges</i> aderidos à superfície do vaso. - Fonte: PARK, <i>et. al.</i> (2002).	17
Figura 16 – Correlação da fração volumétrica de fibra com o a tração aplicada à fibra durante o enrolamento. - Fonte: MERTINY e ELLYIN (2002).	18
Figura 17 – Fotografia de alguns corpos de prova em ensaios mecânicos submetidos a vários tipos de carregamentos. - Fonte: MERTINY e ELLYIN (2002).	18
Figura 18 – Configuração do padrão de enrolamento calculado para o projeto do cotovelo proposto. - Fonte: LI, <i>et. al.</i> (2006).	21
Figura 19 – Caminhos traçados pelo cálculo realizado para a referida geometria. - Fonte: BLOM, <i>et. al.</i> (2009).	22
Figura 20 – Exemplo de trajetórias geodésicas.	23

Figura 21 – Ciclo de projeto do material compósito. - Fonte: CARVALHO (2007).....	24
Figura 22 – Esquema do processo de deposição de vapor químico utilizado na fabricação de fibras de boro. - Fonte: PIGGOTT (2002).....	26
Figura 23 ‘a’, ‘b’, ‘c’, ‘d’, ‘e’, ‘f’, ‘g’, ‘h’ – Algumas formas alotrópicas do carbono: ‘a’ - diamante, ‘b’ - grafite, ‘c’ - lonsdaleite (nome em homenagem a cientista Kathleen Lonsdale, conhecido também como diamante hexagonal), ‘d’ - fulereno C_{60} , ‘e’ - fulereno C_{540} , ‘f’ - fulereno C_{70} , ‘g’ - carbono amorfo (<i>glassy carbon</i>), ‘h’ - nanotubo de carbono. - Fonte: SCOTT (2009).....	27
Figura 24 ‘a’, ‘b’, ‘c’, ‘d’ – Imagens por MEV de seções transversais de fraturas de fibras de carbono com um tratamento de térmico a 2500°C: ‘a’ - tipo radial, ‘b’ - tipo aleatório, ‘c’ - tipo estrias circunferenciais, ‘d’ - tipo estrias circunferenciais com estruturas aleatórias. - Fonte: HAMADA, <i>et. al.</i> (1987).	28
Figura 25 – Esquema do processo produtivo da fibra de vidro. - Fonte: PIGGOTT (2002)....	30
Figura 26 – Relação ente os módulos de elasticidade longitudinal e transversal de diversos tipos de fibras – Fonte: Adaptado de PIGGOTT (2002).	31
Figura 27 – Impregnador radial de fibras. - Fonte: NYGÅRD e GUSTAFSON (2004).	32
Figura 28 – Dispositivo espalhador de fibras. - Fonte: NYGÅRD e GUSTAFSON (2004). ..	32
Figura 29 – Tipos de fibras de vidro utilizados na experiência de permeabilidade da resina na fibra, aplicando-se a técnica radial. - Fonte: WU, <i>et. al.</i> (2007).	33
Figura 30 – Distribuições dos diâmetros de fibra em relação aos dados das fibras produzidas. - Fonte: THOMASON (2008).....	34
Figura 31 – Matriz do QFD realizado para o projeto do remodelador de fibras.	39
Figura 32 ‘a’, ‘b’ e ‘c’ – Geometria onde predomina basicamente um ângulo de 45°. ‘a’ - polia 1, ‘b’ - polia 2 e ‘c’ - polia 3.....	40
Figura 33 ‘a’, ‘b’ e ‘c’ – Geometria onde predomina basicamente uma coroa esférica. ‘a’ - polia 1, ‘b’ - polia 2 e ‘c’ - polia 3.....	40
Figura 34 – Primeiro projeto conceitual.	41
Figura 35 ‘a’ ‘b’ – Primeiro protótipo construído. ‘a’ - vista lateral e ‘b’ - vista superior	42
Figura 36 – Segundo projeto conceitual.	43
Figura 37 – Ilustração da seção transversal de um <i>roving</i>	45
Figura 38 – Ilustração da seção transversal de um <i>tape</i>	46
Figura 39 ‘a’, ‘b’ e ‘c’ – Primeiro protótipo ensaiando a remodelagem. ‘a’ - saída da fibra do remodelador. ‘b’ - detalhe da divisão da fibra sobre a superfície da polia plana. ‘c’ - detalhe do acúmulo de fibras nas bordas da polia.....	46

Figura 40 ‘a’, ‘b’ e ‘c’ – Remodelamento pelo primeiro protótipo. ‘a’ – entrada da fibra, mostrando o acúmulo de fibras de um lado somente na polia curva. ‘b’- detalhe da divisão da fibra sobre a superfície da polia plana. ‘c’- detalhe da divisão não uniforme das fibras sobre a superfície das polias.....	47
Figura 41 – Amostra da fibra de vidro no formato <i>tape</i> e bobinada manualmente.....	47
Figura 42 ‘a’, ‘b’ e ‘c’ – Segundo protótipo ensaiando a remodelagem. ‘a’ - entrada da fibra do remodelador. ‘b’- saída da fibra do remodelador. ‘c’- detalhe das fibras remodeladas ainda sobre a polia de saída.....	48
Figura 43 ‘a’ e ‘b’ – Remodelamento pelo segundo protótipo. ‘a’ - perspectiva do remodelador. ‘b’- detalhe do sistema tensionador por molas de compressão.	48
Figura 44 – Exemplo de uma elipse.	49
Figura 45 ‘a’ e ‘b’ – Ilustração do processo de filament winding. a - mostra o detalhe dos espaços preenchidos apenas por resina (vermelho) entre os <i>rovings</i> ; b - mostra o detalhe dos espaços preenchidos apenas por resina (vermelho) entre os <i>tapes</i>	50
Figura 46 – Variação nas medidas de largura e espessura do <i>roving</i> remodelado.	51
Figura 47 ‘a’ e ‘b’ – Régua para tomada do comprimento de fita a ser medido e detalhe de posicionamento do gabarito de medição. ‘a’ - Visão geral do gabarito para estabelecer o comprimento total. ‘b’ - Detalhe da régua e do gabarito para as medições de largura e espessura.....	53
Figura 48 ‘a’, ‘b’ e ‘c’ – Sequência das medições realizadas para se obter a espessura da fita de <i>roving</i> remodelado. ‘a’ - Medição de espessura do gabarito sem a fita, realizada com micrometro. ‘b’ - Detalhe do posicionamento da fita para medição de espessura. ‘c’ - medição da espessura da fita.	54
Figura 49 – Detalhe do gabarito ranhurado a cada 0,25 mm. As linhas mais espessas iniciam 0,5 mm.	55
Figura 50 – Malha gerada e detalhe para o atrito de contato entre o par polia – <i>roving</i>	59
Figura 51 – Ponto de aplicação da força de tração no <i>roving</i>	59
Figura 52 – Condição de contorno e restrições entre o par polia- <i>roving</i>	60
Figura 53 – Tensão resultante de atrito de contato entre o par polia – <i>roving</i>	60
Figura 54 – Tensão resultante de atrito de contato entre o par polia- <i>roving</i>	61
Figura 55 – Gráfico comparativo da largura e espessura inicial e final.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sumário de análise dos dados para os vasos de pressão tipo 1 e 2 (adaptado de COHEN, <i>et. al.</i> , 2001).....	16
Tabela 2 – Predição de falha para vasos de pressão compósitos (adaptado de COHEN, <i>et. al.</i> , 2001).....	16
Tabela 3 – Propriedades de fibras naturais, sintéticas de alto desempenho e metálicas (adaptado de PIGGOTT, 2002).	25
Tabela 4 – Valores para resistência, módulo de elasticidade e máxima temperatura de uso para fibras inorgânicas (adaptado de PIGGOTT, 2002).....	30
Tabela 5 – Propriedades mecânicas comparativas entre diversos tipos de fibras sintéticas (ORTENZI, 2007).	31
Tabela 6 – Dados geométricos do <i>roving</i> e do <i>tape</i>	49
Tabela 7 – Medidas de rugosidade superficial da polia e da fibra de vidro.	50
Tabela 8 – Condições para simulação da tensão de atrito entre o par polia-fibra de vidro.	56
Tabela 9 – Medidas de largura e espessura obtidos após o ensaio da fibra de vidro, como <i>roving</i> modificado.	57
Tabela 10 – Condição de contorno para simulação da tensão resultante de atrito entre o par polia-fibra de vidro.	61

LISTA DE SÍMBOLOS

E_{11} :	Módulo de elasticidade longitudinal às fibras;
E_{22} :	Módulo de elasticidade na direção transversal;
G_{12} :	Módulo cortante longitudinal;
L :	Largura
η :	Viscosidade dinâmica (Pa/s^{-1})
ρ :	Massa específica (kg/m^3)
Re :	Número de Reynolds
T_g :	Temperatura de transição vítrea
μm :	Micrometro (micron) – equivalente a 10^{-6} metro
ν :	Viscosidade cinemática (m^2/s)
ν_{12} :	Coeficiente de Poisson (deformação y,x)
ν_{21} :	Coeficiente de Poisson (deformação x,y)
V :	Velocidade (m/s)

LISTA DE ABREVIATURAS

AAP:	Peróxido de Acetil-Acetona – catalisador para cura a frio.
AFP:	<i>Automated Fiber Placement</i> – colocação de fibras automatizada.
AFRP:	<i>Aramida Fiber Reinforced Polymer</i> – Polímero reforçado com fibra aramida.
ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ASTEB:	<i>Advanced Standard Test Evaluation Bottle</i> .
ASTM:	<i>American Standards for Testing and Materials</i> .
ATL:	<i>Automated Tape Laying</i> – laminação automática através de fitas.
BPO:	Peróxido de Benzoíla – catalisador para cura a frio ou térmica.
BMC:	<i>Bulk Molding Compound</i> – Moldagem por compressão do compósito.
CFRP:	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> – Polímero reforçado com fibra de carbono.
CNC:	<i>Computer Numeric Control</i> – Controlador Numérico Computadorizado.
DMA:	Dimetil anilina – acelerador de cura utilizado com BPO.
FRP:	<i>Fiber Reinforced Polymer</i> – Polímero reforçado com algum tipo de fibra.
FEM:	<i>Finite Element Model</i> – Modelagem por Elementos Finitos ou MEF.
GFRP:	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> – Polímero reforçado com fibra de vidro.
ISO:	<i>International Standards Organization</i> .
MEKP:	Peróxido de Metil-Etil-Cetona.
MEV:	Microscopia Eletrônica de Varredura.
PBO:	Poli p-fenileno de Benzobisoxazol (<i>poly p-phenylenebenzobisoxazole</i>).
PBZT:	Poli p-fenileno de Benzobistiazol (<i>poly p-phenylenebenzobisthiazole</i>).
PTBPC:	Peróxido Terciário de Butil-cumila – catalisador para cura térmica.
PTBPO:	Peróxido Terciário de Butil-peroctoato – catalisador para cura térmica.
RTM:	<i>Resin Transfer Molding</i> - Moldagem por transferência de resina.
SMC:	<i>Sheet Molding Compound</i> – Moldagem por compressão de folhas pré-impregnadas submetidas à compressão e calor.
TEX:	Unidade de densidade linear igual à massa em gramas por quilômetro de filamentos de fibras, tecidos ou manta.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Considerações Gerais	1
1.2	Breve Histórico.....	6
1.3	Escopo do Trabalho.....	7
1.4	Desenvolvimento do Trabalho.....	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Evolução dos Sistemas <i>Filament Winding</i>	9
2.2	Teoria do <i>Filament Winding</i> e Fibras	11
2.3	Compósitos	23
2.3.1	Fibras	25
2.3.2	Cerâmica.....	34
3	DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO	37
3.1	Projeto Conceitual do Conjunto	38
3.1.1	Seleção da Tipologia mais Apropriada.....	40
3.1.2	Alteração da Tipologia e Confecção de Novo Protótipo.....	42
3.2	Montagem do Protótipo do Remodelador	43
4	ENSAIOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	45
4.1	Ensaio experimentais com as fibras	45
4.2	Procedimento para aferição da geometria	51
4.3	Análise numérica por FEM de componentes do remodelador	56
4.3.1	Análise dos Resultados da Simulação	61
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO	63
5.1	Análise dos Resultados.....	63
5.1.1	Conclusões.....	65

6	REFERÊNCIAS	67
---	-------------------	----

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Os materiais compósitos são de grande importância industrial devido as suas características e propriedades específicas. Esse tipo de material pode ser projetado conforme a aplicação ou o desejo do projetista em se obter o desempenho esperado e adequado a cada peça ou caso de aplicação. Sendo que algumas propriedades relevantes são o baixo peso, a alta rigidez, maior resistência a ambientes corrosivos, maior resistência a degradação por agentes químicos, em alguns casos, isolamento elétrico e isolamento termo-acústico.

Entre vários constituintes principais dos materiais compósitos podem-se citar: as fibras, as matrizes, materiais aditivos, materiais para produção de elementos de núcleos (*core*), como pode ser visto na Figura 1 e 2, para o caso de sistemas sanduíche nos quais o contorno (*shell*) pode ser um compósito, metal, ou porcelana.

Figura 1 – Alguns arranjos de núcleos para sistemas sanduíche. – Fonte: HYPERSIZER (2008).

Figura 2 – Exemplos de materiais de núcleo para sistemas sanduíche. – Fonte: ECONCORE (2008).

Uma das grandes vantagens dos materiais compósitos está, justamente, na ampla possibilidade de combinações entre fibras, matrizes e processos. Também se pode trabalhar com as mais variadas formas de fibras, como: filamento único (*roving*), tecidos (unidirecionais, bidirecionais e triaxiais), mantas de filamento único, mantas de fibras picadas, *tapes*, fibras picadas, e fibras moídas.

Categorias de fibras segundo a origem:

Figura 3 – Quadro de fibras quanto à origem.

Como se pode observar no quadro de origem das fibras é possível ainda a combinação entre os vários tipos obtendo-se, como exemplo: um tecido híbrido de fibras de vidro e carbono, tramados entre si ou manta de fibras naturais com fibras de aramida.

A seguir, a Figura 4 mostra as várias tipologias das fibras que são fabricadas com o vidro.

Figura 4 – Tipologia de fibras de vidro. - Fonte: OWENS CORNING (2009).

A Figura 5 ilustra as categorias de matrizes, mais utilizadas, segundo a origem:

Figura 5 – Quadro de matrizes quanto à origem.

A seguir são conceituados alguns dos principais processos produtivos de compósitos, com o intuito de demonstrar as diferenças, frente ao processo de enrolamento filamentar:

- *Centrifugation* (centrifugação): processo de moldagem por centrifugação de diversas geometrias, com reforço por fibras picadas ou contínuas e a resina aplicada juntamente nas paredes internas do molde.
- *Filament Winding* (enrolamento filamentar): processo de laminação por enrolamento de fibras contínuas *roving* ou *tape*, que são impregnadas com resina e depositadas em um mandril que pode ser colapsável ou não.
- *Hand Lay-up*: processo laminação manual no qual a combinação de fibras do tipo tecido ou manta, são inseridos em um molde e impregnados com resina.
- *Pultrusion* (pultrusão): processo de laminação contínua para fabricação de perfis lineares de seção transversal constante, no qual a fibra contínua (*roving*) ou *tape* é impregnado com resina e o material é tracionado por um sistema e por meio de um molde de metal aquecido chega à sua forma final.
- RTM (*resin transfer molding*): modelagem por transferência de resina. É um processo de fabricação onde é injetada resina sob pressão na cavidade de um molde fechado em que as fibras já estão depositadas, formando o compósito.
- SMC (*sheet molding compound*): moldagem por modelagem de chapas é o processo de fabricação de materiais reforçados de fibras principalmente utilizados em moldagem por compressão utilizando folhas ou chapas de fibras pré-impregnadas.
- *Spray-up*: sistema misto de laminação no qual a deposição da fibra e resina se faz por equipamento de ar comprimido, sendo lançadas sobre um jato de resina e direcionadas para a cavidade de um molde aberto e a modelagem através do processo manual (*hand lay-up*).

A Figura 6 resume alguns dos processos de laminação usuais.

Figura 6 – Quadro dos principais processos de laminação.

Vários processos podem ser aplicados no laminado com a finalidade de complementar ou mesmo melhorar as características do compósito, como: *vacuum form* (conformação a vácuo), autoclave, aquecimento (pré, pós, estufa), véu superficial, e filmes protetores.

A seguir, temos as principais áreas e exemplos de produtos que podem ser fabricados utilizando os materiais compósitos:

- Aeronáutica: fuselagem, componentes externos, dutos, pisos internos, divisórias e *pallets*;
- Aeroespacial: caixa para motores de foguetes (*motor cases*), tanques de combustíveis, peças de satélites, tubos de condutores elétricos fabricados em material isolante termo-elétrico e isolamento termo-acústico;
- Automotiva: cilindros para GNV (gás natural veicular) e extintores, tanques de combustíveis, engrenagens, carenagem e cases, painéis e semi-reboques;
- Artefatos Esportivos: raquetes de tênis, garfos e quadros de bicicletas, tacos de golfe, remos, pranchas e esquis;
- Biomédica: próteses, implantes, órteses, aparelhos e instrumentos cirúrgicos;
- Construção Civil: tubos e conexões, formas para pilares e estacas, vigas, pilares sujeitos a ataques químicos, reforços

internos e externos, estruturas, reservatórios (caixas d'água e cisternas), divisórias e materiais de acabamento;

- Energia: tubos e dutos para indústrias do setor sucroalcooleiro e petroquímico, pás de turbinas eólicas e vasos de pressão em geral;
- Naval: dutos condutores de arrefecimento, mastros, retrancas de embarcações, guarda - mancebos, divisórias internas, cascos, conveses e superestruturas;
- Militar: cápsulas de mísseis e bombas, protetores de ogivas, invólucros para materiais de resíduos radioativos, revólveres, antenas de radares, projéteis e coletes à prova de balas.

1.2 Breve Histórico

Historicamente, o homem empenhou-se no cultivo de alimentos, manipulação de metais, principalmente para a arte da guerra, e sempre foi praticante de crenças e rituais. Assim, muitas civilizações desenvolveram variadas técnicas preciosas para a evolução de ciências como a medicina e a engenharia. Uma dessas técnicas dentro da engenharia foi o desenvolvimento da tecnologia de enrolamento que nos remete ao ano de 1370 a.C., aproximadamente (TARNOPOL'SKII, *et. al.*, 1998). Como prova desta técnica, há um antigo sarcófago egípcio no Museu Britânico construído por enrolamento de fibras de vidro em torno de um mandril solúvel, sendo que as múmias eram envoltas com fitas embebidas em um tipo de resina que foi a precursora das resinas poliésteres.

A partir da descoberta da pólvora, na China antiga, e a produção de foguetes de bambu, os chineses passaram a enrolar cordões nos bambus aumentando a rigidez destes, pois a elevada pressão na câmara de combustão culminava com o colapso dos foguetes (TARNOPOL'SKII, *et. al.*, 1998).

Na Rússia no início de 1869 e na Alemanha em 1900, várias pistolas a tambor foram fabricadas por enrolamento de fios como reforço para gerar adequada distribuição de tensões (TARNOPOL'SKII, *et. al.*, 1998).

No desenvolvimento da tecnologia de enrolamento de fibras houve três importantes estágios: a concepção da primeira patente por LOHEST (1957) abordando os aparatos para o enrolamento filamentar; a criação de amostras de

anéis para testes de resistência segundo as normas da ASTM em 1955; e o primeiro livro publicado sobre a fabricação de materiais compósitos dedicado totalmente a tecnologia de enrolamento filamental por ROSATO e GROVE (1964).

A Figura 7 mostra o esquema de uma máquina de enrolamento filamental ainda movida manualmente.

Figura 7 – Esquema da primeira máquina de *filament winding*. – Fonte: BAXTER JR. (1965).

Nos anos 50 concebeu-se como uma técnica de manufatura, aquela denominada *filament winding* (enrolamento filamental), com o intuito de atender a demanda de novos materiais para a indústria aeroespacial e aeronáutica, (CARVALHO, 1996; KOUSSIOS, 2004). Esse novo processo apresenta vantagens como: colocação de fibras de maneira contínua sobre uma superfície de formato qualquer com simetria baricêntrica rotacional; elevada precisão na colocação da fibra e no ângulo de enrolamento; alta fração volumétrica de fibra no laminado e qualidade controlada constantemente durante o processo. Também, apresenta algumas desvantagens como: escorregamento da fibra (*fiber slipping*) sobre o mandril e seu descolamento da superfície (*fiber bridging*) durante a laminação exigindo cálculos precisos das trajetórias, principalmente quanto às trajetórias não geodésicas.

1.3 Escopo do Trabalho

Neste trabalho, foi criado, patenteado e validado um subsistema que será acoplado a um equipamento de enrolamento filamental, formando um único conjunto quando estiver em funcionamento. Esse subsistema, denominado

organizador de fios, terá como função principal o remodelamento de filamentos com o intuito de buscar a obtenção de *tapes* para melhorar a fabricação de laminados pelo processo de enrolamento filamentar. O sistema possui polias com geometrias variadas, que podem ser fabricadas a partir da usinagem a verde de porcelana ou material metálico. O processo de fabricação dessas polias e sua montagem é descrito no decorrer do trabalho, assim como o processo de validação para sua utilização no equipamento. Também foi analisado o comportamento da fibra ao ser submetida ao tracionamento através dessas polias. Finalmente, foram criados dois protótipos funcionais para avaliar o desempenho do processo idealizado no trabalho.

A relevância do trabalho reside na possibilidade de se obter fibras com uma geometria mais adequada para aplicações em processos de fabricação de estruturas em compósitos. Esta nova geometria da fibra possibilitará a obtenção de um produto final com maior homogeneidade, menor ocorrência de vazios e qualidade superior do laminado.

1.4 Desenvolvimento do Trabalho

O capítulo 1 faz menção dos materiais compósitos, suas aplicações nas mais variadas áreas, identificação dos tipos de fibras e matrizes e os principais materiais constituintes, descrição de alguns processos de laminação, breve histórico da evolução do processo de *filament winding*, proposta da pesquisa e a organização do trabalho.

Já o capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre o tema abordado.

O capítulo 3 descreve a metodologia de pesquisa mostrando como o trabalho foi desenvolvido, as principais ferramentas utilizadas e equipamentos, bem como o modelo numérico e a ferramenta computacional adotada no caso em questão.

No capítulo 4 são discutidos os resultados dos ensaios realizados, comparando com os dados dos cálculos numéricos obtidos e os resultados da validação do subsistema quando inserido no conjunto do equipamento de *filament winding*.

O capítulo 5 apresenta as conclusões finais e propostas para novas pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é realizada a revisão bibliográfica sobre o tema.

2.1 Evolução dos Sistemas *Filament Winding*

Desde 1947 muitas agências governamentais têm feito pesquisas intensivas como esforço para desenvolver e aplicar o sistema *filament winding* no projeto estrutural de vasos de pressão, para produzi-los com alta resistência e baixo peso (ROSATO e GROVE, 1964). A Figura 8 mostra uma máquina de *filament winding* na qual, o mandril é fixo, sendo o sistema de cabeçote móvel e realiza todo o movimento durante a laminação.

Figura 8 – Máquina de *filament winding* fabricando o invólucro de uma bateria – Fonte: ROSATO e GROVE (1964).

O sistema de laminação por *filament winding* teve seu início formalizado a partir de uma patente publicada sobre instrumentos aplicados ao *filament winding*, por LOHEST (1957). Com isso, uma série de mecanismos e complementos foram patenteados permitindo a execução da laminação por *filament winding*. Posteriormente BAXTER JR. (1965), patenteou a primeira máquina de *filament winding*, a qual ainda era operada manualmente.

No decorrer de décadas, muitas melhorias foram feitas, principalmente na automação e na concepção de novos projetos das máquinas de enrolamento filamentar e nos seus mecanismos e subsistemas auxiliares que complementam o sistema.

É possível citar como exemplos de máquinas atuais, que resultaram da evolução do processo de *filament winding*, a ATL (*automated tape laying*) e a AFP (*automated fiber placement*), mostrados nas Figuras 9 e 10, respectivamente.

Figura 9 – Exemplo de uma máquina ATL. – Fonte: INGERSOLL (2008).

Figura 10 – Exemplo de uma máquina AFP. – Fonte: ELECTROIMPACT (2008).

2.2 Teoria do *Filament Winding* e Fibras

Na década de 1960, ROSATO e GROVE descreveram os conceitos fundamentais da laminação por *filament winding*, que teve por objetivo mostrar a evolução histórica do processo, suas vantagens, limitações e gama de aplicações como:

- tanques de armazenamento e tubulações;
- aeroespacial e aeronaves;
- bélica (mísseis, armas);
- veículos subaquáticos;
- equipamentos elétricos.

ROSATO e GROVE (1964) ainda descrevem procedimentos para reforços, tipos de matrizes polimérica e detalhes da fabricação, como:

- tipos de máquinas;
- métodos de enrolamento e mandris;
- sistemas de tensionamento de fibras ou fitas (*tape*);
- revestimento interno (*liner*).

Os autores abordaram ainda vários fatores que afetam as propriedades desejáveis, entre eles as variáveis de fabricação, de processo, de bobinagem, de dimensionamento, de materiais, de tensões e fatores ambientais.

Como parâmetros de ensaios, podem ser destacados os ensaios de torção de anel, os de compressão, ensaios de pressão hidrostática e ensaios não destrutivos utilizando raios-x e outros métodos, como raios- β e ultra-som.

CARVALHO (1996), abordou o processo de enrolamento filamentar visando à otimização da disposição das camadas de reforços contínuos nos padrões prescritos, como mostra a Figura 11, as orientações das fibras nas direções principais, visando à possibilidade de fabricação de componentes de alto desempenho. Entretanto, argumenta que o caminho das fibras não pode ser escolhido arbitrariamente e que as fibras devem ser dispostas com precisão, para evitar seu escorregamento na superfície durante o processo.

Esse tipo de problema foi investigado e foi desenvolvido um ambiente integrado utilizando metodologias de otimização tendo em vista as

restrições, sendo algumas metodológicas e outras de condições de contorno, como: otimização de caminhos das fibras, colocação conveniente das fibras em relação à resistência uniforme de toda a estrutura, o escorregamento da fibra na superfície do mandril e o descolamento da fibra da superfície ou camada inferior. Esses métodos foram programados para, desse modo, os cálculos das trajetórias ótimas serem obtidos computacionalmente e logo em seguida serem validados experimentalmente em vasos de pressão cônicos e tubos não lineares, observando-se a aplicabilidade do método anteriormente proposto no projeto de compósitos.

Figura 11 'a', 'b', 'c' – Padrões básicos de enrolamento: 'a' - *polar winding*, 'b' - *helical winding* e 'c' - *hoop winding*.

JOHANSEN, *et. al.* (1998), relatam a automatização computadorizada do processo de fabricação por enrolamento filamentar de componentes, incluindo a geração de dados de controle para máquinas de enrolamento filamentar. É fornecida uma introdução à base geométrica do enrolamento filamentar em superfícies da revolução, com ênfase na geração de padrões de recobrimento.

Os autores exemplificam o uso do método em um componente real, sendo o algoritmo implementado denominado *CADPATH*[®], como um sistema de projeto auxiliado por computador e fabricação para componentes em *filament winding*, sendo que os principais recursos do programa são: (i) o cálculo das possíveis trajetórias de enrolamento para os componentes com simetria rotacional; (ii) busca por padrões de cobertura; (iii) atualização da geometria entre camadas sucessivas; (iv) análise resultante simplificada de resistência e rigidez do laminado; (v) transferência de dados do laminados para programas FEM para análise detalhada; e (vi) transferência de dados controle para a máquina de enrolamento

filamentar. As Figuras 12 e 13 mostram um exemplo de uma trajetória calculada pelo algoritmo e a peça sendo produzida, respectivamente.

Figura 12 – Exemplo de trajetória geodésica. – Fonte: JOHANSEN, *et. al.* (1998).

Figura 13 – Enrolamento da peça da Figura 12. – Fonte: JOHANSEN, *et. al.* (1998).

TARNOPOL'SKII, *et. al.* (1998), descrevem que o enrolamento filamentar é um dos métodos mais antigos de fabricação de compósitos. E foi, provavelmente, o primeiro método a ser automatizado, e continua a ser hoje um dos métodos mais econômicos para a produção em massa. Os autores mostraram ainda fatores importantes que os engenheiros devem levar em conta ao projetarem estruturas em compósitos por esse método.

Os autores apresentam ainda uma panorâmica sobre os tipos de

fibra e aprofundam o assunto sobre resinas utilizadas e desenvolvidas para o enrolamento filamental. Em seguida, apresentam processos de produção, ferramentas e equipamentos com uma visão geral e orientações práticas. Indicam também, os principais padrões de enrolamento (*hoop*, helicoidal e polar), como mostrado na Figura 11, assim como, os raios de curva mínima para fibras de carbono.

O mesmo autor descreve ainda como erros aparentemente insignificantes na máquina afetam a qualidade das peças fabricadas.

Em qualquer operação do enrolamento, as fibras seguem um caminho complexo ao longo do mandril a tensão de fibra, distribuição, redirecionamento, guias e outros fatores são todos inter-relacionados (TARNOPOL'SKII *et. al.*, 1998).

ROUSSEAU, *et. al.* (1998) em seu estudo sobre enrolamento de filamentos aborda o padrão de enrolamento helicoidal, aplicado muitas vezes na fabricação de tubos. Isso produz, em geral, o entrelaçado das fibras dentro das camadas, sendo que o principal objetivo de seus estudos foi a caracterização do grau de influência do entrelaçado sobre o desempenho mecânico das estruturas cilíndricas sob os mais diversos tipos de carregamento. Eles apresentaram as noções básicas do método de enrolamento helicoidal e de uma máquina de *filament winding* fabricada para os seus estudos.

Os corpos de prova estudados foram tubos compósitos de vidro/epóxi laminados na configuração $[\pm 55]_6$, sendo que todos os parâmetros de fabricação foram mantidos constantes, exceto o padrão de enrolamento. A qualidade da fabricação foi avaliada pelo acompanhamento rigoroso da geometria e da microestrutura dos tubos (ROUSSEAU, *et. al.*, 1998).

Os ensaios efetuados sobre os corpos de prova consistiram de cargas repetitivas e progressivas, destinadas a caracterizar o comportamento do dano sob os mais variados tipos de carregamento (ROUSSEAU, *et. al.*, 1998).

O crescimento dos danos foi aumentado pelo grau de entrelaçamento dos tubos apenas para carregamentos de pressão interna. Os

ensaios de ciclos de pressurização (*wepping tests*)¹ revelaram que a presença de fibras cruzadas pode induzir ao vazamento prematuro nos tubos. As regiões de ondulações e o índice de vazios (*voids*) encontrados perto destas regiões possivelmente representam o início do estado de falha, aumentando assim o crescimento dos danos e a possibilidade de vazamento nas estruturas (ROUSSEAU, *et. al.*,1998).

A Figura 14 mostra como a região de ondulação é formada durante a laminação pelo processo de enrolamento filamental, podendo gerar regiões na peça que poderão levar a um processo de falha do laminado.

Figura 14 – Formação da ondulação no padrão de enrolamento helicoidal. - Fonte: ROUSSEAU, *et. al.* (1998).

COHEN, *et. al.* (2001), discutem o papel da relação entre fração volumétrica de fibra e a resistência para os vasos de pressão compósitos, fabricados pelo processo de enrolamento filamental. A pesquisa englobou um projeto de investigação experimental do processo de manufatura e variáveis de projeto que afetam a qualidade do vaso de pressão compósito e a sua resistência.

A análise estatística dos dados mostrou que a resistência de vasos de pressão compósitos é fortemente influenciada pelo processo de fabricação e pelas variáveis de projeto. Em geral, foi verificado que a seqüência de empilhamento

¹ Quantidade de ciclos de pressurização entre 0 a 8,27 MPa a que um tanque ou tubo é submetido até que haja vazamento do líquido pelas paredes, ASTM D-2143.

do laminado, a tensão de enrolamento, o gradiente da tensão de enrolamento, o tempo de enrolamento e a interação entre o gradiente da tensão de enrolamento e tempo de enrolamento, afetam significativamente a resistência do compósito. A Tabela 1 mostra os dados obtidos para os dois tipos de vasos ensaiados por COHEN, *et. al.* (2001).

Um programa de computador fundamentado na termo-cinética da resina e nas condições de processamento foi utilizado para o cálculo teórico da fração volumétrica de fibra distribuída ao longo de todo o vaso de pressão fabricado por enrolamento filamenar. Dados de resistência versus o volume de fibra obtido juntamente com o programa de computador foram usados para prever a pressão de explosão do vaso em compósito, sendo que os resultados teóricos foram aceitáveis em relação aos dados experimentais obtidos, como mostra a Tabela 2.

Tabela 1 – Sumário de análise dos dados para os vasos de pressão tipo 1 e 2 (adaptado de COHEN, *et. al.*, 2001).

Tipo de Cilindro	Propriedades Físicas	Camada <i>Hoop</i>			Camada Helicoidal		
		Valor de projeto	Valor medido	Diferença %	Valor de projeto	Valor medido	Diferença %
C-1 ¹	Vol. Resina (%)	45	46	2,2	48	44	-8
	Vol. Fibra (%)	55	47	-15	52	47	-10
	Vol. <i>Voids</i> (%)	-	7	-	-	8	-
	Espessura de Camada (mm)	0,279	0,335	20	0,833	0,889	8
C-2 ²	Vol. Fibra (%)	62	44	-29	52	47	10
	Vol. <i>Voids</i> (%)	-	10	-	-	8	-
	Espessura de Camada (mm)	-	-	-	0,833	0,889	7

1-Tipo C-1 (camadas *hoop* dispersas): $(\pm 22,5_2/90_2)_8/\pm 22,5_2$; 2-Tipo C-2 (camadas parcialmente *hoop*): $(\pm 22,5_2/90_4)_2/(\pm 22,5_2/90_3)/[(\pm 22,5_2/90_2)/(\pm 22,5_2/90_3)/\pm 22,5_2$

Tabela 2 – Predição de falha para vasos de pressão compósitos (adaptado de COHEN, *et. al.*, 2001).

Tipo de Vaso	Pressão de Falha Medida (MPa)	Predição baseada no modelo do ABAQUS			Predição baseada nos ensaios		
		Pressão (MPa)	Erro %	Camada <i>hoop</i> falhada	Pressão (MPa)	Erro %	Camada <i>hoop</i> falhada
A	11,74	11,52	-1,9	8	11,49	-2,1	8
	13,09	12,64	-3,4	18	-	-	-
B	10,85	10,86	+0,1	4	10,76	-0,8	5
	16,20	15,45	-4,6	11	16,23	+0,2	11

PARK, *et. al.* (2002), estudaram padrões de enrolamento calculando e utilizando equações de trajetórias semi-geodésicas da fibra, para uma superfície qualquer, uma vez que a trajetória da fibra é dependente da superfície de deposição, do ângulo de enrolamento e da espessura na direção da estrutura laminada.

A diferença do ângulo da fibra através da espessura foi calculada para vários parâmetros de projeto, tais como espessura helicoidal de enrolamento e ângulo. Foram efetuadas análises por elementos finitos considerando a variação dos ângulos de enrolamento através da espessura utilizando o programa comercial ABAQUS. Uma sub-rotina, ORIENT foi codificada para impor a variação dos ângulos de enrolamento a cada elemento sólido.

Ensaio hidrostático padrão foram executados para um vaso de pressão (ASTEB), como mostra a Figura 15. Além disso, os resultados das análises por elementos finitos considerando a não linearidade geométrica foram validados através dos dados experimentais dos ensaios.

Figura 15 – Configuração padrão ASTEB do vaso de pressão dentro da seção de testes e com *strain-gauges* aderidos à superfície do vaso. - Fonte: PARK, *et. al.* (2002).

MERTINY e ELLYIN (2002) investigaram experimentalmente a influência da tensão aplicada às fibras, durante o processo de enrolamento filamentar, quanto às propriedades físicas e mecânicas para geometrias tubulares fabricadas em compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro.

Elementos tubulares mantidos sob pressão utilizados para o transporte e o armazenamento de fluidos geralmente estão sujeitos a uma variedade de condições de carregamento durante a sua vida em serviço. Assim, foram ensaiados corpos de prova tubulares sob carga biaxial de diferentes proporções. Nos ensaios realizados foram medidas as respostas para tensão versus deformação e as informações sobre as falhas funcionais e estruturais indicaram a propagação

das trincas e a característica da falha final dos componentes. As propriedades mecânicas foram analisadas em conjunto com as propriedades físicas, medidas de fração volumétrica de fibra e espessura efetiva da parede. Foi demonstrado experimentalmente e comprovado que a resistência do componente é dependente do grau de tensionamento da fibra durante o enrolamento sobre o mandril.

Considerando condições de carregamento no domínio da fibra e aumentando-se a tensão na tração da fibra, atinge-se uma melhoria da resistência contra a falha de componentes tubulares. Inversamente, quando o carregamento está no domínio da matriz, a falha é retardada com a redução da tração da fibra.

As Figuras 16 e 17 mostram as correlações obtidas e os resultados experimentais respectivamente.

Figura 16 – Correlação da fração volumétrica de fibra com o a tração aplicada à fibra durante o enrolamento. - Fonte: MERTINY e ELLYIN (2002).

Figura 17 – Fotografia de alguns corpos de prova em ensaios mecânicos submetidos a vários tipos de carregamentos. - Fonte: MERTINY e ELLYIN (2002).

ZIEHL e FOWLER (2003) abordaram a concepção de vasos de pressão reforçados com fibra baseada em danos. Entretanto, os códigos computacionais de projeto utilizados ainda baseiam-se, geralmente, num critério de iterações quadráticas que depende do teste de falha das camadas em diferentes orientações. Uma taxa de tensão foi imposta para a nova concepção de vaso de pressão proposto. Essa abordagem fundamentada em danos pareceu ser excessivamente conservadores para certas resinas e não contribuiu para o aparecimento de danos.

Os mesmos autores efetuaram uma investigação experimental para determinar a influência da tensão na contribuição dos danos nos pequenos corpos de prova padronizados ensaiados. Os resultados obtidos foram utilizados para desenvolver uma concepção baseada em danos o que difere da abordagem existente com base na falha.

Nova abordagem sobre danos foi utilizada para conceber tampões e bocais aplicados em um vaso de pressão compósito em polímero reforçado com fibra de vidro, com um diâmetro de 2,13 m por 6,55 m de altura. O vaso foi subsequenteiramente testado com ensaio de ultra-som para verificar a adequação dos novos modelos. Os resultados analisados destas regiões de descontinuidades forneceram comparações entre as previsões do modelo em elementos finitos e os dados mensurados pelos *strain gages*.

KOUSSIOS (2004) apresentou uma visão geral sobre *filament winding*, realizando um trabalho global sobre as variáveis envolvidas no processo de laminação, discorrendo sobre conceitos de geometria diferencial e a teoria da cascas finas anisotrópicas de revolução. Em sua pesquisa o autor formulou um gerador de geometrias de descrição paramétrica superficial para o processo, aplicado a projetos de vasos sob pressão em material compósito.

Ainda nesse algoritmo foram incluídos os cálculos de trajetórias geodésicas e não geodésicas com a geração automática de padrões de enrolamento adequados para os vários tipos de vasos de pressão estudados, combinando, também, diversas estratégias de otimização. Foi proposto um formato de mandril que facilitava o procedimento experimental na determinação do coeficiente de atrito. Todo o processo, envolvendo a cinemática do enrolamento filamentar, combinado com várias recomendações para uma derivação adequada das velocidades e

acelerações associadas ao conjunto, nos movimentos de cada componente da máquina foi estudado.

Esse trabalho foi consolidado em um módulo de controle de colisão no qual foram determinados os movimentos e os limites do alimentador do olho. Além disso, foram propostas várias novas configurações de máquinas, exclusivas para a produção de vasos de pressão de várias proporções, morfologias e tipos de circuitos de enrolamento.

Como um tema principal da tese, as metodologias derivadas e as equações foram aplicadas na classe isotensóides para vasos de pressão.

Os resultados gerados pelos módulos de descrição de trajetórias móveis e algoritmos de geração de padrão foram todos verificados por simulação, enquanto os resultados do algoritmo solucionador cinemático e otimizador foram avaliados tanto pela simulação quanto pela execução em uma máquina de enrolamento filamentar. No entanto, os ensaios mecânicos das estruturas propostas e dos protótipos construídos ficaram como recomendações para futuros trabalhos.

KIM, *et. al.* (2004) demonstraram em sua pesquisa a possibilidade de estabelecer um método de otimização de projeto de estruturas fabricadas com enrolamento filamentar. Conforme os autores, até a data da pesquisa muitos projetos e fabricação de estruturas por enrolamento filamentar eram baseados em experiências de fabricação anteriores, sem ter métodos adequados de cálculo regendo o projeto. Nesta pesquisa, o algoritmo de trajetórias semi-geodésicas foi usado para calcular o possível padrão de enrolamento, tendo em conta o enrolamento e o escorregamento entre a superfície do mandril com a fibra. Além disso, utilizaram a análise por elementos finitos com o código comercial ABAQUS, no qual é apresentada a predição do comportamento das estruturas fabricadas por enrolamento filamentar. Com base no algoritmo de trajetórias semi-geodésicas e no método de análise por elementos finitos, foi projetada uma estrutura para ser fabricada através de enrolamento filamentar usando o algoritmo genético.

LI, *et. al.* (2006), abordaram o emprego de curvas *splines* na otimização de trajetórias do processo de laminação *filament winding*, para a industrialização desses compósitos fabricados por enrolamento filamentar sem simetria axial. A maior dificuldade está na automatização do projeto e,

principalmente, no caminho da fibra sobre a superfície do mandril com intuito de obter uma distribuição uniforme, a cobertura total da peça e todo o processo de laminação sem escorregamento da fibra sobre a superfície do mandril. Trajetórias geodésicas e semi-geodésicas são freqüentemente utilizadas como forma de evitar o escorregamento da fibra. No entanto, a restrição nas curvaturas, como condições iniciais, restringe severamente a liberdade de concepção de projeto, que desempenha um papel importante na produção de componentes de alto desempenho. Os autores apresentaram uma nova classe de trajetórias, com maior liberdade pela generalização de *splines* e oferece as condições para fazer *splines* cúbicas em geometrias como cilindros e cones, tornando estável a trajetória da fibra no mandril.

Após formular a resistência ao escorregamento da fibra nessas geometrias, o autor realizou uma aplicação da teoria desenvolvida em uma forma não geodésica, no caso, um cotovelo, onde se obteve uma ótima deposição e uniformidade das fibras, garantindo boas propriedades mecânicas no laminado e comprovando a convergência de resultados obtidos entre modelos geodésicos e semi-geodésicos através de um método linearizado, aferido por ensaios. Resultados práticos mostram que a distribuição da fibra é excelente, e o produto acabado tem espessura extremamente uniforme, como apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Configuração do padrão de enrolamento calculado para o projeto do cotovelo proposto. -
Fonte: LI, *et. al.* (2006).

BLOM, *et. al.* (2009), buscaram adequar a rigidez elástica dos painéis de compósitos laminados, para permitir as fibras pudessem fazer as curvas dentro do plano das lâminas beneficiando os projetos ou modelos de chapas planas retangulares. O âmbito de aplicação deste conceito de rigidez variável é estendido

para cascas cônicas tridimensionais com dimensões arbitrárias que podem ser fabricadas usando máquinas avançadas de posicionamento de fibra (*fiber placement*). Apresentam ainda o cálculo detalhado de quatro definições do caminho teórico da fibra para superfícies de cascas cônicas genéricas, como mostra a Figura 19. Também foram discutidas as definições de caminhos diferentes e os resultados de geometrias laminadas. Os detalhes da implementação na fabricação e limitações do raio diretor da curvatura, baseado na avançada tecnologia do posicionamento de fitas foram demonstrados.

Figura 19 – Caminhos traçados pelo cálculo realizado para a referida geometria. - Fonte: BLOM, *et al.* (2009).

Como citadas anteriormente, cabe uma observação sobre a diferença entre curvas geodésicas, Figura 20, não-geodésicas e semi-geodésicas:

- Geodésica – é a curva de menor distância entre dois pontos pertencentes a uma superfície.
- Não-Geodésica – é a curva de distância qualquer entre dois pontos desejáveis sobre uma superfície qualquer.
- Semi-Geodésica – é a mescla de curvas geodésicas e não-geodésicas em alguns trechos desejáveis.

Figura 20 – Exemplo de trajetórias geodésicas.

2.3 Compósitos

Os materiais compósitos utilizados em aplicações estruturais, em escala macroscópica, são definidos seguindo os três fundamentos:

- Consistem de dois ou mais materiais fisicamente distintos e separáveis mecanicamente;
- Podem ser fabricados de modo a se controlar a proporção de cada um dos componentes utilizados, objetivando-se a obtenção das propriedades desejadas;
- O desempenho obtido no compósito é superior, se comparado ao dos seus componentes separados.

Nos materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras, polímeros (matrizes) e fibras (reforços) com algumas propriedades físicas e mecânicas desejáveis são combinados, resultando em um material com propriedades superiores.

As fibras geralmente possuem alta resistência em ensaios uniaxiais de tração e módulos de elasticidade elevados, e atuam como componentes principais frente aos esforços aplicados no compósito. A matriz mantém as fibras nas posições e orientações desejadas, separando as fibras umas das outras e evitando abrasão mútua durante as deformações no compósito, distribui os esforços entre as fibras e, no caso dos esforços transversais às fibras, é a principal responsável pela resistência mecânica do compósito, apesar de geralmente possuir baixa resistência mecânica.

2.3.1 Fibras

PIGGOTT (2002) descreve idéias básicas no campo dos materiais compósitos reforçados por fibras e fornece alguns dados recentes sobre capacidades de estruturas autoportantes em que apresenta os dados mostrados nas Tabelas 3, 4 e 5, sobre diversas fibras e suas propriedades.

Tabela 3 – Propriedades de fibras naturais, sintéticas de alto desempenho e metálicas (adaptado de PIGGOTT, 2002).

	Material	Densidade (kg/m ³)	Resistência (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Diâmetro (μm)
Polímeros Naturais	Algodão	1500	0,35	1,1	-
	Linho	-	0,9	110	-
	Seda	1250	0,5	1,3	-
	Lã	1300	0,36	6	-
	Madeira (papel kraft)	~1000	0,9	72	-
Polímeros Sintéticos	Celulose (Fortisan)	1520	1,1	2,4	-
	Poliéster (termoplástico)	1380	0,6	1,2	-
	Nylon	1140	0,8	2,9	-
	Spectra 900 TM	970	2,6	120 ⁺	38
	Spectra 1000 ^{IM}	970	3,0	170 ⁺	27
	Aramida 49 [‡]	1440	3,6	130*	12
	Aramida 149 [‡]	1470	2,41	160	12
	PBO	1470	5,8	365	10
	PBZT	1470	4,2	330	10
Metais	Berílio	1800	1,3	315	-
	Molibdênio	10300	2,1	343	-
	Liga de Níquel (Rene 41)	8200	2,3	220	-
	Aço	7900	4,2	210	-
	Liga de Titânio	4600	2,2	120	-
	Tungstênio	19300	3,9	411	-

⁺ módulo transversal de fibras de polietileno é 1,6 GPa; * módulo transversal do Aramida 49 é 2,49 GPa; [‡] tipo de fibra aramida fabricada pela Twaron.

O mesmo autor faz uma abordagem sobre as fibras quanto a suas origens, separando por fibras naturais, sintéticas, metálicas e minerais. A seguir seguem algumas considerações sobre as fibras de boro, carbono e vidro:

- a- Fibras de boro: As fibras de boro foram desenvolvidas na década de 1960 para aplicações aeroespaciais. O boro tem um grande potencial de resistência, entretanto é um material muito rígido e quebradiço, não sendo

adequado em aplicações que necessitam de fibras mais finas. A fabricação das fibras de boro é feita por deposição em um fio bem fino ($1,25\ \mu\text{m}$ de diâmetro) de tungstênio, como mostra a Figura 22. O fio de tungstênio é aquecido e um rigoroso controle da temperatura é necessário para obter fibras coerentes e do tamanho ideal de cristal. Os cristais devem ser pequenos, de 2 nm a 3 nm de diâmetro, para que o material seja praticamente amorfo. Os melhores resultados foram obtidos para uma temperatura de 1100°C e o diâmetro de fibra normalmente produzido é de 0,1 mm.

Figura 22 – Esquema do processo de deposição de vapor químico utilizado na fabricação de fibras de boro. - Fonte: PIGGOTT (2002).

b- Fibras de carbono: Estas são freqüentemente chamadas fibras de grafite e normalmente utilizam fibras de polímeros com cuidadoso tratamento térmico. Elas podem também ser fabricadas a partir do piche. O carbono ocorre em diversas formas alotrópicas na natureza, como mostra a Figura 23. Somente as formas cristalinas têm alto módulo de elasticidade, e só algumas formas cristalinas do carbono que produzem fibras de forma semelhante ao grafite. As fibras poliméricas (como exemplo o rayon e a poliacrilonitrina) são primeiramente aquecidas a temperaturas relativamente baixas (aproximadamente 220°C) no ar sob tensão para oxidar as fibras e estabilizá-las para que elas possam ser aquecidas a temperaturas mais elevadas sem desintegração. Em seguida são aquecidas a temperaturas superiores a 2000°C , e geralmente ainda sob tensão. Após a conversão inicial do carbono ocorrem algumas recristalizações, então alguns planos do

grafite são orientados ao longo do eixo das fibras, como mostra a Figura 24 em estruturas de fratura.

Figura 23 'a', 'b', 'c', 'd', 'e', 'f', 'g', 'h' – Algumas formas alotrópicas do carbono: 'a' - diamante, 'b' - grafite, 'c' - lonsdaleite (nome em homenagem a cientista Kathleen Lonsdale, conhecido também como diamante hexagonal), 'd' - fulereno C_{60} , 'e' - fulereno C_{540} , 'f' - fulereno C_{70} , 'g' - carbono amorfo (*glassy carbon*), 'h' - nanotubo de carbono. - Fonte: SCOTT (2009).

Figura 24 'a', 'b', 'c', 'd' – Imagens por MEV de seções transversais de fraturas de fibras de carbono com um tratamento de térmico a 2500°C: 'a' - tipo radial, 'b' - tipo aleatório, 'c' - tipo estrias circunferenciais, 'd' - tipo estrias circunferenciais com estruturas aleatórias. - Fonte: HAMADA, *et. al.* (1987).

c- Fibras de vidro: Os vidros cobrem uma vasta gama de materiais, normalmente contendo mais de 50% da sílica (SiO_2) com estruturas aleatórias. Eles muitas vezes são considerados como líquidos super resfriados, denominado de estado vítreo. Vidro comum utilizado para janelas e garrafas, normalmente contém 14% Na_2O , 10% CaO , 2,5% MgO , e 0,6% Al_2O_3 o restante sendo SiO_2 , sendo este tipo de vidro relativamente fraco, em resistência mecânica e possui um alto coeficiente de expansão térmica em comparação com sílica pura, juntamente com uma condutividade térmica muito baixa. A uma temperatura de 700°C é facilmente moldável, embora caibam cuidados para aliviar as tensões desenvolvidas durante os processos moldagem e arrefecimento. Fibras fabricadas com este tipo de vidro não têm propriedades muito boas, sendo comparativamente fracas e facilmente atacada pela água. Os vidros de boro-silicato contêm uma quantidade relativamente grande de B_2O_3 (tipicamente 12,9%) junto com Na_2O (3,8%), e Al_2O_3 (2,2%), são muito

mais fortes que o vidro de composição principal de SiO_2 e Na_2O , sendo em proporções aproximadas de 63% e 18% respectivamente, este mais resistente à água e produtos químicos, e com baixos coeficientes de expansão térmica. Entretanto, eles não formam fibras facilmente. As fibras de vidro, utilizadas para os têxteis, são de uma composição diferente e são as mesmas utilizadas como reforço para polímeros. Para fins de reforço, um dos vidros utilizado com mais frequência é o vidro-E, desenvolvido originalmente por ter boas propriedades elétricas, sendo sua composição típica de CaO 17,5%, Al_2O_3 14,4%, B_2O_3 8%, MgO 4,5%, maior parte do restante (54,4%) SiO_2 . As fibras normalmente são feitas por fusão e os ingredientes agitados, em seguida, o líquido escorre através de furos de 1 mm a 2 mm de diâmetro em um prato de platina aquecido, como mostra o esquema da Figura 25. O vidro é puxado rapidamente formando as fibras com um diâmetro médio de 10 μm . O prato de platina contém centenas de furos, e as fibras são todas formadas em um conjunto. Na obtenção de fibras fortes é essencial que as superfícies de fibras não toquem em nada, até mesmo em outras fibras. Então as fibras são imersas em uma emulsão oleosa formando um revestimento especial para garantir boa aderência entre fibras e a matriz, quando as fibras forem posteriormente incorporadas como reforço em um polímero. Existem fibras de vidro desenvolvidas para atingir alta resistência e módulo de elasticidade, fibras com capacidade de transparência eletromagnética e outras com alta resistência a agentes alcalinos. Todas as fibras de vidro são extremamente sensíveis aos danos na superfície. Apenas tocar uma fibra contra outra é suficiente para causar uma trinca que pode reduzir a resistência, para menos da metade de uma fibra ainda intacta. O manuseio das fibras é possível somente se houver uma camada protetora sobre estas e, mesmo assim, pode ocorrer redução considerável de resistência em caso de negligência no manuseio. As Tabelas 4 e 5 e a Figura 26 apresentam diversas características físico-mecânicas de diversos tipos de fibras.

Figura 25 – Esquema do processo produtivo da fibra de vidro. - Fonte: PIGGOTT (2002).

Tabela 4 – Valores para resistência, módulo de elasticidade e máxima temperatura de uso para fibras inorgânicas (adaptado de PIGGOTT, 2002).

Material	Densidade (kg/m ³)	Resistência (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Diâmetro (μm)	Temperatura (°C)
Vidro E	2540	3,4	72	5 - 25	550
Vidro S	2480	4,8	85	5 - 15	650
Sílica (Astroquartz)	2200	3,45	69	9	1070
Boro	2600	3,5	420	140	700*
SiC (SCS-6)	3320	4,0	410	140	900
SiC (Nicalon)	2800	2,7	185	10	1200
Si ₃ N ₄	2500	2,5	300	10	1200
Carbono P120S (maior rigidez)	2180	2,2	827	10	2500*
Carbono HMS	1900	2,3	377	5	2500*
Carbono (mais econômico)	1810	3,8	238	7,2	2500*
Carbono T40 (maior resistência)	1810	5,6	290	5,1	2500*
Al ₂ O ₃ (Nextel 610)	3880	1,9	373	10 - 12	1200
Al ₂ O ₃ (Nextel 312) ‡	2700	1,7	150	10 -12	1200
Al ₂ O ₃ (Saffil)	3000	2,0	300	3	1000

São dados somente valores representativos. Há variações consideráveis nos valores relatados para muitos dos materiais. A temperatura destina-se apenas como indicação de resistência relativa ao aquecimento. Na prática, a temperatura máxima depende da tensão e do ambiente químico.

* 500°C em atmosfera de oxidação; ‡ contém 24% de SiO₂ e 14% de B₂O₃.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas comparativas entre diversos tipos de fibras sintéticas (ORTENZI, 2007).

Tipo de Fibra	Peso Específico (g/cm ³)	Resistência à Tração – ELU (MPa)	Módulo na Tração (GPa)	Deformação até a ruptura (%)
Vidro – E	2,58	3330	72,5	2,5
Vidro – S	2,48	4600	88,0	3,0
Vidro – R	2,62	4400	86,0	3,0
Aramida (K – 49)	1,44	3620	131,0	2,9
Carbono (AS4C)	1,80	3790	234,0	1,7

Figura 26 – Relação entre os módulos de elasticidade longitudinal e transversal de diversos tipos de fibras – Fonte: Adaptado de PIGGOTT (2002).

NYGÅRD e GUSTAFSON (2004) avaliaram a eficácia dos diferentes métodos de impregnação para a produção de fibra de vidro contínua reforçando a matriz de polipropileno, como material compósito no formato de fitas. Os métodos de laminação selecionados foram: o método de impregnação por pino, Figura 27, impregnação transversal às polias de transporte da fibra incluindo as diferentes técnicas de vibrações e com ranhuras radiais ajustáveis.

Figura 27 – Impregnador radial de fibras. - Fonte: NYGÅRD e GUSTAFSON (2004).

O grau de impregnação da fusão do termoplástico foi estudado qualitativamente com microscopia óptica e quantitativamente determinado pela medição da opacidade. Excelentes resultados foram obtidos usando ranhuras radiais ajustáveis, seguindo o método de impregnação por pino com câmara. Já a impregnação transversal, por polias de transporte da fibra ajustáveis, ocorreu de forma pobre. Utilizando o método das ranhuras radiais ajustáveis foi possível alcançar elevadas taxas de fração volumétrica de fibras dentro do compósito e controlar facilmente o teor fibra versus matriz.

Todas as configurações de ensaios utilizaram um espalhador de fibras de pinos cilíndricos, sendo o *roving* de 1200 TEX foi espalhado tornando-se um *tape* de fibras com largura de 9 mm, sendo este *tape* de fibras submetido a uma pré-tensão constante de 15 N, conforme ilustra a Figura 28.

Figura 28 – Dispositivo espalhador de fibras. - Fonte: NYGÅRD e GUSTAFSON (2004).

WU, *et. al.* (2007), propuseram método para melhorar a tecnologia de fabricação pelo processo de moldagem por transferência de resina (RTM), estudando os parâmetros de permeabilidade inclusos no plano e transversalmente, importantes em códigos de simulação. Sobretudo, a permeabilidade através da espessura, sendo parâmetro crítico na otimização de formas complexas em compósitos de seção espessa.

O trabalho de investigação apresentou um novo método baseado na tecnologia radial para determinar a permeabilidade transversal. As principais diferenças quando comparado com outros métodos é a forma de posicionamento do reforço. A amostra de tecido e mecha de fibras, como apresenta a Figura 29, foram enrolados e colocados no molde. O fluxo do fluido foi na direção radial do reforço através de toda a espessura. A permeabilidade foi medida através de espessura para fita de tecido e a fita de filamento de fibra de vidro, mostrando experimentalmente que a largura da amostra não tem qualquer influência significativa sobre permeabilidade transversal.

Figura 29 – Tipos de fibras de vidro utilizados na experiência de permeabilidade da resina na fibra, aplicando-se a técnica radial. - Fonte: WU, *et. al.* (2007).

THOMASON (2008) apresentou resultados de uma extensa investigação do desempenho mecânico de moldagem por injeção em compósitos contendo fibras longas de vidro, como reforço da poliamida 6,6. O teor de fibras de vidro utilizado nestes compósitos, variou entre 10% a 50% pelo peso, com fibras de diâmetros médios de 10 μm , 14 μm e 17 μm . Testes mecânicos foram realizados em uma faixa de temperatura de 23°C a 150°C sobre a matéria seca como moldados e, também, com vapor de água condicionando as amostras.

Foram comparados os resultados destes compósitos, contendo fibras longas, quando comparados com a extrusão padrão utilizando material reforçado com fibras curtas de fibra de vidro. A influência do diâmetro das fibras e a concentração de fibras de comprimento residual, como mostra a Figura 30, e a distribuição da orientação das fibras e módulo do compósito foram apresentados e discutidos em comparação com as previsões de alguns dos modelos disponíveis de micro-mecânica.

Figura 30 – Distribuições dos diâmetros de fibra em relação aos dados das fibras produzidas. - Fonte: THOMASON (2008).

2.3.2 Cerâmica

FORTULAN (1997) descreve sobre a possibilidade de utilização de cerâmica em aplicações de contato deslizante não-lubrificado para operações de alta carga e altas velocidades, nas quais o atrito e desgaste não são propriedades intrínsecas do material, mas características do sistema de contato. Alterações no carregamento, na velocidade ou no meio ambiente podem causar variações na taxa de desgaste de um corpo ou uma superfície em contato. Foram analisadas as condições que causam o desgaste e os muitos mecanismos que contribuem para a causa de danos, observando que a solução de um problema particular típico depende da identificação precisa da natureza das variáveis envolvidas.

Em algumas situações, o aumento de dureza pode resultar em aumento da resistência ao desgaste. O baixo coeficiente de atrito das cerâmicas em alto vácuo é devido à fragilidade da porcelana que não suporta um crescimento de

junção por deformação plástica. Como não há o crescimento por junções das cerâmicas, um filme superficial de óxido ou por partículas desgastadas pode reduzir o atrito efetivamente diferente do que ocorre com os metais.

Com a fragilidade da cerâmica, vários tipos de trincas são introduzidas pelo atrito ao redor da zona de contato, como as trincas hertzianas laterais, medianas e radiais. A superfície apresenta também trincas generalizadas devido ao processo de acabamento superficial do corpo cerâmico.

O mecanismo de desgaste pode ser observado em três regimes distintos de severidade de contato:

- Regime de desgaste brando:
Caracterizado pelo desgaste microscópico que ocorre nos cantos dos poros, com finos riscamentos superficiais por partículas já desgastadas ou asperidades superficiais.
- Regime de transição de desgaste brando para desgaste severo:
A transição ocorre quando o nível de tensão dinâmica da superfície excede o limite crítico para a iniciação da propagação incontrolável das trincas, com resultado de ruptura da superfície. Os mecanismos de deterioração dominantes são deformações plásticas e fratura da superfície. Partículas removidas pelo desgaste da superfície são esmagadas e moídas em finos grânulos e depositadas na superfície fraturada.
- Regime de desgaste severo:
A superfície, deslizando sob severas condições, é coberta pelos fragmentos desgastados indicando que uma extensa superfície fraturada assume o espaço. As partículas consistem em finos fragmentos moídos que localmente são compactados termo-mecanicamente para formar camadas de tribo-filme.

O atrito e desgaste dos materiais cerâmicos depende fortemente da carga aplicada, velocidade de deslizamentos, acabamento superficial, ambiente e temperatura.

3 DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO

A pesquisa e o protótipo foram desenvolvidos conforme as etapas a seguir:

- Desenvolvimento do Protótipo
- Pedido de privilégio de invenção
- Ensaio experimentais e simulações
- Análise e discussão dos resultados

O desenvolvimento do protótipo foi iniciado a partir da elaboração do 'QFD' – *Quality Function Development*, (ROZENFELD, *et. al.*, 2006) para discutir as principais diretrizes do projeto, assim como para obter um componente com desempenho satisfatório para tal função.

Feitas as análises preliminares, iniciou-se o primeiro projeto conceitual e a partir desse foram feitas modificações até atingir os critérios propostos pelo QFD.

Com a conclusão do projeto conceitual passou-se para a fase do projeto mecânico e construção do primeiro protótipo, respectivamente.

Após a elaboração do primeiro protótipo funcional, foram realizadas as verificações de funcionamento e feitos os ensaios de espalhamento das fibras.

Paralelamente à pesquisa foi elaborada a documentação relativa ao requerimento de patente de invenção do sistema (SOEIRA, *et. al.*, 2009), uma vez que a variabilidade das fibras em forma de multifilamentos é restrita no Brasil, devido a interesses estratégicos dos países que detém a tecnologia de produção das mesmas.

Pelos resultados obtidos, foram realizadas novas alterações no projeto, todas detalhadas no capítulo correspondente, e outro protótipo foi produzido.

A partir do segundo protótipo funcional, novos ensaios foram realizados.

Finalmente foram feitas as análises dos resultados obtidos e apresentadas as considerações pertinentes, bem como indicações dos aprimoramentos que serão feitos no componente.

3.1 Projeto Conceitual do Conjunto

O projeto do remodelador para fibras poliméricas tem na sua principal função alterar a geometria da fibra, com o intuito de proporcionar uma melhor penetração da resina e um recobrimento da superfície a ser laminada de forma mais homogênea, evitando falhas decorrentes do processo de fabricação, como citado já por ROUSSEAU, *et. al.* (1998). O conjunto de polias promove a reestruturação da mecha de fibras, tornando um *roving* em um *tape* de largura controlável, conforme as polias utilizadas.

Como o sistema a ser desenvolvido não possui equivalentes, foi infrutífero comparar os concorrentes (que seriam vagamente processos similares, não produtos) através dos critérios estabelecidos, pois são muito peculiares do novo sistema.

Como conclusão geral do QFD realizado, os requisitos de engenharia que merecem mais atenção na percepção de qualidade são: facilidade de instalação, não desfiar (as fibras) e variar tipo de polias.

A Figura 31 mostra o QFD realizado para o projeto do remodelador visando atender aos requisitos.

Figura 31 – Matriz do QFD realizado para o projeto do remodelador de fibras.

O remodelador foi concebido para melhorar a qualidade da fabricação de peças por enrolamento filamentar, possibilitando, dessa forma, fabricar peças ou componentes com superfícies mais regulares e com a menor probabilidade de ocorrência de falhas. O remodelador também visou a possibilidade de ser utilizado para produzir *tapes* para o reuso sob a forma de bobinas, como um processo de remanufaturamento após a fabricação do *roving*.

Três principais tipologias de polias foram estudadas e consideradas para o projeto do remodelador.

Os dois principais modelos de curvatura, como mostram as Figuras 32 e 33, foram considerados no projeto. Assim sendo, após criteriosa verificação de qual geometria melhor favorecia o espalhamento e o escorregamento da fibra sobre

a superfície geométrica, selecionou-se a geometria da Figura 32 'a' para a polia 1, Figura 33 'b' para a polia 2, e Figura 33 'c' para a polia 3 como as mais adequadas ao projeto.

Durante as definições do projeto do dispositivo foram considerados materiais para a elaboração do mesmo, a cerâmica e o aço inoxidável. A cerâmica seria me melhor valia devido a superfície vítrea que seria promovida pela correta mistura do pó, compactação e usinagem a verde, todos esses parâmetros controlados conforme, FORTULAN (1997). Entretanto o aço inox proporciona uma facilidade em relação à usinagem e cuidados durante o processo, e de simples manuseio comparado com o a cerâmica.

(a)

(b)

(c)

Figura 32 'a', 'b' e 'c' – Geometria onde predomina basicamente um ângulo de 45°. 'a' - polia 1, 'b' - polia 2 e 'c' - polia 3.

(a)

(b)

(c)

Figura 33 'a', 'b' e 'c' – Geometria onde predomina basicamente uma coroa esférica. 'a' - polia 1, 'b' - polia 2 e 'c' - polia 3.

3.1.1 Seleção da Tipologia mais Adequada

O principal critério adotado para a escolha da geometria, onde predomina basicamente uma coroa esférica, foi em função da possibilidade de fabricação das polias em material cerâmico apropriado e com usinagem a verde.

Entretanto devido a restrições do processo de usinagem a verde da porcelana as polias foram fabricadas em aço inox e usinadas em torno CNC, garantindo a forma geométrica desejável.

O emprego e domínio de perfis geométricos convexos nas polias permitem uma melhor adequação da fibra sobre a superfície da polia, assim quando a tensão é aplicada ao sistema a fibra toma a forma da superfície da polia promovendo o remodelamento da fibra para o *tape*.

O raio de concordância da polia começa mais agudo e largura próxima de 10 mm e sofre incrementos nas outras duas polias seguintes permitindo, dessa forma, o espalhamento e a remodelagem da mecha de fibras que resulta, ao final do processo, numa fita de fibras.

Figura 34 – Primeiro projeto conceitual.

Após a montagem física do protótipo do remodelador, Figura 35, foi possível constatar defeitos na concepção de projeto, e realimentar a matriz do QFD, Figura 31, podendo obter resultados otimizados para a realização do segundo protótipo.

Na realização de uma passagem do *roving* através do subsistema, identificou-se que a mecha de fibras sofreu escorregamentos nas polias curvas. Assim, a mesma se acumulou na lateral e não tomou a geometria final esperada.

Figura 35 ‘a’ ‘b’ – Primeiro protótipo construído. ‘a’ - vista lateral e ‘b’- vista superior

3.1.2 Alteração da Tipologia e Confecção de Novo Protótipo

Após a verificação da incompatibilidade de geometria do subsistema proposto, foram refeitos os estudos de curvatura para que os mesmos oferecessem uma convexidade suave e ao mesmo tempo limitassem a largura máxima que se desejava que a fibra tomasse. Com isso foi proposta nova concepção, mais adequada, para prover melhor ajuste da geometria das polias e suas devidas posições relativas, com o fim de obter-se o *tape* do tamanho esperado.

3.2 Montagem do Protótipo do Remodelador

A Figura 36 mostra o projeto do segundo dispositivo de remodelagem, sendo a principal mudança do projeto a disposição das polias e o perfil geométrico.

Figura 36 – Segundo projeto conceitual.

4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÃO NUMÉRICA

4.1 Ensaios experimentais com as fibras

Em relação às fibras, foram feitas análises visuais e através de macro fotografia para avaliar a geometria antes e após o remodelamento. Com isso, foi possível verificar a redistribuição das mesmas e a eficiência do sistema. Da mesma forma, foram analisadas as fibras no sentido longitudinal para verificar a existência de falhas ou fraturas dos filamentos decorrentes do processo de remodelagem valendo-se dos procedimentos descritos no subitem 4.1.

As Figuras 37 e 38 mostram a título de exemplo a seção transversal de um *roving* e do *tape*, para uma análise comparativa.

Figura 37 – Ilustração da seção transversal de um *roving*.

Figura 38 – Ilustração da seção transversal de um *tape*.

As Figuras 39 ‘a’, ‘b’ e ‘c’ mostram a passagem da fibra *roving* pelo primeiro protótipo elaborado.

a

b

c

Figura 39 ‘a’, ‘b’ e ‘c’ – Primeiro protótipo ensaiando a remodelagem. ‘a’ - saída da fibra do remodelador. ‘b’- detalhe da divisão da fibra sobre a superfície da polia plana. ‘c’- detalhe do acúmulo de fibras nas bordas da polia.

As Figuras 40 'a', 'b' e 'c' apresentam detalhes do remodelamento no primeiro protótipo, assim como os defeitos no processo.

Figura 40 'a', 'b' e 'c' – Remodelamento pelo primeiro protótipo. 'a' – entrada da fibra, mostrando o acúmulo de fibras de um lado somente na polia curva. 'b'- detalhe da divisão da fibra sobre a superfície da polia plana. 'c'- detalhe da divisão não uniforme das fibras sobre a superfície das polias.

A Figuras 41 apresenta um bobinamento manual da fibra de vidro sobre um mandril cilíndrico a título de exemplo, demonstrando que a cobertura pela fibra remodelada cobre o mandril de forma mais eficiente.

Figura 41 – Amostra da fibra de vidro no formato *tape* e bobinada manualmente.

As Figuras 42 'a', 'b' e 'c' e Figuras 43 'a' e 'b' mostram a passagem da fibra *roving* pelo segundo protótipo construído, e os detalhes das melhorias na obtenção da fibra *tape*, como os fios, mais bem espalhados sobre a superfície das polias.

Figura 42 'a', 'b' e 'c' – Segundo protótipo ensaiando a remodelagem. 'a' - entrada da fibra do remodelador. 'b' - saída da fibra do remodelador. 'c' - detalhe das fibras remodeladas ainda sobre a polia de saída.

Figura 43 'a' e 'b' – Remodelamento pelo segundo protótipo. 'a' - perspectiva do remodelador. 'b' - detalhe do sistema tensionador por molas de compressão.

Em todos os ensaios realizados a largura do *roving* remodelado passa de seus 4 mm iniciais para uma largura entre 10 mm a 12 mm, isso principalmente dependente da tensão aplicada aos filamentos durante a entrada e

saída das fibras e pela ligação química entre as fibras, uma vez que o *roving* quando fabricado possui um banho com base em silanos.

Os tipos de *rovings* de fibra de vidro *E* utilizados foram de 1200 TEX e 2400 TEX, sendo ambos de 4 mm de largura, variando a espessura 0,50 mm e 0,56 mm respectivamente.

A espessura do *roving* deixa de ser 0,56 mm para 0,2 mm, sendo assim a área superficial de contato com a resina será aumentada em aproximadamente 172,5%.

Tipo da secção do *roving* e *tape* aproximação por uma forma elíptica, como mostra a Figura 44, sendo assim as equações do perímetro e área da elipse são mostradas a seguir pelas equações 4 e 5 respectivamente:

$$P = 2\pi\sqrt{(a^2 + b^2)}/2 \quad (1)$$

$$A = \pi ab \quad (2)$$

Figura 44 – Exemplo de uma elipse.

Tabela 6 – Dados geométricos do *roving* e do *tape*.

Tipo	a ¹ (mm)	b ² (mm)	Comprimento considerado (mm)	Perímetro (mm)	Área da superficial (mm ²)	Área da seção (mm ²)	Volume (mm ³)
<i>roving</i>	1,6	0,19	10	7,16	71,6	0,955	9,55
<i>tape</i>	4,53	0,048	10	20,13	201,3	0,683	6,83

1 - 'a': semi-eixo maior; 2 - 'b': semi-eixo menor, conforme a Figura 44.

As diferenças nas áreas da seção transversal e volume ocorrem devido ao fato de que a aproximação da geometria do *roving* e do *tape* por uma elipse é grosseira, mas realizada apenas a título de exemplo.

A Tabela 7 mostra as medidas das rugosidades superficiais da polia e fibra.

Tabela 7 – Medidas de rugosidade superficial da polia e da fibra de vidro.

Medidas	POLIA		FIBRA
	Ra_x (μm)	Ra_y (μm)	Ra_{fibra} (μm)
1	0,8	0,6	7,4
2	0,6	0,8	5,4
3	0,8	1,2	7,4
4	0,6	1,4	2,0
5	0,6	1,4	2,4
6	0,6	1,4	2,8
7	0,7	1,2	1,4
Média	0,67	1,08	4,11

A Figura 45 ilustra as regiões onde somente a resistência da resina age quando o laminado é solicitado, a qual mostra a diferença entre um laminado fabricado por *rovings* e um por *tapes*.

Figura 45 'a' e 'b' – Ilustração do processo de filament winding. a - mostra o detalhe dos espaços preenchidos apenas por resina (vermelho) entre os *rovings*; b - mostra o detalhe dos espaços preenchidos apenas por resina (vermelho) entre os *tapes*.

Como pode se observar, as regiões onde somente há ação da resina, o compósito poderá sofrer processos de fraturas prematuras, iniciando pontos de concentração de tensão, que se não bem analisados por ensaios não-destrutivos, levarão ao colapso da estrutura.

Assim a utilização de *rovings* remodelados pode garantir um compósito de melhor qualidade já desde a fabricação.

4.2 Procedimento para aferição da geometria

Essa medição foi sistematizada como um critério de verificação de homogeneidade, uma vez que não existem parâmetros de controle para essas verificações de conformidade e estabilidade dimensional para processos de remodelagem como foi proposto neste trabalho. O gráfico da Figura 46 mostra a variação e a média das medidas realizadas para espessura e largura da fita de *roving*. O aumento relativo médio chegou a 9 vezes, aproximadamente. Contudo, ainda existe alguma variabilidade no decorrer do processo, conforme a tensão aplicada no *roving*.

Figura 46 – Variação nas medidas de largura e espessura do *roving* remodelado.

O uso de um sistema de medição a laser pode encarecer substancialmente o mesmo, podendo inviabilizá-lo comercialmente. Por outro lado,

medições de conformidade simplificadas, permitem que se obtenham resultados confiáveis, desde que sejam adotados alguns critérios como os descritos a seguir:

- a- Propor um comprimento para representar o lote;
- b- Estabelecer um número mínimo de medições na amostra;
- c- Estabelecer um método para tomar as medidas, como verificação de temperatura e umidade no momento das medições e horários fixos;
- d- Estabelecer os instrumentos utilizados – paquímetros, micrômetros;
- e- Montar uma folha de medição para anotações;
- f- Criar uma nomenclatura própria para codificar os lotes de medição.

Em relação à aceitação ou não do subproduto obtido é importante que sejam tomadas medidas estatísticas que estão fora dos objetivos da pesquisa. Contudo, devem ser elaboradas para que seja possível ter parâmetros de controle em relação à variabilidade dimensional do *roving* remodelado.

Inicialmente, para efeito de controle das medições realizadas foi adotado como valores aceitáveis, variações das medidas que estejam entre mais ou menos 5% do valor medido, para qualquer uma das duas medidas, isto é, espessura ou largura.

A partir dos critérios descritos, é possível manter um método confiável de verificação de conformidade e estabilidade dimensional e, mesmo, verificar eventuais discrepâncias e variabilidades inaceitáveis.

Devida à dificuldade em se realizar essas medições, se propôs um gabarito de dupla face em PMMA (polimetil metacrilato) ou policarbontato, para medir a largura e a espessura da fita gerada.

O comprimento adotado para realizar a medição foi 200 mm. Esse valor não teve uma relação estatística, mas somente prática por fornecer 5 medidas a cada 50 mm de distância entre si.

A Figura 47 'a' e 'b' apresenta a forma como foram tomados os espaçamentos com o gabarito de régua longitudinal e o gabarito transversal.

a

b

Figura 47 'a' e 'b' – Régua para tomada do comprimento de fita a ser medido e detalhe de posicionamento do gabarito de medição. 'a' - Visão geral do gabarito para estabelecer o comprimento total. 'b' - Detalhe da régua e do gabarito para as medições de largura e espessura.

A partir da proposta de sistematização da medição, foram feitas as medições necessárias.

A Figura 48 'a', 'b' e 'c' mostra a medição da espessura sendo realizada.

a

b

c

Figura 48 'a', 'b' e 'c' – Sequência das medições realizadas para se obter a espessura da fita de *roving* remodelado. 'a' - Medição de espessura do gabarito sem a fita, realizada com micrometro. 'b' - Detalhe do posicionamento da fita para medição de espessura. 'c' - medição da espessura da fita.

Devido à dificuldade de se mensurar com espessímetros analógicos, adotou-se um gabarito com espessura fixa e conhecida, de dupla face, o qual é fechado sobre a fita com uma pressão constante, assegurada por calços gabaritados que impedem que o medidor seja comprimido contra a fita e altere sua espessura artificialmente.

Sem importar a ordem, mas considerando a temperatura e umidade, são tomadas as medições de espessura do gabarito de dupla face e posteriormente do mesmo, com a inserção da fita. Após esse procedimento é descontada a espessura do gabarito, já conhecida e obtém-se a espessura da fita.

Logicamente, artefatos mais aprimorados podem ser construídos, porém não foi objetivo do trabalho discutir esses procedimentos, os quais formam ferramentas para se obter um resultado consistente sobre a variação da geometria.

Como esperado, no caso de protótipos experimentais, o modelo construído pode ser aprimorado para mecanismos mais eficientes. Contudo, a precisão dimensional foi satisfatória, com uma grade de 0,2 mm de espaçamento, como pode ser visto na Figura 49, em detalhe.

Figura 49 – Detalhe do gabarito ranhurado a cada 0,25 mm. As linhas mais espessas iniciam 0,5 mm.

Pelo gabarito, é possível verificar que nesse ponto a fita atingiu cerca de 8 mm de largura. No caso da Figura 44, o valor não foi utilizado nas medições, pois foi um teste preliminar para validar o procedimento adotado. Não foi possível fotografar as medições na data em que foram realizadas.

4.3 Análise numérica por FEM de componentes do remodelador

O intuito da simulação numérica no trabalho, foi verificar o comportamento da fibra e da polia, com a possibilidade de prever o desgaste da polia frente a fricção com a fibra de vidro, e minimizar o máximo a contaminação da fibra por partículas metálicas que possam eventualmente despenprender-se das polias ou mesmo verificar a parte da fibra que é danifica com o processo de remodelagem. Para efeito de simulação foram adotados alguns parâmetros que facilitassem a modelagem e, ao mesmo tempo, permitissem uma aproximação aceitável entre o atrito de contato das partes e a tensão resultante de atrito.

Para isso foi adotada uma condição de simulação com as características mostradas pela Tabela 8.

Tabela 8 – Condições para simulação da tensão de atrito entre o par polia-fibra de vidro.

Quesito	Descrição
Polia - diâmetro	Simetria em X, Y e Z. Usada metade da polia
Polia - largura	2,0 mm ~ 200 vezes a largura do <i>filamento</i>
<i>Roving</i> - comprimento	¼ de circunferência com o raio da polia = 19 mm
<i>Roving</i> - largura	Foi considerado 110 µm
<i>Roving</i> – espessura	Foi considerado 13 µm
Restrições na polia	Apoio cilíndrico com rotação radial livre
Restrições do <i>roving</i>	Rotação e translação fixas
Fator de atrito - <i>roving</i>	1,04
Força aplicada no <i>roving</i>	0 N - 5 N crescente de 0" a 1"

Conforme visto na Tabela 8, a geometria da fibra foi reduzida proporcionalmente em relação à fita na razão de 1/10. Essa relação foi tomada a partir da medição do *roving* transformado em fita, através da medição de 5 pontos

distanciados 50 mm uns dos outros. A Tabela 9 apresenta os resultados e a média das medições de largura e espessura do *roving* modificado.

Tabela 9 – Medidas de largura e espessura obtidos após o ensaio da fibra de vidro, como *roving* modificado.

Medidas	Largura (mm)	Espessura (mm)
1	8,958	0,0983
2	8,994	0,0974
3	9,069	0,0955
4	9,118	0,0936
5	9,167	0,0922
Média	9,062	0,0954

Para a realização da simulação foi necessário converter o valor da rugosidade superficial, Tabela 8, em fator de atrito.

Segundo DE MELLO, *et. al.*(1999) algumas equações podem associar a rugosidade superficial ao coeficiente de atrito, ou fator de atrito. Os autores estabelecem algumas equações a partir das quais é possível obter o fator de atrito para diversos regimes de contato fluido-superfície.

Adotou-se como parâmetro, a viscosidade dinâmica de um laminado ao atingir o ponto de gelatinização durante a cura. Isso representa um valor médio de 361 Pa/s⁻¹.

Para o cálculo da viscosidade cinemática ν , foi utilizada a equação 1:

$$\nu = \eta / \rho \quad (3)$$

Em que η = viscosidade dinâmica (Pa/s⁻¹) e ρ = massa específica (kg/m³).

Dessa forma, com a manipulação e convenção necessária obteve-se, para a massa específica do vidro 'S' igual a 2490 kg/m³. A viscosidade cinemática de 0,01445 m²/s.

A partir das equações 2 e 3 pode ser obtido o fator de atrito através da rugosidade, utilizada para o cálculo da perda de carga em sistemas

hidráulicos. Inicialmente se fez uma adaptação da equação de Reynolds para o caso de um escoamento em canal plano e não tubular, assim:

$$Re = v \cdot L / \nu \quad (4)$$

Em que: Re= número de Reynolds; v= velocidade (m/s); L= largura (m); ν = viscosidade cinemática (m²/s).

Aplicando os valores v= 0,75 m/s; L= 0,009 m e ν = 0,01445 m²/s obtêm-se um Re= 0,466. A partir desse resultado obtêm-se o fator de atrito aplicando-se a equação 3.

$$f = (Re \cdot L / E)^2 \quad (5)$$

Em que: f= fator de atrito; Re= número de Reynolds; E= rugosidade absoluta (mm) e L= largura (mm).

Assim com Re= 0,466; L= 9 mm e E= 4,11 mm, o fator de atrito f= 1,04.

A Figura 50 mostra a malha gerada, com predomínio de elementos hexaédricos, para o par polia - filamento, a Figura 51 mostra a força de tração aplicada na fibra, a Figura 52 apresenta as restrições impostas e a Figura 53 apresenta a tensão de atrito resultante, respectivamente. Esses resultados foram obtidos através da utilização da ferramenta MD PATRAN® e NASTRAN® (MSC, 2009).

Figura 50 – Malha gerada e detalhe para o atrito de contato entre o par polia – *roving*.

Figura 51 – Ponto de aplicação da força de tração no *roving*.

Figura 52 – Condição de contorno e restrições entre o par polia-*roving*.

Figura 53 – Tensão resultante de atrito de contato entre o par polia – *roving*.

4.3.1 Análise dos Resultados da Simulação

Pela carga trativa de projeto aplicada ao *roving* foi possível verificar que a tensão de atrito resultante atingiu seu valor máximo exatamente na tangente de contato entre o filamento e a polia. O gráfico da Figura 54 apresenta a curva de esforço de atrito resultante durante a aplicação crescente de um carregamento monotônico que parte de 0,0 N até atingir 5,0 N no intervalo de tempo de 1 s.

Figura 54 – Tensão resultante de atrito de contato entre o par polia-*roving*.

A Tabela 10 mostra os valores comparativos de tensão máxima de ruptura para cada material em contato, ou seja, a polia em aço inoxidável AISI 304 e o *roving* de fibra de vidro tipo “S” (ADVANTEX®, OCV, 2009), bem como o valor máximo atingido para o carregamento estipulado como condição inicial.

Tabela 10 – Condição de contorno para simulação da tensão resultante de atrito entre o par polia-fibra de vidro.

Material	Tensão máxima de ruptura (MPa)
Aço Inox AISI 304	498
Fibra de vidro ADVANTEX	501
Máxima tensão de contato	2,34 E-10

Cabe ressaltar que o coeficiente de atrito utilizado para a simulação foi o maior entre os dois materiais, conforme consta na Tabela 7. Outra informação que pode ser obtida pelos resultados é o fator de segurança para o carregamento utilizado.

É seguro afirmar que mesmo dobrando o carregamento os valores não seriam alterados a ponto de comprometer a integridade das polias ou do *roving*.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO

Neste capítulo são descritas as pesquisas mais atuais sobre o tema. Sendo agrupadas com o mesmo critério dos itens anteriores.

5.1 Análise dos Resultados

Foi realizado o desenvolvimento de um dispositivo mecânico para possibilitar o remodelamento geométrico de *rovings* a ser utilizado num equipamento de *filament winding*, com o intuito de aumentar a superfície de contato entre cada camada de filamento depositada na superfície do molde e, reduzir a espessura e geometria original do *roving* como é fornecido pelos fabricantes.

Foi elaborado um projeto conceitual e, posteriormente, adotadas as possíveis soluções para a montagem do dispositivo.

A primeira solução foi a fabricação de polias de porcelana, usinadas a verde.

Esse processo foi prejudicado pela dificuldade em se obter a geometria adequada para as polias que foram propostas inicialmente.

No decorrer do trabalho, adotou-se o uso do aço inox AISI 304 usinado em CNC, para favorecer o acabamento superficial e diminuir a rugosidade. Conseqüentemente, reduz-se o fator de atrito entre as superfícies em contato.

Finalmente foi construído o protótipo funcional.

Os resultados obtidos não atenderam aos requisitos iniciais, em parte pela geometria adotada para as polias e, em parte, pela disposição das polias no dispositivo.

A Figura 35 apresenta o primeiro dispositivo montado.

A partir dos resultados preliminares, reavaliou-se o protótipo e foram realizadas as alterações geométricas tanto nas polias, como na disposição das mesmas.

As principais alterações do primeiro protótipo para o segundo foram:

- 1- Aumento substancial do raio de curvatura nas polias curvas;
- 2- Criação de uma polia de entrada com a largura do *roving* para guiar o mesmo de forma centralizada pelo resto do processo;

3- Posicionar as polias de forma a criar um ângulo de contato próximo à metade da circunferência das polias.

Com essas alterações procedeu-se à fabricação do segundo protótipo.

A Figura 43 mostra o segundo protótipo montado.

Essa alteração favoreceu os seguintes aspectos durante o processo de fabricação de componentes de *FRP*:

- a- Diminuição de vazios intersticiais;
- b- Probabilidade de aumento da aderência pela diminuição da área de matriz no entorno dos filamentos individuais;
- c- Maior facilidade de impregnação por parte do polímero;
- d- Maior flexibilidade no uso de tixotropia variável, pois a profundidade a ser atingida pelo polímero é aproximadamente $\frac{1}{4}$ da original;
- e- Menor espessura no transpasse entre uma camada e outra;
- f- Melhor distribuição superficial da fibra sobre o molde e maior homogeneidade.

Por outro lado, significa outro requisito de controle do processo, o qual deve ser monitorado regularmente. Além disso, mesmo que remota, existe a possibilidade de ruptura parcial dos filamentos e eventual embaraçamento do *roving*.

Contudo, esse fato não ocorreu durante os testes com dois tipos de fibras utilizadas:

- a- Tipo P-30 – 2400 TEX;
- b- Tipo P-20 – 1200 TEX.

A partir do novo protótipo, foram realizados os ensaios de remodelamento das fibras utilizando-se fibras de vidro tipo ADVANTEX® (OCV, 2009).

Os resultados foram positivos, apresentando um bom desempenho no processo. Sendo que a largura ficou 283% maior que a original e a espessura ficou 74,7% menor que a original.

A Figura 55 mostra o gráfico da relação entre a seção geométrica inicial e final do *roving*, para efeito comparativo.

Figura 55 – Gráfico comparativo da largura e espessura inicial e final.

5.1.1 Conclusões

O dispositivo construído atendeu os objetivos propostos pela pesquisa, a qual pretendia criar um procedimento para promover o aumento da largura e a diminuição da espessura de *rovings* com intuito de melhorar as superfícies em contato no processo de laminação por *filament winding*.

Essa modificação no formato final do *roving* propicia ganho de qualidade no laminado final, pois reduz a ocorrência de vazios e aspectos indesejáveis já mencionados.

Para aprimorar o processo, é aconselhável que se realizem novas pesquisas especialmente no que se refere à automação desse procedimento para possibilitar o rebobinamento das fitas geradas. Isso facilita a aplicação e acelera o processo de laminação.

O processo adotado para a realização das medições pode ser melhor ajustado, utilizando-se de recursos avançados, em questão a equipamentos de metrologia. Sendo que o dispositivo fará parte de uma máquina de enrolamento filamental.

Uma vez que o dispositivo fará parte de um equipamento experimental, de uso não comercial, não foi o foco da pesquisa dotá-lo de um sistema automatizado, assim como não foi previsto um sistema de reimpregnação com monômero para manter a nova geometria e permitir bobinar a fita sem que os filamentos se emaranhassem.

Fica como sugestões para trabalhos futuros o desenvolvimento de mecanismos que possibilitem executar essas operações para que essas bobinas sejam utilizadas comercialmente.

6 REFERÊNCIAS

BAXTER JR., J. *et. al.* Filament Winding Machine - US3380675 – 1965. In: **United States Patent Office Magazine** N° 430702. Washington: United States Patent Office, p. 15, 1968.

BLOM, Adriana W. *et. al.* Fiber path definitions for elastically tailored conical shells. N° 40. pp. 77-84. In: **Journal of Composites: Part B**, ELSEVIER, 2009.

CARVALHO, Jonas de. **Computer Integrated Design and Manufacturing of Filament wound parts**. Tese de Doutorado. K.U. Leuven: Universidade Católica de Leuven, 1996.

CARVALHO, Jonas de. **Projeto e Fabricação de Componentes em Material Polimérico Compósito**. Notas de aula. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2007.

COHEN, David; MANTELL, Susan C.; ZHAO, Liyang. The Effect of Fiber Volume Fraction on Filament Wound Composite Pressure Vessel Strength. N° 32. pp. 413-429. In: **Journal of Composites: Part B**, ELSEVIER, 2001.

DE MELLO, Carlos Rogério; FERREIRA, Daniel Furtado; CARVALHO, Jacinto de Assunção. Equações Explícitas para o Fator de Atrito da Equação de Darcy-Weisbach. In: **Revista de Ciência e Agrotecnologia**. v.23, n.2, p.365-371. Lavras: UFLA, 1999.

FORTULAN, Carlos Alberto. **Prensa Isostática tipo Wet-Bag**. Tese de Doutorado. São Carlos: USP, 1997.

JOHANSEN, B. S.; LYSTRUP, A.; JENSEN, M. T. CADPATH: a Complete Program for the CAD-, CAE- and CAM-Winding of Advanced Fibre Composites. N77. pp. 194-200. In: **Journal of Materials Processing Technology**, ELSEVIER, 1998.

HAMADA, T. *et. al.* Structures and physical properties of carbon fibers from coal tar mesophase pitch. In: **Journal of Materials Research**. Materials Research Society, 1987.

KOUSSIOS, Sotiris. **Filament Winding: a Unified Approach Computer**. Tese de Doutorado. Delft: Delft University, 2004.

KIM, Cheol-Ung *et. al.* Optimal Design of Filament Wound Structures under Internal Pressure based on the Semi-Geodesic Path Algorithm. N° 67. pp. 443-452. In: **Journal of Composite Structures**, ELSEVIER, 2004.

LI, Haisheng; LIANG, Youdong; BAO, Hujun. Splines in the parameter domain of surfaces and their application in filament winding. N° 39. pp. 268-275. In: **Journal of Computer Aid Design**, ELSEVIER, 2007.

LOHEST, H. Filament Winding Machine - US3082361 – 1957. In: **United States Patent Office Magazine** N° 776532. Washington: United States Patent Office, p. 5, 1963.

MERTINY, P.; ELLYIN, F. Influence of the Filament Winding Tension on Physical and Mechanical Properties of Reinforced Composites. N° 33. pp. 1615-1622. In: **Journal of Composites: Part A**, ELSEVIER, 2008.

NYGÅRD, Per; GUSTAFSON, Claes-Göran. Continuous Glass Fiber-Polypropylene Composites Made by Melt Impregnation: Influence of Processing Method. In: **Journal of Thermoplastic Composites Materials**, SAGE, 2004.

ORTENZI, Altibano. **A Fibra de Vidro em Matrizes Poliméricas e Cimentícias e seu uso Estrutural em Construção Civil – O Estado-da-Arte**. Dissertação de Mestrado. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2007.

PARK, Jae-Sung. *et. al.* Analysis of Filament Wound Composite Structures Considering the Change of Winding Angles through the Thickness Direction. N° 55. pp.63-71. In: **Journal of Composite Structures**, 2002.

PIGGOTT, Michael. **Load Bearing Fibre Composites**. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002.

ROUSSEAU, J.; PERREUX, D.; VERDIÈRE, N. The Influence of Winding Patterns on the Damage Behaviour of Filament Wound Pipes. N° 59. pp. 1439-1449. In: **Journal of Composites Science and Technology**, ELSEVIER, 1998.

ROSATO, D. V.; GROVE, C. S. **FILAMENT WINDING: its development, manufacture, applications, and design**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1964.

ROZENFELD, H. ; FORCELLINI, F. A. ; AMARAL, D.C. ; TOLEDO, J.C.; SILVA, S.L.; ALLIPRANDINI, D.H. ; SCALICE, R.K. . **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo**. 1. ed. São Paulo: Saraiva, 2006.

SAINT-GOBAIN – VETROTEX. **Vetrotex Glass Fibre**. Chambéry: VETROTEX, 2000.

SCOOT, Susanna L. **Curso de Química Inorgânica Avançado** – apostila. Santa Barbara: University of California, 2009. Disponível em: http://www.chem.ucsb.edu/coursepages/08winter/173B-Acott/syllabus/Group_14_Notes.pdf. Acessado em 18/01/2009.

SOEIRA, Lucas Emanuel; Ortenzi, Altibano ; Carvalho, Jonas de. Equipamento para remodelamento de fibras de reforços - PI020090054866 – 2009. In: **Revista da Propriedade Industrial**. N° 2009. INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial, 2009.

THOMASON, J. L. The Influence of Length, Diameter and Concentration on the Modulus of Glass Fibre Reinforced Polyamide 6,6. N° 39. pp. 1732-1738. In: **Journal of Composites: Part A**, ELSEVIER, 2008.

TARNOPOŁ'SKII, Yu. M.; PETERS, S. T.; BEIL', A. I. **Filament Winding**. London: Chapman & Hall, 1998.

WU, Xiaoqing; LI, Jialu; SHENOI, R. A. A New Method to Determine Fiber Transverse Permeability. V. 41. N2. pp. 747-756. In: **Journal of Composites Materials**, SAGE, 2007.

ZIEHL, Paul H.; FOWLER, Timothy J. Fiber Reinforced Vessel Design with a Damage Criterion Approach. N° 61. pp. 395-411. In: **Journal of Composites Structures**, ELSEVIER, 2003.