INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**VIABILIDADE DE FABRICAÇÃO DE TUBO PARA PRÓTESE DE MEMBRO
INFERIOR EM COMPÓSITO HÍBRIDO EPÓXI CARBONO-VIDRO**

GUILHERME WOLF LEBRÃO

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para a obtenção do
Grau de Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Materiais.**

Orientador:

Dr. Jesualdo Luiz Rossi

SÃO PAULO

2007

Dedico este trabalho à minha esposa Susana,
aos meus meninos Thomas e Pedro,
à meus pais
e a todos aqueles
que encontrarem nestas páginas
uma contribuição.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por crer na minha capacidade e permitir mais esta realização.

Ao meu orientador, Dr. Jesualdo Luiz Rossi por ter me apoiado no trabalho e pelas suas orientações sempre tão objetivas e claras.

Ao Dr. Gerson Marinucci pela sua paciência e pela sua contribuição nas várias etapas deste trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, pelos recursos para que este trabalho fosse concluído.

À Escola de Engenharia Mauá (EEM) do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia (CEUN-IMT), por todo apoio recebido durante o desenvolvimento do trabalho.

A Associação de Assistência à Criança Deficiente (AACD) pela sugestão do projeto, apoio técnico e material recebido.

À Margarete Moreira, Igor Zucato, Gustavo Moacir Razzante Filho e demais colegas da EEM que participaram direta ou indiretamente do trabalho.

Aos colegas Osni de Carvalho do Centro Tecnológico da Marinha de São Paulo (CTMSP), Marcelo Moreira do Instituto Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), Milton Oshiro do Hospital das Clinicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo (HCFMSP) pela contribuição em várias etapas do trabalho.

Aos Colegas Valdir Mendes Cardoso e Ricardo Lahuerta da Altair pela modelagem em elementos finitos.

Aos colegas professores e alunos do grupo de aerodesign da EEM pelos experimentos com compósitos.

À colaboração de Ismael Corazza da Vetrotex Saint-Gobain, Tim Averbeck A&P Technology e Marcelo Pio da Aerotech com cessão de amostras fundamentais para conclusão dos experimentos.

VIABILIDADE DE FABRICAÇÃO DE TUBO PARA PRÓTESE DE MEMBRO INFERIOR EM COMPÓSITO HÍBRIDO EPÓXI CARBONO-VIDRO

Guilherme Wolf Lebrão

RESUMO

Neste trabalho propôs-se a construção de um tubo de material compósito híbrido, com fibra de vidro e fibra de carbono, para utilização como prolongador de prótese de membro inferior a serem fabricadas pela AACD - Associação de Assistência à Criança Deficiente. O objetivo é avaliar as solicitações da prótese para otimizar custo e reduzir a massa. Fez-se inicialmente um levantamento das propriedades dos materiais comerciais utilizados para a fabricação do prolongador para referenciar o desenvolvimento do componente da prótese. Utilizou-se modelagem por elementos finitos para otimizar o componente em função dos esforços biomecânicos a que a prótese é submetida. Nesta modelagem, estudaram-se várias disposições, quantidade e material das camadas de forma a atender às solicitações e minimizar os custos. O levantamento bibliográfico permitiu encontrar uma rota de menor custo para a fabricação de compósito que utiliza um processo de transferência de resina auxiliado a vácuo e pré-formados de vidro e carbono. Como referência, foi fabricado um componente pelo processo de bobinagem filamentar que produz materiais compósitos de qualidade reconhecida. O processo de moldagem por transferência de resina assistido à vácuo, apesar de ter alguns insumos importados, pela sua simplicidade pode ser realizado na própria AACD e se mostrou capaz de obter componentes com custo que viabiliza sua produção sem grandes investimentos em equipamentos. Apesar da redução de algumas das propriedades em relação à peça de referência, o tubo apresentou vantagens na redução de massa e na absorção de impacto.

VIABILITY OF HYBRID EPOXI CARBON-GLASS COMPOSITE PIPE MANUFACTURE FOR USE IN LOWER LIMB PROSTHESIS

Guilherme Wolf Lebrão

ABSTRACT

In this work it was considered a construction of a pipe of hybrid composite material, with carbon and glass fibre, for use as prosthesis extension of inferior member to be manufactured for the Associação de Assistência à Criança Deficiente AACD. The objective is to evaluate the requests of prosthesis to optimize cost and to reduce weight. A survey of the properties of the commercial materials commonly used for the manufacture extension became initially a reference to the development of the final component. A finite element modeling was used to optimize the component in the biomechanics function related to the efforts which the prosthesis is submitted. In this modeling some disposals and numbers of layers, amount and material have been studied to take care of the requests and to minimize the cost. A bibliographical survey allowed finding a shipper route for the manufacture of composite that uses a process of vacuum assisted resin transfer molding and preforms of glass with carbon. As reference, a component was produced using filament winding process to compare the quality of the obtained composite pipe. The process, although to have some imported feed-stock, can be proper carried out by AACD and if it showed capable to produce components with cost that makes possible its production internally. Despite the reduction of some of the properties in relation to the reference part, the component presented advantages such as weight reduction and the impact absorption.

SUMÁRIO	Página
1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVOS	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 Materiais compósitos	12
3.1.1 Matriz	13
3.1.2 Fibras	15
3.1.3 Processamento	21
3.2 Prótese	28
3.3 Análise de custo	34
3.3.1 Projeto	34
3.3.2 Matéria-prima	35
3.3.3 Processo	37
4. MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1 Modelagem	43
4.2 Matérias primas – seleção	47
4.3 Processamento	49
4.3.1 Modelagem manual	49
4.3.2 Bobinagem filamentar	50
4.3.3 Moldagem por transferência de resina assistida à vácuo - VARTM	53
4.4 Ensaios mecânicos	55
4.4.1 Ensaio de compressão	55
4.4.2 Ensaio de flexão	57
4.5 Caracterização microestrutural	58
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1 Modelagem	59
5.2 Material comercial	70
5.2.1 Ensaio mecânicos	70
5.2.2 Caracterização microestrutural dos materiais comerciais	74
5.3 Protótipo	76
5.3.1 Ensaio mecânicos	76
5.3.2 Caracterização microestrutural para os protótipos	79
5.4 Análise de custos	86
5.5 Considerações gerais	88
6. CONCLUSÕES	90
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
ANEXO 1. METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE CUSTO	95

1. INTRODUÇÃO

Nas estruturas utilizadas no setor aeroespacial, os requisitos de baixa massa, alta resistência mecânica e rigidez, além da estabilidade dimensional fomentaram, nas últimas décadas, a pesquisa e o desenvolvimento de materiais compósitos avançados, difundindo seu uso neste setor em larga escala. Mais recentemente, não somente no setor aeroespacial, mas em particular na área de bioengenharia, o emprego de materiais compósitos de alto desempenho vem encontrando um vasto campo de utilizações. A substituição de membros amputados, principalmente pés e pernas, tem usado como recurso uma ampla diversidade de materiais, mas encontrou nos materiais compósitos o seu grande aliado, pelas mesmas características que vêm atendendo a outros setores industriais, tais como uma ótima relação massa / resistência mecânica e sua capacidade de ser produzido conforme as solicitações impostas à peça. Hoje, o que limita a popularização do seu emprego na bioengenharia é seu alto custo. As próteses utilizadas atualmente são produzidas utilizando basicamente três materiais diferentes: o alumínio, o aço e o material compósito epóxi-fibra de carbono. O material que oferece a melhor resistência com o menor custo ainda é o aço. O material, porém mais utilizado, são as ligas de alumínio da série AA6000, que oferecem a melhor relação baixa massa e custo acessível. No entanto, como ocorre na indústria aeroespacial, o material que oferece a melhor resistência com baixa massa, mas não é o de menor custo, é o material compósito epóxi-fibra de carbono. O compósito epóxi-fibra de carbono ainda oferece a vantagem de permitir, com a redução de peso uma economia de energia na caminhada e uma melhor adaptação dos pacientes à prótese.

A AACD – Associação de Assistência à Criança Deficiente – São Paulo -SP, em sua oficina ortopédica, encontra dificuldade na produção de componentes para construção de prótese de perna para amputados de membros inferiores. O componente que serve para a ligação do joelho (atualmente desenvolvido pela AACD junto a Escola Senai) com o tornozelo, feito em material compósito epóxi-fibra de carbono, é importado e possui um preço muito alto, apesar de ser o material ideal para este fim pela sua resistência mecânica e baixa massa. A utilização de compósitos permite a fabricação de próteses melhores que as similares, fabricadas em alumínio ou aço, pois são mais leves e com comportamento mecânico semelhante aos materiais naturais como o osso. Algumas empresas internacionais especializadas na fabricação de material compósito epóxi-fibra de carbono oferecem

um produto de uso geral, de preço elevado, e que não foi projetado especificamente para esta aplicação, apresentando muitas vezes resistência superior à necessária para construção do componente da perna. Como opção, foi feita, a pedido da AACD, uma tentativa de fabricação de um tubo por uma empresa nacional, o qual apresentou desempenho inferior ao esperado em suas propriedades. No material houve um superdimensionamento do compósito em termos de matéria-prima para compensar a anisotropia do material. No material compósito constatou-se uma falta de orientação otimizada das fibras no sentido dos esforços, com disposição quase perpendicular ao eixo longitudinal do tubo, e conseqüentemente aos esforços axiais, conforme ilustra a figura 1a. Em outro tubo o posicionamento do tecido de fibra de carbono, em relação ao seu eixo axial, com direção $0^{\circ}/90^{\circ}$ poderia ser otimizado, e ainda há a presença elevada de vazios e bolsas de resina na matriz do compósito, figura 1b. Na figura 2 pode-se observar uma foto dos tubos mostrados nas micrografias

a

b

Figura 1. Micrografia ilustrativa da seção longitudinal de um tubo comercial: a) Uma estrutura produzida por bobinagem com o ângulo de bobinagem quase perpendicular ao eixo do tubo; b) Uma estrutura produzida com orientação bidirecional da fibra de carbono que apresenta o posicionamento de tecido 0/90° não levando em consideração os esforços axiais do componente, detalhe da grande quantidade de bolhas e bolsões de resina.

Figura 2. Exemplo dos tubos fabricados em material epóxi-fibra de carbono utilizados para construção de prótese de membros inferiores: a) compósito fabricado por enrolamento de tecido 0/90°; b) compósito fabricado por bobinagem filamental com ângulo de bobinagem próximo de 90°.

Processos que envolvem o uso de fibras pré-impregnadas com resina e

curadas em autoclaves, onde são necessárias altas pressões, temperaturas e longos ciclos de produção, com controles rígidos de matéria-prima, produzem compósitos de alto desempenho, mas com alto custo do produto final. A opção para viabilizar a fabricação de componentes com qualidade e a um custo mais competitivo, seria utilizar processos que permitissem obter produtos com a mínima perda de matéria-prima, fabricação com ciclos curtos de cura da matriz polimérica e baixa incidência de mão-de-obra, garantindo ainda elevado grau de uniformidade e repetibilidade. Processo como a moldagem por transferência de resina assistida à vácuo (*vacuum assist resin transference molding*, VARTM) está viabilizando, em termos de volume de produção e baixo custo, a produção de materiais compósitos como produto de uso de larga escala para aplicações genéricas ou estruturais (Lebrão, 2005)

Os materiais compósitos apresentam um grande crescimento de utilização em função de possuírem elevados índices de resistência mecânica e rigidez por unidade de massa. No caso específico da construção de tubos ou perfis tipo casca, o seu uso se torna limitado principalmente pelos esforços axiais e de flexão a que são submetidos (Gonçalves et al., 2001).

2. OBJETIVOS

A proposta desse trabalho vem ao encontro da real necessidade de se fabricar para a AACD, um tubo de material compósito polimérico epóxi-fibra de carbono-vidro, para a utilização em próteses de membros inferiores que possuam boas condições de resistência, aliada à baixa massa e baixo custo. Utilizando-se de um estudo de tensões e deformações pelo método de elementos finitos, deseja-se otimizar o ângulo de posicionamento das fibras e o número de camadas necessárias ao componente da prótese. Mostrar, através de ensaios, quais dos exemplares, fabricados por dois processos diferentes, bobinagem filamentar e VARTM, além dos exemplares de alumínio adquiridos no mercado, já utilizados atualmente para este fim, apresentaram o melhor desempenho a um custo mais competitivo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Materiais compósitos

Os materiais compósitos têm a sua origem na própria natureza. Na década de 1940, a idéia de reforçar plástico utilizando fibra de vidro, foi baseada na estrutura do bambu. A partir da década de 1960, os materiais compósitos poliméricos estruturais, denominados avançados, que tinham seu uso restrito a alguns setores da indústria, como na área de mísseis, foguetes e aeronaves, tiveram sua utilização ampliada. Atualmente estruturas de alto desempenho e baixa massa vêm sendo utilizadas também em indústrias automotivas, esportivas, construção civil, entre outras (Higgins, 1997; Wiebeck, 2005). Neste contexto, são considerados como materiais compósitos os materiais multifásicos, produzidos artificialmente, que combinam de forma criteriosa as melhores propriedades de dois ou mais materiais distintos.

A maioria dos materiais compósitos é formada por duas fases: uma fase contínua, denominada matriz, e outra descontínua, denominada fase dispersa. As propriedades dos materiais compósitos variam em função de suas fases constituintes, de suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa, isto é, de sua forma, tamanho, distribuição e orientação.

Podem-se classificar os materiais compósitos, conforme Hull (1987), em:

1. Fibras e matrizes contínuas: dispersos ou alinhados
2. Fibras curta: dispersas ou alinhadas
3. Particulados (esferas, plaquetas, elipsóides, irregulares etc.) na matriz
4. Dispersão forçada, como descrito nos itens 1,2 e 3 acima, mas com partículas menores que 10^{-8} m
5. Estruturas lamelares
6. Esqueletos ou redes interconectadas
7. Multicomponentes, fibras, partículas etc.

É importante frisar que as propriedades finais deverão ser superiores, ou até únicas em alguns aspectos em relação às propriedades individuais dos componentes.

3.1.1 Matriz

A matriz dos compósitos pode ser classificada segundo sua estrutura e natureza química como matrizes cerâmicas, metálicas ou poliméricas. Para compósitos reforçados com fibras, a matriz possui várias funções:

- Une as fibras e funciona como agente através do qual a tensão ou carregamento aplicado é transferido e distribuído às fibras.
- Confere propriedades complementares ao comportamento mecânico do conjunto. Para tanto, a matriz deve apresentar ductilidade e módulo de elasticidade diferentes da fibra, para que a rigidez de um material e ductilidade do outro, sejam combinados.
- Protege as fibras dos danos superficiais resultantes da abrasão mecânica e reações químicas com o meio ambiente.
- Separa as fibras e aumenta a rigidez do conjunto, em virtude disso, sua relativa flexibilidade e plasticidade, previnem a propagação de trincas de fibra para fibra, isto é, a matriz funciona como uma barreira à propagação de fissuras (Higgins, 1997).

As principais propriedades estruturais desejadas em um material pertencem geralmente às fibras, mas é a matriz que permite a transferência do âmbito microscópico para o macroscópico destas propriedades. A matriz possui propriedades mecânicas pobres se comparadas às das fibras. As fibras, porém não possuem utilidade estrutural se não forem aglutinadas por uma matriz, e isto se deve à sua configuração geométrica. A matriz dá forma, aglutina as fibras e transfere os esforços, e isto é que faz com que os materiais compósitos sejam únicos em suas propriedades.

A matriz deve aderir à fibra de forma eficiente e isto ocorre de várias formas. Segundo Hull (1987) os mecanismos que ocorrem na interface fibra-matriz podem ser classificados como interdifusão, atração eletrostática, grupos catiônicos, ligação química e interferência mecânica. É fundamental que a força de adesão entre a fibra e a matriz seja elevada para que as fibras não sejam arrancadas sob condições de solicitação mecânica. A resistência dessa ligação é uma importante consideração na escolha da melhor combinação entre uma fibra e uma matriz. Uma ligação adequada, proporcionada por agentes compatibilizantes, é essencial para maximizar a transmissão da tensão da matriz à fibra e da fibra à matriz (Smith, 1998).

O uso de um compósito com matriz polimérica permite uma grande

flexibilidade na produção e liberdade no projeto de estruturas. A utilização do material polimérico como matriz viabiliza a obtenção de pequenas séries ou peças de grande porte, onde o investimento em moldes de aço, bem como o ferramental necessário para a utilização de materiais metálicos, seria incompatível com o faturamento de um pequeno volume de produção. O material polimérico possibilita a utilização de moldes de baixo custo e reduz de maneira significativa os investimentos de equipamentos e instalações, tornando-se uma solução melhor que matrizes cerâmicas ou metálicas.

A matriz polimérica é geralmente composta por uma resina termorrígida do tipo poliéster insaturada (ortoftálica, tereftálica, isoftálica ou bisfenólica), éster vinílico, epóxi, fenólica, de poliuretano e de silicone. Na moldagem das duas fases ocorrem ligações cruzadas (*cross linking*) proporcionando ao material final, propriedades especiais que definem a sua ampla aplicabilidade. Os materiais compósitos que utilizam resinas termoplásticas como matriz não possuem o desempenho e as características mecânicas dos materiais produzidos por resinas termorrígidas, principalmente em função da interface, da temperatura de trabalho e do seu processo de produção (Smith, 1998).

Devido à massa específica relativamente baixa, se comparada aos metais, e as propriedades mecânicas das resinas e fibras de reforço, os produtos fabricados a partir destes materiais apresentam uma baixa massa específica no compósito e uma excelente resistência mecânica. Os materiais compósitos poliméricos, devido à presença de matriz polimérica, apresentam excepcional inércia química, o que permite sua utilização em uma ampla gama de ambientes quimicamente agressivos (Marinucci, 2001).

Umidade, vento, sol, oscilações térmicas têm baixa ação prejudicial sobre os materiais compósitos de matriz polimérica. E quando características não usuais são requeridas, aditivos como protetores de UV, agentes anti-estáticos, resinas especiais estão à disposição dos técnicos para solucionar aplicações que requeiram propriedades além das usuais. O material polimérico termofixo, devido à sua composição e ao *cross linking*, formado durante o processo de moldagem, apresenta como característica uma alta durabilidade. Além de sua durabilidade tradicional, apresentam técnicas simples de reparo e manutenção.

Os materiais compósitos com matrizes poliméricas têm uma grande vantagem sobre outros materiais estruturais, pois moldes com formas de geometrias

complexas são facilmente adaptáveis aos processos em utilização. Curvas, formas diferenciadas, detalhes arquitetônicos complexos, são facilmente projetados e executados utilizando estes materiais com custo extremamente competitivo.

As resinas epoxídicas de alto desempenho, contém pelo menos dois grupos epóxi terminais por molécula, conhecidos também como grupos oxiranos ou etoxilina. Estas resinas são matérias-primas em vários setores industriais, como a indústria eletroeletrônica, de embalagem, construção civil e transportes. Uma enorme variedade de resinas e agentes de cura são empregados nas diferentes aplicações que necessitam propriedades diversificadas, as quais estas formulações permitem. A alta temperatura de transição vítrea, grande afinidade química com fibras cerâmicas como o carbono e o vidro, sua boa estabilidade térmica, suas propriedades mecânicas e seu custo relativamente acessível fazem deste sistema de matriz polimérica um dos mais utilizados do mercado.

As resinas termorrígidas após entrarem em contato com reforço devem sofrer uma cura, que nada mais é do que um processo de polimerização e durante este processo ocorre um aumento do peso molecular médio do polímero. Os polímeros quando submetidos ao processo de cura desenvolvem uma rede interconectada tridimensional com ligações cruzadas. A funcionalidade das unidades dos monômeros define as características microestruturais da rede polimérica. A densidade das ligações cruzadas, entendida aqui como o número de ligações moleculares por unidade de volume, que é dependente da funcionalidade das unidades do monômero, define as propriedades viscoelásticas e mecânicas do polímero (Neto, 2006).

3.1.2 Fibras

As fibras são os elementos estruturais dos materiais compósitos, responsáveis por suportarem as tensões aplicadas aos componentes. As fibras, sob o ponto de vista mecânico, são um dos mais eficientes meios de reforços estruturais, isto ocorre em função de sua forma geométrica e distribuição de massa em uma seção extremamente fina em relação a seu comprimento. Segundo Neto, 2006, a fibra aproxima-se da resistência teórica que um material pode ter, pois apresenta um menor número de defeitos, e quanto mais fina for a fibra menor ainda será a ocorrência destes defeitos que induzem à falhas no material. Sua configuração geométrica, ou seja, pequeno diâmetro e grande comprimento, permite um alto valor

na relação área superficial/volume e, por consequência, a área interfacial fibra/matriz disponível para transferência por unidade de volume da fibra aumenta em função da relação comprimento/diâmetro (Neto, 2006), indicando que a fibra possui a maior superfície de contato em relação ao volume de reforço no material compósito, se comparado a outras formas geométricas de partículas.

O arranjo ou orientação das fibras em relação umas às outras, a concentração e a distribuição das fibras têm significativa influência na resistência, bem como em outras propriedades dos materiais compósitos reforçados com fibras. Quanto à orientação das fibras, é possível se ter dois tipos de alinhamento. Um no qual a orientação segue os eixos específicos na peça e outro totalmente ao acaso. Fibras contínuas são geralmente orientadas em direções específicas em função da aplicação, enquanto as fibras descontínuas podem ser orientadas ou distribuídas ao acaso na matriz. Melhores propriedades globais são verificadas para distribuição uniforme das fibras.

Os materiais classificados como fibras por sua vez, são também policristalinos e ou amorfos e possuem pequenos diâmetros. Materiais fibrosos são geralmente poliméricos (aramida) ou cerâmicos (vidro, carbono, boro, óxido de alumínio e carbetto de silício), enquanto que materiais como aço, molibdênio e tungstênio são classificados como fios (cintas) e possuem relativamente diâmetros grandes (maiores que a definição geral). Estes materiais são usados, por exemplo, em reforço de aço para pneus automotivos.

As fibras de vidro, de aramida e de carbono são as mais empregadas como reforço, mas outras fibras como as de boro, carbetto de silício, óxido de alumínio também podem ser utilizadas na produção de materiais compósitos.

Fibras de vidro

Os vidros são conhecidos desde as antigas civilizações, como as egípcias e etruscas, sendo produzido em forma de fibras desde a primeira metade do século XX. Vidros são substâncias que se solidificam no estado amorfo. Podem ser obtidos da fusão de reagentes, constituintes, óxidos ou seus derivados. As fibras de vidro contínuas comerciais são constituídas principalmente de sílica (SiO_2) com outros elementos que lhes dão características específicas para cada aplicação. As propriedades mecânicas das fibras de vidro silicato não apresentam alterações significativas em função da composição química, mas são extremamente sensíveis

no que diz respeito às atividades químicas, que por sua vez controlam importantes parâmetros como resistência à corrosão, durabilidade ou resistência à abrasão (Kelly,1994). Os produtos vendidos comercialmente são em sua maioria confeccionados com fios constituídos pela aglutinação de fibras contínuas ou descontínuas (Lubin,1969). Em ambos os casos, o processo de fabricação é o mesmo até a passagem do vidro fundido através de uma matriz de platina e ródio contendo uma centena de furos extremamente finos. Depois disso, o processo se modifica. No processo de fibras contínuas, as fibras são resfriadas, pulverizadas com um agente aglutinante e protetor, unidas em grupos por uma sapata de modo a formar um fio (ou mecha) e por fim são secas. Já no processo de fibras descontínuas, as fibras são resfriadas, colocadas em um tambor rotativo sob vácuo, pulverizadas com um agente aglutinante e protetor e por fim são secas (Callister,1997).

Na constituição de materiais compósitos de matriz polimérica (termorrígida ou termoplástica) as fibras de vidro são os reforços mais utilizados. O baixo custo em comparação com outros reforços não é certamente o único motivo deste sucesso, uma vez que suas propriedades atendem uma grande variedade de aplicações. O material compósito, constituído por fibras de vidro, possui baixo coeficiente de dilatação térmica, boa resistência ao impacto, alta resistência à tração e uma notável flexibilidade de conformação e, em determinados casos, de manutenção. Somente estas vantagens, entretanto, não devem nortear a especificação de um projeto, pois o desempenho do produto acabado depende tanto da escolha do tipo de fibra mais adequada para cada caso, quanto da consideração de alguns fatores no projeto e da observação das propriedades mecânicas finais do material compósito (Smith,1998).

A adequação da fibra de vidro à aplicação que se deseja pode estar relacionada tanto ao tipo de vidro utilizado na confecção da fibra, quanto aos agentes aglutinantes e protetores utilizados na confecção do fio. Para um melhor entendimento sobre as variações dos tipos mais importantes de vidros existentes, e dos tipos de fibras confeccionadas com estas matérias primas, na Tabela I são apresentadas suas respectivas características e observações quanto ao uso.

Embora a resistência mecânica final seja o parâmetro mais importante para a maioria dos reforços, em muitas aplicações as condições de exposição provocam a degradação desta propriedade. Quando submetidos a ensaios de laboratório, a fibra tipo “A” apresenta uma perda de massa de aproximadamente de 11% depois de

imersa por 1 hora em água no estado de ebulição. Já as fibras “E” e “ECR” perdem aproximadamente 1,5% ou menos, nas mesmas condições. Embora a fibra “E” apresente maior perda do que a “ECR”, verifica-se que ela apresenta melhor retenção da resistência mecânica do que os outros dois tipos. Por outro lado os tipos “A” e “E” não resistem aos ácidos e álcalis como o tipo “ECR”.

Tabela I - Propriedades mecânicas típicas de fibras de vidro (Kelly,1994; Neto,2006;Matweb,2006; Saint-Gobain, 2007).

PROPRIEDADES DAS FIBRAS DE VIDRO	A e AR	E	ECR	R	S
Designação *	Vidro de sódio resistente à álcalis	Vidro cálcio alumínio boro silicato	Vidro E modificado resistente quimicamente	Vidro de alto desempenho	Vidro magnésio alumínio boro silicato
Aplicação	Uso geral, resist. química	Uso estrutural	Uso estrut. resist. química	Melhores propried. mec.	Melhores propried. mec
Massa específica g/cm ³	2,70	2,54	2,70	2,53	2,50
Módulo de elasticidade GPa	72	72	72	86	87
Resistência à tração GPa	3,5	3,6	3,4	4,4	4,9

* Designação das letras para composições comerciais, de acordo com Gupta (1988) e Dockum (1987), apud CAHN, et al. (1993)).

A retenção da resistência mecânica e o balanceamento de propriedades fazem com que a fibra de vidro tipo “E” seja a mais utilizada como reforço nos materiais compósitos de matriz polimérica. Indicada para uso geral, a fibra tipo “E” recebeu com o tempo, algumas modificações. Para que sua resistência ao ataque de ácidos e álcalis fosse melhorada, foi desenvolvido o tipo “ECR”. Para melhorar o módulo de Young foram testadas adições com berílio, criando-se o tipo “M”. Entretanto, como o uso do berílio inviabiliza a aplicação comercial, desenvolveu-se o tipo “S”. Disponível em graus de alto e médio desempenho, o tipo “S” pode ter resistência mecânica até 40% maior do que o tipo “E” e é empregado na indústria

aeronáutica e aeroespacial. Recentemente apareceram as fibras com melhores propriedades mecânicas como a do tipo “R”, para atender a crescente demanda por material compósito, que não pode ser atendida pelos fabricantes de outras fibras com propriedades melhores, mas também mais caras que a fibra de vidro.

Fibras de carbono

As fibras de carbono, juntamente com as fibras de vidro, foram os primeiros reforços utilizados para aumentar a rigidez e resistência de materiais compósitos avançados leves, comumente utilizados em aeronaves, equipamentos de recreação, e aplicações industriais. O termo fibra de carbono, geralmente refere-se a uma variedade de produtos filamentosos compostos por mais de 90% de carbono e filamentos de 5 a 10 μm de diâmetro, produzidos através da pirólise da poliacrilonitrila (PAN), piche ou “rayon” (Lubin, 1969).

Fibras de carbono são referidas normalmente como às fibras de grafite; entretanto somente fibras de carbono de elevado módulo de elasticidade com estrutura de grafite tridimensional podem ser propriamente denominadas fibras de grafite. Em virtude das fibras de carbono possuírem elevados valores de resistência à tração, módulo de elasticidade extremamente elevado e baixa massa específica, quando comparados com outros materiais de engenharia, elas são utilizadas predominantemente em aplicações críticas envolvendo redução de massa. As fibras de carbono comercialmente disponíveis podem duplicar seus valores de módulo de elasticidade em relação às outras fibras de reforço, tais como aramida e vidro S, e exceder os metais em resistência à tração. Quando se utiliza materiais compósitos de fibras de carbono, a sua resistência e módulo de elasticidade podem ser orientados de modo otimizado para minimizar a massa final. Além da resistência e rigidez, as fibras de carbono possuem excelente resistência à fadiga, características de amortecimento de vibrações, resistência térmica, e estabilidade dimensional. As fibras de carbono possuem também boa resistência elétrica e térmica e são quimicamente inertes, exceto quanto à oxidação (Callister, 1997).

O elemento carbono possui dois alótropos de baixa massa específica: diamante e grafite, com fortes ligações covalentes entre os átomos de carbono. A microestrutura das fibras de carbono é baseada em estruturas de camadas hexagonais de grafite; no entanto, as fibras de carbono comerciais apresentam carência de ordem tridimensional entre as camadas planas. Esta ordem de estrutura

de grafite incompleta é denominada grafene, ou grafite turbostrático. A forte ligação sp^2 dentro das camadas planas de grafite, resulta num módulo absoluto e limite de resistência à tração teórica maior do que os de todos os materiais conhecidos. As propriedades transversais são significativamente menores que as axiais e como as camadas de grafite são mantidas unidas por ligações mais fracas, resultam em baixos módulos de cisalhamento. As características estruturais detalhadas das fibras de carbono foram investigadas e suas propriedades físicas e mecânicas são primariamente determinadas pela orientação axial das camadas planas de carbono e o grau de perfeição cristalina. Ambas podem ser estudadas através da difração de raios X.

Thomas Edson foi o primeiro a produzir intencionalmente filamentos de carbono pela pirólise do algodão para filamentos de lâmpadas incandescentes em 1878. Mais de 80 anos depois, o excelente desempenho de suas propriedades mecânicas foi demonstrada pelo crescimento de *whiskers* de grafite com resistência à tração de 2,0 GPa e módulo de rigidez de 800 GPa (Lubin, 1969). A primeira fibra contínua comercial foi produzida nos anos 1950 pela carbonização de *rayon* sintético para aplicações em mísseis a temperaturas elevadas. Entretanto a conversão do rayon em fibra de carbono não foi eficiente por causa do baixo rendimento de carbono, além de resultar em fibras com baixas propriedades mecânicas. Em meados da década de 1960, no Japão e na Inglaterra foi desenvolvido um processo mais eficiente de produção de fibras de carbono utilizando poli-acrilo-nitrila (PAN). Este processo é utilizado hoje em dia por mais de 90% da produção de fibras de carbono comercial. Durante as últimas décadas, o processo tem sido melhorado em sua eficiência para aumentar a resistência das fibras, o seu módulo, resistência à manipulação e diminuir deformações e falhas (Wiebeck, 2005).

Durante os anos 1970, os esforços visavam a redução do custo das fibras através do uso do precursor piche, menos dispendioso. A *Union Carbide* comercializou fibras de carbono derivada do piche de baixo módulo baseado no precursor piche isotrópico e uma família de alto módulo de fibras de carbono baseado no precursor cristal líquido do piche. Infelizmente, deficiências na resistência à compressão de fibras e o alto custo na purificação do líquido cristalino do piche precursor (Lubin, 1969), tem limitado a aceitação e crescimento de uso das fibras de carbono de alto módulo. Pesquisas correntes para desenvolver fibras de carbono de baixo custo incluem o crescimento dos filamentos de carbono via

deposição de carbono de gases, tais como monóxido de carbono, metano, ou benzeno sobre um metal catalisador.

As fibras de carbono são geralmente fabricadas a partir de precursores tais como PAN, piche ou rayon e classificadas pelos módulos de elasticidade e resistência, cujas classes são: baixo (< 240 GPa), classe padrão (240 GPa), intermediário (280 a 300 GPa), alto (350 a 500 GPa), e ultra elevado (500 a 1000 GPa). As propriedades mecânicas e físicas típicas estão apresentadas na Tabela II.

Tabela II - Propriedades mecânicas típicas de fibras de carbono (Kelly, 1994).

PROPRIEDADES DAS FIBRAS DE CARBONO	USO GERAL CLASSE PADRÃO	MÓDULO INTERMEDIÁRIO	ALTO MÓDULO PAN	ULTRA ELEVADO PICHE
Alongamento %	1,50	1,60	0,70	0,40
Massa específica g/cm ³	1,76	1,80	1,90	1,82
Módulo de elasticidade GPa	240	285	450	550
Resistência à tração GPa	3,5	4,5	2,0	2,0

3.1.3 Processamento

Há um grande número de processos sendo utilizados para fabricar produtos em materiais compósitos. Cada processo possui vantagens econômicas, de produção e desempenho e cada um deve ser cuidadosamente considerado na etapa de projeto.

Uma vez que o material tenha sido escolhido, trata-se de escolher o processo que responde mais adequadamente às exigências técnicas, com as melhores condições econômicas. A escolha do processo de moldagem resulta da resolução do trinômio: desenho (concepção), estrutura do compósito e processo. O problema é relativamente complexo, tanto pelas possibilidades oferecidas como pelas interações entre elas (Bader, 2002).

Bobinagem filamentar (filament winding)

O processo de bobinagem filamentar é o processo mais adequado à fabricação de tubos e peças axiais e caracteriza-se pelo enrolamento contínuo das fibras sobre um mandril rotatório (molde) de velocidade variável. Pode-se observar na figura 3, um desenho esquemático de um equipamento de bobinagem filamentar, onde percebe-se o fio de carbono saindo das bobinas e sendo depositado sobre o mandril em um padrão helicoidal de bobinagem. Este sistema permite a obtenção de material compósito de elevada relação resistência / massa (superior ao do aço), elevado grau de uniformidade, baixa incidência de mão de obra, permite a fabricação de peças de grande dimensão, baixo índice de perdas, obtenção de peças de elevada fração volumétrica de fibras (reforço) e automatização do processo (Callister, 1997).

Figura 3. Máquina de bobinagem filamentar (Carvalho, 2006).

Quando a fibra de vidro ou carbono é alimentada através de um banho de resina, este processo é chamado *wet winding* e quando o reforço pré-impregnado é utilizado é chamado de *dry winding*. Apresenta algumas desvantagens como limitação dimensional (devido ao equipamento), alto custo de equipamentos e restrição quanto à seção transversal. É indicado para a fabricação de tubos, vasos de pressão e tanques para transportes de líquidos.

No processo de bobinagem filamentar cada camada helicoidal consiste de

um número de passes da fibra com um ângulo de orientação $+\theta$ e com o mesmo número de passes com orientação $-\theta$. Estes passes geram diversos cruzamentos entre as fibras e a deposição simultânea de duas camadas de mesmo ângulo e sinais opostos $[\pm\theta]$. A forma como estes cruzamentos ocorrem é denominada padrão de bobinagem no qual o processo permite que, para o mesmo ângulo, vários padrões sejam gerados apenas com a manipulação adequada dos parâmetros utilizados na programação do equipamento de bobinagem (Carvalho, 2006).

Na figura 4 são mostrados dois padrões de bobinagens diferentes um helicoidal com sobreposição das fibras e outro com o enrolamento paralelo da fibra. O padrão de bobinagem mais adequado ao tubo onde os esforços são axiais é aquele que o ângulo de bobinagem é próximo ao eixo longitudinal do tubo, ou seja, o menor possível. Este ângulo não deve ser zero onde há uma condição desfavorável de tensões aplicadas em um compósito na direção das fibras, isto ocasiona o rompimento da matriz polimérica provocando a delaminação do compósito e a sua conseqüente falha estrutural.

Figura 4. Padrões de bobinagem e indicação do ângulo de bobinagem (Bader et al, 1990).

Moldagem por transferência de resina assistida a vácuo (VARTM-vacuum assisted resin transference molding)

Este processo consiste em preencher os espaços vazios de uma região, cavidade ou molde injetando por um ou vários pontos uma resina de baixa viscosidade já catalisada, e dependendo das características finais do componente,

submetê-lo à pressão e temperaturas para cura final do produto. Os reforços são colocados previamente, no interior do molde e a resina é injetada preenchendo os vazios, enquanto um sistema de vácuo retira simultaneamente o ar. O uso de pré-formados garante repetibilidade e a possibilidade de produções seriadas. O processo possui uma característica de simplicidade que permite um custo inferior do componente final apesar de pequenas perdas nas propriedades globais do mesmo (Swanson, 1996). Neste tipo de processo, podem-se conseguir altas frações volumétricas, com até 70% de fibra, com geometria complexa e excelente precisão dimensional (Yonossi, 2001). A quantidade de material de reforço, seu volume e as dimensões do molde determinam a fração volumétrica de fibra no compósito. Na figura 5 pode-se visualizar um esboço esquemático do processo, o pré-formado posicionado no molde quando então injeta-se a resina e simultaneamente aplica-se um vácuo para retirada do ar.

Figura 5. Exemplo esquemático de processo VRTM (Yonossi, 2001).

Aplicação de vácuo

O maior avanço no processo de transferência de resina foi obtido pelos fabricantes de barcos de alto desempenho. A necessidade de obtenção de estruturas resistentes e de baixa massa com um processo que pudesse ser

realizado por técnicos com um rápido treinamento e equipamentos simples foi sem dúvida alcançado. A influência da indústria aero-espacial permitiu o desenvolvimento de um processo cujo resultado é o aumento da fração volumétrica de vidro pela melhor compactação das fibras, com o uso de pressão positiva ou negativa durante o período de cura do laminado. Este procedimento permite reduzir a quantidade de espaços vazios dentro do laminado, aumentando as propriedades de resistência ao cisalhamento interlaminar, particularmente na adesão da camada mais próxima ao núcleo em construção tipo sandwich. A pressão pode ser aplicada tanto pelo uso de uma autoclave, moldes de encaixe macho e fêmea, injeção de resina ou bolsa de vácuo, sendo a última a mais simples e mais utilizada na construção de barcos e peças não estruturais de alta solicitação.

Bolsa de vácuo (*vacuum bag*)

O modo mais simples e barato de aplicar a pressão a um laminado, e também o mais comum em projetos de construção de estruturas navais, é o uso da bolsa de vácuo. O princípio da técnica é simples, consiste apenas de uma bolsa de vácuo sobre o molde de onde o ar é retirado por uma bomba de vácuo. A diferença de pressão criará uma força externa sobre o laminado que irá remover todas as bolhas e proporcionar um laminado de padrão estrutural. Uma bolsa de vácuo pode ser feita de filme polimérico transparente, rígido ou levemente elástico, e deve ter de 0,2 a 0,4 mm. Existem materiais específicos para esta aplicação como poliamida, PVA e polipropileno, pois em função do ataque químico do sistema da resina e a alta temperatura durante a cura do laminado, a bolsa pode furar, rasgar e deixar entrar ar no sistema, impedindo que o vácuo seja eficiente para compactar as fibras ou mesmo colar o material *sandwich*, conforme ilustrado figura 6.

Uma bomba de vácuo com um controle automático de pressão deve ser utilizada para a retirada do ar do sistema, para que o conjunto permaneça sob a ação da mesma até a cura da resina, quando não há mais possibilidade de refluxo. Na linha de vácuo deve-se ter ainda, um filtro para reter partículas sólidas, vapor da resina e uma barreira ou reservatório para a resina excedente da peça não alcançar a bomba. A linha de vácuo deve ter um registro e marcador de pressão e ser de mangueiras transparentes reforçadas, de forma que qualquer resina ou corpo estranho na linha possa ser identificado.

Moldes maiores precisam de duas tomadas para linhas de vácuo em extremidades opostas, conectadas por uma bifurcação de forma a puxar a mesma quantidade de vácuo em todo o molde. O local das tomadas deve ser preparado para que estas não encostem diretamente o molde, especialmente se a bolsa for utilizada em um laminado sólido. Isso pode ser feito com a colocação de um tubo na forma de espiral ou serrilhado em torno da tomada. Este sistema evita que a tomada colada à superfície obstrua o fluxo de vácuo, além de reduzir o risco de sucção de resina para dentro da linha de vácuo.

Também é necessário construir um caminho para o ar em todas as partes do molde, abaixo do filme de que sela o conjunto, para que ele possa ser direcionado para as tomadas. Isso pode ser feito colocando um material poroso que deixe passar o ar quando todo o laminado estiver compactado, figura 7a. Para peças pequenas pode se utilizar uma tela ou um tubo perfurado que não tenha aderência com a resina. Em peças maiores é recomendado utilizar-se uma manta ou tela de poliéster ou poliamida, que não tenha aderência à resina, pois recebe uma camada de PTFE, chamada de *peel ply*. Em cima do *peel ply* deve-se utilizar um filme polimérico liberador (*release film*) com pequenos furos, que tem a função de deixar passar apenas uma certa quantidade de resina do laminado para o sangrador (*bleeder*). Os filmes perfurados mais utilizados liberam de 1 a 3% o excesso de resina do laminado. Acima desta camada uma manta de feltro deve ser colocada para absorver o excesso de resina e permitir a passagem de ar até a tomada, este feltro é chamado respirador (*breather*) ou sangrador (*bleeder*). Como dito todos os materiais empregados dentro da bolsa de vácuo devem desmoldar da resina após o uso.

A pressão de vácuo necessária ao procedimento é de no mínimo 10 psi (aproximadamente 0,7 atm), e que a bolsa esteja igualmente em contato com o molde, sem nenhuma parte mais justa e outra mais folgada. Para fechamento da bolsa de vácuo utiliza-se uma fita de material dupla face, figura 7b.

Este processo é uma evolução da técnica de laminação manual, já que por melhor que seja um laminador ele nunca conseguirá produzir um laminado de tecido de fibra de vidro e resina com mais do que 35% de fração volumétrica de fibra no material compósito, sem se considerar o fato de ser um processo sem grande repetibilidade que depende da habilidade do operador.

Figura 6. a) Desenho esquemático da montagem do processo de VARTM.
b) Foto ilustrativa do VARTM em componente naval, montado segundo esquema da figura 6a . (Barracuda, 2006).

a

b

Figura 7. a) Procedimento de montagem. b) Vedação do vacumbag (Barracuda, 2006).

3.2 Prótese

É importante esclarecer que o sistema locomotor humano é extremamente complexo e dinâmico. Sendo um sistema integrado, tronco e pernas agem juntos de forma a garantir à locomoção maior equilíbrio e manobrabilidade.

Uma amputação resulta não apenas na perda de um membro, mas em um

desequilíbrio em todo o mecanismo locomotor do indivíduo. A colocação de uma prótese passa a ser a solução do problema de equilíbrio dinâmico, sendo necessário compensar a perda funcional pelas alterações no comportamento das partes remanescentes do sistema. Uma amputação ocorre normalmente entre as articulações e raramente sobre estas, pois o osso é um material vivo que responde às solicitações impostas a ele. Possui ainda, um complexo relacionamento com as estruturas ao seu redor, sendo que nas extremidades ele é mais flexível para absorver impactos e evitar fraturas próximas às articulações e não danificar cartilagens, e na região medial é mais rígido para cumprir sua função estrutural.

Um conjunto de músculos sempre está associado a um dos segmentos dos membros e freqüentemente esta musculatura se localiza sobre duas ou mais articulações e influencia em vários graus os movimentos destes membros (Rose,1994). É recomendado desta forma que, por ocasião da amputação ou em cirurgia corretiva posterior, haja uma fixação do feixe muscular no osso remanescente para recuperar o que restou da função motora. Toda função motora que permanece é importante, pois a prótese é uma substituição precária do membro amputado já que ela não possui, de maneira geral, a mesma função motora que os músculos originais possuíam. A máxima restauração das funções de locomoção em amputados de membros inferiores é atingida com as seguintes considerações: o encaixe do coto (parte remanescente do membro amputado) tem que ser confortável e adequado em relação à magnitude e aplicação das forças; uma avaliação efetiva dos benefícios da relação corpo-prótese e por fim um bom conhecimento biomecânico da marcha e do equipamento que vai se utilizar como prótese.

Podem-se classificar as amputações, e consequentemente as próteses, conforme a localização do corpo onde elas ocorrerem. Existem quatro tipos básicos de amputações e suas variações conforme proximidade ou distâncias a que se localizam das articulações.

São elas:

- amputação de quadril: onde o indivíduo perde parte do corpo a partir da metade do quadril incluindo a articulação da coxa;
- amputação acima do joelho: onde o indivíduo perde parte do corpo que corresponde à porção inferior ao meio da coxa;
- amputação abaixo do joelho: onde o indivíduo perde parte do corpo que corresponde à porção inferior ao meio da tíbia;

- amputação de pé: onde o indivíduo perde parte do corpo que corresponde à porção inferior do tornozelo.

Do ponto de vista prático para a amputação, mesmo quando ela ocorre na parte proximal ao quadril, uma vez que o coto esteja confortavelmente alojado no soquete, ou encaixe do coto, pode-se colocar um tubo metálico ou uma haste de madeira com uma ponta de borracha, para amortecer o impacto, fazendo com que o indivíduo consiga uma locomoção razoável, porém não permite o movimento de forma harmônica como é feito no sistema natural. Basicamente, foi o que se fez durante a Segunda Guerra nos principais centros militares de reabilitação de amputação. Com o avanço das técnicas cirúrgicas, o uso de novos materiais e o desenvolvimento dos joelhos e dos pés artificiais, exemplo na figura 8, o uso de próteses de membros inferiores se tornou permanente para diferentes aplicações.

Figura 8. Prótese de membro inferior para amputação acima do joelho com suporte do coto, joelho, tubo (objetivo deste trabalho) e pé. Detalhe do conjunto mecânico hidráulico de um joelho policêntrico para exercer a função de marcha (Rose, 1994).

A prótese se justifica por razões estéticas e funcionais, pois fornece mais funções que uma simples haste de madeira. O uso de pés e joelhos artificiais se mostrou bastante eficaz para devolver ao indivíduo várias das funções dos músculos e dos ossos que a perna possui. Novos materiais, como plásticos e compósitos, mecanismos hidráulicos e pneumáticos e os sistemas eletrônicos de marcha auto-adaptativos, como os desenvolvidos por Wilkenfeld (2006) no MIT, agora fazem parte do conjunto de soluções aplicadas aos problemas biomecânicos decorrentes de uma amputação (Rose, 1994).

O osso é um dos materiais compósitos mais interessantes que a humanidade conhece. Ele é um material constituído de hidroxi-apatita como componente modificador de impacto e colágeno como matriz polimérica. O osso, porém, se divide em duas estruturas do mesmo material. A tíbia, por exemplo, apresenta a primeira estrutura óssea e mais importante, que é a cortical, uma estrutura compacta de maior massa específica no corpo humano ($\rho = 1,99 \text{ g/cm}^3$) e extremamente rígida ($E=12,5 \text{ GPa}$) que envolve a maior parte da ossatura humana. A segunda estrutura chamada esponjosa, onde há uma predominância da organização trabecular, que é uma série de filamentos de hidroxi-apatita formados segundo as linhas de força da estrutura óssea por um complexo mecanismo piezo-elétrico, esta próxima às extremidades onde o osso é mais flexível ($E = 0,44 \text{ GPa}$) e menos denso ($\rho = 0,29 \text{ g/cm}^3$), também visível na figura 9 (Black, 1998).

Figura 9. a) pode-se observar pela radiografia a alteração na massa específica óssea do centro do osso em relação a sua lateral; b) um corte mostra o tecido esponjoso com o trabeculado e o cortical no contorno do mesmo (Leivas, 2003)

Acreditava-se que os humanos e outros animais escolhiam as velocidades de seus passos baseando-se na minimização do custo energético e metabólico da locomoção. No ser humano, o modo de locomoção mais econômico em baixas velocidades é a caminhada. Conforme a velocidade da caminhada aumenta, chega-se a um ponto que correr requer menos energia metabólica do que andar.

Para uma análise simplificada, pode-se afirmar, além do consumo metabólico, que a grande diferença entre andar e correr é a força de reação do solo, de 1200 N para caminhada e 5000 N para a corrida (Amadio, 1996). No movimento de caminhar humano, existe pelo menos um pé em contato com o chão e existem pequenas fases de duplo suporte, quando ambos os pés ficam em contato com o chão. Em contraste, correr é uma série de saltos impactantes com o chão, que são usualmente alternados com fases aéreas, quando nenhum dos pés está em contato com o chão. Esta diferença do modo de locomoção direciona a resultante para uma componente vertical de maior magnitude e de força de reação do solo quando se compara corrida com caminhada. Na primeira metade da fase de contato com o solo, a componente horizontal da força de reação do solo é negativa, indicando que a pessoa está sendo empurrada para trás, figura 10. Na segunda metade, a componente horizontal da força de reação do solo é positiva, fazendo com que a pessoa seja empurrada para frente, figura 11. O modo de atuação da força no solo é similar para andar e correr nos humanos e uma grande variedade de outros animais, com uma grande diversidade de formas corporais, massas, e números de pernas (Garbin, 2005).

Entretanto, a velocidade na qual o animal prefere trocar seu modo de locomoção não é a velocidade que minimizaria o custo energético metabólico. O ser humano muda de caminhar para correr a uma velocidade que não é energeticamente ótima, mas que está associado à sua conveniência. Sendo assim, o dimensionamento da prótese é feito para caminhada, mas levando-se em conta que uma eventual corrida faz parte do uso normal da mesma.

Estas diferentes estruturas constituem um sistema de sustentação que é capaz de absorver impacto do solo ao mesmo tempo em que mantém o organismo humano em pé.

Figura 10. Principais solicitações de uma prótese de membro inferior na condição I, antes do passo (ISO 10328-3-1996).

Figura 11. Principais solicitações de uma prótese de membro inferior na condição II, após o passo (ISO 10328-3-1996).

3.3 Análise de custo

O acesso à alta tecnologia sempre será maior quanto maior for o recurso disponível. A engenharia é uma especialidade que leva à busca do conhecimento para a criação de soluções tecnológicas aos problemas da atualidade, mas está constantemente pressionada pela redução dos custos produtivos e pela viabilização econômica de processos com alto grau de tecnologia aplicada. O custo de um processo ou de um produto tornou-se, para as organizações em geral, uma forma de se decidir pelo seu uso ou não, mesmo que haja outras justificativas para sua realização. Hoje, o custo é um item importante a ser pesquisado e considerado, no que se refere ao desenvolvimento de novas tecnologias.

Pode-se afirmar que a estrutura mais barata é aquela que cumpre exatamente sua função, sem excesso ou falta de propriedades, uma vez que o excesso implica em um desperdício de material e a falta em uma situação que pode comprometer o uso do componente.

Sabe-se que processos como *bobinagem* e laminação de pré impregnados (*pre-preg*) com cura em autoclave produzem materiais de desempenho excepcional, de propriedades mecânicas elevadas e que normalmente estão associadas a custos elevados. Novos e antigos processos aprimorados têm conseguido produzir peças com desempenho muito superior à laminação manual, próximo aos processos citados, mas com custos de produção significativamente inferiores.

Os projetos de materiais compósitos são realizados com base em suas solicitações estruturais e as fibras posicionadas, durante o processo produtivo, de forma a maximizar o desempenho do componente ou minimizar a condição de fadiga. Uma série de fatores tem forte influência sobre o custo do material compósito e dentre eles pode-se destacar: projeto, matéria-prima e processo.

3.3.1 Projeto

O projeto, material e o processo devem ser pensados e, se possível, executados simultaneamente. No caso de materiais compósitos, muitos parâmetros estruturais estão fortemente ligados ao projeto, processo e manufatura de estruturas. Os parâmetros de cada etapa interferem nas outras. Na verdade, alguns dos parâmetros de um material compósito, tais como orientação da fibra, que é variável do material, podem ser também classificados como variáveis estruturais e de processo. No projeto e no planejamento das rotinas de produção, é frequente

otimizar o processo depois de definir o estudo estrutural. Este procedimento, entretanto, demanda um alto custo de manufatura e um grande número de operações que provavelmente produzirão os melhores resultados estruturais. Uma vez determinados, e avaliadas as configurações estruturais, o processo não pode ser mais otimizado sem se rever a estrutura. Sabe-se que 80% do custo de manufatura é determinado nas configurações estruturais preliminares do projeto estrutural (Park, 2005).

Posteriormente, uma otimização pode somente ser aplicada às variáveis remanescentes, isto torna limitada uma redução de custo posterior ao projeto. Este problema requer um método de otimização que considere simultaneamente desempenho estrutural e custo de fabricação. Park (2005) propõe como forma de redução de massa, e conseqüentemente custo, o uso de modelagem numérica com a aplicação de um algoritmo genético nos parâmetros de produção de um compósito fabricado por moldagem por transferência de resina, tanto os parâmetros do material, como sua orientação e número de camadas, quanto a velocidade do fluxo de resina e o número de furos de entrada de resina no molde, podem ser otimizados para melhoria de processo de produção de materiais compósitos. O uso de aplicativos, como o *ARENA*TM, para modelagem de eventos discretos, como processos produtivos, ou *Optistruct* e o *Hyperstudy* da *ALTAIR*TM que permitem modelar e otimizar modelos físicos ou multi-sólidos, podem ser feitos permitindo a otimização dos mesmos e redução de custos nos procedimentos ou nos componentes uma vez que estas simulações são numéricas e não se faz uso de um protótipo até que se deseje validar o modelo. Alguns destes procedimentos ainda são experimentais, porém, devem se tornar rotina nos próximos anos, permitindo melhores rendimentos em processos já em uso.

3.3.2 Matéria-prima

A matéria-prima, para confecção de um componente com propriedades mecânicas que atendam às solicitações a ele impostas é dos itens que mais interferem na redução de custo. Mas nem sempre este item obedece à fórmula simplista de “material mais barato implica em produto mais barato”. A economia inicial pode, inúmeras vezes, converter-se em custos adicionais de processo ou perdas de propriedade mecânica, com eventual aumento em suas dimensões para

compensar tais perdas. Deste modo, é importante que o material seja escolhido por um critério técnico comparativo de propriedades e de custo. Isto não deve comprometer o julgamento técnico e uma avaliação criteriosa do custo-benefício do uso de materiais não convencionais, ou pelo menos, não usuais à aplicação em questão.

Segundo Bader (2002), a escolha da resina, apesar de uma influência na resistência ao impacto, fadiga, resistência à trinca e resistência a corrosão, exerce influência pouco representativa no custo de produção de um componente em material compósito. Quando se utiliza fibras com alto desempenho como carbono ou aramida o preço da resina é muito inferior ao da fibra. Com o uso da fibra de vidro, os preços da resina e da fibra se aproximam, mas as perdas de propriedades, tais como aderência e temperatura de transição vítrea não justificam a opção por resinas de custo menor. Na produção de um compósito estrutural objetiva-se reduzir ao máximo o volume de resina, já que as propriedades principais encontram-se nas fibras. As resinas com melhores propriedades normalmente são oferecidas a um custo maior, porém permitem as maiores relações de frações volumétrica fibra/resina no compósito. A seleção correta da resina que atenda às solicitações do material e do processo é com certeza, fator preponderante no custo final do material compósito.

Com relação à seleção do material compósito para uma aplicação, Ashby (1999) fornece elementos metodológicos e mercadológicos para a escolha do material mais adequado ao projeto. Faz-se necessário realizar uma análise preliminar do desempenho estrutural de um componente de compósito em função das especificações das matérias-primas como: rigidez, resistência à tração, massa e o custo. Pode-se utilizar diversos índices que associam propriedades para seleção de materiais de engenharia, como por exemplo, de rigidez e resistência à tração, correlacionando ambos com propriedades como massa específica e custo de matéria-prima. Um único índice relacionando todas estas variáveis pode ser criado para efeito de comparação de vários materiais que se deseja selecionar. Os índices, apresentados na tabela III, permitem comparação entre estas variáveis simultaneamente para diferentes materiais, maximizando as propriedades que são interessantes e minimizando aquelas que não contribuem para o desempenho desejado.

Tabela III – Tabela comparativa propriedades, custo, massa específica (Bader, 2002).

Material	Rigidez			Resistência	
	Tração	Flexão	Torção	Tração	Torção
Índice de mérito	$E/C\rho$	$E^{1/2}/C\rho$	$G^{1/2}/C\rho$	$\sigma/C\rho$	$\sigma^{2/3}/C\rho$
Vidro E-epóxi	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Aramida-epóxi	1,12	1,14	1,15	1,03	1,02
Carbono alt. mod.-epóxi	1,78	1,30	1,30	1,64	1,30
Carbono mod. int.-epóxi	1,03	0,67	0,66	0,95	0,70

O índice para a rigidez sob tração, por exemplo, é representado por $E/C\rho$, sendo E módulo de Young, C o custo em \$/kg e ρ a massa específica. Para o índice de resistência à tração tem-se $\sigma/C\rho$, onde σ é o limite de resistência à tração, sendo C e ρ os mesmos parâmetros mencionados para rigidez. Na tabela III, são apresentados os índices calculados para estas e outras propriedades dos principais materiais compósitos, tendo-se como base o custo somente da matéria-prima. Pode-se observar que o carbono de alto módulo-epóxi é o que apresenta maiores índices nas propriedades mecânicas, enquanto o compósito carbono-epóxi de módulo intermediário é o que apresenta índices mais baixos, com melhores propriedades e com massa menor, que o vidro E e a Aramida, para uma mesma solicitação. Na primeira coluna, o índice $E/C\rho = 1,78$ para o compósito com fibra de carbono de alto módulo, é o maior valor, indicando a melhor relação de rigidez em função do custo da matéria-prima ou seja esta seria a estrutura mais leve e com menor custo que atenderia a solicitação. Na mesma coluna o compósito com fibra de aramida tem valor $E/C\rho = 1,12$, indicando ser esta a segunda opção com índice melhor que o compósito de fibra de carbono de módulo intermediário. Este critério simples de seleção passa despercebido para um grande número de empresas que trabalham com compósitos. Uma consequência simples disto é o aumento das dimensões estruturais para compensar a falta de resistência de um compósito mal dimensionado e o conseqüente encarecimento do componente.

3.3.3 Processo

Alguns processos modificam as propriedades finais do material que produzem e, no caso dos compósitos, isto se dá de maneira muito mais efetiva. Há ampla oferta de matéria-prima para confecção de peças em compósito, tais como resinas líquidas, fibras ou materiais pré-processados como tecido, trama, tecido não tecido,

pré-formados, *braids*, etc., que, apesar de mais caros, em relação às fibras, reduzem os posterior custos de processamento. Como exemplo, pode-se citar que na Marinha Americana para aplicações estruturais de grandes dimensões, complexas e espessas, usa-se como processo padrão a moldagem por transferência de resina assistida a vácuo – RTM (Soratia, 1999).

O RTM tem, nos últimos anos, substituído outros processos onde o controle produtivo é baixo. É um processo que se presta tanto para a fabricação de estruturas aeronáuticas com precisão dimensional e tolerâncias estreitas, onde se utiliza altas pressões e temperaturas como para a produção seriada de dutos de ar condicionado, cascos e divisórias, com uso de vácuo e cura a temperatura ambiente. No VARTM é possível o posicionamento das fibras conforme a necessidade de solicitação das peças, ajustando a orientação dos tecidos e das fitas, ou utilizando-se de pré-formados, para posteriormente injetar a resina sobre esta montagem, com elevado grau de produtividade e desempenho das peças produzidas.

A automação de processos, como VARTM, propicia resultados que dependem menos da habilidade do operador e produzem peças com maior homogeneidade. O uso de moldes metálicos aquecidos e o vácuo aplicado simultaneamente à injeção da resina têm produzido compósitos com até 70% de fibra em massa e com volumes de produtividade de até 750 peças por ano por cavidade. Isto até pode parecer pouco, mas se for considerado que a produção de peças com o uso de pré-impregnados e autoclave produz em média 150 peças por ano por cavidade, explica o crescente interesse por processos como o VARTM (Soratia, 1999; Bader, 1999). Apesar, de em alguns casos, não haver o absoluto controle da matéria-prima em nas empresas processadoras de VARTM, como há na indústria aeroespacial, a simplicidade do processo garante por si só um resultado competitivo (Barracuda, 2006).

Para que um material compósito tenha um desempenho adequado, grandes recursos são investidos na garantia e no controle da qualidade das matérias-primas e do processo. Um material compósito de alta qualidade e com pequena quantidade de defeitos é normalmente feito com controles rígidos de produção. Um eventual baixo desempenho do processo de fabricação e do controle da qualidade, como a presença de vazios e bolsas de resina, frequentemente é compensado, nas empresas, com o superdimensionamento de componentes. Sabe-se que é possível

obter uma economia de massa, e portanto custo, quando se utiliza um processo para a fabricação de compósitos avançados que reduza a tendência que estes materiais têm na formação de vazios, trincas e bolsas de resinas no interior ou na superfície dos componentes (Costa, 2001). A formação de vazios em compósitos, em geral, deve-se a bolhas de ar aprisionadas no sistema de resina quando da sua formulação e bolsas de resina formadas durante processo de fabricação, umidade absorvida pela matéria-prima durante a sua armazenagem e seu processamento e ciclos de cura inadequados, tais como valores de pressão e temperaturas fora da especificação. Isto está diretamente ligada ao tipo de processo escolhido, controle da qualidade e ao seu nível tecnológico.

A formação e crescimento de vazios causam a perda da resistência, rigidez e vida em fadiga do laminado, muitas vezes resultando em falha catastrófica. Sabe-se que a resistência dos compósitos frente alguns tipos de esforços, como cisalhamento interlaminar e compressão, entre outros, diminui com o aumento do volume de vazios. Costa (2001), usando critério de Mar e Lin, determinou que em laminados unidirecionais com no máximo 0,75 % de porosidade e tecidos com no máximo 0,9% porosidade não há perdas significativa de suas propriedades mecânicas. Portanto, se o processo atender aos parâmetros de porosidade e massa específica de fibra, as demais variáveis podem ser otimizadas em função do custo. A obtenção de características superiores às descritas acima implicaria em um gasto energético e tecnológico exponencialmente maior. O uso de técnicas de ensaios não destrutivos, como as utilizadas na indústria aeroespacial, pode prevenir falhas e avaliar a qualidade do processo obtido. Este estudo, porém, não avalia o impacto custo do controle da qualidade no preço final do compósito. O alto custo dos equipamentos os torna ainda proibitivos na maioria dos fabricantes no país.

Bader (2002) ao descrever os principais processos de fabricação de peças estruturais em compósitos demonstra que a automação, o uso racional de equipamentos de aquecimento para cura ou cura em temperatura ambiente diminuem custos na fabricação. O mesmo autor também conclui que o material usado com mais freqüência na fabricação de peças aeronáuticas, a laminação de *pre-preg* com cura em autoclave, também se traduz em maior custo de fabricação se comparado a processos com desenvolvimentos mais recentes como RTM (*resin transference molding*), RFI (*resin film infusion*), SMC (*sheet molding compound*), GMT(glass mat thermoplastic), termo formagem com PEEK (polieteretercetona) ou

PEKK (polietercetonacetona) e pultrusão. Estes processos vêm oferecendo opções de custo mais baixo para produção de compósito e seu desenvolvimento promove uma popularização destes processos na indústria como opção de substituição dos materiais tradicionais.

Na tabela IV é possível fazer-se uma comparação de fração volumétrica de fibra “Vf”, módulo de elasticidade “E”, preço da peça em função da matéria-prima, processo, ferramenta de produção e produtividade para fabricação de um componente com a mesma função, com o mesmo material e desempenho equivalente. Nesta mesma tabela IV destaca-se o melhor desempenho nos itens 1 e 2, do processo de *pré-preg* com autoclave, com relação às propriedades onde o módulo de rigidez “E” e a fração volumétrica de fibra “Vf” são maiores. Entretanto o custo da matéria-prima é maior e os volumes de produção menores. Na tabela IV, no item 3 e 4, encontram-se os processos RTM e RFI com valores de módulo de rigidez “E” e volume de fibra “Vf”, respectivamente, 23 e 28 % (razão entre os itens 4 e 1) menores, porém apresentam de 55 a 63% (razão entre os itens 3:1 e 4:1) de redução no preço da matéria-prima e um aumento de 100 a 400% (razão entre os itens 3:1 e 4:1) no volume de produção.

Tabela IV – Tabela comparativa processo, matéria-prima, propriedades e custo (Bader, 2002).

Item	Material		Propriedades			Processo		
	Fibra	Matéria-prima	Vf	E (GPa)	Preço (\$/kg)	Processo	Ferramenta	Produção (peças/ano)
1	HScarbono	UDprepreg	0,65	55	100	Autoclave	1parte compósito	125
2	HScarbono	UDpp Fita	0,65	55	120	Autoclave	1parte compósito	125
3	HScarbono	Tecido	0,50	40	45	RFI-autoclave	1parte compósito	250
4	HScarbono	Tecido	0,50	40	45	LP-RTM	2parte compósito	500
5	HScarbono	SMC	0,40	27	80	Termoform	2partes metal	8000
6	HScarbono	*GMT	0,30	15	90	Termoform	2partes metal	13250
7	HScarbono	Tecido fita	0,45	36	50	Pultrudado	Metal fundido	12500

Na tabela V pode-se identificar os mesmos processos, da tabela anterior, organizados, de forma crescente, segundo sua massa. Esta tabela foi feita para uma mesma placa, produzida com processos diferentes, mas com propriedades mecânicas equivalentes, para isto a espessura foi aumentada compensando a perda de propriedades.

Tabela V - Dados referentes ao laminado e seu custo considerando o mesmo desempenho com diferentes materiais e processos de fabricação (Bader, 2002).

Item	Material	Processo	Espess. (mm)	Mass (kg)	Mat. prima (\$/peça)	Ferramenta (\$/peça)	Process /to (\$/peça)	Deprec. (\$/peça)	Custo total (\$/peça)
1	HScarbono	a-cut,a/c prepreg	2,50	4,84	806	40	610	502	1958
2	HScarbono	a-lay,a/c fita	2,50	4,84	683	40	573	733	2029
3	HScarbono	RFI,a/c	3,25	6,26	402	40	518	484	1444
4	HScarbono	LP-RTM	3,50	6,62	425	80	394	63	962
7	HScarbono	Pultrudado fita	4,00	8,06	504	8	21	5	538
5	HScarbono	Termoform SMC	5,00	9,32	518	10	38	27	593
6	HScarbono	Estamp.frio GMT	8,60	20,03	1336	16	23	20	1395

Em ordem crescente de massa.

Percebe-se, pela tabela V, que entre os valores 6,62 e 9,32 de massa, nos processos RTM, pultrusão e termo formagem, há um aumento da massa de 36 a 92 % em relação ao *pre-preg* autoclave. Apesar do aumento na massa, uma redução de 50 a 75 % no custo de todo o processo pode ser observada, apesar da perda de algumas propriedades e o conseqüente aumento da espessura. Isto mostra que alguns processos oferecem uma redução significativa de seus custos, pela simplicidade de equipamento, ferramentas e operação sem perda nas propriedades importantes para algumas aplicações.

Deve-se notar que as perdas nas propriedades com o uso do VARTM são menos significativas que a redução de custo obtida com o mesmo com a vantagem de tolerâncias mais estreitas e maior precisão dimensional (Younossi, 2001). A tabela VI compara o custo da produção de um componente estrutural aeronáutico entre o alumínio, o VARTM e o *pre-preg* autoclave, por meio do custo relativo de produção em relação ao alumínio de um mesmo componente, considerando a complexidade do processo.

Tabela VI – Custo de produção de um item em compósito em relação a produção do mesmo item em alumínio considerando a complexidades do processo (Younossi, 2001).

Processo	Simples	Intermediário	Complexo	Muito complexo
Complexidade				
Lam.pre-preg. manual	1,3	1,8	2,2	3,0
VARTM	-	-	1,4	2,3

A tabela VI mostra o VARTM como o processo com maior potencial para promover uma redução de custo nas peças em compósitos, pois, mesmo para peças com maior complexidade, mantém seu custo proporcionalmente mais baixo.

Na verdade o VARTM é um processo com equipamentos mais simples, moldes mais baratos e de fácil reprodução e aplicação. Sua automação, com certeza, aumenta seu custo no momento da aquisição dos equipamentos, no treinamento da mão de obra e na aquisição dos pré-formados de matéria-prima, mas também aumenta sua produtividade.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Modelagem

O sistema estrutural ósseo humano inspirou inúmeros trabalhos na área de bioengenharia. Este trabalho visa desenvolver uma estrutura de compósito com uma casca rígida e uma parte interna mais flexível semelhante ao osso humano. Isto foi proposto para aperfeiçoar a estrutura protética, uma vez que sistemas biológicos são otimizados pelo próprio processo evolutivo a que estão submetidos. O modelo utilizado é um sistema de compressão axial circular em um tubo. A escolha deste modelo se deve a sua semelhança a um osso, pois este é uma estrutura tubular esbelta, que foi otimizada pela evolução ao longo de milênios, para uso em condições de compressão e eventual flexão.

O sistema ósseo é um tecido vivo e vinculado diretamente a sua função, um mecanismo *piezo-elétrico* com base no cálcio e fósforo, quando solicitado, é ativado e melhora suas propriedades. As melhorias destas propriedades incluem aumento da massa específica e do módulo do material de que o osso é feito, modifica a direção e a forma das fibras constituintes e o diâmetro externo do próprio osso para que aumente seu momento de inércia dando maior rigidez à estrutura, como no caso de um atleta onde as solicitações são constantes e sistemáticas e observa-se aumento de massa específica óssea com o aumento dos treinos.

As estruturas tubulares que estão sujeitas à compressão podem sofrer flambagem antes mesmo desta solicitação chegar ao limite de resistência do material. É freqüente no dimensionamento adotar-se um coeficiente de segurança para o componente e não manter a estrutura no limite, pois esta pode eventualmente ter que suportar solicitações além do que o uso normal prevê.

Sabe-se segundo Hibbeler (2000), que estruturas sob compressão axial têm seu limite de resistência à flambagem, ou carga crítica (P_{cr}) de compressão, dependente das dimensões da coluna, representada pelas variáveis I (momento de inércia da seção), L (comprimento ou distância do centro de rotação ao ponto de aplicação da carga), segundo a fórmula de Euler, dada pela equação 4.1

$$P_{cr} = (\pi^2 \cdot E \cdot I) / L^2 \quad (4.1)$$

Observa-se na equação 4.2, que a capacidade da coluna de suportar uma carga aumenta com o aumento do momento de inércia da seção transversal. Assim, colunas eficientes são projetadas de forma que a maior parte da área da seção transversal seja afastada, tanto quanto possível, de seus eixos principais centróides.

No dimensionamento de colunas procura-se atender a condição de momentos de inércia idênticos em todas as direções. Assim, do ponto de vista geométrico, os tubos de seções circulares são excelentes colunas.

Estas considerações induzem a duas conclusões: a primeira é que colunas tubulares e circulares são mais viáveis que barras maciças ou seções poligonais. A outra é que colocar um material de módulo maior na periferia e módulo menor internamente, aumenta o módulo do conjunto e consequentemente a carga crítica a que o elemento pode ser submetido, ao mesmo tempo em que reduz custo de matéria-prima.

Na prática, no lugar da carga crítica pode-se utilizar a tensão crítica (σ_{cr}), que é a tensão média atuante sobre a coluna imediatamente antes de ocorrer o fenômeno de flambagem, dada pelas fórmulas 4.2 e 4.3.

$$\sigma_{cr} = (\pi^2 \cdot E) / (L/(I/A)^{1/2})^2 \quad (4.2) \quad \text{ou}$$

$$\sigma_{cr} = (\pi^2 \cdot E) / (L/r)^2 \quad (4.3)$$

Onde :

r é o raio de giração $r = (I/A)^{1/2}$

L/r é o índice de esbeltez

A é área da seção transversal

Expressando o limite de resistência da coluna em função da tensão, pode-se comparar materiais diferentes tendo como condição limite a tensão máxima de compressão que o material pode suportar. O que foi mencionado acima não vale para colunas suficientemente curtas, de forma que o material ao ser carregado com uma carga axial de compressão, não flambe. Mas quando o carregamento atingir o limite de resistência à compressão do material este entrará em colapso.

Uma última consideração deve ser feita. Para os ensaios utilizou-se um encaixe com flange para que o tubo não escorregasse. Em uma análise isto equivale

a um engastamento nas pontas do tubo. A fórmula de Euler, porém foi desenvolvida para o caso de uma coluna cujas extremidades são fixadas por pinos, tais que possam girar como na prótese. Algumas considerações devem feitas para que haja coerência na análise. Na equação 4.4 o comprimento L representa a distância em que o momento fletor atuante na viga é nulo. Na figura 12a pode-se observar uma estrutura tubular como ela é montada na prótese e na figura 12b vê-se a mesma estrutura na condição de ensaio e sua alteração na condição de flambagem. Caso a coluna seja apoiada de outro modo, ou seja, sem que as pontas possam girar livremente, a fórmula de Euler poderá ser utilizada desde que L agora represente a distância entre os pontos onde o momento fletor é nulo. L_e agora representa o comprimento equivalente da coluna. Assim, a coluna engastada em suas duas extremidades, figura 12b, tem pontos de momentos nulos, distantes $L/4$ de cada um dos apoios. Seu comprimento equivalente será, portanto, $L_e = L/2$. Vale então para a fórmula de Euler a seguinte relação:

$$\sigma_{cr} = (\pi^2 \cdot E) / (K \cdot L/r)^2 \quad (4.4)$$

onde K é o fator de extremidade, $L_e = K \cdot L$ e para o caso b da figura 12, que equivale à condição do componente, $K=0,5$

Isto quer dizer que o material dos ensaios deve resistir quatro vezes mais que o material da prótese na sua montagem original onde os pinos não estão engastados.

Figura 12. Condição de carregamento do tubo a) na prótese e b) no ensaio com o uso da flange.

O uso de uma prótese é submetido a duas classificações: A pela atividade e B pela massa corporal, segundo a Otto Bock do Brasil (Otto Bock, 2006) e suas sub-classificações em quatro tipos:

Atividade A -

1. Caminhadas em ambientes internos.
2. Caminhadas limitadas em ambientes externos.
3. Caminhadas ilimitadas em ambientes externos.
4. Caminhadas ilimitadas em ambientes externos com altas exigências.

Massa corporal B –

1. até 75 kg
2. até 100 kg
3. até 125 kg
4. acima 125 kg

O tubo dimensionado, objeto do presente estudo, foi desenvolvido para a AACD, uma instituição assistencial que trata de crianças. Portanto, será utilizado como referência a condição 3, de caminhadas ilimitadas em ambientes externos e massa corporal de até 100 kg. Uma solicitação que cobre o perfil de atividades das crianças, segundo orientação da AACD. Caminhadas externas podem, eventualmente, gerar uma condição extrema de corrida. Segundo Amadio, 1996 a corrida gera forças de reação do solo de até cinco vezes o peso de um indivíduo, portanto para uma massa de 100 kg a reação do solo poderá ser de até 5000 N.

Para construir o material compósito a ser utilizado neste estudo e selecionar a orientação mais adequada das fibras, realizou-se uma modelagem matemática por elementos finitos. Para isto, utilizou-se o sistema de pré processamento Altair HyperMesh 7.0, solver Altair OptiStruct 7.0 e o pós processador Altair HyperView 7.0. Os dados de entrada para os cálculos foram parâmetros de solicitação das próteses, segundo a norma ISO 10328-3-1996 *Prosthetics – Structural Testing of Lower-limb Prostheses*, onde os valores de esforço por compressão de 5000 N e dimensões próximas às de utilização, neste caso 145 mm de comprimento, 30 mm de diâmetro externo e 3 mm de espessura de parede. Para a modelagem optou-se por uma malha poligonal quadrada e avaliou-se as tensões pelo método de Tsai-Wu. Pressupôs-se o uso de camadas de 0,15 mm, de compósito fibra de carbono-epóxi e camadas de 0,25 mm de compósito de fibra de vidro epóxi com sobreposição

assimétrica. Além das condições de cargas axiais em relação ao eixo longitudinal da peça, avaliou-se o modelo conforme as condições I e II descritas na norma ISO 10328-3-1996 e exemplificada nas figuras 10 e 11. Estes foram os dados de criação do modelo para ensaio no sistema de análise por elementos finitos.

4.2 Matérias-primas – seleção

Hoje as próteses são fabricadas utilizando basicamente três materiais diferentes: o alumínio, o aço e o material compósito epóxi-fibra de carbono. O material que oferece a melhor resistência com o menor custo ainda é o aço. O material, porém mais utilizado, são as ligas de alumínio da série AA6000, que oferecem a melhor relação baixa massa e custo acessível. No entanto, como ocorre na indústria aeroespacial, o material que oferece a melhor resistência com baixa massa, mas não é o de menor custo, é o material compósito epóxi-fibra de carbono.

Diante deste fato, optou-se por fabricar o componente estrutural da prótese em um compósito híbrido epóxi-fibra de carbono e epóxi-fibra de vidro. Considerando-se a disponibilidade do processamento industrial de compósitos no mercado e junto à AACD, optou-se pelo uso de dois processos de fabricação: um por bobinagem filamentar e outro por transferência de resina à vácuo sobre uma luva tubular tramada, também conhecida comercialmente como *braid*.

Para bobinagem filamentar utilizaram-se as fibras presentes na tabela VII e a resina, GY260/HY907/DY062, que têm suas propriedades apresentada na tabela VIII na primeira coluna. Para a transferência de resina à vácuo, foram utilizados as *braids* de fibras, cujas propriedades estão apresentados nas tabelas IX e a resina LY 1564/ XB 3485 utilizada têm suas propriedades apresentada na tabela VIII. Neste trabalho, o molde de VARTM não é um molde rígido bipartido, mas é rígido apenas internamente. Este molde é fabricado com uma barra de alumínio cônica, para facilitar sua extração ao final do processo, sobre a qual as camadas de fibras são sobrepostas, em seguida é colocado um tubo de filme de poliamida ou poli-acetato de vinila e aplica-se o vácuo simultaneamente à injeção da resina. A resina pode fluir livremente pelo comprimento do tubo a partir de uma extremidade preenchendo os vazios, enquanto na outra extremidade aplica-se vácuo de 10 psi (aproximadamente 0,7 atm) para extração do ar e compactação das fibras.

Tabela VII - Fibra de carbono Hexcel AS 4 - 6K, e fibra de vidro tipo E- Vetrotex Saint-Gobain E.

Propriedades	AS4 – 6K	Vidro E
Módulo de elasticidade (GPa)	228	72
Limite de resistência à tração (MPa)	4278	2800
Alongamento até à ruptura (%)	1,5	2,3
Diâmetro do filamento (μm)	7,1	17,0
Massa específica (g/cm^3)	1,77	2,6

Tabela VIII - Resinas epóxi – Huntsman Araldite.

Propriedades	GY260/HY907/DY062	LY 1564/ XB 3485
Processos	bobinagem	RTM
Módulo de elasticidade (GPa)	3,3	3,3
Limite de resistência à tração (MPa)	85	78
Alongamento até à ruptura (%)	4,8	6,0
Massa específica (g/cm^3)	1,22	1,14

Tabela IX - *Braids* em fibra de carbono Siltex AS 4 - 6K, e fibra de vidro tipo E- SILTEX Flecht- und Isoliertechnologie Holzmüller GmbH & Co.KG.

Propriedades	Vidro035.14430303682G	Carbono035.14440421C
Módulo de elasticidade (GPa)	73	230
Limite de resistência à tração (MPa)	2400	3530
Alongamento até à ruptura (%)	4,5	1,5
Diâmetro da luva a 45°(mm)	35	35
Massa específica material (g/cm^3)	2,6	1,73
Peso (Kg/100 m)	6,77	1,96
Espessura da parede tramada (mm)	0,50	0,30

A resina do sistema VARTM foi preparada com as seguintes frações de mistura, com porcentagem de massa, na proporção de 100 partes de resina para 37 partes de endurecedor. A cura se deu a temperatura ambiente por 24 horas e o ciclo de pós cura é de 15 horas à 50 °C, segundo especificação técnica Huntsman LY 1564/ XB 3485. Para o sistema de bobinagem filamentar a proporção da resina em

massa foi de 100 partes de resina, 100 partes para o endurecedor e uma parte de acelerador, com uma cura em estufa realizada em 18 horas começando por um patamar de 80 °C, em seguida 100 °C e finalmente 120 °C, segundo gráfico da figura 13, onde a matriz polimérica atinge a máxima temperatura de transição vítrea possível para o sistema, segundo especificação técnica Huntsman para resina epóxi-éter diglicidílico de bisfenol, endurecedor metiltetrahidroftálico e acelerador benzildimetilamina.

Figura 13. Gráfico do ciclo de cura da matriz.

4.3 Processamento

4.3.1 Moldagem manual

Um protótipo modelado por laminação manual foi executado para verificar o posicionamento das camadas, testar o uso dos pré-formados de *braid*, verificar a espessura das camadas após modelagem e se a modelagem se aproximava do comportamento real dos compósitos híbridos antes de realizar os processamentos que exigem a confecção de moldes e programação numérica para a execução por bobinagem.

Utilizou-se um mandril de alumínio como molde interno para a laminação da camada de vidro. Após a aplicação de desmoldante, aplicou-se uma camada da resina LY 1564 / XB 3485 e por cima desta utilizou-se um *braid* de fibra de vidro, como se pode observar na figura 14a e 14b. Utilizando-se um *braid* de carbono,

envolveu-se a o *braid* depositada sobre o mandril de alumínio. Uma nova camada de resina foi aplicada sobre o braid e em seguida o mesmo foi esticado de forma que se fechasse sobre a fita de vidro, comprimindo-a. Após oito camadas de fibra de vidro e três camadas de carbono, enrolou-se sobre o conjunto uma fita de celofane de 0,10 mm, aguardou-se a cura e colocou-se na estufa para pós-cura. Durante o ciclo de pós-cura da resina, que é de 15 horas à 50 °C, o celofane se contrai e o molde interno de alumínio se dilata comprimindo assim o compósito e compactando as camadas.

a

B

Figura 14. a) protótipo fabricado por laminação manual com o uso do *braid*. b) detalhe da seção transversal do tubo que apesar da aparente compactação das camadas apresenta uma baixa fração volumétrica e presença significativa de vazios.

4.3.2 Bobinagem filamentar

O equipamento de bobinagem filamentar possui um comando numérico para controle dos eixos que guiam o bobinagem dos fios. Os fios são bobinados sobre um mandril horizontal de alumínio passando, inicialmente, por um sistema de impregnação de resina. Os fios são depositados sobre o mandril com o auxílio de um cabeçote que aplica as fibras segundo os eixos desejados em relação ao eixo axial do mandril, conforme figura 15 (Carvalho, 2006). Neste trabalho utilizaram-se dois tubos de diferentes configurações quanto a orientação da fibra: um tubo com configuração de ângulos $+15^\circ$ e -15° e outro tubo com configuração de ângulos $+45^\circ$ e -45° .

Figura 15. Aplicador de fibra com comandado por programação numérica (Carvalho, 2006).

A máquina foi programada para realizar uma bobinagem helicoidal através da sincronização dos eixos de movimento utilizado-se de um algoritmo específico para cada ângulo. As camadas helicoidais foram depositadas sobrepostas da seguinte forma: as seis primeiras camadas de fibra de vidro e as três últimas, externas, de fibra de carbono. As camadas de fibra de vidro possuem espessura média de 0,30 mm e as camadas de fibra de carbono possuem espessura média de 0,15 mm.

O mandril utilizado na bobinagem foi fabricado em alumínio com comprimento de 700 mm, diâmetro em uma das pontas de 30 mm e na outra ponta 24 mm, sendo a inclinação final necessária para sua extração do material pós bobinagem, conforme pode-se observar na figura 16. Para acabamento superficial, o mandril foi lixado utilizando-se lixa 600 e 800 para a retirada dos riscos e polido com massa de polir C562-1142.MG4 ICI e sobre ele aplicado um desmoldante QZ11 Huntsman.

Figura 16. Mandril de alumínio para bobinagem filamental, com detalhe do pino para posicionamento dos fios nos ângulos de bobinagem.

A matriz polimérica foi preparada utilizando-se um sistema tricomponente, conforme tabela VIII, homogeneizada e colocada na cuba do sistema de impregnação, que foi fixado sobre o carro longitudinal da máquina de bobinagem. O controle de temperatura do sistema de impregnação manteve a viscosidade da matriz dentro de limites determinados, permitindo uma impregnação efetiva dos filamentos.

Ao final da bobinagem o molde foi retirado do equipamento e colocado sobre mancais rotativos em uma estufa de cura, conforme figura 17 (Carvalho, 2006). O mandril foi acoplado a um redutor que o manteve em rotação para evitar o escorrimento da resina durante o processo de cura.

Figura 17. Estufa de cura com mancais rotativos (Carvalho, 2006).

4.3.3 Moldagem por transferência de resina assistida à vácuo - VARTM

O processo de transferência de resina auxiliado à vácuo foi realizado na AACD na oficina ortopédica com um equipamento específico para este fim. Utilizou-se uma bomba de vácuo da marca Bock com capacidade de 0,7 atm e um invólucro de PVA (poli-acetato de vinila) para a confecção do saco de vácuo. Na modelagem utilizou-se um molde cilíndrico com 24 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento em alumínio polido, com ângulo de saída de 0,5 mm de diferença entre o raio inicial e final do molde. Esta conicidade do molde, feito para retirada do tubo, produz uma pequena diferença no seu diâmetro entre uma ponta e outra. Este fato não evidenciou uma diferença numérica significativa das tensões no tubo durante a modelagem numérica.

As camadas de carbono e vidro foram aplicadas com *braids* de diâmetro 35 mm, com espessura da trama de 0,15 mm para a fibra de carbono e 0,30 mm para a fibra de vidro e para cada camada de *braid* tem-se + θ /- θ de fios tramados. Nesta preparação, para ambas as fibras, utilizou-se um ângulo inicial do tecido de 45° para o fio em relação ao eixo longitudinal do tubo. Este ângulo muda à medida que o *braid* é ajustado ao diâmetro do tubo. Medidas empíricas mostraram que o ângulo do *braid* em relação ao eixo longitudinal do tubo varia de 45° para o diâmetro de 35 mm,

diâmetro nominal de fabricação, até 30° para um diâmetro de 25 mm, que é o diâmetro do molde sobre o qual o *braid* é depositado. Esta montagem foi deixada desta forma intencionalmente pois, para manter-se o mesmo ângulo do *braid* nas várias camadas, teria-se que ter tramas com ângulos diferentes de forma à compensar estas variações, isto elevaria significativamente o custo de montagem. Sabe-se, porém, pelas modelagens numéricas que ângulos menores melhoram as propriedades do componentes pois alinham mais a fibra no sentido dos esforços. Na figura 18, pode-se observar o processamento do *braids* comerciais de vidro e carbono por VARTM. Na figura 19, é mostrado o resultado do processo de produção de um tubo em material compósito.

Figura 18. Fabricação do tubo por VARTM. Molde e *braid* colocados na posição vertical, envolvidos com filme de PVA ligados a uma bomba de vácuo.

Figura 19. Compósito feito a partir de *braid*, com indicação do ângulo da trama de 45° na camada externa, pois nas camadas internas estes ângulos diminuem pelo estiramento da luva tramada, com detalhe do acabamento superficial (Siltex, 2006).

4.4 Ensaios mecânicos

Nas normas de ensaio ASTM D3410 para compressão e D 790 para flexão há uma especificação das dimensões dos corpos de prova. Na norma ISO 10328-3-1996 a determinação é que seja ensaiado o componente no seu tamanho original. Este trabalho tem como objetivo selecionar o material que seja mais adequado ao componente e que ofereça a melhor relação custo benefício. Utilizou-se para os ensaios o tamanho médio do componente para uso em próteses infantis de 30 mm diâmetro externo e 145 mm de comprimento, como especificado anteriormente. Todos os elementos foram confeccionados com estas dimensões para efeito de comparação. Os diâmetros interno e externo variaram nos diferentes processos de fabricação em função da compactação das fibras e da forma cônica do molde interno para a fabricação do tubo. No entanto, manteve-se constante a espessura das camadas de fibra de carbono com 1 mm e fibra de vidro com 2 mm. Os ensaios foram realizados a uma temperatura de 26 ± 1 °C e 76 ± 12 % de umidade. Para os ensaios de compressão e flexão foi utilizada uma máquina universal de tração e compressão LDS 120.

4.4.1 Ensaio de compressão

Os ensaios de compressão foram realizados segundo as normas ASTM D 3410/D 3410M – 95 e ISO 10328-4-96. Um encaixe para evitar que o tubo

eskorregasse foi confeccionado, conforme figura 20a e 20b, uma vez que o ensaio de compressão foi realizado com um componente relativamente longo, conforme Costa (2001). Um conjunto foi montado para ensaio do tubo e todos os corpos de prova ensaiados nas mesmas condições.

a

b

Figura 20. a) Suporte para estabilização do tubo durante o ensaio de compressão.
b) Foto do tubo montado com suporte, pronto para o ensaio.

Os resultados dos ensaios estão apresentados de duas formas: o primeiro valor da tabela representa a média das cargas máximas suportadas pelos tubos durante o ensaio. Esta média é calculada com os valores medidos a partir do

momento em que não houve mais aumento no valor da leitura da carga na máquina de ensaios, mesmo que o equipamento continuasse deformando o tubo. O segundo valor representa a média das tensões, ou seja, o valor médio da razão da carga máxima pela área média da secção transversal do tubo. Para os cálculos, foram utilizadas as áreas médias dos tubos pois que existem pequenas variações nos diâmetros dos mesmos em função do seu formato cônico. Um terceiro valor está presente apenas na tabela de resultados do ensaio de compressão, e representa o coeficiente de segurança, que é a razão entre a carga máxima e o valor do limite mínimo estabelecido na norma ISO 10328-3-1996 de 5000 N.

4.4.2 Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão à fratura foram realizados segundo a norma ASTM D 790 – 99, levando-se em consideração a norma ISO 10328-3-1996 para o comprimento do componente. Os ensaios de compressão realizados nos protótipos e nos materiais disponíveis no mercado permitiram avaliar as principais solicitações da prótese. Um conjunto foi montado, conforme descrição esquemática da figura 20, para ensaio dos corpos de prova.

Figura 20. Desenho esquemático do ensaio de flexão para avaliar a prótese em condições crítica de uso.

4.5 Caracterização microestrutural

A caracterização microestrutural foi realizada em amostras embutidas a frio, seguida de lixamento e polimento com pasta de diamante de 6 até 3 microns e observadas por microscopia óptica com aumento de 50 até 1000 vezes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os estudos realizados para a avaliação das propriedades do componente e do material indicam que o custo do componente pode ser otimizado atendendo-se a norma para próteses ISO 10328-3, 1996 e as solicitações que os materiais comerciais existentes apresentam.

Para a realização da avaliação da viabilidade do tubo em estudo, procedeu-se a análise em quatro etapas:

1- uma análise exploratória dos materiais comerciais usados na fabricação de próteses. Para obtenção dos valores de referência ensaiou-se o tubos de Alumínio AA 6082 T6 e de compósito fibra de carbono-epoxi.

2- uma modelagem matemática para avaliar como se comporta o material

3- uma análise de viabilidade do custo de produção do material compósito epóxi fibra de carbono-vidro fabricado por VARTM e bobinagem filamentar.

4- a produção e ensaio dos materiais e processos propostos

A seguir apresenta-se os resultados e discussões das etapas descritas acima.

5.1 Modelagem

Uma análise inicial exploratória com modelos de elementos finitos foi realizada com o objetivo de avaliar alguns resultados e definir uma linha de trabalho racional. Este procedimento permitiu inúmeras simulações sem que para isto fosse necessária a fabricação de um protótipo real. Neste trabalho, as designações de mix, seguida de uma seqüência numérica, se referem aos cálculos das simulações realizados para diferentes especificações do material compósito.

A espessura da camada utilizada para a modelagem foi de 0,15 mm para material compósito epóxi-fibra de carbono e 0,30 mm para compósito epóxi fibra de vidro e uma fração volumétrica utilizada foi de 60% de fibra, para as modelagens de mix 2 a 11. Valores de espessura 0,15 mm para compósito epóxi-fibra de carbono e 0,25 mm para compósito epóxi-fibra de vidro e fração volumétrica de 65% de fibra, foram adotadas para as modelagens de mix 12 a 14, após da matéria-prima para fabricação dos protótipos. Nos mix de 12 a 14 o conjunto totalizou 14 camadas, sendo 6 camadas de fibra de carbono externas, 8 camadas de fibra de vidro internas totalizando-se 3,0 mm de parede, uma espessura similar aos tubos de compósito disponíveis comercialmente. Ensaio exploratório realizado com material comercial,

para avaliar as suas propriedades, permitiu-se observar que na modelagem obteve-se simulações dos tubos de compósito epóxi carbono-vidro com resistência superior aos tubos comerciais de compósito fibra de carbono, mas com espessura 50 % superior e com propriedades mecânicas similares aos tubos de alumínio liga AA6082 T6 comumente usado. A modelagem por elementos finitos mostrou-se extremamente útil, se não obrigatória para testar várias posições, espessuras e natureza das camadas de compósito.

Fez-se então, treze simulações iniciais:

- Nas primeiras modelagens, vide tabela IX, avaliou-se a posição relativa das camadas de vidro e carbono e percebeu-se que a fibra de carbono, como camada externa, confere ao tubo maior resistência à compressão e à flambagem, como discutido na revisão bibliográfica (mix02 e mix03).

- Estudou-se em seguida como o ângulo de colocação da fibra em relação ao eixo longitudinal do tubo afetaria a resistência do material compósito mesmo para uma compressão axial (mix03, mix04 e mix05) indicados nas tabelas X e XI e nas figuras 21 e 22.

- Avaliou-se como seria o comportamento do tubo nas condições I e II de carga, segundo a norma ISO 10328-3-1996 (mix06 à mix11).

- Nos últimos três itens ajustou-se às condições de modelagem às de processo, os mix12 e mix13 representam a bobinagem filamentar e o mix14 o VARTM, mas tomando-se o cuidado de manter a espessura final do compósito de fibra de vidro com 2 mm e o de fibra de carbono com 1 mm nos três mix, para efeito de comparação.

Na Tabela IX pode-se visualizar um quadro da posição relativa das camadas de diferentes materiais nas três condições de esforço em que foram avaliadas na modelagem numérica. Os carregamentos aplicados foram axiais, a condição I e condição II segundo a norma ISO 10328-3-1996 , como pode ser visto nas figuras 10 e 11, onde vê-se que a condição I representa o início do passo e a condição II o final do passo. Nestas condições a carga aplicada ao tubo não é a axial, mas uma componente desta. O ângulo se refere à posição da fibra em relação ao eixo longitudinal do tubo $+ e - \theta$. A letra “c” indica uma camada com fibra de carbono e “gl” as camadas com fibra de vidro “E” e o número subscrito antes das letras representa a quantidade de pares de camadas.

Os resultados apresentados na tabela X mostram a deformação calculada

para o componente nas condições de aplicação da carga axial, condição I e condição II em função dos diferentes ângulos e da orientação da fibra no compósito. Na figura 21, estes mesmos dados estão dispostos graficamente e pode-se observar que os posicionamentos das fibras mais próximas ao eixo longitudinal do tubo indicam uma deformação menor em todas as condições. Na figura 22 mostra-se a influência do ângulo θ no coeficiente de segurança do tubo, onde uma alteração de 30° na direção da fibra se traduz em quase duas unidades no coeficiente de segurança.

Tabela IX - Modelagens realizadas com a orientação das fibras e direção dos esforços. Os sinais $\pm$ Com indicação do ângulo e de gl para fibra de vidro e c para fibra de carbono.

Modelagem	Direção dos esforços	Arranjo
mix02	axial	$\pm 45_{3c}/\pm 45_{3gl}/+45_{gl}$
mix03	axial	$\pm 45_{3gl}/+45_{gl}/\pm 45_{3c}$
mix04	axial	$\pm 15_{3gl}/+15_{gl}/\pm 15_{3c}$
mix04.1	axial	$\pm 15_{4gl}/+15_{gl}/\pm 15_{3c}$
mix05	axial	$\pm 5_{3gl}/+5_{gl}/\pm 5_{3c}$
mix06	cond. I	$\pm 5_{3gl}/+5_{gl}/\pm 5_{3c}$
mix07	cond. II	$\pm 5_{3gl}/+5_{gl}/\pm 5_{3c}$
mix08	cond. II	$\pm 15_{3gl}/+15_{gl}/\pm 15_{3c}$
mix09	cond. II	$\pm 45_{3gl}/+45_{gl}/\pm 45_{3c}$
mix10	cond. I	$\pm 45_{3gl}/+45_{gl}/\pm 45_{3c}$
mix11	cond. I	$\pm 15_{3gl}/+15_{gl}/\pm 15_{3c}$
mix12	axial	$\pm 15_{4gl}/\pm 15_{3c}$
mix13	axial	$\pm 45_{4gl}/\pm 45_{3c}$
mix14	axial	$+30_{gl}/-31_{gl}/+32_{gl}/-33_{gl}/+34_{gl}/-35_{gl}/+36_{gl}/-37_{gl}/+38_{gl}/-39_{gl}/+40_{gl}/-41_{gl}/+42_{gl}/-43_{gl}$

Tabela X – Deformação calculada para o tubo com carga de 5000 N.

<i>Deformação / θ</i>	<i>ÂNGULO 5°</i>	<i>ÂNGULO 15°</i>	<i>ÂNGULO 45°</i>
AXIAL	0,089	0,091	0,094
CONDIÇÃO I	6,75	6,82	7,06
CONDIÇÃO II	2,97	6,82	7,06

Figura 21. Deformação calculada em função do ângulo da fibra e das condições I e II da norma ISSO 10328-3-1996.

Observa-se na modelagem que o tubo projetado para este estudo tem menor deformação com ângulos menores e isto é mais significativo quando o carregamento não é axial. Isto favorece o componente, visto que a condição axial representa só parte do período de utilização. Por outro lado, a deformação está associada à absorção da energia do material. Como a deformação é maior para ângulos maiores, a condição (45°) de posicionamento das fibras se mostra mais favorável à absorção de energia que as demais. Outro fato importante com relação ao posicionamento das fibras é que ângulos muito baixos (por exemplo, 5°) são muito complexos e onerosos de serem processados e não se justificam pela melhoria de propriedades que oferecem.

A análise biomecânica preliminar e informações normativas indicam que o componente deve resistir a um esforço de compressão de 5000 N, nos ensaios realizados. Tubos de alumínio AA 6082 T6 usados atualmente na fabricação das

próteses são bem mais resistentes. Como poderá ser verificado mais à frente onde os ensaios estão mais detalhadamente discutidos junto as tabelas de resultados XII e XIII.

Figura 22. Como o ângulo da fibra afeta o coeficiente de segurança calculado para a carga normalizada.

Tabela XI – Cálculo do coeficiente de segurança em relação à carga normalizada.

θ / Resistência	Axial	Condição I	Condição II
Ângulo 15 °	15,567	15,563	15,568
Ângulo 45 °	13,827	13,917	13,847

Os gráficos da figura 23 mostram as deformações calculadas associadas aos diferentes tipos de configuração de compósitos sob uma força aplicada axialmente de 5000 N, considerando-se que os tubos tenham as mesmas dimensões. As denominações da figura 23 referem-se à forma de como as camadas estão dispostas nas paredes do tubo. O compósito epóxi-fibra de carbono vidro, possui camadas de carbono internamente e de vidro externamente já o compósito epóxi fibra de vidro carbono as camadas estão dispostas da forma inversa.

Nota-se, na figura 23, conforme o discutido anteriormente, que o posicionamento de materiais com maior módulo na periferia da seção transversal do componente melhoram a rigidez e diminuem a deformação do material sob tensão.

Isto reforçou a decisão de montar um sistema onde, à semelhança do osso humano, tem-se um material rígido por fora o compósito epóxi-fibra de carbono e uma parte interna mais dúctil o compósito epóxi fibra de vidro.

A figura 24 mostra a modelagem de elementos finitos para as condições de falha por flambagem nas situações de carga a) Axial, b) Condição I e c) Condição II e seus detalhes de deformação, bem como o número de vezes que resiste à carga de 5000 N, coeficiente de segurança, a que estaria sujeito o tubo modelado pelo mix 3, 10 e 9 respectivamente. Nota-se que a carga que provoca a flambagem é muito superior ao limite de resistência do material. As cargas, obtidas na modelagem são de 17 vezes a carga padrão, para as condições I e II e 68 vezes para a condição axial. Isto está muito além do limite de resistência dos materiais obtidos experimentalmente, entre 7 à 16 vezes a carga padrão, indicando que o material permanecerá no seu comportamento elástico, ou seja as deformações plásticas ocorrerão muito além do limite de segurança do material.

Na figura 23a, a imagem do item a representa uma compressão axial e no item b para a condição de prótese I e na figura 23c para a condição II. O limite de resistência à compressão de destas modelagens está próximo de 13 vezes o valor de 5000 N. Na modelagem mostrada na figura 25, tem-se a otimização dos arranjos de fibras onde o compósito atende à norma e também as solicitações dos materiais equivalentes comerciais.

Nas modelagens das figuras 26 e 27, aumentou-se o coeficiente de segurança, aumentando o número de camadas de fibra de vidro. A mudança do ângulo de orientação das fibras também melhora à resistência a compressão, mas diminui a rigidez do sistema permitindo maior absorção de energia na deformação.

Nas figuras 25 e 27, pode-se observar duas modelagens, a primeira mix04, figura 25, com sete camadas de vidro e três de carbono e a segunda, mix4.1, figura 27, os cálculos foram realizados com nove camadas de vidro e as mesmas três de carbono. Na primeira, com sete camadas, o coeficiente de segurança é aproximadamente treze vezes, e com nove camadas, é de aproximadamente quinze vezes. Isto indica que a principal sustentação do tubo é realizada pelo compósito de fibra de carbono e que cada camada de vidro, apesar de menos representativa que o carbono, esta associada uma unidade no coeficiente de segurança.

Figura 23. Deformações associadas aos diferentes tipos de configuração de camadas considerando a mesma espessura de parede: a) compósito epóxi-fibra de carbono - 0,0418 mm; b) compósito epóxi fibra de vidro - 0,1118 mm; c) compósito epóxi-fibra de carbono vidro 0,1184 mm; d) compósito epóxi fibra de vidro carbono 0,0940 mm.

Figura 24. Modelagem de elementos finitos para as condições de falhas por flambagem nas situações de carga.

Figura 25. Modelagem com 7 camadas de fibra de vidro 0,30mm e 6 camadas de compósito epóxi-fibra de carbono 0,15 mm e ângulo da fibra de 15° em relação ao eixo axial do tubo. a)Compressão axial - mix04 b) Condição I - mix11 c) Condição II - mix08

Figura 26. Modelagem com 7 camadas de fibra de vidro 0,30 mm e 6 camadas de compósito epóxi-fibra de carbono 0,15 mm e ângulo da fibra de 45° em relação ao eixo axial do tubo. a) Compressão axial – mix03 b) Condição I – mix10 c) Condição II – mix09.

Figura 27. Modelagem com 9 camadas de fibra de vidro 0,30mm e 3 camadas de compósito epóxi-fibra de carbono 0,15 mm e ângulo da fibra de 15° em relação ao eixo axial do tubo. a) Compressão axial – mix04.1 b) Condição I c) Condição II.

Na figura 28 apresentam-se as três últimas modelagens que correspondem aos mix 12, 13 e 14 que são as modelagens dos protótipos que foram construídos neste trabalho. Na figura 28 estão indicadas às deformações máximas e as cargas máximas calculadas e suportadas para os três tipos de protótipos projetados apenas para condição axial, já que as outras condições não apresentam diferenças representativas. Na figura 28a para o ângulo de 45° da fibra o coeficiente de segurança é de 17,4 e a deformação de 0,052 mm, na figura 28b para o ângulo de 15° da fibra o coeficiente de segurança é 18,6 e a deformação de 0,047 mm e na última modelagem para o *braid*, figura 28c, onde levou-se em conta que para cada camada mais interna há uma variação no ângulo (mix 14), o coeficiente de segurança é de 17,3 e a deformação de 0,052 mm, mostrando que, pelos valores calculados, o uso de pré-formados é tão eficiente quanto a fabricação por bobinagem filamentar.

Figura 28. Modelagem dos mix 12,13 e 14 com os quais foram construídos os protótipos. Na coluna da esquerda a deformação máxima calculada e na coluna da direita a tensão máxima suportada pelo tubo, pelo critério Von Mises e a região onde ela ocorreria. a) deform.: 0,052mm – tensão coef.seg. : 17,375 b) deform.: 0,047mm – tensão coef.seg. : 18,644 c) deform.: 0,052mm – tensão coef.seg. : 17,293

5.2 Material comercial

O objetivo desta parte do trabalho é avaliar os materiais comerciais normalmente utilizados na fabricação do componente da prótese, para poder comparar com o material proposto. Foram ensaiados tubos de alumínio 6082 T6 e de compósito fibra de carbono sob compressão axial e flexão. Os mesmos ensaios foram realizados nos protótipos para comparação. Foram realizados de dois a cinco ensaios para cada material e para cada condição de solicitação.

Foi utilizada uma máquina universal de ensaios, mostrada na figura 29a. Os corpos de prova de compressão foram alojados em flanges para melhor posicionamento e evitar o escorregamento dos elementos, figura 28b, durante os ensaios.

Nos ensaios dos materiais comerciais, obteve-se valores muito maiores que o esperado para os tubos ensaiados, o que difere do limite especificado em norma. Duas possibilidades apontam para esta discrepância observada: a primeira se deve ao fato de que o tubo ensaiado, estando encaixado em uma flange, tem comportamento diferente do que na montagem original da prótese, onde em uma das extremidades há uma rótula, com a possibilidade de flambagem maior que o limite de resistência do material. A segunda é que um coeficiente de segurança foi adotado para garantir a estabilidade do indivíduo, mesmo em situações extremas.

5.2.1 Ensaios mecânicos

Pode-se observar nas figuras 29c e 29d os componentes de alumínio e compósito epóxi-fibra de carbono sob compressão axial. Na figura 29c observa-se o alumínio AA 6082 T6 sob flambagem apresentado uma deformação plástica durante o ensaio. Na figura 29d o tubo de carbono sofre uma ruptura sem que se observe deformação semelhante ao alumínio.

Na tabela XII, são apresentados a média e desvio padrão dos valores de carga máxima suportada pelo tubo em Newton [N], da tensão média em MPa e o coeficiente de segurança, em função da carga padrão da norma (5000 N), para tubos de alumínio existentes no mercado.

Os tubos de alumínio AA 6082 T6 usados atualmente na fabricação das

próteses são bem mais resistentes que a especificação da norma. Estes podem resistir 13 vezes a força proposta pela norma e no caso dos tubos de compósito fibra de carbono de 7 a 10 vezes esta mesma força (tabela XIII). Esta diferença de resistência, entre os tubos de alumínio e os tubos de compósito fibra de carbono, provavelmente se deve ao fato de o alumínio flambar antes do material atingir seu limite de resistência. Esta deformação por flambagem do alumínio ocorre na fase plástica de deformação do material, uma vez que este não retorna ao seu estado inicial. Esta absorção no caso do alumínio está associada a uma deformação plástica, mas no CEFC esta deformação é praticamente elástica.

Nas tabelas XII e XIII relacionou-se os dados dos ensaios comparativos de alumínio AA 6082 T6 e carbono epóxi-fibra de carbono (CEFC), materiais usados em próteses comerciais. Nestas tabelas se pode notar que a carga máxima suportada pelo tubo de alumínio é quase o dobro da carga suportada pelo tubo de CEFC. Notou-se nos ensaios, que a flambagem do material ocorre com aproximadamente 80% do limite de resistência do componente. O CEFC apresenta uma deformação média de 0,6%, enquanto que o alumínio de 6,7%. Esta deformação do alumínio é significativamente maior que do material compósito, indicando uma absorção de energia maior. A absorção de energia é um efeito desejado neste componente da prótese, pois diminui os impactos sobre os demais elementos do conjunto. Como o carbono é mais rígido ele não sofre flambagem, mas resiste melhor aos esforços com menor deformação, e grande parte desta força elástica.

Uma segunda seqüência de ensaios foi realizada para uma avaliação mais coerente dos componentes. Na condição axial de carregamento o ensaio que representa melhor o fenômeno é o de compressão, mas nas condições de norma I e II aparecem também os esforços de flexão.

Os corpos de prova dos materiais comerciais, devidamente padronizados, foram solicitados sob flexão como descrito no item 4.4.2 e como podem ser vistos nas figuras 30a e 30b.

a

b

c

d

Figura 29. a) Máquina universal de tração e compressão utilizada para realização dos ensaios b) Encaixe usinado para evitar escorregamento do corpo de prova no ensaio de compressão. c) Ocorrência de flambagem em ensaio de compressão dos elementos comerciais em alumínio AA 6082 T6. d) Ocorrência de falha em ensaio de compressão dos elementos comerciais em materiais compósito com o uso de tecido 0/90° com uso de *braid*.

Tabela XII - Tabela de avaliação tubos de alumínio AA 6082 T6, sob compressão, utilizados na fabricação de próteses.

Alumínio AA 6082 T6	Carga máxima N	Tensão média MPa	Relação de resistência
Media	78237	435	16,0
Desvio Padrão	5661	32	1,0

Tabela XIII – Tabela de avaliação tubos de compósito epóxi-fibra de carbono - CEFC, sob compressão, utilizado na fabricação de próteses.

CEFC	Carga máxima N	Tensão média MPa	Relação de resistência
Media	39037	157	8,0
Desvio Padrão	7753	25	1,5

a

b

Figura 30. a) Tubo de alumínio AA 6082 T6, posicionado sob o cutelo, antes do ensaio. b) O mesmo tubo de alumínio após ensaio de flexão evidenciando uma deformação plástica acentuada.

As Tabelas XIV e XV mostram os resultados do alumínio e do CEFC para os ensaios de flexão indicando uma menor resistência dos tubos de CEFC à flexão quando comparados ao alumínio AA 6082 T6. A ruptura ocorre principalmente por cisalhamento das fibras e colapso da parede do tubo na região comprimida pelo cutelo da máquina de ensaios, como pode ser observado nas figuras 31a e b. Na figura 31b as fibras rompidas podem ser vistas na parte superior do perfil onde o cutelo pressionou. Nota-se também que o tubo está na sua forma horizontal, indicando que a maior parte da deformação foi elástica e não plástica, pois o mesmo retornou a sua posição inicial de antes do ensaio, como mostra a sequência na figura 35 para o tubo de material compósito híbrido.

Tabela XIV – Tabela de avaliação tubos de alumínio AA 6082 T6, sob flexão, utilizado na fabricação de próteses.

Alumínio AA 6082 T6	Carga máxima N	Tensão média MPa
Media	15027	82
Desvio Padrão	453	2

Tabela XV – Tabela de avaliação tubos de compósito epóxi-fibra de carbono - CEFC, sob flexão, utilizado na fabricação de próteses.

CEFC	Carga máxima N	Tensão média MPa
Media	6468	26
Desvio Padrão	554	2

Figura 31. a) Tubo de CEFC após o ensaio de flexão visualizando a parte comprimida pelo ensaio de flexão. b) Tubo de CEFC após o ensaio de flexão vista de perfil com a região comprimida visível na parte superior do tubo.

5.2.2 Caracterização microestrutural dos materiais comerciais

As micrografias das figuras 32 do tubo comercial de fibra de carbono com resina epóxi, indicam um compósito com elevada fração volumétrica apesar de apresentar uma grande quantidade de microvazios com distribuição regular e regiões de bolsas de resina, figura 32b. Pode-se perceber que o material compósito é produzido com várias camadas com pelo menos duas direções diferentes das fibras, porém sem o cuidado necessário para a redução da porosidade. Como os valores de resistência à compressão foram mais baixos que do alumínio AA 6082

T6, isto pode indicar uma fibra de baixo módulo ou orientação da fibra incompatível com os esforços no compósito, já que os tubos de alumínio e de material compósito possuem dimensões semelhantes, ou a concentração e a morfologia dos vazios está comprometendo suas propriedades mecânicas. Nas figuras 32c pode-se observar um material compósito também com fibra de carbono produzido por bobinagem com o ângulo das fibras próximo à 90° . Sendo os esforços, aos quais o tubo está submetido axiais, este tipo de material não apresenta bom desempenho nestas condições. Uma quantidade menor de defeitos também foi observada neste material, figura 32d.

a

b

c

d

Figura 32. Micrografia do compósito fibra de carbono epóxi comercial com a) Aumento 100x b) Aumento de 200x c) Tubo comercial que apresentava significativa quantidade de bolhas. d) Indicação da espessura da camada 153 μm .

5.3 Protótipos

5.3.1 Ensaios mecânicos

A construção de protótipos em materiais compósitos epóxi-fibra de carbono-vidro CEFCV, pelos dois processos discutidos neste trabalho, permitiu ensaiar e avaliar com maior acuidade os custos e validar as análises feitas até então.

A bobinagem filamentar produz materiais compósitos com excelentes propriedades e altas frações volumétricas de fibras de até 64% (Marinucci, 2001), porém com um custo mais elevado. Este processo permitiu fabricar um componente com propriedades próximas aos valores modelados numericamente. Para as avaliações de bobinagem foram fabricados apenas dois protótipos para cada ensaio, em função da disponibilidade de recursos produtivos.

Dois tipos de protótipos de bobinagem foram produzidos um com ângulo de 15° em relação ao eixo da peça denominado BOB15 e outro com um ângulo de 45° denominado BOB45.

O uso de pré-formados e do processo de transferência de resina auxiliado a vácuo, VARTM, permitiu pela sua simplicidade, um custo bem mais acessível, além de poder ser realizado internamente na AACD. Um protótipo feito com o VARTM na AACD permitiu verificar a viabilidade de produção e seu custo. Para o processo de VARTM, com o uso de pré-formados tipo *braid*, foram feitos cinco protótipos para cada ensaio, e denominados RTM.

Nas tabelas XVI e XVII estão apresentados respectivamente os dados dos resultados do ensaio de compressão e flexão dos protótipos fabricados por bobinagem BOB15 e BOB45. Nas tabelas XVIII e XIX os resultados do processo VARTM para os mesmos ensaios. Na última coluna das tabelas dos ensaios de compressão aparece o coeficiente de segurança, que representa o número de vezes que a carga máxima excede a carga limite de 5000 N especificada na norma. Este coeficiente não existe para o ensaio de flexão.

Na tabela XVI e na tabela XVIII observa-se que a tensão limite de resistência à compressão axial é maior para os protótipos bobinados do que os produzidos por VARTM. Esta diferença é de 60 a 180% para BOB45 e BOB15, respectivamente. Os protótipos fabricados por bobinagem apresentam um limite 7% maior de resistência à flexão. Isto se deve em primeiro lugar, pela precisão da bobinagem para o posicionamento das fibras durante o processo produtivo, a tensão aplicada à fibra e da maior fração volumétrica obtida neste processo.

Tabela XVI – Tabela comparativa da solicitação de compressão em protótipos fabricados por bobinagem filamentar para ângulos de 15° e 45° de posicionamento da fibra nos protótipos.

CEFCV	Carga máxima N	Tensão média MPa	Relação de resistência
BOB15 Media	76277	305	15,0
Desvio Padrão	1052	41	2,0
BOB45 Media	36685	147	7,3
Desvio Padrão	2630	11	0,5

Tabela XVII - Tabela comparativa da solicitação de flexão em protótipos fabricados por bobinagem filamentar para ângulos de 15° e 45° de posicionamento da fibra nos protótipos.

CEFCV	Carga máxima N	Tensão média MPa
BOB15 Media	7889	32
Desvio Padrão	208	1
BOB45 Media	6762	27
Desvio Padrão	139	1

Tabela XVIII - Tabela comparativa da solicitação de compressão em protótipos fabricados por VARTM e *braid*.

CEFCV	Carga máxima N	Tensão média MPa	Relação de resistência
RTM Media	26787	99	5,5
Desvio Padrão	1575	8	0,3

Tabela XIX - Tabela comparativa da solicitação de flexão em protótipos fabricados por VARTM e *braid*.

CEFCV	Carga máxima N	Tensão média MPa
RTM Media	5537	18
Desvio Padrão	404	1

Nas figuras 33 e 34 os nota-se os dois protótipos BOB45 e BOB15 após o ensaio de compressão onde se vê claramente as fraturas acompanhando o ângulo de laminação das fibras. A fratura no BOB45 atravessa a peça de um lado ao outro, acompanhando o ângulo de 45°, percorrendo aproximadamente 45 mm de material e no BOB15 para atravessar a peça sob um ângulo de 15° a fratura percorre aproximadamente 110 mm. Este mecanismo por si só já justifica uma resistência melhor nos compósitos solicitados por compressão, onde o ângulo é mais baixo. Na figura 35, na seqüência de fotos, mostra-se a retirada do carregamento que havia

sido aplicada sobre o tubo e o retorno do mesmo à posição, praticamente inicial. Este comportamento se deve principalmente ao fato de que a parede de cima do tubo foi comprimida e a de baixo tracionada. A condição de compressão do tubo perpendicular à direção da fibra ocasionou o cisalhamento das mesmas. Na face inferior onde as fibras foram tracionadas, que é a melhor situação de carga para as fibras, permitiu que seu comportamento tivesse um desempenho superior. Nas figuras 33 e 34 observa-se o acabamento superficial indicado a sobreposição das fibras e nas figuras 36 a, b e c os detalhes dos três protótipos fabricados pelos diferentes processos, onde percebe-se os diferentes padrões de produção.

Figura 33. Cilindro produzido por bobinagem BOB45 com fratura na região indicada.

Figura 34. Cilindro produzido por bobinagem BOB15 com fratura na região indicada.

Figura 35. Ensaio de flexão onde o componente BOB15 retorna à posição horizontal original após a retirada da carga, evidenciando uma recuperação elástica do tubo.

Figura 36. Seção transversal dos protótipos com a possibilidade de visualizar detalhe de fabricação e posicionamento das camadas e das fibras.

a) VARTM b) BOB15 c) BOB45.

5.3.2 Caracterização microestrutural para os protótipos

Nas figuras 37 e 38 mostra-se duas micrografias, com ampliação de 50 vezes da camada de fibra de vidro, referente aos dois processos utilizados na confecção dos protótipos. Na figura 37, material bobinado, pode-se perceber que a fração volumétrica das fibras é maior e sua distribuição mais regular que da figura 38, VARTM. A fração de vazios maior em função das bolhas e as bolsas de resina também são perceptíveis na micrografia 38. Isto está relacionado diretamente com a carga que o tubo suporta e com falhas no processo produtivo. Sabe-se por Maier, (2003) que a morfologia e a distribuição de vazios influenciam o comportamento

mecânico dos materiais compósitos, e isto está relacionado ao processo e suas variáveis. O processo de VARTM, realizado na AACD, é um processo bem simples, eficiente e é utilizado pela oficina há muito tempo na fabricação de próteses, porém não conseguiu produzir peças com a mesma qualidade da bobinagem.

Figura 37. Camada de fibra de vidro no processo de bobinagem.

As fibras utilizadas, para a fabricação da camada de compósito epóxi carbono, têm 17 μm de diâmetro e as camadas têm aproximadamente a mesma espessura (2350 μm fig. 37 e 2230 μm 38), porém a distribuição da fibra e a fração volumétrica diferem em função do processamento. O pré-formado tipo *braid* possui mais camadas formando uma trama que, durante o processamento, dificulta a penetração da resina entre as fibras e aprisiona ar entre as tramas favorecendo a formação de vazios como mostrado na figura 38.

Figura 38. Micrografia mostrando camada de fibra de vidro *braid* VARTM e a presença de vazios.

Nas figuras 37 e 38 é visível a diferença de compactação obtida com o processo de bobinagem, tanto na região de fibra de vidro, onde esta tem um diâmetro maior, quanto na região de fibra de carbono, que tem uma espessura de quase à metade da camada de fibra de vidro. Como este processo permite aplicar uma tensão aos filamentos e molhá-los com a resina antes de depositar a fibra no molde, reduz-se, como observado na figura 38 a quantidade de vazios e bolsas de resinas. Estas regiões mais ricas em resina que fibras são os pontos fracos dos materiais compósitos. Na figura 39 observa-se uma fratura na região de fibra de carbono do compósito que se propaga pela região de resina, a mais frágil. Na figura 40 percebe-se uma trinca iniciando na camada externa e propagando-se para as camadas mais internas do compósito. Uma indicação de que na camada de compósito de fibra de carbono é onde principiam as fraturas, pois é nesta camada em que se concentram as principais tensões do material híbrido, na periferia da seção transversal.

Figura 39. BOB15, Camada de carbono com detalhe de uma fratura entre as camadas originada na região de resina.

. Figura 40. BOB15, com detalhe da trinca originando na camada externa de carbono, provavelmente em alguma bolsa de resina ou bolha de ar.

As camadas de fibra de carbono do material compósito produzido por bobinagem filamentar têm de 170 a 200 μm , e as camadas de fibra de vidro do material compósito têm de 250 a 300 μm . No VARTM estas camadas de fibra de carbono do compósito têm de 150 a 170 μm , e as camadas de fibra de vidro do material compósito têm de 200 à 250 μm .

No detalhe da figura 41 pode-se observar, com uma ampliação de 500 vezes, a região das fibras de carbono, mais claras e as fibras de vidro, mais escuras. Nota-se que há um volume maior de resina na região de fibra de vidro. Sendo o diâmetro da fibra de vidro maior, na acomodação das fibras durante a laminação, o volume de vazios é maior, permitindo uma retenção maior de resina. O fato de haver regiões de resina maiores no compósito epóxi fibra de vidro propicia uma propagação maior das trincas por esta região.

Na figura 42, de um protótipo BOB15, observa-se uma trinca se propagando pelo compósito na região A, na região B ela altera sua direção e na região C ela provavelmente encontra maior resistência de uma outra camada de material compósito em orientação diferente e muda para um plano diferente do visualizado nesta foto, mas se propaga preferencialmente pela região mais rica em resina. Na figura 42 é possível observar em detalhe a trinca A inicialmente intralaminar passa a interlaminar e quando se aproxima de uma região de interface B mais rica em resina propagando se em um novo plano.

Além das bolhas e bolsas de resina, outro problema que observou-se, foi a presença de regiões onde não houve molhamento da fibra pela resina. Na figura 41, com ampliação de 200 vezes, pode-se observar uma região onde a fibra não foi molhada pela resina. Este fato pode ser observado com mais frequência no processo de VARTM, mas também nota-se sua ocorrência na bobinagem como na figura 42 na região escurecida indicada pela seta.

Figura 41. Detalhe das fases do compósito epóxi-fibra de carbono, à direita mais claro, do compósito epóxi da fibra de vidro à esquerda.

Figura 42. Propagação da trinca no compósito atravessando a camada de fibra e se desviando região mais rica em resina, onde a propagação é mais favorável.

Figura 43 Região onde a fibra não foi molhada pela resina no processo VARTM, ampliação 200 vezes.

Figura 44. Região, mais escura, onde a fibra não foi molhada pela resina no processo bobinagem filamentar.

5.4 Análise de custo

O custo para a fabricação de material compósito manufaturado com VARTM e pré-formado mostrou-se até este instante, com base nos dados obtidos com a fabricação do protótipo em compósito, uma opção mais atraente que a bobinagem.

Optou pelo uso de fibra de carbono, apesar de ser um insumo muito mais caro que a fibra de vidro. A fabricação do compósito utilizando a fibra de carbono como uma casca, à semelhança do osso humano, foi crucial para a otimização do custo da estrutura. Permitindo rigidez e um limite de resistência à compressão elevado. A fibra de vidro permitiu que uma camada flexível interna ao tubo garantisse um comportamento mais dútil à estrutura.

Um tubo será mais viável economicamente quanto menos material ele utilizar na sua fabricação. O objetivo deste trabalho foi minimizar o custo tendo como restrição o comprimento e a carga especificada “F”, para isto utilizou-se, segundo Ashby 1999, as seguintes relações: o custo “C”, a área da seção transversal “A” da coluna, o seu comprimento “l”, o custo do material por kg “Cm” e sua massa específica “ ρ ”. Deste modo, tem-se:

$$C = A l C_m \rho \quad (5.4.1)$$

Para que se faça uma análise mais específica do material a ser utilizado deve-se levar em conta todas as variáveis importantes ao componente e sua utilização. Algumas delas têm que ser minimizadas, outras maximizadas. Para isto, foi proposto a montagem de um índice de mérito I_m de acordo com Ashby 1999. Este índice permite realizar uma comparação de diferentes materiais em relação às mesmas condições e variáveis sob a condição de carga axial para estruturas de seção circular.

No I_m proposto considera-se uma flambagem elástica decorrente do carregamento, para que não exceda a carga crítica que uma coluna pode suportar. Este índice I_m , segundo Ashby, (1999), está relacionado ao módulo de rigidez do material E (GPa) , pois o conjunto é dependente desta grandeza para melhorar seu desempenho sob compressão, da massa específica ρ (kg/m³), pois qualquer redução de massa conseguida é importante para o desempenho da prótese, e finalmente o custo C (R\$/kg), segundo anexo 1, onde a matéria-prima e processo de

fabricação com certeza norteiam as escolhas. A fórmula do índice de mérito é expressa como:

$$I_m = E^{1/2} / (\rho.C) \quad (5.4.2)$$

A partir do índice I_m montou-se a tabela XIV com todos os materiais disponíveis para fabricação do tubo da prótese.

O índice é baixo para o material compósito epóxi-fibra de carbono, com 60% de fração volumétrica de fibra (CRFC 60%fc), em função do seu alto custo de matéria-prima e processo. Para o material compósito epóxi-fibra de carbono-vidro bobinado (CEFVC BOB), o processo é o maior fator de influência no índice e no material compósito epóxi fibra de vidro, com 60% de fração volumétrica de fibra (CEFV 60%fv), sua alta massa específica e baixas propriedades contribuem para reduzir o valor do índice de comparação. O alumínio (AA 6082 T6) tem seu índice superior aos citados anteriormente por ser um material com propriedades excepcionais, mas perde para o material compósito epóxi-fibra de carbono-vidro produzido por VARTM (CEFCV VARTM) em dois aspectos. O primeiro é sua densidade e o segundo seu custo, que por ser um material de uso estrutural tem seu preço diferenciado no mercado, tratamentos térmicos como T6 agregam custo ao alumínio. É conveniente ressaltar que, na coluna indicada como massa, o dimensionamento foi feito na mesma condição de carregamento para efeito de comparação, pode-se perceber que os compósitos híbridos se apresentam como uma solução intermediária entre a fibra de vidro, mais denso, e o carbono, menos denso.

Tabela XIV – Tabela comparativa entre custos apurados nos processos de fabricação.

MATERIAL	MÓDULO E (GPa)	MASSA ESPECÍFICA (g/cm³)	MASSA (Kg/m)	CUSTO (R\$/m)	ÍNDICE DE MÉRITO $I_m (E^{1/2}/C_x)$
alumínio 6082T6	70	2,70	0,500	150	2,07
CEFC 60%fc	139	1,56	0,274	700	1,08
CEFV 60%fv	45	2,06	0,931	230	1,42
CEFVC VARTM	58	1,75	0,500	183	2,37
CEFVC BOB.	76	1,89	0,450	358	1,29

5.5 Considerações finais

1- O material compósito mostrou se uma solução melhor para aplicação em próteses do que os tubos de alumínio, pois:

- São mais flexíveis, absorvendo melhor as tensões impostas ao componente, com no caso de flexão.

- Tem melhor comportamento quando sob flexão deformando elasticamente, porém com tensão menor.

- Tem um custo menor e podem ser produzidos por processos diferentes que conferem a estes propriedades também diferentes.

- A tensão máxima de compressão tende a aumentar quando a orientação das camadas se alinha à direção de aplicação do carregamento, conferindo ao mesmo material propriedades diferentes dependendo do arranjo das fibras e do processo.

2- Modelos numéricos são fundamentais para projeto e *design* de peças em compósitos.

3- As imperfeições decorrentes dos processos de fabricação afetam as propriedades dos materiais compósitos de forma significativa, mas os modelos matemáticos de elementos finitos ainda não conseguem prever isto com eficácia. Correlações com protótipos experimentais são necessárias para aferir e validar os modelos.

4- O VARTM e *braid* oferecem uma opção de baixo custo em relação à bobinagem filamentar, mas com diminuição das propriedades finais e um conseqüente aumento na massa de fibra de carbono para compensar. A bobinagem filamentar produz um material compósito com propriedades mecânicas melhores, mas com custo maior. São, portanto, materiais orientados à mercados distintos.

5- O uso de casca externa de carbono e interna de vidro formando um conjunto híbrido é uma solução muito eficaz para redução de custo sem perdas de propriedades estruturais do material compósito. Esta montagem equivale a uma estrutura tipo sanduíche.

6- As perdas das propriedades no processamento por VARTM estão relacionadas aos vazios que permanecem nas camadas mais internas durante o processamento. Este problema está relacionado ao processo atual usado pela AACD de VARTM que apesar de atender suas necessidades não consegue obter um rendimento que a fabricação deste tubo necessita. Pois simulações com modelos de tubo, produzidos tanto por bobinagem quanto por VARTM, indicam propriedades semelhantes aos dois processos.

6. CONCLUSÕES

Uma análise de elementos finitos permitiu o posicionamento correto das fibras e definição da espessura das camadas de forma que se maximizassem as propriedades. A análise permitiu ainda várias configurações sem que se produzisse nenhum protótipo físico, economizando tempo e recurso para a definição do arranjo final.

A escolha do VARTM foi significativa para viabilizar o custo do produto. A simplicidade do processo, a possibilidade do aumento da capacidade produtiva com poucos investimentos, o uso de mão de obra com pouco treinamento e o baixo custo de pelo aumento na capacidade produtiva, apesar de terem suas propriedades prejudicadas. A produção de um protótipo com bobinagem, permitiu avaliar claramente os resultados obtidos com o VARTM.

Apesar das perdas de propriedades, a simplificação do processo produtivo com o uso de pré-formados e VARTM justifica e viabiliza este processo para produção de componentes de prótese.

O uso de pré-formados *braid*, além de melhorar o rendimento no processamento, produziu tubos com melhor acabamento externo.

Os protótipos produzidos por bobinagem apresentaram propriedades mecânicas e de massa superiores às do alumínio, mas com custo superior. Os protótipos produzidos por VARTM apresentaram propriedades de massa e custo melhores que a do alumínio, mas propriedades mecânicas inferiores sendo estas semelhantes aos materiais compósitos de fibra de carbono utilizados comercialmente para fabricação de prótese.

7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo do efeito sobre as propriedades mecânicas da relação entre o diâmetro do *braid* e o ângulo final em relação ao eixo do tubo.
- Tubo para prótese de alumínio reforçado com fibra de carbono ou vidro.
- Estudo da fadiga em próteses com tubo de material compósito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amadio, A. C., Duarte M. **Fundamentos biomecânicos para análise do movimento**, São Paulo, Laboratório de Biomecânica- EEFUSP, 1996.

Ashby, M. F. **Materials Selection in Mechanical Design**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2nd ed., 1999.

Bader, M. G; Smith, W.; Isham, A. B.; Rolston, J. A.; Metzner, A. B. **Processing and Fabrication Technology**. Ed. Technomic Publishing, Vol. 3, 1990.

Bader, M. G. Selection of composite materials and manufacturing routes for cost effective performance. **Composites**: Part A 33, 2002, p. 913-934

Barracuda Advanced Composites Aplicação à vacuo **Manual de construção de barcos**, www.barracudatech.com.br/trab_tec.htm# 2006

Black, J.; Hastings G. **Handbook of Biomaterial Properties**, Ed. Chapman & Hall, 1998.

OTTO BOCK DO BRASIL, , <http://www.ottobock.com.br/mobis.asp>, 25.07.2006

Callister, W. D. **Materials Science and Engineering**, Ed. John Wiley & Sons. Inc, 4th edition, New York, 1997.

Carvalho, O. **Influência da configuração de bobinagem no comportamento mecânico de cilindros de compósito polimérico**. Tese de Mestrado. Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares, IPEN/USP ,2006 ,São Paulo.

Costa, M. L.; Almeida, S. F. M.; Rezende, M. C. Resistência ao cisalhamento interlaminar de compósito com resina epóxi com diferentes arranjos das fibras na presença de vazios. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 11, nº 4, 2001, p. 182-189.

Garbin, G. G.; Baratella, H.; Basso, L. R. S.; Annicchino, M.B. **Jump J, Saltando como cangurus**. Trabalho de Graduação, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, 2005.

Gonçalves, A.; Almeida, S. F. M; Neto, F.L. Comportamento de cilindros de carbono / epóxi submetidos a cargas compressivas axiais. **Polímeros** vol. 11, n.2 São Carlos abr./jun, 2001.

Hibbeler, R. C. **Resistência dos materiais**, Ed. LTC , 3^a edição, 2000

Higgins, R. A. **Propriedades e Estruturas dos Materiais em Engenharia**, Ed. Difel, 1997.

Hull, D. **An introduction to a composite material**. Cambridge Solid State Science Series, UK, 1987

ISO 10328-3-1996 **Prosthetics – Strutral Testing of Lower-limb Prostheses**.

Kelly, A. **Concise Encyclopedia of Composite Materials**. Ed. Pergamon, UK , 1994

Lebrão, G. W.; Marinucci, G.; Rossi, J. L. Análise de custo em materiais compósitos carbono epóxi. **III Congresso Brasileiro de Carbono**, Rio de Janeiro, 2005.

Lubin, G. **Handbook of Composites**. Ed. Van Nostrand Reinhold, 1969.

Leivas, T.P.; Seminário – **Biomateriais, Implantes em Ortopedia e Traumatologia** – Centro Universitário Mauá, II Semana de Engenharia ,2003

Mayer, S.; Cândido, G. M.; Rezende, M. C. Influência do condicionamento ambiental na resistência a tração de compósitos de carbono / epóxi reparados. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 13, nº 3, 2003, p. 147-153.

Marinucci, G. **Desenvolvimento, Fabricação, Caracterização Mecânica e Microestrutural de Cilindros de Fibra de Carbono Colapsados por Pressão Interna**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares, IPEN/USP ,2001 ,São Paulo.

Matweb, <http://www.matweb.com/search/GetSubcat.asp> , 11.11.2006

Neto, F. L.; Pardini L. C. **Compósitos Estruturais Ciência e Tecnologia** , Ed. Edigar Blucher , 1ª ed. 2006

Norma ASTM D-3410-87 - **Standard Test Method forCompressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading**

Norma ASTM D303976 **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**

Norma ASTM D 790 – 99 **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**

Otto Bock do Brasil <http://www.ottobock.com.br/>, 08.11.2006

Pardini, L.C. Pré-formados para compósitos estruturais. **Polímeros**, vol. 10, n.2, São Carlos, abr./jun. 2000.

Park, C. H.; Lee, W. I.; Han, W. S.; Vautrain, A. Multiconstraint optimization of composite structures manufactured by resin transfer molding process. **Journal of Composite Material**, vol. 39, nº 4, 2005, p. 347 – 374

Rose, J.; Gamble, G.,G. **Human Walk**. 2nd ed., cap. 8 , Willian & Wilkins U.S.A. 1994.

Saint-Gobain Vetrotex International,
http://www.vetrotexasiapacific.com/business_info/rap_gstrand.html, 13.01.2007

SILTEX Flecht- und Isoliertechnologie Holzmüller GmbH & Co.KG, www.siltex.de/en 18.07.2006

Sorathia, U.; Ness, J.; Blum, M. Fire safety of composites in the US Navy; **Composites**: Part A, 30, 1999, p. 707-713.

Smith, W.F. **Princípios de Ciência dos e Engenharia dos Materiais**- Terceira ed., McGRAW-HILL, cap.13.2, 1998.

Swanson,S.R.; Smith L.V. Comparison of biaxial strength properties of braided and laminated carbon fiber composites. **Composites**: Part B 27B(1996) 71-77 Elsevier Science Limited

Wiebeck H., Harada J. **Plásticos de Engenharia: Tecnologia e Aplicações**. Ed Artliber, 2005.

Wilkenfeld A., Herr, H. **An Auto-Adaptive External Knee Prosthesis**. Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institue Of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, <http://www.ai.mit.edu>, 21.01.07

Younossi O, Kennedy M, Graser J.C. **Military Airframe Costs: The Effects of Advanced Materials and Manufacturing Process**. Randi publication Database, 2001.

ANEXO 1. METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE CUSTO

O cálculo do custo da peça, para efeito de comparação, e avaliação dos resultados foi realizado segundo metodologia proposta por Michael G. Bader em “Selection of composite materials and manufacturing routes for cost effective performance” 2002 .

Consideraram-se tubos com comprimento de um metro e materiais que tivessem uma resistência equivalente à compressão.

O custo total do tubo “C_{tot}” é a soma dos custos parciais. Estes custo parciais estão divididos em quatro categorias:

1- Matéria-prima “C_f”.

O custo da matéria-prima “C_f” depende da massa do tubo “m”, do custo da matéria-prima por kg “P_f” e do aproveitamento da matéria-prima que o processo oferece “u”, fornecido no artigo. O calculo é feito segundo a fórmula:

$$C_f = 100 \text{ m } P_f / u$$

2- Processo “C_t”.

O custo da moldagem “C_t” é obtido com o preço do molde “P_t” dividido pela produtividade de um molde na sua vida útil “N_t”.

$$C_t = P_t / N_t$$

3- Mão de obra “C_i”.

A mão de obra “C_i” é o produto do total de horas trabalhadas “t_h”, em minutos, pelo operador ou operadores que fabricam os tubos pelo valor da hora trabalhada dos operadores “P_i”.

$$C_i = t_h P_i / 60$$

4 – Valor do capital “C_p”.

O valor do capital “C_p” é na verdade a amortização dos investimentos no preço do produto comercializado. Onde “P_p” é o valor investido, “w” é o período de amortização do investimento, “R_i” é a taxa de juros, “t” é o número de dias trabalhados, “P_o” é o custo por hora de operação das instalações industriais e o “t_p” é o numero de linhas de produção, considerando-se uma linha de produção.

$$C_p = t_p \{ P_p (1/w + R_i/100) / (250 \times t_o) + P_o \}$$

O custo total do tubo por metro linear para uma resistência equivalente é dado por :

$$C_{tot} = C_f + C_t + C_i + C_p$$