

USP

Campus de São Carlos

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE
COMPONENTES DE ÓRTESES EM
MATERIAIS POLIMÉRICOS REFORÇADOS**

CLÁUDIO TORRES GONÇALVES

Orientador: Prof. Dr. Jonas de Carvalho

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

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

Eng. Cláudio Torres Gonçalves

PROJETO E FABRICAÇÃO DE COMPONENTES DE ÓRTESES
EM MATERIAIS POLIMÉRICOS REFORÇADOS

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jonas de Carvalho

São Carlos

Julho 2003



Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 25 / 11 / 03

Ass.: *Leandro Corioli*

DEDALUS - Acervo - EESC



31100044210

Class.	TESE - EESC
Cutt.	2554
Tombo	T331/03
Sysno	1349636

Ficha catalográfica preparada pela Seção de
Tratamento da Informação do Serviço de
Biblioteca - EESC/USP

G635p
Gonçalves, Cláudio Torres
Projeto e fabricação de componentes de órteses em
materiais poliméricos reforçados / Cláudio Torres
Gonçalves. -- São Carlos, 2003.

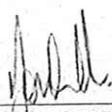
Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.
Área : Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Jonas de Carvalho.

1. Material polimérico reforçado.
2. Compósito.
3. Órteses.
4. Resina epóx.
5. Fibra de carbono.
6. Projeto. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

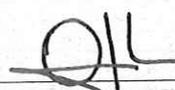
Candidato: Engenheiro **CLÁUDIO TORRES GONÇALVES**

Dissertação defendida e julgada em 18-09-2003 perante a Comissão Julgadora:



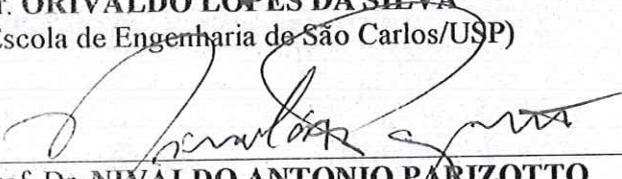
Prof. Assoc. **JONAS DE CARVALHO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado.



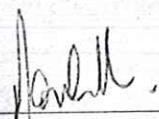
Dr. **ORIVALDO LOPES DA SILVA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

aprovado

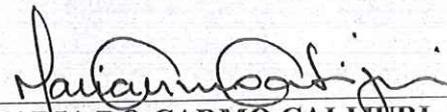


Prof. Dr. **NIVALDO ANTONIO PARIZOTTO**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO



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



Profa. Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Dedicatória

Dedico este Trabalho de Mestrado à minha esposa *Elaine Cristina D. Gonçalves*, que tanto me motivou a realizar este trabalho; à minha filha *Maria Angélica*, que me faz feliz em todos os aspectos; ao meu filho *Theo Vinícius*, de nove meses que veio ao nosso convívio, no decorrer do desenvolvimento deste trabalho.

Também dedico este trabalho ao meu pai, *Diógenes Gonçalves*, por estar concretizando um sonho também dele, na medida que, pela adversidade da vida (sendo pai e mãe ao mesmo tempo), projetou em mim muito de seu desejo de realização pessoal.

Dedico, ainda, à minha tia, *Maria Domingas Gonçalves* pela ajuda que dela recebo em relação à minha educacional e pessoal.

Agradecimentos

A todos os colegas do LTC – Laboratório e Tribologia e Compósitos, que me ajudaram neste trabalho.

Aos colegas do CAD CAE, pela compreensão e pela amizade nestes anos de mestrado.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela bolsa de estudo.

Aos funcionários da oficina do LAMAFE, pela ajuda na parte experimental deste trabalho.

À empresa TECSIS, por me fornecer material (resina e fibra de vidro) no início deste trabalho.

À companhia aérea TAM – LINHAS AÉREAS, pelo material (resina e fibra de carbono), na conclusão deste trabalho.

Em especial, agradeço ao Professor Jonas de Carvalho, por me orientar neste trabalho e ao Professor Benedito de Moraes Purquério, pela utilização das instalações do LTC.

Resumo

GONÇALVES, C.T. (2003). Projeto e fabricação de componentes de órteses em materiais poliméricos reforçados. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

Os materiais poliméricos reforçados vêm sendo utilizados em inúmeras aplicações que requerem um alto desempenho estrutural, obtendo-se assim, ótimos índices de aceitação por parte de projetistas e engenheiros. Estes materiais, que também são conhecidos como materiais compósitos, apresentam excelentes propriedades estruturais, as quais estão relacionadas à rigidez, flexibilidade, resistência à corrosão, fadiga e associadas a um baixo peso, possibilitando assim a sua obtenção através da utilização adequada dos mesmos. Para diversas aplicações como na aviação comercial, aviação militar, indústrias navais, indústrias de geradores eólicos, bem como para a área médica, eles são considerados como excelentes substitutos dos materiais metálicos, como ocorre nos projetos de próteses e órteses biomecânicas. Neste trabalho, faz-se a aplicação de materiais poliméricos reforçados na construção de uma componente de órtese, no que se refere às metodologias de projeto e fabricação. Variáveis relacionadas às propriedades do material serão analisadas e estudadas através de ensaios experimentais e de simulações computacionais, visando o uso adequado dos materiais compósitos e o seu desempenho na aplicação de uma componente da órtese biomecânica. Fatores relacionados ao processo, ao material, e à metodologia empregada, são determinantes para a definição das propriedades do compósito. Estes, por sua vez, serão analisados e discutidos, visando uma futura aplicação em uma órtese biomecânica.

Palavras chave: compósitos, órteses, material polimérico reforçado, design.

Abstract

GONÇALVES, C.T. (2003). Design and fabrication of orthoses components in reinforced polymeric material. Dissertation (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

Reinforced polymeric materials have been used in applications that require high structural performance with low weight. Such materials, known as composites materials, are able to present excellent properties concerning stiffness, strength, corrosion and fatigue, associated with weight reduction that can be obtained through an adequate use its of constituents. In many applications in the medical area, such materials are considered as a substitute for conventional metallic materials, as the case of biomechanical prostheses. In this work, the application of reinforced polymeric materials in prostheses is studied concerning the design and manufacturing processes. Variables related to the material properties are analyzed through experimental tests and computer simulation, in order to obtain the best configuration of material properties. It is proven that the use of composite materials is an advantageous alternative to replace metallic materials in the design and manufacturing of biomechanical prostheses.

Keywords: composites, orthoses, reinforced polymeric material, design.

Sumário

RESUMO

ABSTRACTS

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS	2
2.2	RESINAS EPÓXI	6
2.3	FIBRAS DE CARBONO.....	11
2.3.1	Classificação e tipos.....	13
2.3.2	Obtenção dos fios da Fibra de Carbono	14
2.3.3	Propriedades	17
2.3.4	Aplicações	17
2.3.5	Fibras de Carbono – Propriedades Mecânicas.....	20
2.4	PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS	23
2.4.1	Determinação das propriedades mecânicas através de métodos teóricos (analíticos e numéricos).....	24
2.4.2	Determinação das propriedades mecânicas através de métodos experimentais (ensaios laboratoriais)	24
2.5	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	28
2.5.1	Áreas de Aplicação	29
2.5.2	Nomenclatura.....	30
2.5.3	Método Matemático	31
2.5.4	Implementação Computacional	34
2.6	ÓRTESES	37
2.6.1	Definição de Órtese.....	37
2.6.2	Classificação das Órteses	38

2.6.3	Constituintes de uma Órtese	44
2.6.4	Componentes e terminologia	44
2.6.5	Avaliação e evolução das órteses.....	50
2.6.6	Considerações patológicas.....	53
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	58
3.1	ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	58
3.1.1	Confecção dos Corpos de Prova	59
3.1.2	Ensaio de Tração	60
3.1.3	Ensaio de Flexão.....	61
3.1.4	Ensaio de Compressão	62
3.1.5	Laminação Manual.....	62
3.2	ENSAIOS NO COMPONENTE.....	65
3.3	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	65
4	RESULTADOS.....	70
4.1	ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	70
4.2	ENSAIOS NO COMPONENTE.....	71
4.3	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	78
5	CONCLUSÕES.....	81
6	BIBLIOGRAFIA	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

1 Introdução

O desenvolvimento de novos produtos e tecnologias constitui hoje um fator estratégico para se atingir níveis de produtividade, qualidade e custos exigidos pelo mercado. Atualmente, materiais poliméricos reforçados, também conhecidos como compósitos, têm sido aplicados nos mais diferentes setores produtivos, tais como automobilístico, aeronáutico, construção civil, área médica, energia eólica, entre outros, principalmente devido à possibilidade de se obter componentes com alto desempenho estrutural, associado ao baixo peso. Entre as razões que os tornam atraentes a estas aplicações, podemos citar:

- Baixo peso associado à alta rigidez e resistência mecânica;
- Possibilidade de “customizar” as propriedades do material aos requisitos do projeto, através da determinação adequada das mesmas, da geometria do componente e do processo de fabricação;
- Potencial redução de custos através da diminuição de operações, montagens e sub-montagens de peças, bem como daqueles associados à manutenção e reparos.

Há certos tipos de produção em massa como moldagem por injeção, pultrusão (*Pultrusion*), moldagem por Transferência de Resina (*RTM*), que permitem aos compósitos serem produzidos em grande volume, a custos e ciclos de produção bem reduzidos.

Neste contexto torna-se interessante estudar a aplicação destes materiais a componentes biomecânicos, possibilitando que possam ser usados de maneira criteriosa e otimizada, durante todo o ciclo de desenvolvimento do produto.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Materiais Compósitos

A partir da Revolução Industrial o Homem tem utilizado geralmente os materiais metálicos para desenvolvimento e fabricação de novos produtos, gerando projetos e técnicas de fabricação bem diversificados, que requerem processos mais complexos. Com o desenvolvimento tecnológico, muitas empresas buscaram a automatização destes processos para a fabricação de seus produtos. Entretanto, o caminho do desenvolvimento não seguiu apenas em uma só direção, surgindo também o desenvolvimento de Novos Materiais e suas possíveis aplicações para novos desenvolvimentos os utilizando.

Desta forma, através do estudo das Ciências dos Materiais, os cientistas procuravam estudar as propriedades destes novos materiais o que deu origem aos materiais poliméricos e às suas classes de materiais, dentre os quais destacam – se os materiais poliméricos reforçados, mais conhecidos como materiais compósitos.

Os materiais metálicos apresentam características como, por exemplo, um alto grau de rigidez e alto grau de resistência. Entretanto, tais materiais possuem altas densidades, exigindo das máquinas que os usinam, um ferramental mais resistente além, naturalmente, do maior peso do componente fabricado. Os materiais poliméricos reforçados (compósitos), por sua vez, se destacam por possuir baixa densidade, alta resistência, alta rigidez, além da resistência ao impacto. Trabalhando-se com os materiais constituintes, consegue-se chegar à compósitos com propriedades mecânicas idênticas e/ou superiores à dos materiais metálicos.

Atualmente as tecnologias mais recentes ampliaram a utilização de compósitos com combinações dos materiais constituintes (basicamente a fibra e a resina), propiciando a criação de novos projetos e novos processos de fabricação, resultando em uma drástica redução das etapas destes processos. O desenvolvimento dos materiais compósitos vem crescendo de uma maneira acelerada nos últimos anos, propiciando aos projetistas desenvolver novas alternativas de projeto e manufatura para confeccionar novos produtos, fornecendo-lhes um novo leque de possibilidades.

O material compósito pode ser entendido como um material que possui duas ou mais fases constituintes, onde cada fase representa um tipo de material com propriedades físicas e químicas diferentes e que, quando associadas adequadamente, resultam em um material (compósito) com propriedades superiores aos componentes individuais. De acordo com esse conceito de formação combinada, procura-se moldar melhores combinações, aliadas à melhores propriedades, por uma combinação criteriosa dos seus materiais constituintes.

Neste trabalho será abordado, especificadamente, o compósito estrutural laminado, que possui uma resina como matriz e fibras longas como reforço, conforme ilustrado na Figura 1. Neste contexto, cabe algum comentário com relação às matrizes poliméricas e aos reforços constituídos por fibras e, principalmente, à adesão entre fibra e matriz (estrutura do laminado).

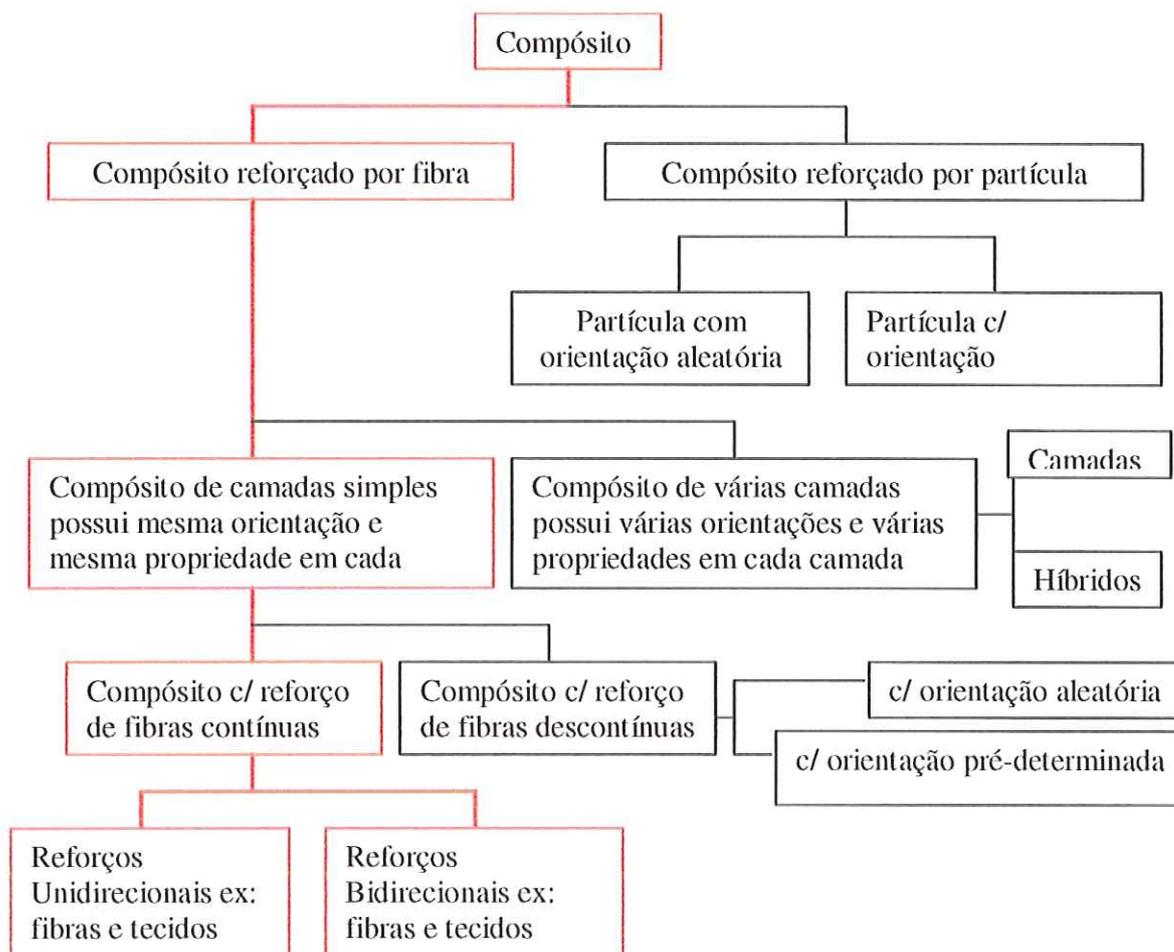


Figura 1 – Esquema de classificação das fibras para materiais compósitos. AGARWAL, D.B.; BROUTMAN (1990)

Os materiais poliméricos reforçados são conhecidos por possuírem propriedades específicas superiores se comparadas aos materiais convencionais de engenharia. São também conhecidos como materiais estruturais avançados de grande potencial para aplicação na indústria aeronáutica, aeroespacial, naval, automobilística, geradora de energia eólica, entre outras, e com potencial para aplicação no campo da medicina, área biomecânica. Os compósitos laminados a serem estudados são constituídos de camadas de tecidos de fibra de carbono

orientadas, tratadas superficialmente e impregnadas com resina epóxi, denominados compósitos com reforço de fibras contínuas na Figura 1.

Pode-se dizer que, para cada tipo de compósito, obtém-se propriedades específicas distintas, através de seus materiais constituintes, que dependem dos seguintes fatores:

- Proporção (%) da fibra e da resina;
- Distribuição e orientação da fibra;
- Tipo e espessura da fibra;
- Tipo da resina;
- Comprimento da fibra (da fibra picada até os tecidos bidirecionais);

Então, para se obter compósitos com propriedades mecânicas adequadas, os mesmos não devem depender apenas das orientações da fibra, mas também de suas frações volumétricas. Estes valores são estimados e se adequam aos compósitos com aplicações em vários setores:

- Fibras unidirecionais, os valores são de 50 a 70%;
- Fibras bidirecionais, os valores são de 30 a 55%;
- Fibras com orientação aleatória, os valores são de 15 a 35%;

Para determinar as propriedades resultantes do compósito pode-se usar procedimentos experimentais, ou pode-se estimá-las através da “regra – das – misturas”:

$$E_c = E_f \cdot v_f \cdot A + E_m \cdot (1 - v_f) \quad (1)$$

onde:

E_c = Módulo de elasticidade do compósito;

E_f = Módulo de elasticidade da fibra;

E_m = Módulo de elasticidade da matriz;

v_f = Fração volumétrica da fibra;

A = Fator de eficiência da fibra;

$A = 1$ para fibra unidirecional;

$A = 1/2$ para fibra bidirecional;

$A = 3/8$ para fibra randômica;

2.2 Resinas Epóxi

Grande parte dos materiais poliméricos que são utilizados para fabricação de componentes estruturais, são obtidos a partir de resinas epoxídicas. Esta família de resinas se caracteriza pela utilização de catalisadores e/ou endurecedores na mistura, a qual deverá conter as propriedades físicas que vão determinar as características da resina para o compósito.

Dentre todas as resinas epoxídicas, tem-se a resina epóxi que se destaca em relação às demais resinas, pelos seguintes fatores:

- As resinas epóxi e seus agentes de cura estão disponíveis em uma ampla variedade de tipos, viscosidades e de cura à temperatura ambiente, possibilitando serem formuladas de acordo com as necessidades do processo de fabricação;
- As resinas epóxi apresentam uma boa aderência para uma ampla variedade de agentes de reforço;
- A reação de uma resina epóxi e seu agente de cura produzem uma reação exotérmica entre ambos, e há um grau de cura entre o agente e a resina favorecendo a sua utilização;
- A sua taxa de retração é bem menor do que as resinas fenólicas.

De acordo com HENRY LEE & KRIS NEVILLE a resina epóxi é definida como uma molécula contendo mais do que um grupo α - epóxi (situado internamente no meio da, no fim da, ou na estrutura cíclica) capaz de ser convertida para um termofixo.

as mais utilizadas na confecção dos compósitos.

Tabela 1: Propriedades das resinas mais utilizadas na confecção de produtos em compósitos.

Propriedades da resina	Epóxi	Poliéster
Densidade (Kg. M ⁻³)	1,11 – 1,4	1,1 – 1,46
Dureza (Rockwell M)	80 – 110	70 – 115
Resistência à Tração (GPa)	28 – 91	42 – 91
Módulo de Tração (MPa)	2,4	2 – 4,5
Resistência à Flexão (GPa)	80	103
Módulo de Flexão (GPa)	3,5	4,2
Deformação à falha (%)	4 – 7	1.25
Coefficiente de exp. Térmica (10 ⁻⁶ .k ⁻¹)	8,1 – 11,7	9,9 – 18
Temperatura de cura (°C)	110 – 150	100 - 125

Fonte: K.L. Edwards (1998)

As resinas termofixas são mais aplicadas para uso estrutural, pois apresentam excelentes características finais para o compósito e para um vasto número de aplicações. Para Morena (1988) outras razões para estas aplicações são:

- As resinas e seus agentes de cura estão disponíveis em uma ampla variedade de tipos, viscosidades e de temperaturas de cura;
- Possibilidade de se apresentar sob várias formulações para obtenção de diferentes propriedades após cura;
- Boa aderência a uma ampla variedade de agentes de cura;

Lucato (1991) comenta que, dentre as termofixas, as epoxídicas apresentam inúmeras vantagens para o desenvolvimento de projetos:

- 1- Apresentam uma certa facilidade para a sua moldagem.
- 2- Fornecem baixa contração, evitando tensões residuais.
- 3- Possibilitam a cura à temperatura ambiente.
- 4- Possuem alto módulo de elasticidade e compressão.

5- Propiciam aplicações estruturais de alto desempenho.

6- Possibilidade de adesão da mesma resina após cura.

Assim, as resinas epóxi são particularmente úteis na fabricação de laminados para fins estruturais. A partir deste fato, pode-se então afirmar que a sua utilização adequada em laminados depende da escolha correta de um “agente de cura” para obtenção das propriedades físicas adequadas do termofixo. Podemos afirmar que a utilização do termo catalisador ou endurecedor está relacionada diretamente com a proporção utilizada dos mesmos, ou seja, proporções menores que 10% são ditas catalisadoras e proporções acima de 10% são conhecidas por endurecedoras.

Outras características das resinas epóxi são a sua facilidade de manipulação, tempo de vida de trabalho, a sua capacidade de ser formulada para curar a várias temperaturas e em tempos diferentes, e boa adesão aos agentes de reforço e resistente a água. As resinas epóxi provaram ser capazes de ser um bom substituto para os metais em geral, pois propiciam alta estabilidade dimensional e boas propriedades mecânicas. Também se pode destacar algumas qualidades que permitem a produção de moldes, para obtenção de réplicas, com as mesmas características geométricas de tolerâncias bastante baixas.

Como já foi comentado sobre o grau de cura da resina, podemos defini-lo em termos de algumas propriedades que mudam durante a reação de cura e alcançam um valor constante ao término da cura. Ao término da cura, a resina adquire características específicas determinadas pela sua estrutura química. Uma alta densidade de suas ligações cruzadas propicia uma melhoria na resistência da resina a reagir com outras substâncias. Entretanto, uma baixa densidade de suas ligações cruzadas permite melhorar a dureza, propiciando um maior alongamento das macromoléculas da resina.

Alguns parâmetros importantes para a utilização de resinas termofixas:

- Temperatura de Cura da resina.
- Viscosidade da resina.

- Shelf life.
- Sistema de cura da resina.
- Tempo de Gel (*Gel Time*).
- Rigidez após a cura.
- Contração após a cura.
- Pot Life.

Esses parâmetros são descritos resumidamente a seguir:

A temperatura de cura da resina epóxi está diretamente relacionada com o “agente de cura” da resina. Como mencionado anteriormente, estes agentes podem ser desde aditivos inseridos na resina durante a sua formulação, até catalisadores e endurecedores apropriados para atingir a temperatura de cura ideal. A temperatura de cura ideal significa também que, durante o processo de cura, o sistema resina + agente de cura propicia um aumento da densidade das ligações cruzadas da resina, até a sua temperatura de cura transformar o sistema resina + agente de cura em um termofixo.

A viscosidade da resina epóxi está relacionada diretamente com a impregnação da mesma no agente de reforço, além estar relacionada à processos de moldagem, denominados “processos – fáceis”.

O Shelf life da resina está relacionado aos aditivos e inibidores que são adicionados para aumentar o tempo de vida útil da resina, mantendo as mesmas características e propriedades da mesma, durante o seu armazenamento em recipientes fechados.

O Sistema de cura da resina epóxi pode ser explicado como a formação da cadeia tridimensional através da reação química da resina, e seus agentes de cura (catalisadores e/ou endurecedores). Basicamente, esta reação resulta na mudança da

resina líquida para uma resina sólida. Durante o processo de cura da resina epóxi, esta se contrai menos que as demais resinas termofixas, sendo benéfico para utilização desta resina, pois a contração evita surgimento de tensões “internas”;

O *Gel Time* ou tempo de gel de uma resina significa que é o intervalo de tempo que leva para os reagentes, no estado líquido (resina e catalisador e/ou endurecedor) sejam misturados, até o instante em que ocorra a denominada gelatinação da mistura.

A *Rigidez após cura* da resina, ou seja, o estado de endurecimento da resina, se realiza em função de uma reação química irreversível que se caracteriza pela interligação das grandes cadeias moleculares, formando assim moléculas maiores, tornando o polímero mais resistente.

O *Pot Life* da resina é definido como o tempo disponível para utilização da resina e seu agente de cura, após serem misturados. Como exemplo, neste trabalho o sistema resina + endurecedor a ser utilizado tem seu *Pot-life* em torno de 25 minutos.

2.3 Fibras de Carbono

O agente de reforço tem como função manter os reforços unidos para transmitir a estes o carregamento aplicado. Outra função do reforço, ou dos reforços, é a de suportar os carregamentos transmitidos para ele no compósito.

Materiais de fibra de vidro são geralmente utilizados como reforços, em conjunto com resinas, principalmente devido às suas valiosas propriedades, como alta resistência mecânica, resistência à corrosão, baixa densidade, isolante térmico, resistente a ação do tempo para os compósitos. As fibras são também conhecidas como reforços fibrosos, agentes de reforço, ou apenas reforços e se apresentam basicamente nas suas formas mais conhecidas: fibras contínuas, fibras picadas e fibras aleatórias. As fibras contínuas se caracterizam por serem produzidas com

comprimento indefinido, possuir uma alta linearidade dos seus milhares de filamentos, e servir como matéria-prima para outros produtos, tais como fitas de fibras, as fibras picadas e fibras contínuas, na forma de tecidos unidirecionais, bidirecionais e tridimensionais.

As fibras do carbono são uma linha nova de materiais, denominados de alta-resistência.

A fibra do carbono foi descrita como uma fibra que contém pelo menos 90% de carbono obtido por um controlado processo de pirólise das fibras. A existência da fibra do carbono veio a se tornar pública em 1879, quando Thomas Edson registrou uma patente para a manufatura dos filamentos de carbono, apropriada para o uso em lâmpadas elétricas. Entretanto, nos anos 60, as pesquisas eram direcionadas principalmente à aplicações na indústria aeroespacial, em especial para aeronaves militares. Nestas áreas, materiais resistentes e de pouco peso são considerados fatores primordiais. Nas décadas seguintes e mais recentes, as fibras do carbono passaram a ser aplicadas nos mercados da aviação civil e nas indústrias de transporte.

Dessa forma, os compósitos de fibra de carbono são utilizados geralmente em aplicações onde a resistência, a rigidez, e um peso mais baixo são as características predominantes assim como são exigências críticas do compósito. Também podem ser usadas em altas temperaturas e em aplicações onde se requerem inércia química e resistência a ambientes com alta umidade.

Os fornecedores da Associação Avançada dos Materiais Compósitos produziram em 1997, nas indústrias de fibras de carbono em compósitos, a estatística apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Produção Mundial de Fibra de Carbono em quilogramas por ano.

Ano	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Produção [kg]	5889369	6613140	7893730	8930746	9364752	11732700

Fonte: Carbon Fiber (2003).

Atualmente, os Estados Unidos consomem quase que 60% da produção mundial de fibra de carbono, e os japoneses são os melhores fornecedores, pois produzem 50% da capacidade de produção mundial. O maior produtor desta fibra é a indústria de Toray e a capacidade de produção mundial da fibra de carbono é baseada quase totalmente no Japão.

2.3.1 Classificação e tipos

Com base no módulo de rigidez, na resistência e na temperatura final do tratamento de calor, as fibras do carbono podem ser classificadas nas seguintes categorias:

As propriedades da fibra de carbono, elas podem ser agrupadas em:

- Tipo Ultra-alto-módulo, UHM (módulo > 450 GPa).
- Tipo Alto-módulo, HM (módulo entre 350-450 GPa).
- Tipo módulo-Intermediário, IM (módulo entre 200-350 GPa).
- Tipo Baixo módulo, tipo HT (módulo < 100 GPa, resistência à tensão > 3.0 GPa).
- Tipo Superalta tensão, tipo SHT (resistência à tensão > 4.5 GPa).

Com relação ao tipo de fibra, as fibras do carbono são classificadas em:

- Fibras de carbono do tipo PAN;
- Fibras de carbono do tipo Pitch;
- Fibras de carbono do tipo Pitch Mesofásico;
- Fibras de carbono do tipo Pitch Isotrópico;
- Fibras de carbono do tipo Rayon.

Com relação à temperatura final do tratamento de calor, as fibras de carbono são classificadas em:

- Tipo-I, alto tratamento de calor nas fibras de carbono (HTT), onde temperatura final do tratamento de calor deverá ser de 2000°C e pode ser associada com fibra do tipo de alto módulo;

- Tipo-II, tratamento intermediário de calor nas fibras de carbono (IHT), onde temperatura final do tratamento de calor deverá ser em torno de aproximadamente 1500°C e pode ser associada com fibra do tipo de alta resistência;

- Tipo -III, baixo tratamento de calor nas fibras de carbono (SHT), onde temperatura final do tratamento de calor não será maior do que 1000°C. Estas são basicamente de baixo módulo e baixa resistência.

2.3.2 Obtenção dos fios da Fibra de Carbono

A fibra do carbono foi descrita como uma fibra que contém ao menos 90% de carbono, obtido pela pirólise controlada das fibras. O termo "fibra de grafite" é usado para descrever as fibras que têm 99% de carbono em excesso. Através desta variedade dos tipos de fibras, estas são usadas para produzir fibras do carbono de diferentes morfologias e de diferentes características específicas. As fibras precursoras de maior utilização, são as fibras poliacrilonitrila (PAN), fibras celulósicas (Rayon viscoso, do algodão), e do Pitch do petróleo ou do carvão.

As fibras de carbono são manufaturadas pela pirólise controlada dos materiais orgânicos na forma fibrosa. É basicamente um tratamento de calor dos precursores que removem o oxigênio, o nitrogênio e o hidrogênio para dar forma às fibras de carbono.

Fibra de carbono do Poliacrilonitrila (PAN):

Há três estágios sucessivos na conversão do precursor PAN para as fibras de carbono de alto desempenho, extraído do petróleo:

-Estabilização Oxidativa: O precursor PoliAcriloNitrila é primeiramente esticado e simultaneamente oxidado a uma temperatura na ordem de 200-300°C. Este tratamento converte o termoplástico PAN a um não-plástico cíclico PAN.

-Carbonização: Após a oxidação, as fibras são carbonizadas aproximadamente a 1000°C, sem tensão, em uma atmosfera inerte (normalmente nitrogênio), por algumas horas. Durante este processo os elementos, que não são de

carbono, são removidos por volatilidade para originar as fibras de carbono, com um rendimento de aproximadamente de 50% da massa do PAN original.

- Grafitação: Dependendo do tipo de fibra exigido, as fibras são tratadas a temperaturas entre 1500-3000°C que melhora empilhamento e a orientação dos cristais no sentido da fibra.

Fibra de Carbono de Rayon:

A conversão de fibras de Rayon (fibras de celulose) em fibras de carbono é um processo do três estágios:

1º) Estabilização: A estabilização é basicamente um processo oxidativo que ocorre por etapas. Na primeira etapa, entre 25-150°C, há uma absorção física da água. A segunda etapa há uma desidratação celulósica entre 150-240°C. Finalmente, a terceira etapa é um “rompimento” térmico das ligações cruzadas cíclicas e algumas ligações do tipo C—C, ligam-se através da reação via radical livre (240-400°C) e, depois disso, ocorre uma aromatização.

2º) Carbonização: Entre 400 e 700°C, o resíduo de carbono é convertido em camadas de grafite.

3º) Grafitação: A grafitação é realizada sob tensão a 700-2700°C para obter um alto módulo da fibra através da orientação longitudinal dos planos das fibras.

Fibra de Carbono de PITCH (piche):

As fibras de carbono são feitas a partir da obtenção de fios de fibra de carbono, após fusão do piche; opção bastante interessante por causa do seu alto teor de carbono e do seu relativamente baixo custo dos materiais iniciais.

A fabricação da fibra de carbono do Piche se divide em quatro etapas:

1º) Preparação do Piche: É um ajuste no peso molecular, na viscosidade, e na orientação da estrutura cristalina para girar e adicionar mais calor.

2º) Fiação e extração: Neste estágio, o Piche é convertido em filamentos, com alguns alinhamentos nos cristais para obter características direcionais.

3º) Estabilização: Nesta etapa, algum tipo de termofixo é utilizado para manter a forma do filamento durante a pirólise. A temperatura da estabilização está entre 250 e 400°C.

4º) Carbonização: A temperatura de carbonização está entre 1000-1500°C para a obtenção dos filamentos.

Estas fibras são caracterizadas devido à um grande número de pequenas esferas na sua estrutura, cada esfera tem um diâmetro médio equivalente de 0.03 a 1 mm e uma orientação quase unidirecional de camadas entrelaçadas de carbono. Estas estruturas apresentam um formato geométrico do tipo mosaico na secção de área das fibras de carbono. As camadas entrelaçadas de carbono de cada esfera são orientadas no sentido das camadas entrelaçadas na direção das esferas de carbono vizinhas.

Fibra de Carbono do Piche isotrópico:

O piche isotrópico ou o piche de cloreto polivinil derretido, é fundido e torcido com altas taxas de tensão para alinhar as moléculas paralelas à linha central da fibra. A fibra é refrigerada e oxidada com uma baixa temperatura (< 100°C). A oxidação é feita por um processo bem lento, para assegurar a estabilização e a ligação cruzada das fibras. Este processo não é industrialmente atrativo, devido à longa etapa da oxidação, e somente as fibras de carbono de baixa qualidade com nenhuma grafitação são produzidas. Como exemplo estes tipos de fibras são usadas como enchimentos em materiais de isolamento térmica.

O alto peso molecular do piche, principalmente de natureza anisotrópica, são referenciados como piche mesofásico. O precursor do piche é tratado termicamente acima de 350°C para convertê-lo em piche mesofásico, que contém ambas fases isotrópicas e anisotrópicas. Devido a ocorrência da sua tensão de cisalhamento, durante a obtenção dos fios, as moléculas da mesofase se orientam paralelas ao eixo central da fibra. A fibra é carbonizada a temperaturas até 1000°C. A principal vantagem deste processo é que nenhuma tensão é exigida durante o processo de estabilização ou de grafitação, caso contrário do Rayon ou dos precursores do PAN.

2.3.3 Propriedades

No geral, vê-se que a maior tenacidade da fibra de carbono se dá em função da tensão de tração do material constituinte da fibra de carbono. A tensão de tração e o módulo de rigidez são obtidos pela carbonização sob tensão, e o alto módulo de rigidez das fibras em função das estruturas cristalinas dispostas na fibra com os planos orientados paralelamente ao longo dos filamentos da fibra. Por enquanto, a resistência da fibra de carbono depende do tipo de material precursor, das condições do processo, de temperatura do tratamento de calor e da presença de falhas e defeitos. Baseado nas fibras de carbono do PAN, a resistência aumenta até um máximo de temperatura de 1300°C e então diminui gradativamente.

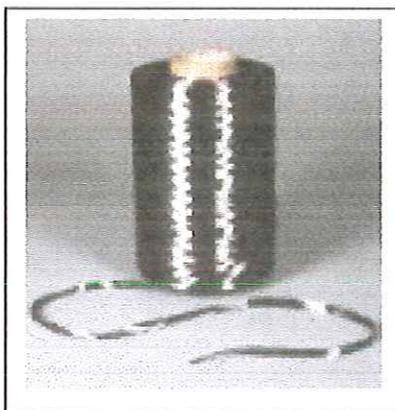


Figura 2 – Bobina de fio de fibra de carbono.

Fonte: Carbon Fiber (2003).

2.3.4 Aplicações

As principais aplicações das fibras de carbono estão na tecnologia empregada, que inclui a engenharia aeroespacial, a engenharia aeronáutica, a nuclear, e a engenharia de transportes gerais, que inclui componentes da engenharia, tais como os rolamentos, as engrenagens, as cames, as pás do ventilador e os corpos do automóvel. Recentemente, algumas novas aplicações das fibras de carbono foram

descobertas. Como exemplo, a reabilitação estrutural de uma ponte, na indústria de edificações e na indústria de construção civil; decoração nos interiores automotriz, marinhos, estruturas de aeronaves e de automóveis; no entretenimento geral; nos instrumentos musicais, etc. A alta condutividade elétrica fornece uma nova área de aplicação. A Tabela 3 ilustra algumas das características e as aplicações fibras de carbono.

A produção de fibras com tamanho de diâmetro pré-determinado permite, que estas fibras possam ser convertidas na forma de fios em uma ampla variedade de formas têxteis, de tecidos unidirecionais e bidirecionais e também de materiais não têxteis. A figura a seguir ilustra o avanço tecnológico da fibra de carbono, na área aeroespacial.

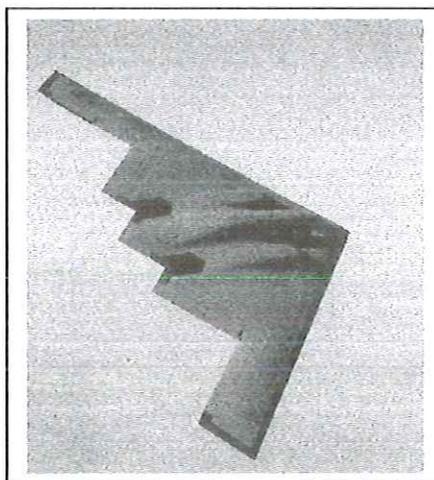


Figura 3 – Aeronave F-117A: Estrutura em fibra de carbono.

Fonte: DANIEL, I.M. (1994).

Tabela 3: Características e aplicações da Fibra de carbono

Características e Aplicações das Fibras de Carbono	
1. Resistência do material, dureza específica, baixo peso;	Aeroespacial, rodas e transporte marítimo, esportes em geral;
2. Alta estabilidade dimensional, baixo coeficiente de expansão térmica, e baixa abrasão;	Equipamentos de áudio, alto-falantes para equipamentos de som, estruturas para caminhonetes, braços de robôs;
3. Resistente à vibração, resistência do material, e dureza do mesmo;	Equipamentos de áudio, alto-falantes para equipamentos de som, estruturas para caminhonetes, braços de robôs;
4. Condutividade elétrica;	Capotas automotivas, ferramental, embalagens e bases equipamentos eletrônicos, proteções EMI e RF, escovas;
5 Biologicamente inerte e permeabilidade do raio-x;	Aplicações médicas em próteses e em órteses, equipamentos cirúrgicos e raios-X, implantes, reparos em tendão / ligamentos;
6. Resistente à fadiga, auto-lubrificável;	Maquinário têxtil, engenharia em geral;
7. Quimicamente inerte, alta resistência à corrosão;	Indústria química; área nuclear; válvulas, selos, e componentes de bomba em plantas de projeto;
8. Propriedades eletromagnéticas;	Grandes anéis de retenção em geradores, equipamento radiológico;

Fonte: Carbon Fiber (2003).

2.3.5 Fibras de Carbono – Propriedades Mecânicas

As propriedades das fibras são apresentadas no gráfico a seguir. Pode-se afirmar que as propriedades do compósito são derivadas das propriedades da fibra e da resina, elas se interagem, utilizando as propriedades dos materiais constituintes, das frações volumétricas, da rigidez, etc.. A seguir o diagrama apresenta uma comparação básica dos tipos principais da fibra quando usadas como preregs de epóxi de alto-desempenho.

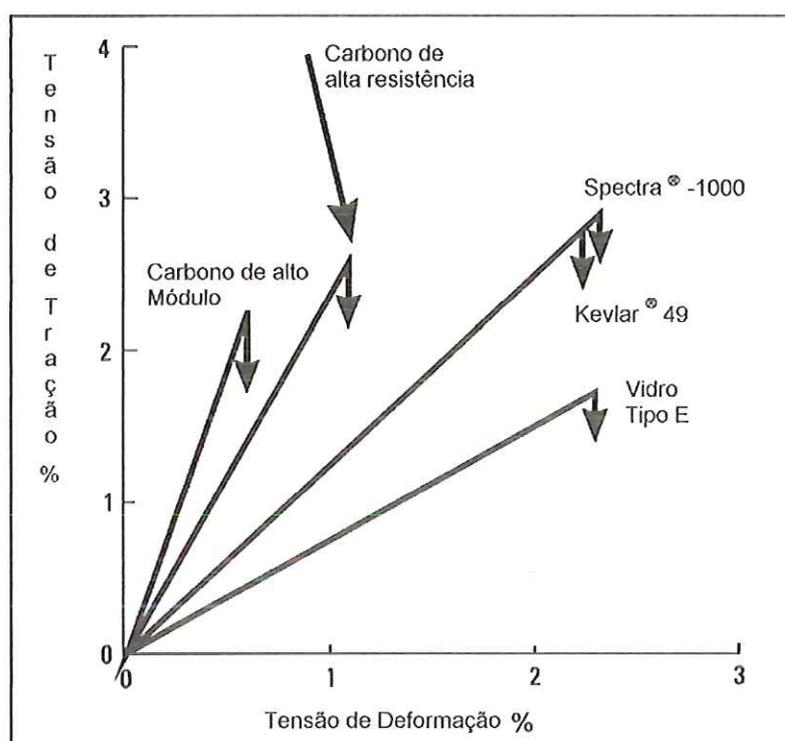


Figura 4 - Gráfico tensão x deformação para fibras avançadas

Fonte: JANG, B.Z. (1994)

Este gráfico apresenta a resistência dos diferentes tipos de fibras nos compósitos. Cada curva indica também a rigidez (módulo) do compósito; a maior inclinação, com a menor deformação representa a maior rigidez. O gráfico mostra também algumas fibras, tais como a kevlar, e podem apresentar propriedades

diferentes quando submetidas à compressão e flexão comparada com o carregamento de tração.

Uma função primordial a se considerar na utilização do reforço é de suportar os esforços a que são submetidos. Uma característica importante a ser analisada em projetos com materiais compósitos é a orientação de como é direcionada a fibra, desde a sua forma básica (fio), até na sua forma têxtil (tecido), para ser incorporada no compósito e, conseqüentemente, no componente no qual este material será empregado. Assim, as propriedades mecânicas do compósito também dependem da fração volumétrica da fibra, da forma que o reforço é utilizado (manta, fio ou tecido) e da forma pela qual o compósito será processado.

As fibras em geral, na forma de fios e mantas, se caracterizam por fornecer reforços apenas na direção que já estão dispostas, já os tecidos se caracterizam por ter orientações nos seus fios (fibra contínua) permitindo reforços em duas direções e, finalmente os fios de fibras picadas produzem na sua grande maioria reforços aleatórios, conforme já ilustrado na Figura 5. Portanto, o arranjo pode ser unidirecional, bidirecional ou aleatório. Os dois últimos possuem características de anisotropia, ou seja, suas propriedades dependem das direções do reforço no produto final (ENGINEERED MATERIALS HANDBOOK, 1987).

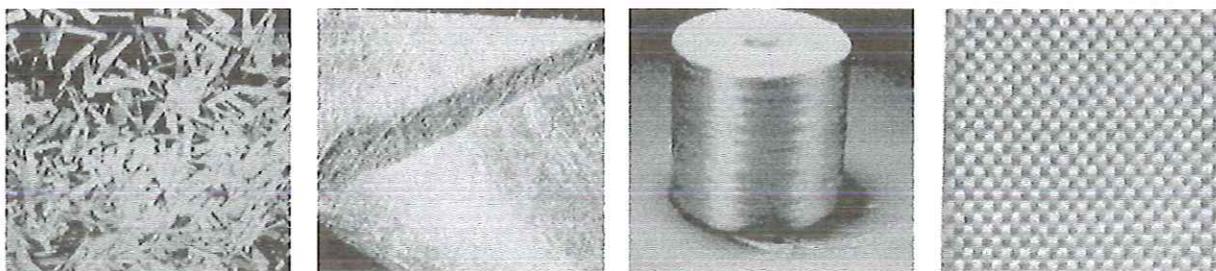


Figura 5 - Tipos de Agentes de reforços

Fonte: AGARWAL, D.B.; BROUTMAN, L.J. (1990).

A orientação da fibra é então escolhida, levando em consideração as direções dos esforços que atuam no componente. Outro aspecto a ser considerado é o

comprimento da fibra, que caracterizará a rigidez de um compósito reforçado. Isto ocorre porque a rigidez do laminado depende diretamente da magnitude de tensão que a matriz consegue transmitir para as fibras. Tal fenômeno de transmissão de carregamento é função do comprimento das fibras e da adesão da mesma à matriz.

Das inúmeras fibras existentes, a fibra de carbono é uma das mais utilizadas tanto na forma de fios como na forma de tecidos. Isto se deve basicamente às suas propriedades mecânicas serem superiores a dos metais. A Tabela 4 traz algumas propriedades da fibra de carbono e de outras fibras que possuem custos mais elevados.

Tabela 4: Propriedades de fibras utilizadas em compósitos

Fibra	Densidade ρ (10^6 g/m^3)	Módulo de Young da fibra- E_f (GPa)	Resistência à Tração da fibra- σ_{tf} (MPa)
Fibra de Vidro (tipo E)	2,54	70	2200
KEVLAR 49	1,45	130	2900
SiC (Nicalon)	2,60	250	2200
Alumina	3,90	380	1400
Boro	2,65	420	3500
Carbono	1,86	380	2700

Fonte: MATTHEWS & RAWLINGS (1994)

Tais propriedades tornam as fibras de carbono muito mais atrativas para a produção de compósitos principalmente com fibras contínuas. Desta forma, o presente trabalho analisará o comportamento da fibra de carbono contínua como material reforçante, não descartando, porém, a avaliação de outros reforços.

Interface Fibra com Matriz

Um ponto que merece grande atenção está relacionado à interação das fibras com a matriz. Para garantir que os esforços sejam transmitidos de uma fase para a outra, deve-se propiciar uma forte adesão entre a fibra de carbono (material

inorgânico) e a matriz epoxídica (material orgânico). Caso não haja esta forte interação, o material ficará sujeito a falhas, tais como delaminações, e estará sujeito à propagações de trincas em maiores escalas (SIERAKOSWKI, 1997). Este fato influencia diretamente na escolha dos materiais a serem empregados, pois a combinação de quaisquer fases, nem sempre propiciará a interação adequada fibra-matriz, sendo as vezes necessário um tratamento superficial nas fibras, para que estas interajam fortemente com as matrizes.

Como já foi mencionado, o material compósito possui geralmente propriedades superiores aos materiais ditos convencionais, portanto, se faz necessário saber como determiná-las.

2.4 Propriedades de compósitos

Os compósitos estruturais laminados são constituídos por um conjunto de lâminas (ou camadas) empilhadas. Por conseguinte, uma lâmina de compósito é constituída de um conjunto de reforços envolvidos por uma matriz polimérica. Inicialmente, tem-se que os reforços podem estar orientados ou distribuídos aleatoriamente, fazendo com que os compósitos possuam uma inerente anisotropia, ou seja, a presença de propriedades mecânicas, físicas, térmicas e elétricas, diferenciadas direcionalmente ao longo do material. No entanto, a anisotropia pode trazer benefícios, pois permite ao projetista utilizar as propriedades do material juntamente com as características, geométricas e funcionais da peça, com o objetivo de se obter um desempenho desejado, sendo possível projetar o material de acordo com os carregamentos aplicados (VINSON & SIERAKOWSKI, 1987). Com isso, surgem teorias que visam estimar ou quantificar as propriedades elásticas dos materiais compósitos, tais como: módulos de Young, módulos de cisalhamento e coeficientes de Poisson. Na literatura, são encontrados basicamente dois métodos:

- Determinação das propriedades mecânicas através de métodos teóricos (analíticos e numéricos);

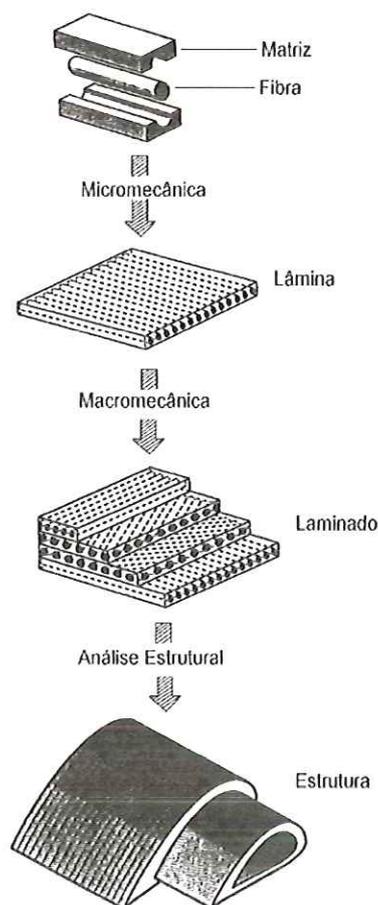
- Determinação das propriedades mecânicas através de métodos experimentais (ensaios laboratoriais);

2.4.1 Determinação das propriedades mecânicas através de métodos teóricos (analíticos e numéricos)

VINSON & SIERAKOWSKI (1987) analisaram os materiais compósitos sob dois aspectos: micromecânico e macromecânico. Pela Figura 6 é possível verificar que a abordagem micromecânica trata-se da fração volumétrica e das propriedades do reforço, bem como da matriz que serve para caracterizar a lâmina não levando em conta a estrutura interna dos elementos que a constituem. Portanto, as matrizes poliméricas (resinas) e as fibras são analisadas e interpretadas como materiais homogêneos e isotrópicos.

2.4.2 Determinação das propriedades mecânicas através de métodos experimentais (ensaios laboratoriais)

Segundo WHITNEY et al (1984) é freqüentemente desejável obter as propriedades dos materiais constituintes (fibra e resina) através de ensaios padronizados pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Assim, as fibras podem ser caracterizadas utilizando a ASTM D3878-95c e a matriz polimérica, utilizando a ASTM (1972). Entretanto, as fibras e as resinas sintéticas comerciais já foram caracterizadas pelos fabricantes. Sendo assim, o trabalho de caracterização apenas se faz necessário quando da utilização de fibras e resinas não-convencionais (exemplo: fibras e resinas naturais).



Níveis de observação e os tipos de análises para materiais compósitos

Figura 6 - Abordagem micromecânica e macromecânica

Fonte: DANIEL, I.M. (1994).

Como foi comentado anteriormente, pode-se determinar as propriedades mecânicas de uma lâmina tomando as propriedades mecânicas de cada constituinte. Entretanto, essas propriedades podem ser obtidas diretamente através da execução de ensaios mecânicos representativos efetuados em amostras com camadas unidirecionais, ou seja, a amostra é um laminado que é constituído por lâminas empilhadas com o mesmo ângulo de orientação. Tais ensaios visam a determinação das constantes elásticas fundamentais: módulos de elasticidade a tração e a

compressão longitudinais e transversais, módulo devido ao cisalhamento no plano da lâmina e o maior coeficiente de Poisson. Além disso, os ensaios caracterizam as cinco resistências apresentadas por uma lâmina: resistência a tração longitudinal e transversal, resistência a compressão longitudinal e transversal e resistência ao cisalhamento. Vale ressaltar que tal caracterização pode ser elaborada apenas com carregamentos aplicados no plano da amostra (lâmina). Entretanto, um laminado em serviço sofre a ação de carregamentos combinados, sendo assim necessário também caracterizar a lâmina frente a carregamentos de flexão.

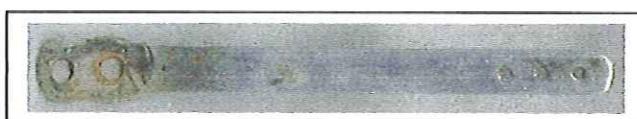
Agarwal e Broutman (1990) mostram que vários testes para compósitos estão sendo padronizados e aperfeiçoados pela ASTM. Um exemplo disso é a norma ASTM D3039/D3039M – 95a, que através de um ensaio de tração uniaxial possibilita a identificação dos módulos de elasticidade e as resistências transversal e longitudinal bem como o coeficiente de Poisson.

No presente trabalho, será utilizada norma ASTM D790-96a para realizar um ensaio de flexão 3-pontos com o intuito de analisar o comportamento de uma componente de uma órtese de membro inferior (perna – pé), Figura 2.7, mediante carregamento estático uniaxial. Os resultados deste ensaio serão apresentados através de gráficos de tensão x deformação e comparados com o ensaio da mesma componente da órtese feita de Alumínio.

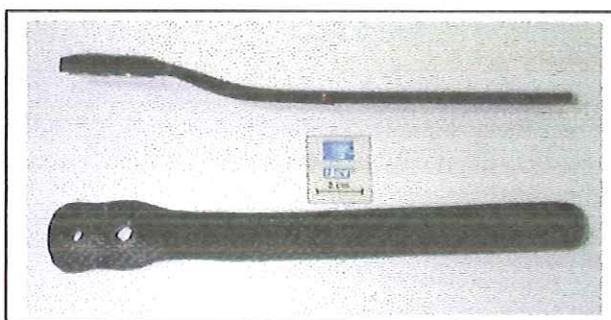
Além desses aspectos, Carvalho (1996) descreveu mais algumas particularidades relacionadas aos ensaios mecânicos em compósitos, tais como:

- Os ensaios mecânicos que são executados para a determinação de propriedades mecânicas dos materiais estão fundamentados na aplicação de teoria básica de mecânica. Tal teoria é aplicada satisfatoriamente para materiais elásticos homogêneos e isotrópicos, o que não é o caso em compósitos reforçados com fibras, onde a não homogeneidade, a anisotropia e a não elasticidade dificultam a aplicação de tais conceitos.
- Surgem grandes dificuldades na execução dos ensaios devido:

- à influência de efeitos de borda (“*end-effects*”) que promovem regiões de concentração de tensão próximas às arestas da amostra;
- à geração de níveis de carregamento adequados sem causar danos ao material;
- ao uso de dimensões apropriadas (em particular espessura), em relação à escala de heterogeneidade do material;



a) Componente da órtese em Alumínio;



b) Componente da órtese em Fibra de Carbono;

Figura 7 - Componente da órtese em estudo.

Fonte: O autor

- A anisotropia propicia alguns problemas, tais como:
 - agrava os efeitos de borda (“*end-effects*”), que dependem da geometria da amostra (“*specimen*”) e do grau de anisotropia;
 - gera falhas prematuras em fixações ou em pontos de aplicação de carga;
 - promove delaminações prematuras em arestas vivas (“*free edges*”) ou aparecimento de outros mecanismos de falha;

- aumenta a diferença entre as propriedades do material, como por exemplo, módulo à tração, que é governado pelas propriedades da fibra e módulo ao cisalhamento, governado basicamente pelas propriedades da matriz.
- Os testes em compósitos são geralmente de alto custo pois:
 - os materiais são na sua maioria caros;
 - a fabricação de amostras e corpos de prova demanda atenção meticulosa à detalhes;
- Em determinados casos, normas (ASTM, ISO, DIN, etc.) podem ser bastante adequadas; enquanto que em outros podem ser totalmente inadequadas.

Verifica-se, pela literatura consultada, que há uma gama de comentários a serem feitos com relação à execução de ensaios mecânicos em compósitos. Entretanto, neste momento, torna-se pertinente apresentar como os resultados obtidos em ensaios laboratoriais, ou através de modelos teóricos, são utilizados em uma análise estrutural de um laminado completo.

2.5 Método dos Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos (MEF) é um método matemático e computacional que serve para analisar problemas do contínuo.

Este método pode ser interpretado como um processo matemático que calcula, com precisão, deslocamentos, esforços e tensões atuantes em peças estruturais. O método permite que a peça em estudo tenha forma geométrica, carregamentos e condições de contorno quaisquer. O que ocorre é uma semelhança física entre o modelo gerado por FEA (Finite Element Analysis) e a situação física real, não sendo apenas um simples modelo de uma abstração matemática, difícil de ser visualizada.

O método é válido para estudos estáticos, dinâmicos, harmônicos, fluidos, elétricos, magnéticos, térmicos, flambagem, etc...

2.5.1 Áreas de Aplicação

Inicialmente o MEF foi usado em cálculo estrutural (a partir da década de 60), e hoje é largamente aplicado em problemas de campo (calor, fluidos, campo elétrico e magnético), e problemas estruturais mecânicos.

Aplicados em esforços concentrados, distribuídos, pressão em linha e superfície, distribuição uniforme e gradiente.

O emprego deste método se faz valer em todos os tipos de materiais isotrópicos, ortotrópicos, não-lineares, variáveis com temperatura e fadiga.

Algumas das análises que podem ser executadas por softwares que utilizam o método de elementos finitos são:

- estática linear de tensões e deformações (edifícios, pontes, torres, componentes mecânicos em geral, tubulações industriais, etc...);
- dinâmica (modos de vibração e frequências naturais);
- não linear de tensões e deformações (conformação, grandes deformações,.);
- térmica (transmissão de calor em regime permanente e transiente);
- tensões devido ao carregamento térmico (tubulações industriais);
- escoamento de fluídos (aerodinâmica, hidrodinâmica);
- campos elétricos (condutores, isolantes, eletrodeposição e corrosão) e magnéticos.

2.5.2 Nomenclatura

O modelo é gerado através de pontos (*keypoints*), linhas (*lines*) e áreas (*areas*). O modelo por elementos finitos é composto por elementos (*elements*) conectados entre si por nós (*nodes*), formando a malha (*mesh*) de elementos finitos, conforme a Figura 8.

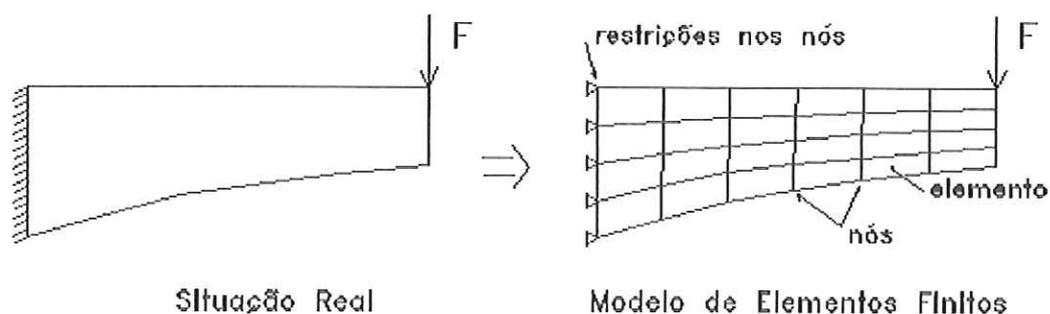


Figura 8 - Modelo de Elementos Finitos

Fonte: SIMULAÇÃO computacional (2003)

No caso de tensões e deformações cada nó possui até 6 Graus de Liberdade (*Degrees of Freedom*), ou GL's (DOF's), em relação ao sistema de coordenadas cartesianas globais, dependendo do tipo de elemento a ser utilizado. Um grau de liberdade é a possibilidade que um nó tem de rotacionar ou transladar em relação a um eixo coordenado.

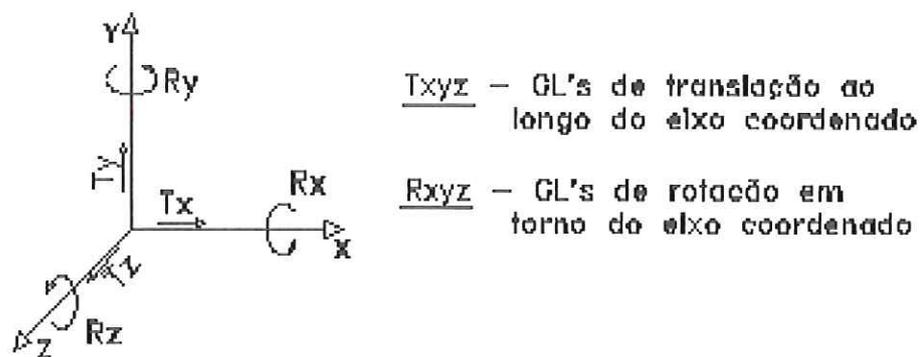


Figura 9 - Graus de liberdade de um nó

Fonte: SIMULAÇÃO computacional (2003)

2.5.3 Método Matemático

Os engenheiros civis foram os primeiros a utilizarem a análise por elementos finitos (FEA), conhecidos como "Método de Análise Matricial de Estruturas". A divisão da estrutura em elementos era quase natural, principalmente em treliças e vigas rebitadas ou soldadas. A estrutura real é transformada matematicamente numa série de elementos do tipo "mola". A relação matemática que descreve Força x Deslocamento para uma única mola é conhecida como a lei de Hooke:

$$F = K * x$$

Onde: F = força

K = constante de rigidez da mola

x = deslocamento

Se colocarmos uma proteção imaginária na "mola", nós a chamaremos "Domínio", e perguntaremos quais são as influências externas. Isto mostrará que as

influências externas são as forças encontradas nos nós. A resposta para a força é a deflexão.

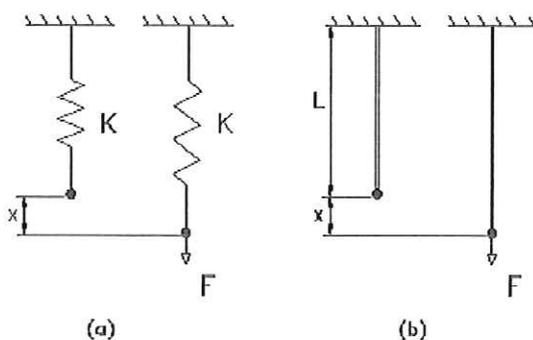
Sumariamente, as influências externas, neste caso as forças, produzem as incógnitas primárias, os deslocamentos. Considere este "domínio" como um sistema de entrada e saída. Como exemplo de aplicação do método em tensão/deformação considere o exemplo a seguir:

Na Figura 1.3 (b):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \rightarrow \text{Tensão}$$

$$\sigma = E * \epsilon \quad \rightarrow \text{Lei de Hooke}$$

$$\epsilon = \frac{x}{L} \quad \rightarrow \text{Deformação}$$

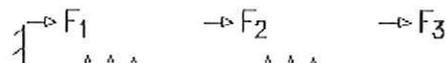


Então:

$$F = \frac{E * A}{L} * x \Rightarrow \frac{E * A}{L} = K$$

Onde: K = constante de rigidez da barra

Sistema de equações que representa a situação da Figura 1.4:



$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} \quad \{F\} = [K] * \{x\}$$

Onde K é a Matriz de Rigidez.

A variável primária (o vetor deslocamento) é resolvida pela inversão da matriz K :

$$\{x\} = [K]^{-1} * \{F\}$$

O exemplo das molas é um tanto quanto elementar. A estrutura de uma ponte é um exemplo melhor, modelado com um conjunto de treliças.

A treliça permite deslocamentos em duas direções (u e v) em cada nó. Neste caso a matriz de rigidez do modelo é uma matriz de 4 x 4. Quando os elementos ficam mais complexos, a matriz de rigidez também se torna mais complexa. Para elementos simples a matriz de rigidez pode ser escrita por meio de expressões analíticas. Para elementos mais complexos eles são freqüentemente avaliados numericamente.

Para uma análise por elementos finitos a chave teórica é achar e resolver estas matrizes. Em softwares comerciais a solução desta matriz é transparente ao usuário. Geralmente estes programas comerciais oferecem uma ampla biblioteca de elementos para os quais eles podem montar e resolver a matriz de rigidez. Uma vez selecionado um elemento, todo o sistema, ou a equação principal, é montado. A montagem é feita pela inserção do elemento matricial na respectiva linha e coluna da matriz. Este processo de montagem é facilmente efetuado pelo computador. Finalmente, a equação principal é resolvida para incógnita primária, o vetor de deslocamento, {d}:

$$\{d\} = [K]^{-1} * \{F\}$$

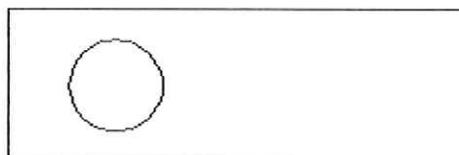
Simbolicamente, nós mostramos isto pela inversão da matriz $[K]$. Porém, na prática, a maioria dos softwares com programas comerciais usam métodos mais complexos de solução.

2.5.4 Implementação Computacional

PRÉ-PROCESSAMENTO

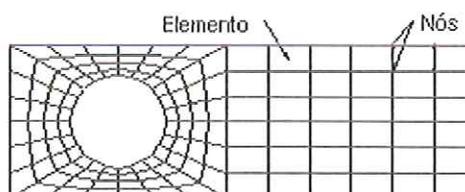
Modelamento:

Consiste no desenho em CAD da estrutura a ser calculada. Pode ser executado no próprio programa ou importado de outros CAD's:



Malha de elementos finitos:

Consiste na discretização da estrutura, ou seja, a sua divisão em elementos conectados por nós:



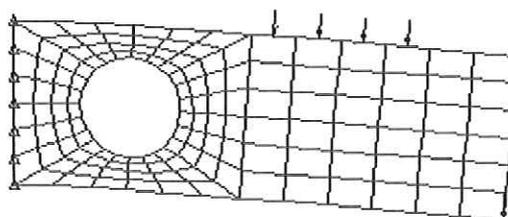
Condições de Contorno:

Restrições - definem como a estrutura se relaciona com o meio externo (vinculações).

PÓS-PROCESSAMENTO

Deslocamentos:

Pode ser visualizada a estrutura deformada ou um mapa com faixas coloridas de deslocamentos. Pode-se conhecer também os deslocamentos individuais de cada nó, com o mouse ou por meio de listagens:

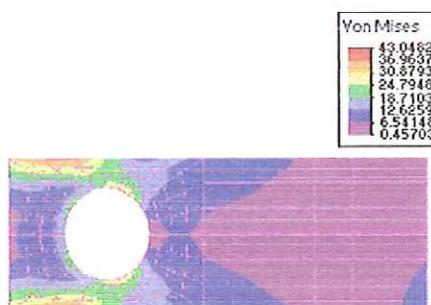


Tensões:

As tensões podem ser visualizadas (na forma de mapas com faixas coloridas), nas direções principais, os valores máximos e mínimos principais (fadiga), ou de acordo com os critérios de resistência de von mises ou tresca.

Concentração de Tensões:

Podem ser visualizadas as regiões de maior concentração de tensões, que durante a vida útil da estrutura estarão mais propensas a apresentarem trincas (permitindo escolher futuros pontos de inspeção).



2.6 Órteses

2.6.1 Definição de Órtese

Para entender o que vem a ser uma órtese, é necessário que também se entenda o porquê de se estar utilizando este aparelho de reabilitação motora, no auxílio à pessoas (crianças e adultos), em um pronto restabelecimento tanto dos movimentos dos membros superiores, quanto inferiores. Algumas definições de órteses:

- Uma definição técnica para órtese é ser uma peça ou um aparelho de correção ou complementação de membros ou órgãos do corpo.

- Outra definição de órtese afirma que são aparelhos utilizados para correção de membros ou para melhorar sua função numa pessoa portadora de deficiência. Com relação às próteses uma definição básica é que são aparelhos utilizados para substituição de membros ou órgãos do corpo.

- Uma definição mais geral de uma órtese é um aparelho utilizado na parte externa do corpo do ser humano; para auxiliar ou até mesmo melhorar a mobilidade nos membros (inferiores e superiores) e as suas funções.

- Pode-se definir órtese como um exoesqueleto que, aplicado a um ou vários segmentos do corpo humano, tem a finalidade de proporcionar o melhor alinhamento possível, buscando sempre a posição funcional do aparelho. Adequar a órtese a uma determinada parte do corpo auxilia na redução da fadiga, facilita a recuperação do complexo musculotendíneo e das articulações afetadas, proporcionando melhora da função locomotora remanescente.

Pode-se afirmar que a confecção de órteses é uma fusão de técnicas e conhecimentos entre ciência e arte. Embora esta aprendizagem seja mais um dos recursos de tratamento, à disposição do fisioterapeuta e de pessoas especializadas na confecção das órteses, existem poucos profissionais que se envolvem com este tipo

de trabalho. Por isso, é importante destacar a importância destes profissionais na abordagem deste tema, através de um estudo resumido de seus princípios de aplicação e do manuseio dos materiais utilizados.

São necessários conhecimentos específicos de patologia, fisiologia, anatomia, cinesiologia, biomecânica, mecânica, ciências dos materiais, resistência dos materiais, plásticos reforçados para a correta fabricação da órtese de cada paciente. Além disso, é de suma importância avaliar e considerar o seu aspecto estético.

O mais importante, no entanto, é ter sempre em mente que cada paciente é diferente, necessitando de uma órtese personalizada. Atualmente, os diferentes termos utilizados para órtese têm sido usados como sinônimos, embora tecnicamente, o termo refira-se a um aparelho de uso permanente.

2.6.2 Classificação das Órteses

Os aparelhos de órteses têm sido cada vez mais aperfeiçoados no que diz respeito ao tipo de material empregado para sua confecção, aos projetos com aplicação de conceitos de ergonomia, além das inovações que podem ser aplicadas aos aparelhos já existentes.

As órteses podem ser divididas em órteses baixas (estendendo-se do pé até o terço superior da perna), e órteses altas (ultrapassam o joelho, chegando até a parte superior da coxa).

Órteses de Pé: São suportes removíveis para os pés, feitos de materiais variados, colocados no interior do calçado, para tratar os diferentes sintomas e deformidades dos pés.

As órteses de pé podem ser macias, flexíveis quando feitas de couro, cortiça, borracha, polímeros moles, polímeros reforçados e espuma plástica. Comumente são usados para pés ulcerados, artríticos e isquêmicos hipoestáticos. E também podem

ser rígidas ou semi-rígidas, feitas de polímero sólido que permite flexibilidade mínima. (DELISA, 1992).



Figura 2.10 - Órtese para o pé

Fonte: PRODUTOS ortopédicos. (2003).

As razões pelas quais deve-se utilizar estes aparelhos, entre outras, é a de satisfazer as necessidades clínicas do paciente. Outras razões são as condições neurológicas que podem alterar os padrões de movimento, devido a uma lesão cerebral, devido a uma paralisia cerebral, devido a distúrbios cerebrais ou do tronco cerebral, como na doença de Parkinson, déficits sensitivos que geralmente se caracterizam por movimentos não coordenados.

As razões mais importantes para prescrevê-las são aquelas que proporcionam:

- 1- Estabilidade mediolateral do tornozelo durante a fase de apoio;
- 2- O recolhimento dos artelhos durante a fase de balanceio para impedir arrasto dos mesmos, tropeções e quedas;
- 3- Simulação da impulsão durante a fase final de apoio, aproximando-se assim de uma marcha mais normal e reduzindo o gasto de energia;
- 4- Para impedir o desenvolvimento de deformidade.

Órtese de Tornozelo: São prescritas mais para fraqueza muscular que afeta o tornozelo e articulações, correção de deformidades do pé e tornozelo e redução das

forças de sustentação do peso. Além dos efeitos mecânicos sobre o tornozelo as órteses de tornozelo - pé também podem afetar a estabilidade do joelho, variando o grau de dorsiflexão¹ ou flexão plantar. (DELISA, 1992).



Figura 11 - Órtese para o tornozelo

Fonte: PRODUTOS ortopédicos. (2003).

Embora as órteses de metais ainda sejam prescritas, as órteses poliméricas são mais comuns; geralmente elas se estendem desde a planta do pé, sem um mecanismo de junção, até a parte superior da panturrilha.

Órtese metálica curta vem sendo utilizada há muitos anos no tratamento dos problemas com os membros inferiores, sobretudo em crianças portadoras de paralisia cerebral. Sua aplicação, com uma tira dianteira, baseia-se no sistema de contenção de três pontos, na qual a faixa para a panturrilha e as hastes metálicas da parte traseira do calçado se opõem à força anterior, exercida pela tira dianteira de couro que se encontra ao nível da articulação talocrural.

¹ Dorsiflexão: (Flexão para o dorso, Flexão ou curvatura do pé em direção à perna).

Órtese de material polimérico apresenta componente destinado ao pé e outra para a perna, sendo contínuas ou divididas em duas peças como no caso da órtese articulada .

Órtese sólida do tipo padrão impede os movimentos da articulação do tornozelo, costuma ser ajustada na 2ª e 3ª flexão dorsal. Destina-se a melhorar a postura em flexão plantar, tão freqüente nos casos de paralisia cerebral. Controla bem o alinhamento do pé.

Órtese com bloqueio recíproco é confeccionada em material polimérico, mas o componente destinado à perna cobre a face anterior da tíbia. Esse modelo de OATP é geralmente usado em crianças portadoras de paralisia cerebral, cuja postura se caracteriza pela flexão exagerada de quadris, joelhos e tornozelos.

Órtese de Joelho - Tornozelo - Pé: São prescritas a fim de proporcionar estabilidade ao joelho para sustentação do peso, na presença de uma fraqueza grave de membro inferior, devido a lesões do neurônio motor superior ou inferior. (DELISA, 1992).

Órtese tornozelo-pé padrão: os eretores se estendem até o joelho, onde se unem aos eretores da coxa. Caso os extensores do joelho estiverem fracos usa-se uma trava de joelho.

Órteses de Quadril - Joelho - Tornozelo - Pé: O aparelho ortopédico desse tipo pode ser usado no controle do movimento e do alinhamento em cada uma destas articulações, permitindo que a criança se mantenha em posição ereta contra a ação da gravidade e capaz de executar movimentos nessa posição. Esses aparelhos têm sido utilizados geralmente nos pacientes que apresentam paraplegia congênita ou adquirida.

O modelo convencional possui articulação ao nível dos quadris e uma faixa na cintura ou na altura da pelve, que se encontra presa às varas verticais externas da órtese. Além dos componentes já descritos, anteriormente, apresenta uma junta de quadril travável, presa a uma faixa pélvica, para controlar movimentos na articulação anatômica do quadril.



Figura 2.12 - Órtese para Quadril, joelho, tornozelo e pé.

Fonte: PRODUTOS ortopédicos. (2003).

Neste tópico o intuito é de rever os conceitos de órteses, sua aplicação, os tipos mais utilizados e uma possível aplicação de novos materiais (materiais compósitos), em alguma órtese já existente no mercado.

Neste trabalho estudaremos ÓRTESE LONGA P/ PERNA, indicadas em paralisias dos membros inferiores, apenas um componente da órtese, o qual se fixa no sapato ortopédico.



Figura 2.13 - Estrutura de órtese longa com cinto pélvico (perna direita).

Fonte: PRODUTOS ortopédicos. (2003).



De acordo com Sullivan: “O objetivo principal de uma órtese é ir ao encontro das necessidades básicas funcionais de um paciente com deficiência locomotora, enquanto fornece uma mínima restrição aos movimentos”. As necessidades funcionais que podem ser superadas pela utilização de uma órtese são:

- Estabilizar a situação do membro lesionado, ou deficiente;
- Reduzir a dor e a deformidade do membro lesionado, ou deficiente;
- Melhorar a função, ou proteger o membro lesionado, ou deficiente;

Uma órtese pode ter também mais do que um objetivo, por exemplo, uma órtese de tornozelo – pé que dá uma dorsiflexão assistida, enquanto estabiliza a articulação do tornozelo, protegendo-o contra algum trauma. Já se sabe que o ato de “deambular”,² com uma deficiência motora não corrigida, ou uma deficiência motora congênita, requer um gasto energético maior do que o normal.

A utilização de uma órtese irá, com certeza, reduzir esta energia gasta para andar, mesmo que possa ultrapassar o gasto energético de uma pessoa ausente destas deficiências.

As órteses são conhecidas por vários termos e vários nomes por vários anos. Exemplificando: as órteses destinadas à parte inferior da perna, com objetivo de auxiliar na dorsiflexão, é mais conhecida como órtese curta de perna, órtese abaixo do joelho, órtese de dorsiflexão assistida e órtese de Klenzak. Este sistema de vários termos gera uma certa confusão. Então, a partir de 1974, uma nova terminologia e um novo sistema de prescrição para as órteses foram criados e adotados para serem utilizados regularmente. Tal norma utiliza uma combinação simples de letras, para se definir articulações a serem controladas por uma órtese.

² Deambular: (Passear, Vaguear, Fazer mover-se em passeio).

2.6.3 Constituintes de uma Órtese

Os componentes mais comuns para órteses de metal são entre outros suportes, coletes, bandas tiras e revestimentos.

Os suportes ou hastes são peças que possuem formato longitudinal, que partem de um ponto proximal para outro distal da órtese; sua espessura frequentemente é bem menor que o seu comprimento. O propósito do suporte é de encaixar a parte do corpo a ser controlada pela órtese, e pode ser colocado na lateral, posterior ou anteriormente. São produzidos também com a finalidade de se adaptarem aos contornos das partes que eles se encaixam, sem exercer muita pressão sobre as regiões ósseas adjacentes aos tecidos moles e aos nervos superficiais.

Outros propósitos destes componentes das órteses são:

- Manter as órteses fixas no corpo do paciente;
- Exercer uma contra pressão para manter um alinhamento adequado;
- Dar apoio e controlar a deformidade do paciente;

2.6.4 Componentes e terminologia

O que se pode julgar essencial na construção de uma articulação é o seu acabamento bem adequado às necessidades, o que vai permitir o movimento mais apropriado e fornecer a aproximação mais real do movimento da articulação do ser humano.

O fisioterapeuta deve conhecer o alinhamento mais adequado das articulações da órtese. Dentre as linhas base mais importante veremos o seguinte:

1. As articulações mecânicas de tornozelo devem estar 0,6 cm acima ou abaixo da borda distal do maléolo medial.
2. A articulação mecânica do joelho deve estar 1,2 a 2,0 cm do platô medial tibial.

3. A articulação mecânica do quadril deve estar ligeiramente anteriorizada e um pouco acima do trocânter maior.

4. Todas as articulações mecânicas e suportes de metal devem ter um espaço de 0,6 cm entre o componente e o corpo.

Todas as órteses com articulação devem ter um mecanismo que controla a articulação.

Os métodos possíveis de controle são:

- a) Travas que restringem todo o movimento.
- b) Freios que restringem o movimento.
- c) Articulações livres que são controladas pela força muscular do paciente e que permitem um movimento de amplitude normal.
- d) Articulações assistidas que são controladas por forças dinâmicas integradas na estrutura interna.
- e) Controle pelo alinhamento.

TRAVA

Existem vários tipos de travas disponíveis para usar em órteses. Elas já são utilizadas para controlar o movimento na região do joelho. A mais comum é a trava de anel (Fig.14). Essa trava de anel é feita para encaixar, suavemente, no seu lugar, quando a articulação for alinhada em extensão. A trava pode ter várias opções, como a trava de extensão, o que torna o desengate da trava mais fácil, ou um botão retentor, o qual fixa a trava e evita o bloqueio, quando a restrição à deambulação se torna desejada.

FREIOS

Os freios são aparelhos internos construídos dentro das articulações do tornozelo (da órtese) para limitar o movimento. A restrição que há no movimento é obtida através de um pino, o qual é inserido no canal da articulação, ou por um sulco interno manufaturado, como parte de uma articulação de eixo simples. Um exemplo de freio comumente prescrito é aquele que restringe o movimento de flexão plantar. A articulação fica, então, livre para mover-se na dorsiflexão.

Os pinos são empregados para controlar a articulação do tornozelo e podem ser mudados a partir de uma articulação assistida para uma articulação restrita.

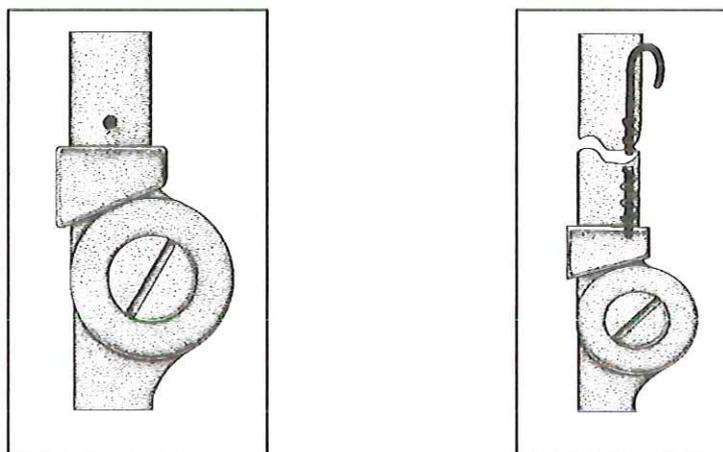


Figura 14 - Travas com botão retentor e de extensão;

Fonte: O'SULLIVAN, S.B.; CULLEN, K.E.; SCHMITZ, T.J. (1987).

ARTICULAÇÕES LIVRES

As articulações livres são articulações com ausência de controles e permitem uma maior amplitude de movimento para o paciente, chegando à amplitude normal, e é prescrita quando a intenção da órtese é proteger o movimento médio-lateral. Alguns exemplos de órteses que empregam articulações livres são as

denominadas órteses de joelho-tornozelo (tutor-longo), com uma trava de joelho livre, ou uma órtese de tornozelo-pé (tutor-curto), destinada para reduzir a instabilidade medial-lateral do tornozelo.

ARTICULAÇÕES ASSISTIDAS

As articulações assistidas são feitas para realizar um controle periódico na articulação do tornozelo para dar a dorsiflexão. Existem inúmeras maneiras de realizar esta assistência para estes tipos de articulações.

O movimento assistido é adquirido pelo esforço dinâmico de um componente de molas. Ao realizar um movimento que se descreva como um passo ou seja, de acordo com o conjunto tornozelo – pé completa o passo: desde o toque do calcanhar no chão, até o apoio total do pé no chão este mesmo componente de molas é mais solicitado. À medida que o peso do paciente é transferido sobre o pé, o componente de mola é liberado (menos solicitado) e o pé assume uma posição mais dorsifletida.

Essa assistência pode ser adquirida por uma mola dentro da articulação mecânica do tornozelo ou pela flexibilidade ou elasticidade do material a ser utilizado. No caso de órteses plásticas, a flexibilidade é controlada pela rigidez do plástico e pela concentração de material distribuída na região a ser solicitada.

CONTROLE PELO ALINHAMENTO

Um tipo de controle pelo alinhamento é articulação do joelho (Fig. 15). A articulação do joelho utiliza um conceito de prótese, porque o joelho é mais estável na extensão, pois a articulação da órtese longa é fixada posteriormente à linha de apoio do peso, para a seguir realizar a movimentação durante a fase livre de apoio. É necessário então que o paciente tenha a extensão total e forçada do joelho para adquirir condições de estabilidade, a qual caracteriza o componente da órtese.

A utilização da órtese com o joelho bloqueado permite reduzir o consumo energético em relação ao normal (joelho livre), por que a perna pode encurtar-se, ligeiramente, na fase de balanceio. Entretanto, é essencial que o paciente tenha a extensão total do joelho para adquirir estabilidade que caracteriza o componente da órtese.

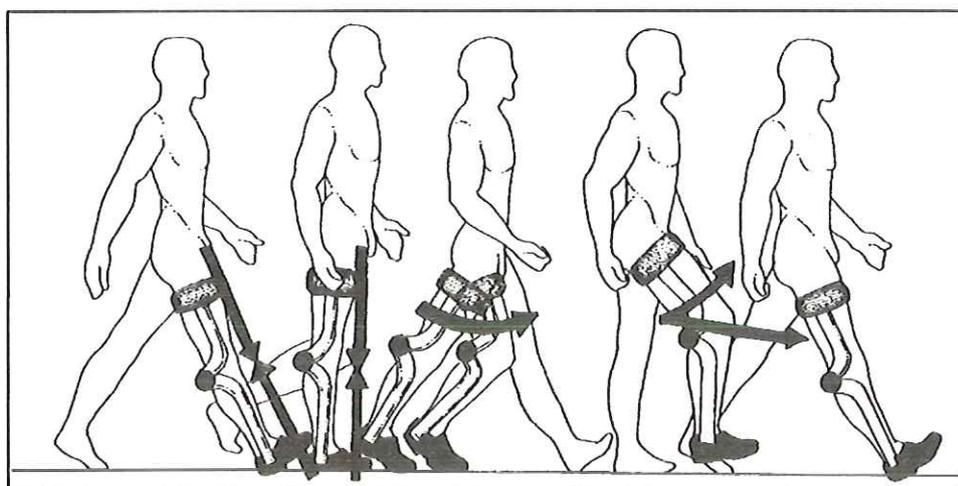


Figura 2.15 - Articulação do joelho com contra -peso.

Fonte: O'SULLIVAN, S.B.; CULLEN, K.E.; SCHMITZ, T.J. (1987).

FIXAÇÕES DE SAPATO

A órtese que possui tornozelo deve ser fixada ao sapato, ou deve ser aplicada ao sapato através de algum mecanismo. Portanto, nas órteses de metal podem ser fixadas aos sapatos por componentes como: o estribo sólido (Fig. 16), um estribo do tipo splint (Fig. 17), ou um estribo sólido com fixação por pinos, o qual faz parte deste trabalho (Fig. 18).

A desvantagem do estribo do tipo splint é de não permitir ajuste no ponto de fixação do mesmo à órtese, além de necessitar de ferramentas para dar o aperto após a união do estribo à órtese. O único ajuste então é na junção de geometria circular da órtese por meio de um sistema parafuso/ porca. O estribo de pinos se torna então o

mais prático de todos, pois permite facilmente a fixação e a remoção da órtese sem remover a bota ortopédica do pé, por exemplo.

Os estribos do tipo splint permitem que os sapatos sejam trocados.

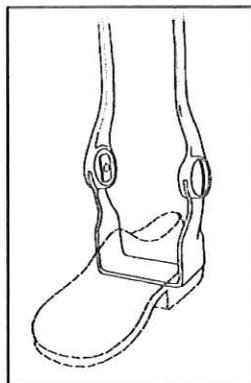


Figura 16 - Estribo sólido com de sapato

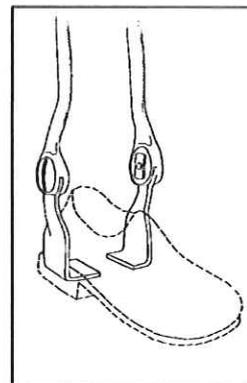


Figura 17 - Estribo do tipo splint fixação com fixação de sapato

Fonte: O'SULLIVAN, S.B.; CULLEN, K.E.; SCHMITZ, T.J. (1987).

Os aspectos fundamentais abordados sobre os mecanismos essenciais para utilização de uma órtese foram bem elucidados, mas falta relatar a aceitação do paciente para com este aparelho ortopédico, o qual será fixado no seu corpo e deverá conviver com o mesmo durante um período prolongado.

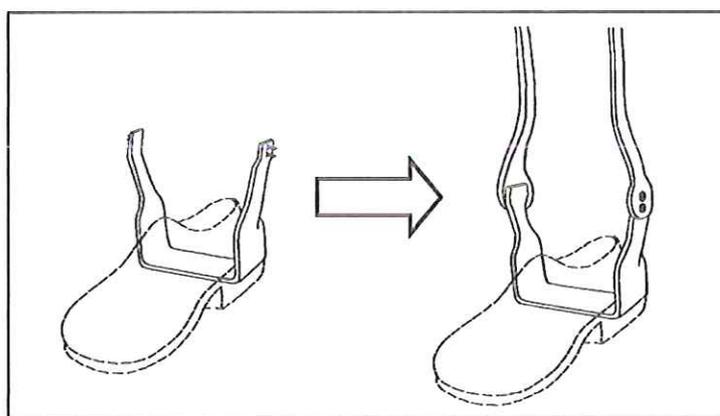


Figura 18 - Estribo sólido com fixação por pinos

Fonte: O'SULLIVAN, S.B.; CULLEN, K.E.; SCHMITZ, T.J. (1987).

Esta árdua tarefa fica a cargo do fisioterapeuta, pois é nele que o paciente depositará total confiança, com relação a deficiência que o mesmo possui ou adquiriu. Será periódica e rotineira a consulta que o paciente deverá fazer ao fisioterapeuta, para saber se o seu quadro clínico apresentou melhoras, permaneceu inalterado, ou foi agravado, necessitando um outro tipo de aparelho, ou de um aparelho com a mesma função, mas com diferente concepção, ou, até mesmo um aparelho idêntico, desde que mais leve.

Pelo fato do fisioterapeuta estar mais relacionado com o paciente, ele deve iniciar a atividade de prescrever a órtese, explicar seu propósito (a sua função), e após prescrição médica, apresentar a órtese de maneira a convencer o paciente que este aparelho o irá auxiliar nas suas funções locomotoras. Também é importante ressaltar para o paciente que o aparelho não irá resolver todos os problemas das funções locomotoras, mas irá contribuir na redução parcial destes problemas.

Outro aspecto a ser abordado com o paciente deverá ser a aparência da órtese, que poderá ser alterada mediante a utilização de certos tipos de roupas ou a utilização de órteses avançadas, por exemplo, com material polimérico reforçado, onde poderá ser feito um acabamento que satisfaça as exigências do paciente.

Um último aspecto a ser abordado é a reação do paciente à utilização deste aparelho, com o propósito de evitar uma possível rejeição.

2.6.5 Avaliação e evolução das órteses

Com relação a todas as órteses de articulação, é possível afirmar que inovações tecnológicas estão sendo feitas nesses aparelhos, para que possam ser projetados de acordo com as necessidades específicas e para as mais variadas deficiências. Um projeto de órtese moldada e funcional é uma inovação tecnológica recente. Com o desenvolvimento da tecnologia eletrônica, as órteses passaram a funcionar por estímulos elétricos, por controle mioelétrico e por microprocessadores.

O desenvolvimento que mais contribuiu para a evolução destes aparelhos foi a utilização de plásticos e plásticos reforçados na construção das órteses. Eles são leves, relativamente duráveis e capazes de serem modificados a partir de um polímero mais rígido ou de um agente de reforço com mais rigidez, para aumentar a vida útil da órtese, além de realizar acabamentos para melhorar a estética do material polimérico. Entretanto, há limitações, tanto nos projetos das órteses, como nos materiais utilizados para a sua construção. Nas órteses de membros inferiores, por exemplo, existem algumas limitações, como a não resposta à alternância de movimentos de joelho e tornozelo. O principal fator para que predomine estas limitações é o peso da órtese, podendo causar atrofias e até mesmo contraturas³; em outras palavras, o paciente poderá até ter medo de deixar de usar a órtese quando não necessitar mais dela. Por essas e outras razões é que se faz necessário um estudo mais detalhado das peças, ou componentes, que compõem uma órtese, para que seja possível uma redução dessas limitações.

É sob este contexto que se faz necessária à participação de profissionais das áreas de tecnologia (mecânica, eletrônica e materiais), em conjunto com a área de fisioterapia, para buscar melhorias contínuas e tornar a utilização destes e de outros aparelhos ortopédicos mais eficientes.

Quanto à avaliação que se faz de uma órtese é de acordo com a colocação, a função e o acabamento da mesma. A avaliação deve ser feita quando a órtese é colocada pela primeira vez em um paciente e também deve ser feita antes da alta do paciente.

Um processo completo de avaliação, bem definido, para órteses de membro inferior, avalia:

- Fidelidade à prescrição inicial ao paciente.

³ Contratura: (ação ou efeito de contrair, qualidade ou estado que está contraído, contração permanente e involuntária de um músculo, sem lesão da fibra).

- Precisão no acabamento do aparelho.
- Conformidades das articulações mecânicas dos eixos da articulação do paciente.
- Suportes afastados de proeminências ósseas e de nervos superficiais.
- Conforto às bandas, tiras e correias.
- Adequação da função de ficar em pé, sentar e andar.
- Habilidade para colocar e para remover a órtese.

Com relação ao processo de treinamento para a utilização de órteses, o mesmo deve ir além de ensinar o paciente a mover-se, usando uma órtese. O papel do fisioterapeuta é de orientar:

- Como aplicar a utilização da órtese corretamente.
- Como usar a órtese e os vários componentes e travas.
- Como se movimentar enquanto utiliza a órtese.
- Período de utilização da órtese.
- Checar a região de contato entre a pele e a órtese.
- Manutenção do aparelho: caso encontre defeitos a órtese deve ser substituída.

A manutenção da órtese deve ser levada ao conhecimento dos pacientes, de como deve ser feita, além de uma inspeção diária da região do corpo onde será fixada a órtese. Isto se deve a:

- Problemas de alergias na pele causada pelo contato entre a própria pele e a órtese.
- Aparecimento de contraturas ou luxações devido à fixação inadequada da órtese no corpo do paciente.

Quando uma órtese nova é utilizada, após a remoção da mesma de ser verificada a região de contato com a pele, pois as dermatoses podem aparecer. Caso

não desapareçam logo, a causa poderá ser a própria órtese e aí o paciente é encaminhado ao técnico de órteses para os ajustes e cuidados necessários.

Os problemas causados pelos dispositivos mecânicos, ou pelo material que a órtese foi construída são, entre outros:

- Pressão nos suportes ou articulações.
- Abrasão causada pelo couro enrugado.
- Pinçamento de tecidos causados por bandas e faixas que estão alinhadas incorretamente ou muito tensas.

À medida que o quadro clínico do paciente evolui, em outras palavras, as condições terapêuticas do paciente mudam, muda-se também o tamanho do corpo fazendo com que hajam ajustes e alterações nas órteses. Por exemplo: para se evitar atrito desnecessário nos tecidos, o paciente deve compreender como a órtese será novamente alinhada no seu corpo e como os componentes da mesma devem se ajustar. Somente assim poderá avaliar se os ajustes, ou as trocas foram eficientes, à medida que ele próprio coloque e retire a órtese.

Um procedimento básico que se sugere para uma rotina de manutenção na órtese:

- O material, que muitas vezes reveste a órtese, deve ser limpo semanalmente com sabão neutro e deve ser seco cuidadosamente.
- As articulações devem ser inspecionadas semanalmente.
- Os parafusos devem ser checados e reapertados se necessário.
- As partes móveis devem ser lubrificadas uma vez por mês.
- As partes não metálicas devem ser checadas, para verificar se não há trincas ou deformações, e limpas com água e sabão.

2.6.6 Considerações patológicas

Com relação aos pacientes que possuem deficiências congênitas, uma dessas deficiências, clinicamente, prevalece na função locomotora. Nos membros inferiores

há uma certa flacidez muscular, em alguns grupos musculares, evidenciada na posição sentada e a espasticidade flexora é mais aparente na posição em pé, nos grupos muscular extensor.

Os pacientes que possuem uma paralisia, ou uma atrofia de um dos lados do corpo, em outras palavras, uma hemiplegia, são impossibilitados de realizar padrões de movimentos racionais e sinérgicos (padrões de movimentos provenientes de estímulos cerebrais).

Para os membros inferiores, os padrões de sinergia e os componentes de flexão para um hemiplégico são respectivamente:

- Flexão do quadril.
- Abdução do quadril.
- Rotação externa do quadril.
- Flexão do joelho.
- Dorsiflexão dos dedos e tornozelo.
- Inversão.

Para os membros inferiores, os padrões sinérgicos e os componentes extensores para um hemiplégico são respectivamente:

- Extensão do quadril.
- Adução do quadril.
- Rotação externa do quadril.
- Extensão do joelho.
- Flexão plantar e inversão do tornozelo.
- Flexão plantar dos dedos.

Clinicamente, dependendo da gravidade deste tipo de manifestação, os movimentos fora dos padrões sinérgicos irão se expandir.

O controle motor pode ser avaliado tanto em termos de padrões de movimentos (sinergia), como em padrões de movimentos seletivos. Podem aparecer deficiências no que diz respeito à marcha, provenientes de contraturas, fraqueza, equilíbrio deficiente, em função de paralisia cerebral. A seguir serão relacionadas

parte dos problemas mais frequentes de movimento ineficiente (marcha hemiplégica) e as suas possíveis causas.

I - Análise da marcha no decorrer da progressão anterior – O apoio:

A) Problema do joelho

1- Causas da flexão no decorrer da progressão anterior.

- a) Contratura em flexão em função da fraqueza do quadríceps⁴ causa a flexão do joelho;
- b) Amplitude da dorsiflexão, além da posição neutra, combinada com uma fraqueza do quadríceps que irá causar a flexão no joelho;
- c) Perda de força do padrão de extensão no movimento do quadríceps, dos músculos extensores do quadril e dos flexores plantares permitem a flexão do joelho;
- d) Se há contração do quadríceps, o joelho pode fletir-se a 20 ou 30 graus durante a progressão anterior;

2- Causas da hiperextensão durante a progressão anterior.

- a) Contratura em flexão plantar acima de 90 graus pode causar hiperextensão do joelho;
- b) O joelho irá dobrar para trás (recurvar-se) durante o movimento de extensão;
- c) Espasticidade grave do quadríceps causa a extensão total ou hiperextensão do joelho.

⁴ Quadríceps: (grande músculo extensor na frente da coxa, formado por quatro feixes em cima que se unem em um tendão, para encerrar a patela, e se inserem como ligamento patelar, na tuberosidade da tíbia dos extensores do quadril).

d) Atrofia do quadríceps pode ser evitada, bloqueando-se o joelho em hiperextensão.

B) Problema do pé – tornozelo

a) Marcha eqüina é causada pela espasticidade ou contratura, não permitindo que o calcanhar toque o solo;

b) O pé-varo é causado por uma hiperatividade ou por uma espasticidade, ou por uma espasticidade do tibial anterior, tibial posterior, dos flexores dos dedos. O paciente acaba por se apoiar na superfície lateral do pé.

c) Os dedos em martelo são causados pela espasticidade dos flexores dos dedos. Eles evitam que o paciente pise para frente, com o pé oposto, por causa da dor ao apoiar o peso do corpo dos dedos flexionados.

d) O comprimento dos passos realizados pela perna oposta diminuirá se há falta de amplitude de dorsiflexão, no lado oposto (necessário em torno de 10 graus de dorsiflexão do tornozelo).

II – Análise da marcha durante o balanceio para frente

A) Problema com o joelho

a) Extensão incorreta do joelho ao apoiar o peso ao avanço do corpo, está associado com:

a1) Flexão inadequada do quadril, causando um apoio deficiente do pé, resultante de uma resposta não muito adequada no padrão flexor, ou por um movimento seletivo deficiente.

a2) Espasticidade do quadríceps.

b) Flexão exagerada dos joelhos, porém um tanto quanto demorada, associada com uma forte sinergia flexora.

Extensão inadequada do joelho ao apoiar o peso e ao avanço do corpo, que está associado com:

- b1) Sustentação de um padrão flexor total.
- b2) Atrofia do quadríceps ou uma propriocepção⁵ deficiente.

B) Problema do pé e tornozelo

a) Equinismo ou equinovarismo persistente é um problema importante durante a progressão da fase de balanceio.

a1) O equinismo pode ser causado por contraturas ou espasticidade dos flexores plantares, atrofia dos dorsiflexores ou contração tardia dos dorsiflexores no padrão flexor, de maneira que o ante-pé arrasta-se durante a fase de meio balanceio e flete dorsalmente ao final da fase de balanceio.

a2) O varismo pode ser causado pela espasticidade do tibial anterior, ou espasticidade tibial anterior com atrofia dos extensores dos dedos.

a3) Equinovarismo pode ser causado por espasticidade do tibial anterior, posterior ou dos músculos.

C) A dorsiflexão exagerada pode ocorrer em pacientes que ativem a sinergia total.

Assim é possível diagnosticar, com certa precisão, qual a causa da deficiência do paciente que precisará usar uma órtese, qual o tipo de órtese e qual o material que a mesma poderá ser feita.

É com este processo evolutivo, e com o propósito fundamental de melhorar a eficiência do aparelho e dos seus recursos fisioterapêuticos no paciente, que surgiram as órteses feitas de material polimérico reforçado, ou seja, projetos de órteses com a sua fabricação em material compósito, com o intuito de adquirir melhores propriedades mecânicas e estruturais da órtese.

⁵ Propriocepção: (sensação e conhecimento da posição das articulações).

3 Materiais e Métodos

3.1 Ensaios experimentais

Para a realização dos ensaios experimentais da resina epóxi e do compósito, fez-se o estudo para fabricação e confecção dos corpos de prova. No ensaio padronizado da resina utilizou-se uma matriz metálica composta de chapa retangular de aço inox para reter a resina, outra também de aço inox usinada com os perfis vazados dos corpos de prova (C.D.P.), de tração e flexão e, cantoneiras com furos para unir ambas as chapas por parafusos, obtendo 5 C.D.P(s) para cada ensaio. Já para o ensaio de compressão da resina, utilizou-se molde de borracha de silicone (B. Silicone RT-426), produzido pela Wacker, obtendo 4 C.D.P(s) para os ensaios. No caso do laminado, utilizou-se um molde metálico, composto de base, espaçadores e tampa. Os procedimentos experimentais empregados foram analisados com o intuito de obter bom desempenho na confecção do laminado, associado às propriedades dos seus materiais constituintes.

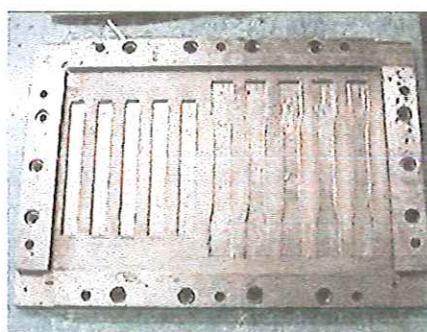


Figura 19. Matriz para moldagem de corpos de prova

Fonte: O autor

3.1.1 Confeção dos Corpos de Prova

A metodologia utilizada para a confecção dos C.D.P(s), em resina, teve como objetivo principal evitar a formação de bolhas; já para o compósito, a preocupação principal foi evitar possíveis falhas durante a laminação.

A seguir é descrito o procedimento para confeccionar os C.D.P(s). de tração, flexão e compressão em resina e, em seguida, o procedimento para confeccionar os C.D.P(s). de tração e flexão para laminados.

Para os C.D.P(s). de tração em resina adotou-se as especificações da norma ASTM 638-96, de acordo com as seguintes etapas:

- Pesou-se a quantidade de resina, e de catalisador, necessárias para produzir os C.D.P(s).;
- Fez-se um pré-aquecimento da resina e do catalisador, a uma temperatura de 75 °C durante 10 minutos;
- Fez-se um dessecamento da resina e do catalisador, utilizando uma bomba de vácuo;
- Fez-se a homogeneização da mistura e vazou-se a mesma na matriz metálica;
- Desmoldou-se os C.D.P(s). após 24 horas, armazenando-os em recipiente fechado.

Para obtenção dos C.D.P(s). de flexão em resina, utilizou-se o procedimento descrito acima e a geometria para estes C.D.P(s). foi retirada da norma ASTM 790-96^a. Para os C.D.P(s). de compressão, também em resina, foi usado o mesmo procedimento, utilizando-se a geometria recomendada pela norma ASTM (1996).

Com relação aos C.D.P(s). de tração em compósito, utilizou-se especificações da norma ASTM (1995), de acordo com os seguintes procedimentos:

- Pesou-se a quantidade de resina, catalisador e de tecido de fibra de vidro para obter a fração volumétrica desejada do laminado final.

-Aplicou-se uma lâmina do tecido sobre a cavidade do molde metálico, despejou-se quantidade da mistura sobre a lâmina, fazendo laminação à mão (*hand-lay-up*), impregnando todo o tecido com a resina.

-Repetiu-se a etapa anterior até empilhar o número de tecidos desejados, respeitando-se as especificações de espessura determinadas pela norma, obtendo-se diferentes frações volumétricas em fibra:

-Fechou-se o molde e aplicou-se pressão, através de uma prensa hidráulica.

-Após a cura do compósito, pesou-se a placa a fim de quantificar o volume de resina perdido, e calcular a fração volumétrica do laminado.

Para obtenção dos C.D.P(s) de flexão em laminado, foi usado o mesmo procedimento, utilizando as dimensões especificadas pela norma ASTM D 790-96^a.

Todos esses ensaios foram realizados em uma máquina de ensaio universal MTS (Sintec 6), e os resultados foram utilizados para análises numéricas, via método dos elementos finitos, utilizando um Software comercial (ANSYS 5.5).



Figura 20. Máquina de ensaio universal Sintec6

Fonte: O autor

3.1.2 Ensaios de Tração

Os ensaios de tração dos C.D.P(s) em resina epóxi, conforme especificações da ASTM (1996), foram ensaiados utilizando-se uma velocidade de aplicação da carga igual a 5,0 mm/min nas garras.

Os ensaios de tração para os corpos de prova em compósito seguiram as especificações da norma ASTM (1995) com velocidade de aplicação da carga igual a 2,0mm/min nas garras.

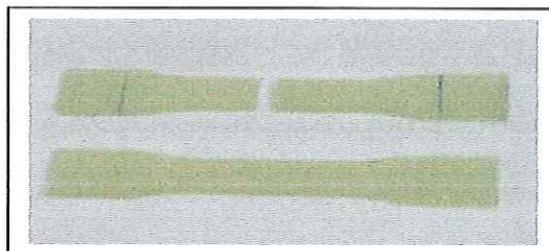


Figura 21. Corpos de prova de tração

Fonte: O autor

3.1.3 Ensaios de Flexão

Os testes de flexão três-pontos para C.D.P(s). com resina epóxi seguiram as especificações da norma ASTM D790-96a, com velocidade de aplicação da carga igual a 1 mm/min nas garras. Contudo, devido à limitações no banco de ensaios, para o compósito foram utilizados valores de comprimento e “*span*” (distância entre os apoios do corpo de prova), diferentes dos especificados pela norma, ou seja, 126 mm e 43 mm respectivamente.

Para os ensaios em compósito foram utilizados laminados com 55% de fração volumétrica em fibra, com tecido unidirecional com fibras orientadas a 0° em relação ao carregamento.

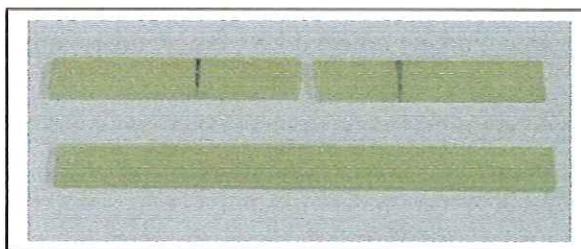


Figura 22. Corpos de prova de flexão

Fonte: O autor

3.1.4 Ensaios de Compressão

Os ensaios de compressão em resina seguiram as especificações da norma ASTM (1996), com velocidade de aplicação da carga igual a 1,3 mm/min nas garras.



Figura 23. Corpos de prova de compressão

Fonte: O autor

3.1.5 Laminação Manual

O processo de laminação manual é o pioneiro e o mais conhecido, sendo utilizado até hoje pela grande maioria das empresas. É um processo simples, que não exige altos investimentos, porém ferramental como moldes, pincéis, trinchas, rolos de lã, rolete de alumínio, facas, tesouras e estiletos, os quais permitem a fabricação de qualquer tipo e tamanho de peças.

Utiliza-se neste processo moldes abertos, quase sempre construídos da própria fibra mais “agentes de carga”, que reproduzem peças com acabamento liso e colorido em uma das faces. Permite paredes com espessura controlada, insertos metálicos, nervuras, relevos, translucidez se necessário, rotulação, texturização superficial, e outras tantas características para laminação.

Algumas regras básicas devem ser seguidas, quase sempre particulares de cada projeto. A primeira é uma das mais importantes, se considerarmos que todas as características dimensionais e superficiais do "Modelo" serão transferidas para o "Molde" e, posteriormente, para as peças. Isto quer dizer que, todo cuidado e tempo

dispensado a esta fase de construção do modelo e molde, é que determinará o sucesso do produto final (a peça). Os moldes, por sua vez, devem ser confeccionados com matérias primas de primeira qualidade, a partir de resinas e gel *coats* específicos para moldes, e possuir uma superfície polida.

Como preparativo para moldagem, deve-se encerar e polir a superfície do molde com Desmoldante. Em moldes novos, recomenda-se este procedimento por três (3) vezes consecutivas antes das primeiras moldagens. Outro procedimento complementar é a aplicação de desmoldante líquido, que garante e facilita a desmoldagem. Ele pode ser aplicado em substituição à cera ou posterior a esta, desde que ela esteja muito bem polida e seca. Alguns fabricantes preferem desmoldantes semipermanentes que, apesar de melhor desempenho, requerem cuidados especiais para sua utilização.

A laminação sobre o molde inicia quando os tecido de fibra estiverem preparados, ou seja, cortados, após prévia medição e já determinada a seqüência de empilhamento a ser realizada durante a laminação.

A laminação é a impregnação de resina por sobre a superfície de cada camada de fibra, disposta sobre o molde, com a resina devidamente catalisada, utilizado-se uma espátula ou rolo de lã. A próxima seqüência de tecido deverá ser distribuída uniformemente sobre a camada anterior, e uma nova camada de resina deverá "encharcar" as fibras.

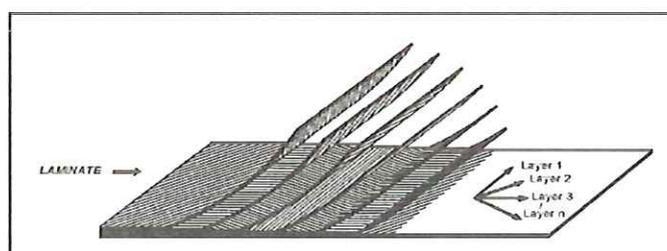


Figura 24. Processo de laminação à mão (*Hand Lay Up*)

Fonte: O autor

Para a compactação, homogeneização e retirada das bolhas de ar desta camada, usa-se o rolete de alumínio, em passadas uniformemente direcionadas de dentro do laminado para as bordas. Caso o projeto da peça a ser laminada necessite de mais compactação para menor imperfeição do processo, há outros processos de fabricação de compósitos.

3.1.5.1 Vacuum Bag Process

Este processo é a obtenção de vácuo, através de uma bolsa de plástico, utilizando bombas de vácuo, elétricas ou pneumáticas, com mangueiras e conectores para remover o ar. Dá-se o nome a este conjunto de processo de Bolsa de Vácuo (Vacuum Bag Process). A figura a seguir ilustra este outro processo de fabricação de material compósito.

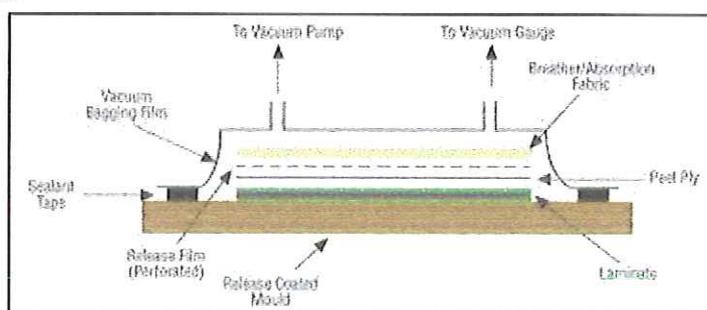


Figura 25. Processo de Bolsa de Vácuo

Fonte: GUIDE to composites. (2003).

Insertos metálicos reforços internos, materiais de núcleo, e outros detalhes internos podem ser introduzidos durante ou antes da laminação.

A eliminação das rebarbas é feita com a peça ainda no molde, logo após a solidificação da resina atingir um estado intermediário de cura. A peça é deixada no molde até a cura ser completada (resfriada naturalmente).

A desmoldagem é feita com muito cuidado para danificar-se o molde e/ou a peça. Nunca introduza objetos metálicos ou duros o suficiente para riscar. Se necessário, use cunhas de madeira. Da mesma forma não bata no molde com

martelos. A técnica mais adequada para desmoldagem é a introdução de bicos de ar comprimido, previamente localizados nos moldes, ou a injeção de ar comprimido através das bordas.

3.2 Ensaaios no componente

O componente a ser moldado foi laminado no molde metálico, utilizando-se resina epóxi e fibra de carbono. O molde para a confecção do componente da órtese foi confeccionado para se utilizar insertos metálicos, e também a utilização de bolsa de vácuo para redução dos vazios durante a moldagem. A figura 26 apresenta matriz para laminação, no sistema intra e extradorso para o processo de laminação.

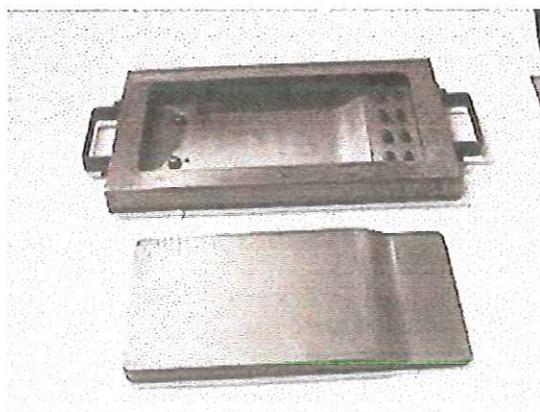


Figura 26. Molde metálico para moldagem do componente.

Fonte: O autor

3.3 Simulação numérica

Para gerar o modelo para simulação por Elementos Finitos no ANSYS, o primeiro passo foi gerar a geometria do componente utilizado na órtese mecânica.

A Figura 27 apresenta a órtese e a componente da órtese mecânica, a qual foi utilizada gerar o projeto do modelo numérico para a simulação da componente em compósito.

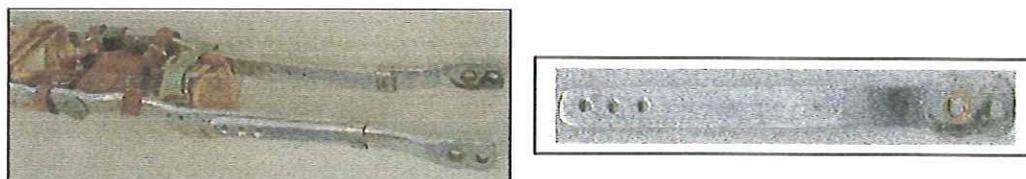


Figura 27 a) Órtese mecânica b) Componente em estudo

Fonte: O autor

Inicialmente obteve-se o modelo da componente no Ansys através junção de linhas, pontos e curvas, como mostra a Figura 28.

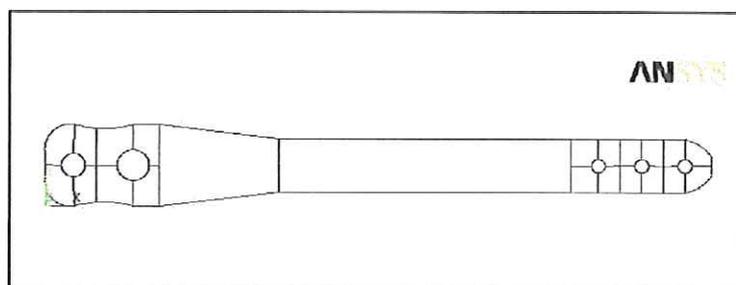


Figura 28. Modelo da componente no Ansys

Fonte: O autor

Foram simuladas, por elementos finitos, cinco configurações de material, cujo primeiro correspondente ao material metálico comercialmente utilizado (Alumínio), e as demais em material compósito com diferentes seqüências de empilhamento. Outros dados referentes à geração do modelo:

- Tipo do elemento para a simulação: SOLID 46 (*3-D Layered Structural Solid*), adequado para análise de materiais laminados, uma vez que possibilita a entrada da seqüência de empilhamento (*stacking sequence*) utilizada. Este elemento possui um total de 8 nós (um em cada vértice), cada um apresentando 3 graus de liberdade, em translação. O modelo gerado é ilustrado na Figura 29.

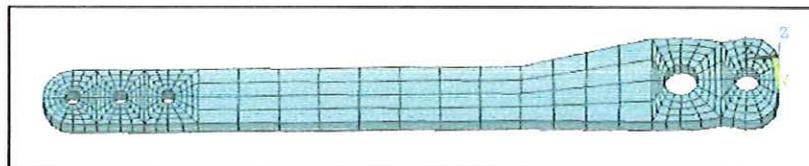


Figura 29. Modelo gerado com malha

Fonte: O autor

Considerou-se o material como sendo ortotrópico; e as seqüências de empilhamento utilizadas na simulação por elementos finitos, estão assim formadas: $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/45^\circ/90^\circ/0^\circ]$, $[0^\circ/-45^\circ/45^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]$, $[0^\circ]_6$ e $[90^\circ]_6$;

O modelo foi engastado nos furos correspondentes à fixação da órtese nas direções cartesianas X, Y e Z, conforme ilustrado na Figura 30, e Figura 31.

Procurou-se reproduzir fielmente as dimensões do modelo físico, apenas reduzindo o número de furos na área retangular da componente, de três para dois.

As dimensões do modelo físico são basicamente as seguintes:

-Comprimento total da componente $C = 225.10^{-3}$ m;

-Largura da haste na região oblíqua $L = 28,6 \cdot 10^{-3}$ m;

-Espessura da componente $\varepsilon = 6,2.10^{-3}$ m;

-Diâmetros dos furos na região oblíqua $\Phi = 8,2. 10^{-3}$ m e $9,6. 10^{-3}$ m respectivamente;

-Diâmetros dos furos na região retangular da haste $\Phi = 4,5.10^{-3}$ m respectivamente;

Com relação às simulações foram utilizadas:

Análises estáticas;

Deslocamento ao longo da componente da órtese de 1 mm.

Procurou-se, a partir dos resultados da simulação analisar comparativamente os níveis de tensão, obtidos para a órtese atual em material metálico, e a possível

órtese em material compósito. As propriedades do material ortotrópico foram retiradas dos ensaios e estão na TABELA 3.1:

Propriedade do Material	Unidade [S.I.]
E_{11} (E_x)	15 Gpa
E_{22} ($E_y = E_z$)	3,7 Gpa
G_{12} ($G_{xy} = G_{xz}$)	1,5 Gpa
G_{23}	1,4 Gpa
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0,33
ν_{23}	0,31
ρ_c (densidade)	$1,7 \cdot 10^3$ (Kg/m^3)

TABELA 5. Propriedades do material utilizado nas simulações, obtido experimentalmente.

Fonte: DANIEL, I.M. (1994).

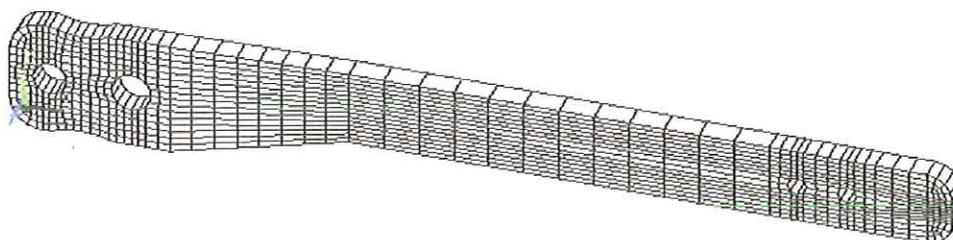


Figura 30. Representação da malha, modelo discretizado em elementos finitos.

Fonte: O autor

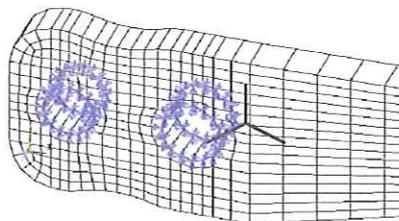


Figura 31. Vínculos para engastar a componente.

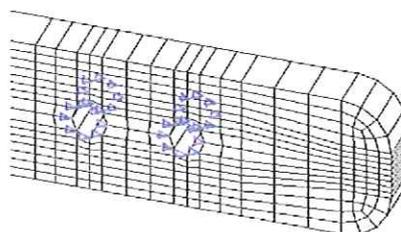


Figura 32. Vínculos para deslocamento da componente.

4 Resultados

4.1 Ensaios experimentais

Os resultados dos ensaios de tração nos C.D.P(s) em resina epóxi podem ser visualizados na Fig. 33 . Nota-se que a resposta à tração é frágil e os níveis atingidos de pico de tensão estão, aproximadamente, entre 35 MPa e 50 MPa, o que é coerente com dados provenientes da literatura, que variam de 28 MPa até 100 MPa (Michaelli, 1995). Com relação aos módulos de elasticidade (E), chegou-se a valores próximos a 2,0 GPa, demonstrando também que há coerência com dados da literatura que variam de 2,4 GPa até 6,0 GPa (Michaelli, 1995).

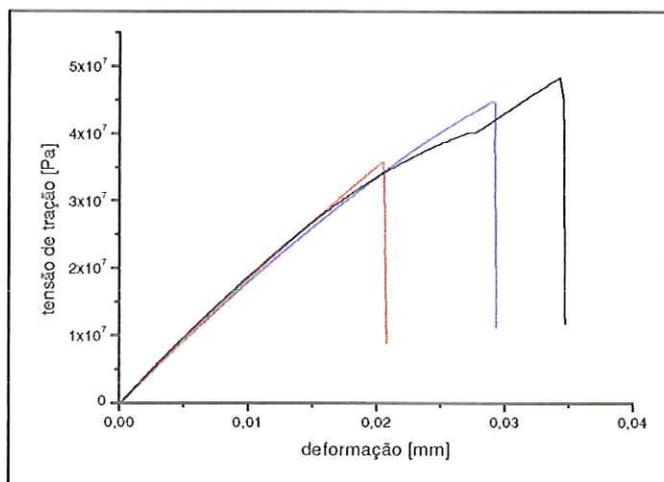


Figura 33. Curvas tensão x deformação para ensaio de tração em resina epóxi.

Os resultados dos ensaios de compressão, nos corpos de prova em resina epóxi, podem ser visualizados na Fig. 34. Nota-se que a resposta à compressão indica um comportamento dúctil e os níveis atingidos de pico de tensão estão próximos a 95 MPa, caracterizando a plastificação do material, estando próximos dos níveis apresentados na literatura, que são da ordem de 100 MPa. Obteve - se valores de módulos de elasticidade próximos a 2,0 GPa, dados estes coerentes com a literatura

que indicam praticamente os mesmos valores apresentados durante o carregamento de tração (HANDBOOK OF COMPOSITES, 1982).

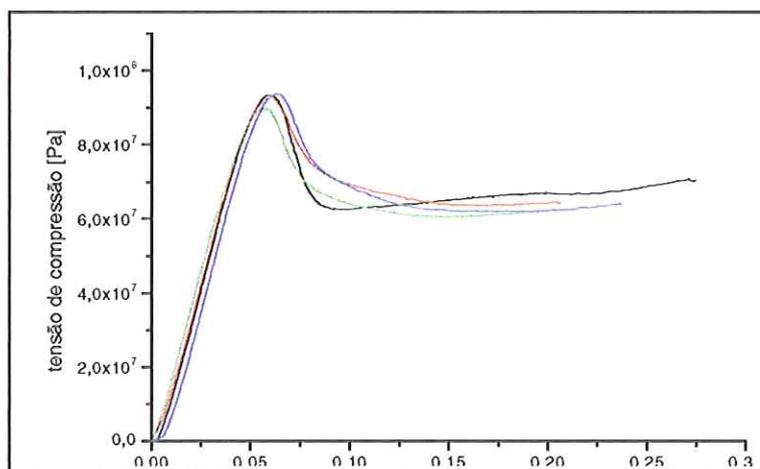


Figura 34. Curvas tensão x deformação - ensaio de compressão em resina epóxi.

Os resultados dos ensaios de tração, para os corpos de prova em compósitos unidirecionais, com fibras orientadas a 0° em relação ao carregamento aplicado, podem ser visualizados na Fig. 35. Comparando-se os resultados obtidos, para os compósitos unidirecionais, aos dados provenientes da literatura e resultados teóricos obtidos através da Regra das Misturas, verifica-se que os valores são satisfatórios, Tabela. 6.

4.2 Ensaios no componente

A componente da órtese foi analisada através de uma simulação computacional para avaliar o seu comportamento mediante tipos de solicitações mecânicas, ou em outras palavras, a esforços mecânicos aplicados pela utilização da pessoa que está em processo de reabilitação, ou deficiência em deambular (caminhar). O princípio básico do estudo mecânico do comportamento de uma peça é simular, com maior autenticidade possível, os efeitos mecânicos após aplicação dos esforços.

Na fase de proposta, o objetivo principal deste projeto foi o de reproduzir uma peça, com a mesma geometria e, com as mesmas características dimensionais da peça utilizada na órtese. Esta, por sua vez, tem as características dimensionais determinadas, e assim, foi possível confeccionar uma matriz metálica, conforme ilustra a Figura 36 contendo exatamente o perfil da componente em estudo.

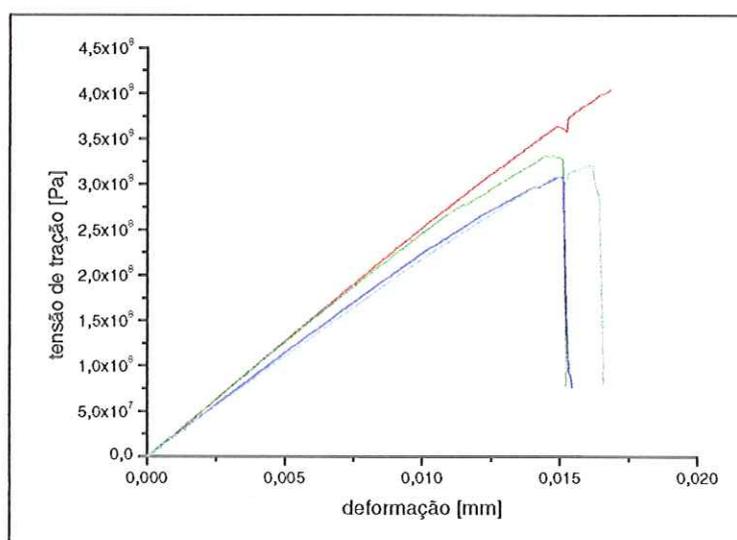


Figura 35. Curvas de tensão x deformação ensaio de tração em compósito.

TABELA 7: Resultados para o compósito unidirecional: experimental /literatura/ regra das misturas

Compósito	Tensão Máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	Módulo de Elasticidade (E)
Ensaio de Tração	[GPa]	[GPa]
Experimental	0,4	16
Literatura	1,1	39
Regra Misturas	0,7	24

Fonte: O autor

Após reproduzir exatamente a componente da órtese, através de processos de conformação mecânica, ou seja, por processos de usinagem; e a mesma venha ser fabricada por processo de fabricação de materiais compósitos, ou seja, de laminação

concluiu-se que, no ponto de contato da peça fabricada em material compósito, com o estribo metálico fixado na bota ortopédica, se faz necessário a introdução de buchas metálicas Fig. 36, no compósito para evitar alguma compressão no laminado da peça, evitando qualquer tipo de delaminação, ou algum dano de maior intensidade.

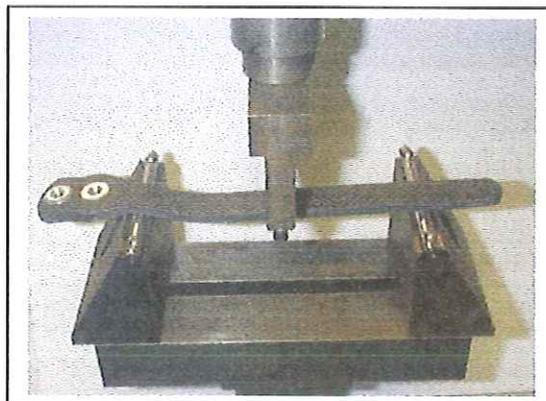


Figura 36. Órtese com insertos metálicos

Fonte: O autor

Com relação ao material utilizado na fabricação da componente da órtese seria, a princípio, utilizada fibra de vidro. Entretanto, após consultas técnicas, e uma análise e avaliação da resistência dos tipos de fibra, e do desempenho das mesmas quando realizado ensaio mecânico na peça, tudo nos levou a utilizar a fibra de carbono devido as suas propriedades (TABELA 4.), bem como a possível doação da mesma pela companhia aérea TAM S/A.

O ensaio realizado na componente de compósito somente foi o da flexão da mesma, em função da sua característica dimensional dificultar os valores precisos para ensaios mecânicos que, realmente, reproduzam o esforço da componente na órtese. Os ensaios que predominariam, numa análise mais realística, seriam os de compressão e o de flexão.

No ensaio, para a compressão da componente, haveria a necessidade de se utilizar o que é conhecido por extensômetro de medida strain gage. Mas sem o

mesmo, ao submeter a componente à compressão, inevitavelmente ocasionaria numa flambagem dela e, provavelmente, encobriria o valor correto do ensaio.

Portanto, na análise de esforços mecânicos, realizou-se o ensaio mecânico e destrutivo da peça, à flexão 3 pontos, para analisar o comportamento da mesma em comparação com similar em Alumínio.

A TABELA 8 traz os valores para realização do ensaio, ou seja, o valor do comprimento (L), entre os apoios para a peça, como ilustrado na Fig. 36, a largura (b) da peça, a velocidade do ensaio (Ve), espessura da peça (h), e para os corpos de prova em fibra de carbono com epóxi (d22, d23, d24), o módulo de rigidez longitudinal da fibra (E_{11}), com a mesma seqüência de orientação da fibra [0/90/+45/+45/90/0]. Além das peças em carbono, foi feito o ensaio a flexão da peça de Alumínio (d21).

TABELA 8: Especificações técnicas para o ensaio à flexão

Amostra	Empilhamento	(Ve) [mm/min]	(L) [mm]	(h) [mm]	Módulo de Elasticidade [MPa]
d21	Alumínio	5	0,136	6,2	57.10^3
d22	[0/90/45/45/90/0]	5	0,136	6,2	228
d23	[0/90/45/45/90/0]	5	0,136	6,2	228
d24	[0/90/45/45/90/0]	5	0,136	6,2	228
d31	[0/45/-45/45/45/0]	5	0,136	6,2	228
d32	[0/45/-45/-45/45/0]	5	0,136	6,2	228
d33	[0/45/-45/-45/45/0]	5	0,136	6,2	228

Fonte: O autor

A fabricação da componente, em fibra de carbono com epóxi foi, realizada nas seguintes etapas:

-Preparação da bancada para os processos de laminação a mão e bolsa de vácuo na matriz metálica, para a obtenção da componente em compósito.

-Preparação da matriz metálica e dos insertos com cera desmoldante; e introdução do inserto metálico nos pinos-guia.

-Corte da quantidade de tecido, na dimensão da matriz, para realizar a laminação.

-Verificação do peso de cada tecido cortado, para verificar fração volumétrica da fibra.

-Verificação do peso da quantidade de resina utilizada na laminação, para verificar a fração volumétrica da resina.

-Processo de laminação da fibra com a resina, empilhando com a orientação da fibra pré-determinada.

- Fechamento da bolsa de vácuo, conectando-a na bomba de vácuo através de mangueira, utilizando 23 Psi de pressão de vácuo.

-Deixar por duas horas e meia em vácuo e com aquecimento por lâmpadas especiais para acelerar o processo de cura.

-Desmoldagem da chapa de compósito para ser usinada e receber a mesma geometria da componente em Alumínio.

Os materiais utilizados, todos eles foram emprestados pela empresa TAM – linhas aéreas:

1-Fibra de Carbono: 3000 filamentos, bidirecional, Módulo de Elasticidade do material (E_{11}) = 288 MPa.

2-Resina Epóxi = Hysol EA 9396 (Loctite Aerospace).

3-Desmoldante do tipo cera Realese.

4-Ferramental, bomba de vácuo, espátulas MEK (Metil Etil Cetona) para limpeza do material e da matriz.

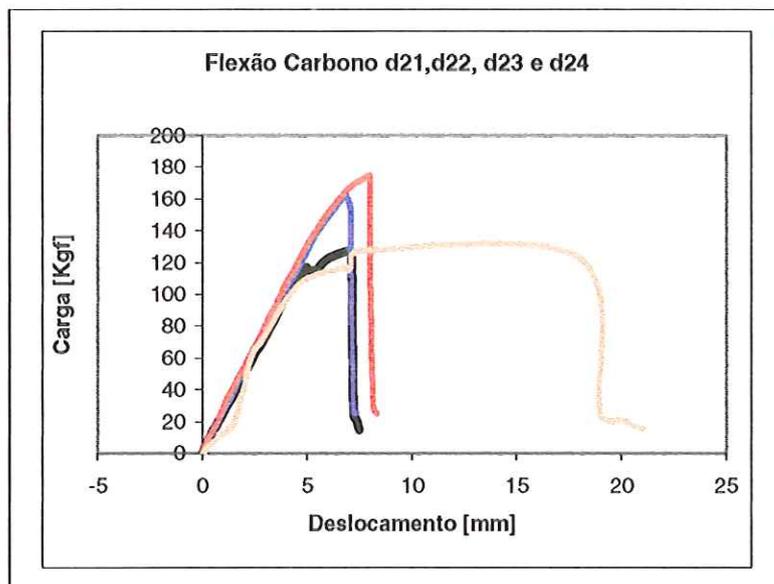


Figura 37. Gráfico Carga x Deslocamento – ensaio flexão 3 pontos

Fonte: O autor

O gráfico apresenta a curva carga x deslocamento das amostras da componente em carbono para o ensaio a flexão 3 pontos.

O ensaio obteve os seguintes resultados: para amostra (d21) a tensão máxima até atingir um regime de escoamento, sem sofrer ruptura foi de 145 Kgf, representada no gráfico pela curva na cor bege claro; a amostra (d22) atingiu a ruptura em 127 Kgf, representada no gráfico pela curva na cor preta; a amostra (d23) atingiu a ruptura em 162 Kgf, representada no gráfico pela curva na cor vermelha; e a amostra (d24) atingiu a ruptura em 175 Kgf, representada no gráfico pela curva na cor azul.

Em função dos valores obtidos, através da norma ASTM D790-96a e a TABELA 8, fez-se cálculos para plotar a curva Tensão (σ) x deformação (ϵ) para obter o módulo de Elasticidade do material.

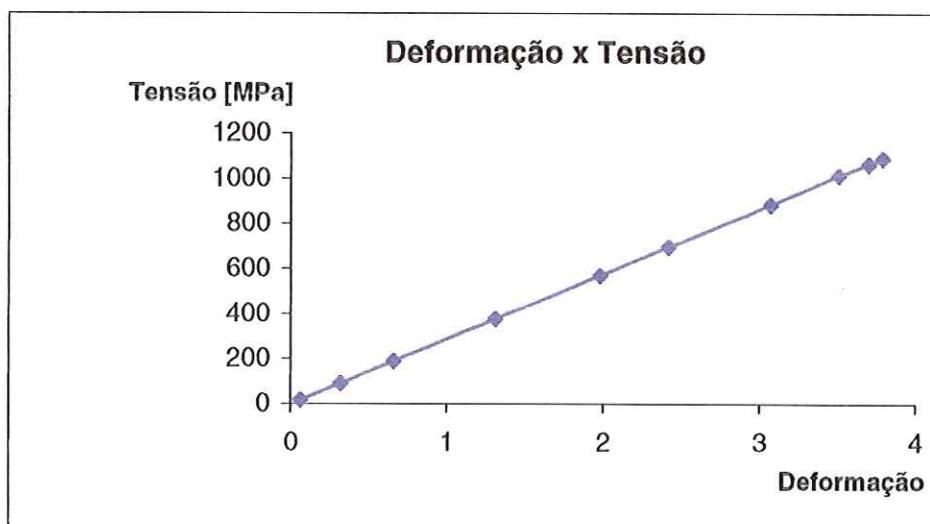


Figura 38. Gráfico tensão x Deformação do ensaio a flexão

Fonte: O autor

Com base no ensaio realizado e as condições para que as amostras da componente com orientação das fibras estabelecidas, fez-se o cálculo para obter o módulo de elasticidade da componente, tomando como base a inclinação da curva de todas as amostras que obedecem esta inclinação, e utilizando a Teoria de Elasticidade:

$$\varepsilon = \frac{PxLxh}{8xE_{11} \cdot I} \quad (2)$$

onde:

P = Carga [N]

L = distância entre apoios [m]

h = espessura da componente [m]

E_{11} = Módulo de elasticidade da fibra [MPa]

I = momento e inércia [m⁴]

$$\sigma = \frac{3xPxL}{2xbxh} \quad (3)$$

É necessário destacar que o ensaio foi realizado em uma máquina de ensaio universal tipo MTS, do Departamento de Materiais da USP de São Carlos.



Figura 39. Máquina de ensaio Universal

Fonte: O autor

4.3 Simulação numérica

As simulações dos compósitos apresentaram valores de tensão máxima para o deslocamento até o ponto de escoamento do material, ao longo da direção X, conforme a TABELA 9.

TABELA 9. Valores de Tensão máxima obtida na simulação numérica.

Material do Componente da Órtese	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]
01 – Alumínio	1500,0
02 – Resina Epóxi	43,3
03 - Compósito unidirecional a 90°	92,5
04 – Compósito unidirecional a 0°	103,0
05 - Compósito [0° 90° 45°] _s	121,0
06 - Compósito [0°-45°+45°] _s	141,0
07 – Compósito [0° 90° 45°] _s - Carbono	288,8

Fonte: O autor

Embora os valores de tensão máxima, obtidos para o Alumínio estejam bem acima dos da resina e do compósito, fica evidente o ganho obtido através da adição de reforço em fibra de carbono, bem como sua dependência da seqüência de empilhamento em função da orientação da fibra. Contudo observa-se na Tabela anterior que a medida que se altera seqüências de empilhamentos, obtém-se um ganho na tensão máxima dos compósitos, direcionando-os para a melhor seqüência de empilhamento que poderá resultar em valores tão próximos quanto ao material metálico, valores estes vantajosos para reproduzir órteses, indicando claramente sua potencialidade como material alternativo para uso em componentes biomecânicos.

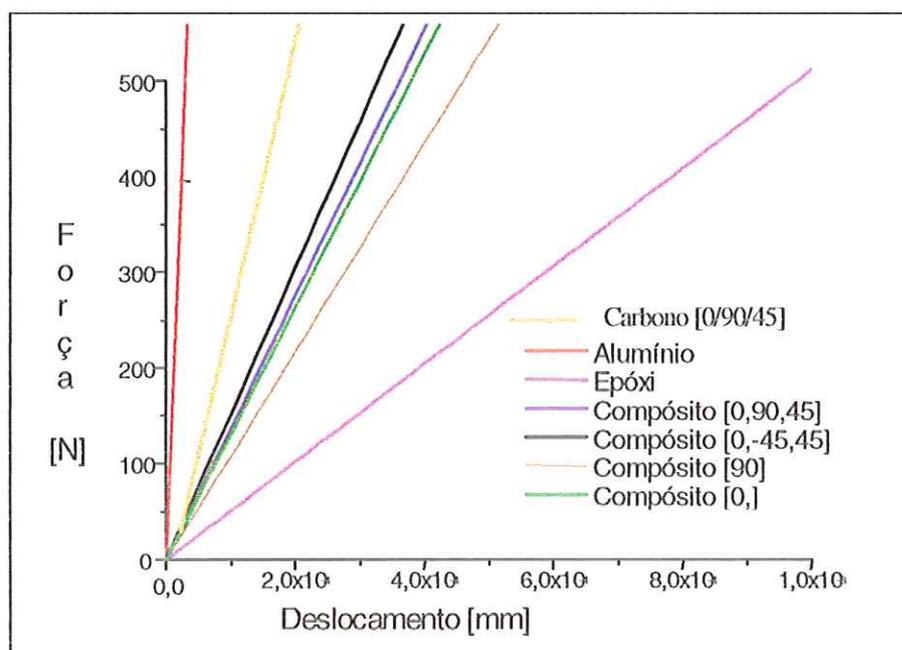


Figura 40. Curva carga x deslocamento obtidas na simulação

Fonte: O autor

5 Conclusões

Os resultados obtidos indicam a potencialidade do uso de polímeros reforçados como materiais substitutos aos metálicos, tradicionalmente utilizados, no projeto de componentes biomecânicos, com vantagens de redução de peso e de custo.

A proposta deste trabalho foi a de buscar a redução de peso e a otimização das propriedades do material compósito, como material alternativo aos metálicos.

Considera-se que a proposta deste trabalho obteve êxito, pois foi possível considerar uma redução de peso de aproximadamente 40% de um peso de 71 gramas, em metal para outro de 43 gramas em compósito obtendo-se um resultado positivo relativo a proposta do trabalho. Contudo, deve-se observar que, para que este trabalho se tornasse mais amplo, seria de oportuno interesse: a realização dos demais ensaios mecânicos; a aquisição de equipamento que permita a realização destes ensaios; uma análise computacional, mais específica e abrangente, haja vista a necessidade de uma análise computacional, envolvendo simulações de mecanismos mais complexos tais como fratura, dano progressivo e impacto. Contudo, simulações envolvendo tais processos ainda são objetos de estudo, podendo inclusive dar origem à uma série de trabalhos adicionais na área.

Como contribuição final, ressalta-se a comprovação e a utilização de materiais poliméricos reforçados, em componentes de órteses, pode representar uma boa alternativa para obtenção de componentes de baixo peso e alto desempenho, desde que sejam observados, criteriosamente, os requisitos de projeto e fabricação de tais materiais.

6 Referências Bibliográficas

AGARWAL, D.B.; BROUTMAN, L.J. (1990). **Analysis and performance of fiber composites**. 2nd ed. New York: John Wiley.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1995). **D3039/D3039M-95a**: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composites. Philadelphia. CD-ROM.

_____. (1995). **D638-96**: Standard test method for tensile properties of plastics. Philadelphia. CD-ROM.

_____. (1991). **D695/96**: Standard test method for compressive properties of rigid plastics¹. Philadelphia. CD-ROM.

_____. (1995). **D 3878-95c**: High-Modulus Reinforcing Fibers and Their Composites¹. Philadelphia. CD-ROM.

ANSYS USER'S MANUAL (1995). Theory, Procedures, Elements. V.I, v.II, v. III and v. IV – ANSYS, inc. Houston, USA.

ANSYS/LS-DYNA (1998). Theoretical manual. Livermore Software – Livermore Software. Technology Corporation, Livermore, USA.

ASHBY, M.F. (1992). **Materials selection in mechanical design**. Oxford: Pergmon Press.

ASTM D 790-96a (1996). Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. West Conshohocken.

CALLISTER JR., W.D. (1985). **Materials science and engineering**. New York: John Wiley.

CARBON fiber. (2203). Vince Kelly's Carbon Fiber Technology. Disponível em: <<http://www.geocities.com/CapeCanaveral/1320/>>. Acesso em: 22 jul. 2003.

CARVALHO, J. (1996). **Computer integrated design optimization and manufacturing of filament wound parts**. 106p. Tese (Doutorado) - Faculty of Applied Sciences, Division PMA, Leuven, 11 fev.1996.

- DANIEL, I.M. (1994). **Engineering mechanics of composite materials**. New York: Oxford: University Press.
- ENGINEERED MATERIALS HANDBOOK (1987). ASM International, v.1 – Composites. Library of Congress Catalog in Publication Data.
- EDWARDS, K.L. (1998). **An Overview of the technology of fibre-reinforced plastics for design purposes**. Materials & Design, Oxford.
- GUIDE to composites. (2003). Reno: ABARIS. Disponível em:<<http://www.netcomposites.com/education.asp?sequence=82>>. Acesso em: 19 ago. 2003.
- HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CEMENT COMPOSITES, 15., 1991, Mainz. **Proceedings...** London: E & F N Spon.
- HULL, D. (1981). **An Introduction to composite materials**. London: Cambridge University Press.
- JANG, B.Z. (1994). **Advanced polymer composites**. Materials Park: ASM International.
- LEE, S.M. (Ed.). (1990). **International encyclopedia of composites**. New York: VCH.
- LUBIN, G. (Ed.) (1992). **Handbook of composites**. New York: Van Nostrand Reinhold.
- MATTHEWS, F.L.; RAWLINGS, R.D. (1994). **Composite materials: engineering and science**. London: Chapman & Hall.
- MICHAELI, W. (1995). **Plastics processing: an introduction**. Munich: Hanser.
- MORENA, J.J. (1988). **Advanced composite mold making**. Malabar: Society of Plastics Engineers.
- O’SULLIVAN, S.B.; CULLEN, K.E.; SCHMITZ, T.J. (1987). **Fisioterapia: tratamento, procedimentos e avaliação**. São Paulo: Manole. p.165-446.
- PRODUTOS ortopédicos. (2003). São Paulo: AACD. Disponível em:<http://aacd.org.br/ortopedia_prods_orteses.asp#>. Acesso em: 15 mar. 2002

SIERAKOSWKI, R.L. (1997). **Strain rate effects in Composites**. *ASME* (American Society of Mechanical Engineers).

SIMULAÇÃO computacional: **introdução á análise por elementos finitos**. (2002).
Porto Alegre: PCE. Disponível em:<www.pce.com.br/intro_fea.htm>. Acesso em: 19 ago. 2003.

TURI, A. (Ed.). (1981). **Thermal characterization of polymeric materials**. New York: Academic Press.

VINSON, J.R.; SIERAKOWSKI, R.L. (1987). **Behavior of structures composed of composite materials**. Dordrecht: Nijhoff.

WATT, W.; PEROV, B.V. (Ed.). (1985). **Strong fibres**. Amsterdam: Elsevier Science.