

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGEM

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TUBO
COMPÓSITO POR ULTRASSOM

Felipe Alves Koops

Dissertação para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGEM

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TUBO
COMPÓSITO POR ULTRASSOM

FELIPE ALVES KOOPS
Engenheiro de Materiais

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Ciência e tecnologia dos materiais

Porto Alegre

2013

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke, PPGEM-UFRGS, Brasil.

Banca examinadora:

Dr. Fernando Machado Machado, UNIFRA, Santa Maria, RS, Brasil

Dr. Rubem Manoel de Braga, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil

Dr. Toni Roger Schifelbain de Lima, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGEM

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Marina Koops e Mario Koops, pelo apoio incondicional à minha formação, além do amor e suporte financeiro que sempre me deram e pelos valores que me ensinaram.

À minha namorada Clarice que sempre me apoiou nos momentos difíceis e ouviu minhas reclamações e pelos conselhos.

Aos colegas do LAMEF, em especial alguns nomes devem ser citados, pois tiveram participação na execução do trabalho como o Dr. Rubem Braga (Rubão), os Engenheiros Sérgio A. Pavani, Allan Romário Dias, Toni Roger Lima e Elisangela Pelizzari. Aos futuros Engenheiros Alexandre Gamarra, Toni Chiossi e Johnny Lacerda.

A colaboração essencial dos membros do LACER, em especial Antonio Takimi e Matheus Cunha, pois tiveram participação direta no trabalho.

Aos meus amigos que me apoiaram em momentos complicados e que sempre se prontificaram a ajudar.

À banca examinadora deste trabalho.

Ao Professor Thomas Clarke pela orientação.

A Petrobras pelo financiamento da bolsa de estudos durante os meses que realizei o trabalho.

*“O maior inimigo esconde-se
no local mais improvável.”*

Júlio César, 75 a.C.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	VII
Lista de Tabelas.....	VIII
Lista de Equações.....	X
Lista de Símbolos e Abreviaturas.....	XI
RESUMO.....	XIV
ABSTRACT.....	XV
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Materiais Compósitos.....	4
3.1.1 Compósitos Poliméricos.....	6
3.1.1.1 Matriz Termorrígida.....	8
3.1.1.1.1 Resina Epóxi.....	9
3.1.1.2 Fibras.....	11
3.1.1.2.1 Fibras Sintéticas.....	12
3.1.2 Processos de Fabricação.....	14
3.1.2.1 Enrolamento Filamentar ou “ <i>Filament Winding</i> ”.....	15
3.1.2.1.1 Enrolamento Molhado.....	16
3.2 Ultrassom.....	22
3.2.1 Principais variáveis da técnica de ultrassom.....	25
3.2.1.1 Velocidade.....	25
3.2.2 Tipos de Mostradores.....	31
3.3 Comportamento Elástico de Materiais Anisotrópicos.....	34

3.3.1	Materiais Ortotrópicos	37
3.3.2	Materiais Transversalmente Isotrópicos	38
3.3.3	Constantes Elásticas e Propriedades Mecânicas.....	40
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	43
4.1	Materiais	43
4.2	Métodos	43
4.2.1	Ensaio Mecânicos	44
4.2.1.1	Ensaio de tração em corpo de prova do tipo halteres.....	44
4.2.1.2	Ensaio de tração em corpo de prova do tipo anel com seção reduzida	46
4.2.2	Densidade e Fração Volumétrica de Fibras	49
4.2.3	Porosidade Aparente.....	50
4.2.4	Medidas de ultrassom	50
4.2.5	Composição Química	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.1	Ensaio Mecânicos	58
5.1.1	Ensaio de tração em corpos de prova do tipo halteres.....	58
5.1.2	Ensaio de tração em corpos de prova do tipo anel com seção reduzida.....	59
5.2	Densidade e Fração Volumétrica de Fibras	60
5.3	Porosidade Aparente.....	61
5.4	Medidas de Ultrassom	61
5.5	Cálculo das Constantes Elásticas e Propriedades Mecânicas.....	66
5.6	Composição Química	67
6	CONCLUSÕES	68
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

Lista de Figuras

Figura 3.1 - Classificação dos Compósitos (CALLISTER JR., 2001).....	6
Figura 3.2 - Ligação cruzada de moléculas durante a cura (MAZUMDAR, 2002).....	9
Figura 3.3 - Estrutura básica do DGEBA.....	10
Figura 3.4 - Ilustração de um equipamento de enrolamento filamental (SHEN, 1995).	17
Figura 3.5 - Tubo fabricado pelo processo de enrolamento filamental (S A Composites)	18
Figura 3.6 - Enrolamento circunferencial (SHEN, 1995).....	19
Figura 3.7 - Enrolamento helicoidal (SHEN, 1995).....	19
Figura 3.8 - Etapas do enrolamento helicoidal (SHEN, 1995).....	20
Figura 3.9 - Enrolamento polar (AINSWORTH, 1971).....	21
Figura 3.10 - Desenho esquemático de um transdutor ultrassônico (BERUTTI, 2004).	24
Figura 3.11 - Acoplamentos para ensaio de ultrassom. (a) contato direto. (b) imersão (BERUTTI, 2004).....	25
Figura 3.12 - Representação esquemática de uma onda ultrassônica longitudinal (BERUTTI, 2004).....	27
Figura 3.13 - Representação esquemática de uma onda ultrassônica transversal (BERUTTI, 2004).....	28
Figura 3.14 - Representação do A-scan (ANDREUCCI, 2011).....	32
Figura 3.15 - Representação do B-scan (ANDREUCCI, 2011).....	33
Figura 3.16 - Representação C-scan (ANDREUCCI, 2011).....	34
Figura 3.17 - Orientação das tensões em um elemento de volume infinitesimal (CHUNG, 1996).	35
Figura 3.18 - Material Ortotrópico com isotropia transversal (NYE, 1993).	39
Figura 3.19 - Material compósito com as principais direções das fibras (MARQUES e WILLIAMS JR., 1986).....	41
Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia aplicada.	43
Figura 4.2 - Corpos de prova do tipo halteres. (a) sentido do corte do tubo. (b) dimensões do corpo de prova. (c) corpo de prova.....	45
Figura 4.3 - Sistema de ensaio de tração no corpo de prova tipo halteres.....	46
Figura 4.4 - Corpos de prova do tipo anel. (a) sentido do corte do tubo. (b) dimensões do corpo de prova. (c) corpo de prova.....	47

Figura 4.5 - Sistema de ensaio de tração no corpo de prova tipo anel com seção reduzida	48
Figura 4.6 - Direções das medidas de velocidade ultrassônica	51
Figura 4.7 - Corpo de Prova do tipo I, (a) desenho com as dimensões do corpo de prova, (b) vista Lateral e (c) vista Frontal	52
Figura 4.8 - Desenho esquemático apresentando as variáveis DP (Distância Projetada), PS (Percurso Sônico), α (Ângulo de refração corrigida) e h (Distância entre a Superfície da amostra e o furo) no interior da amostra.	54
Figura 4.9 - Corpo de Prova do Tipo II, (a) desenho com as dimensões do corpo de prova e (b) vista superior.	56
Figura 4.10 - Corpo de Prova do Tipo III, (a) desenho com as dimensões do corpo de prova e (b) vista superior.	56
Figura 5.1 – Curva tensão-deformação do corpo de prova tipo halteres	58
Figura 5.2 - Curva tensão-deformação do corpo de prova do tipo halteres corrigida. ...	59
Figura 5.3 - Curva tensão-deformação dos corpos de prova testados do tipo anel	60
Figura 5.4 - Tela do equipamento Olympus-Epoch XT para a medida da velocidade longitudinal no sentido radial do tubo.	61
Figura 5.5 - Tela do equipamento Olympus-Epoch XT para a medida da velocidade transversal no sentido axial do tubo.	62
Figura 5.6 - Tela do equipamento Olympus-Epoch XT para a medida da velocidade longitudinal no sentido intermediário a 44° entre os eixo x e z.....	63
Figura 5.7 - Tela do equipamento Olympus-Epoch XT para a medida da velocidade longitudinal no sentido circunferencial do tubo.	64
Figura 5.8 - Tela do equipamento Olympus-Epoch XT para a medida da velocidade transversal no sentido radial do tubo.	65

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Composição (%) típica das fibras de vidro	13
Tabela 3.2 - Tensor versus Notação Reduzida para tensões e deformações (JONES, 1999).....	36
Tabela 3.3 - Relações entre constantes elásticas de rigidez da matriz e as velocidades ultrassônicas (MARQUES e WILLIAMS JR., 1986)	42
Tabela 3.4 - Relações entre as constantes elásticas e propriedades para material transversalmente isotrópico (MARQUES e WILLIAMS JR., 1986)	42
Tabela 4.1 - Valores dos ângulos de incidência calculados para o aço.	53
Tabela 4.2 - Valores dos ângulos refratados para compósito.....	53
Tabela 4.3 - Valores de h medido, DP, PS.	54
Tabela 4.4 - Valores dos ângulos refratados para compósito.....	55
Tabela 4.5 - Valores de h medido e DP e PS calculados.....	55
Tabela 5.1 - Resumo das velocidades medidas	66
Tabela 5.2 - Valores das constantes elásticas da matriz.....	66
Tabela 5.3 - Valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson	67
Tabela 5.4 - Composição química da amostra cilíndrica do tubo compósito.....	67

Lista de Equações

Equação 3.1 - Equação da velocidade ultrassônica	26
Equação 3.2 - Forma matricial do tensor de tensões	35
Equação 3.3 - Igualdade demonstrando equilíbrio de volume	35
Equação 3.4 - Lei de Hooke	35
Equação 3.5 - Lei de Hooke	36
Equação 3.6 - Notação reduzida	36
Equação 3.7 - Notação reduzida	36
Equação 3.8 - Matriz de rigidez simétrica	37
Equação 3.9 - Matriz de rigidez para material ortotrópico	37
Equação 3.10 - Matriz de flexibilidade de material ortotrópico simplificada	38
Equação 3.11 - Igualdade devido a simetria	38
Equação 3.12 - Matriz de rigidez para material transversalmente isotrópico	40
Equação 3.13 - Matriz de flexibilidade de material transversalmente isotrópico simplificada	40
Equação 4.1 - Equação da tensão circunferencial para anel de seção reduzida	48
Equação 4.2 - Fração em massa de fibra do compósito	49
Equação 4.3 - Fração volumétrica de fibra do compósito	50
Equação 4.4 - Equação da Porosidade Aparente	50
Equação 4.5 - Lei de Snell	52

Lista de Símbolos e Abreviaturas

DGEBA - Éter diglicidílico de bisfenol A

DETA - Dietilenotriamina

RTM - Resin Transfer Molding

SiO₂ - Dióxido de silício

Al₂O₃ - Óxido de alumínio

B₂O₃ - Óxido de boro

MgO - Óxido de magnésio

CaO - Óxido de cálcio

Na₂O - Óxido de sódio

Cl - Cloro

TiO₂ - Dióxido de titânio

Fe₂O₃ - Óxido férrico

K₂O - Óxido de potássio

SO₃ - Óxido sulfúrico

ZrO₂ - Dióxido de zircônio

P₂O₅ - Pentóxido de fósforo

Co₂O₃ - Óxido de cobalto (III)

SrO - Óxido de estrôncio

v - velocidade,

f - frequência

λ - comprimento de onda

σ_{ij} - Tensor de tensão

ρ - Densidade

C_{ijkl} - Tensor de rigidez elástica do material

s_{ijkl} - Tensor de flexibilidade do material

S_{kl} - Tensor de deformação

E_i - Módulo de elasticidade

ν_{ij} - Coeficiente de Poisson

G_{ij} - Módulo de cisalhamento

d_1, d_2 - espessura das seções reduzidas

b_1, b_2 - largura das seções reduzidas

W_f - fração de massa de fibra do compósito

ω_f - massa de fibra após queima

ω_c - massa do compósito

V_f - fração volumétrica de fibras

W_f - fração de massa das fibras

ρ_c - densidade do compósito

ρ_f - densidade das fibras

m_s - massa seca da amostra

m_u - massa úmida

m_i - massa imersa

PA - Porosidade Aparente

CP-I - Corpo de Prova do Tipo I

CP-II - Corpo de Prova do Tipo II

CP-III - Corpo de Prova do Tipo III

v_i - velocidade de incidência

v_r - velocidade de refração;

α_i - ângulo de incidência;

α_r - ângulo de refração

DP - Distância Projetada

PS - Percurso Sônico

h - Distância entre a superfície da amostra e o furo

RESUMO

Com o avanço da indústria do petróleo, há uma grande necessidade de tubulações e componentes resistentes a ambientes corrosivos, ocasionando a necessidade de materiais resistentes a esse tipo de ambiente sem prejuízo às propriedades mecânicas, por isso existe a necessidade da caracterização das propriedades mecânicas. As técnicas convencionalmente aplicadas são os ensaios mecânicos tradicionais, porém eles muitas vezes são muito complexos de serem realizados, não fornecem os dados necessários ou muito caros. Este trabalho apresenta a técnica de ultrassom realizado a partir do método de pulso-eco, para a determinação das constantes elásticas de um tubo compósito comercial de resina epóxi reforçada com fibra de vidro. Alguns trabalhos nessa área já foram realizados, mas neles são apresentados amostras planas ou em forma de chapas, ao contrário do apresentado nesse trabalho que faz medidas em tubo compósito. Com as medidas de ultrassom se obtém as velocidades ultrassônicas longitudinais e transversais em determinadas direções para o cálculo das constantes elásticas e a partir destas, as propriedades mecânicas do material. Essa técnica foi adotada pela dificuldade de se obter as variáveis das constantes elásticas por ensaios mecânicos e por se tratar de uma técnica não destrutiva. Os experimentos são realizados com amostras de fibra de vidro/epóxi considerados transversalmente isotrópicos para simplificação do modelo, utilizando transdutores com frequências de 2 e 4 MHz para a determinação das velocidades longitudinais e 1 MHz para as velocidades transversais com sapatas de 45 e 60° para o aço, com ângulos corrigidos para compósito de 19,1 e 44°, respectivamente. Para o cálculo das constantes elásticas também é necessária a determinação da densidade do compósito que foi realizada por picnometria a hélio. Paralelamente aos ensaios de ultrassom, foram realizados ensaios mecânicos de tração em corpos de prova do tipo anel (direção x) e do tipo halteres (direção z) para a avaliação das propriedades mecânicas. Além dos ensaios de ultrassom e ensaios de tração, foi realizada a análise química do tubo compósito pela técnica de fluorescência de raios X. Os ensaios mecânicos nos forneceram módulo de elasticidade de 22,04 GPa (direção x) e módulo de elasticidade de 10,30 GPa (direção z). Os módulos de elasticidade obtidos por ultrassom na direção x e z foram 16,90 e 13,82 GPa, respectivamente. A fração volumétrica de fibra foi de 27,27% e análise química por fluorescência de raios X identificou a presença de 56,76% de material orgânico, 24,38% de SiO₂, 12,05% de CaO, 4,85% de Al₂O₃ e outros compostos 1,96%.

ABSTRACT

With the advancement of the petroleum industry, there is a great need for piping and components resistant to corrosive environments, resulting in the necessity for materials resistant to this kind of environment subject to mechanical properties, so there is the need for characterization of mechanical properties. The techniques conventionally applied are the traditional mechanical tests, but they are often very complex to apply, do not provide the necessary data or very expensive. This paper presents the ultrasound technique performed using the pulse-echo method for the determination of the elastic constants of a composite tube commercial epoxy resin reinforced with glass fiber. Some studies in this area have been developed but samples are presented them flat or shaped plates, contrary to what is presented in this study measures composite tube. With ultrasound measurements obtained ultrasonic velocities in the longitudinal and transverse directions, completed for the calculation of the elastic constants and from these, the mechanical properties of the material. This technique was adopted by the difficulty of obtaining the variables of the elastic constants for mechanical testing and it is a non-destructive technique. The experiments are carried out with samples of glass fiber/epoxy considered transversely isotropic to simplify the model, using transducers with frequencies of 2 and 4 MHz for determining the speed longitudinal and 1 MHz for speeds transverse shoes 45 and 60° for steel, with fixed angles for composite of 19.1 and 44°, respectively. For the calculation of the elastic constants is also necessary to determine the density of the composite was performed by helium pycnometry . Alongside the ultrasound tests were performed on tensile test specimens of type ring (x direction) and the type dumbbells (z direction) for the evaluation of mechanical properties . Besides the ultrasound tests and tensile tests was performed chemical analysis of composite pipe technique of X-ray fluorescence The mechanical tests provided us with modulus of 22.04 GPa (x direction) and modulus of elasticity of 10.30 GPa (z direction) . The modulus of elasticity using ultrasound in x and z direction were 16.90 and 13.82 GPa, respectively. The fiber volume fraction was 27.27% and chemical analysis by x-ray fluorescence showed the presence of 56.76 %, organic material, 24.38 % SiO₂, 12.05 % CaO, 4.85% Al₂O₃ and 1.96% other compounds.

1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos alcançados pelas diversas áreas da engenharia levaram à crescente demanda de novos materiais que pudessem ser aplicados em condições extremas como, por exemplo, temperatura, pressão, ataque químico e carregamento mecânico, para a viabilidade econômica e técnica.

Os materiais compósitos poliméricos possuem diversas vantagens quando comparados aos materiais metálicos utilizados normalmente na engenharia. Sua resistência a ambientes corrosivos, associada à sua alta resistência e módulo de elasticidade específicos, aliada à sua baixa densidade, impulsionaram a aplicação destes materiais em estruturas que exigem baixa massa específica sem sacrifício das propriedades mecânicas. Por esses motivos, os materiais compósitos têm grande emprego e potencial na indústria do petróleo, visto que em algumas aplicações em tubulações para o transporte de óleo, gás, água quente e água de lavagem são necessários uma grande resistência à ataques corrosivos.

Para se ter um efetivo aproveitamento do desempenho dos compósitos poliméricos em tubulações dadas as diversas variáveis do processo de enrolamento filamentar se faz necessária a determinação das propriedades mecânicas. O conhecimento da matriz de rigidez elástica é essencial para se garantir o comportamento mecânico desses materiais sob condições elásticas. Entre as técnicas convencionais usadas para a obtenção das propriedades elásticas desses materiais, os mais utilizados são os ensaios mecânicos. Mas estes apresentam desvantagens, tais como: (a) algumas constantes dos materiais são de difícil obtenção, (b) são destrutivos (c) custos altos envolvidos na produção e preparação de amostras, entre outros. Utilizando-se técnicas de ensaios não destrutivos por ultrassom em materiais pode-se determinar as constantes elásticas do material através das velocidades de propagação das ondas elásticas que se propagam no material.

Com considerações de simetria, o número de constantes elásticas no material é reduzido de 21 (material anisotrópico) para cinco (material transversalmente isotrópico). A determinação das constantes elásticas da matriz de rigidez de materiais compósitos é feita a partir da medição das velocidades de propagação das ondas elásticas em

diferentes orientações de propagação, pois estas estão relacionadas com as constantes elásticas e a densidade do material.

Existem estudos na área de caracterização das propriedades mecânicas de materiais compósitos por métodos não destrutivos como holografia óptica, ressonância mecânica e ultrassom. Nesse contexto, a utilização de métodos ultrassônicos foi o escolhido apesar de apresentar algumas limitações que não foram apresentados em trabalhos anteriores como as medidas de ultrassom em corpos de prova em formatos cilíndricos (a maioria apresenta estudos em chapas ou componentes planos), utilização de ultrassom convencional para medidas das velocidades, correção de ângulos para materiais compósitos, pois a maioria das sapatas são projetadas para aço.

O presente trabalho apresenta um estudo de tubos compósitos de resina epóxi reforçada com fibra de vidro do tipo E, produzidos por enrolamento filantar, determinando-se as propriedades mecânicas para o material através de ensaios mecânicos e ensaios por ultrassom.

No estudo, se fez uma revisão bibliográfica abordando materiais compósitos, resina epóxi, fibras de vidro e enrolamento filantar. Também se discutiu sobre o ensaio de ultrassom e como determinar as constantes elásticas e as propriedades mecânicas de um material transversalmente isotrópico através das velocidades ultrassônicas. Foram apresentados no trabalho os procedimentos experimentais dos ensaios tração de corpos de prova do tipo halteres e do tipo anel com seção reduzida para avaliação dos módulos de elasticidade, coeficientes de Poisson. Além disso, foram realizadas medidas de densidade por picnometria a hélio (necessária para a determinação das constantes elásticas), fração mássica e volumétrica de fibras do compósito obtidos através do método da queima, porosidade aparente (que influencia nas medidas ultrassônicas e na resistência mecânica dos materiais), ensaios de ultrassom para obtenção das velocidades longitudinais e transversais necessárias para a determinação das constantes elásticas e posterior cálculo das propriedades mecânicas e a utilização de técnica de fluorescência de raios X para análise da composição química. Por fim, se discutiram os resultados e as conclusões.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho constitui-se na aplicação da técnica de ultrassom para a caracterização das propriedades mecânicas de materiais compósitos para produção de tubulações.

Como objetivos específicos, foram desenvolvidos os seguintes trabalhos investigativos:

- ensaios mecânicos de tração em corpos de prova do tipo halteres e do tipo anel com seção reduzida para obtenção das propriedades mecânicas por meio convencional;
- análise da fração volumétrica de fibras a partir do método da queima;
- medidas de velocidades ultrassônicas a partir do método pulso-eco para a determinação das constantes elásticas e das propriedades mecânicas;
- determinação da composição química do tubo compósito através da técnica de fluorescência de raios X.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Materiais Compósitos

Materiais compósitos vêm sendo utilizados para resolver problemas tecnológicos há muito tempo, mas apenas nos anos 60 fez com que esses materiais começassem a chamar a atenção das indústrias com a introdução de compósitos à base polimérica. Desde então os materiais compósitos se transformaram num material comum de engenharia e são projetados e produzidos para várias aplicações incluindo componentes para a indústria automotiva, artigos esportivos, peças para a indústria aeroespacial, artigos de consumo e na marinha e indústria do petróleo.

O crescimento da utilização dos compósitos também surgiu por causa de uma maior sensibilização em relação ao desempenho do produto e aumento da concorrência no mercado mundial de componentes leves. Entre os materiais, materiais compósitos têm amplo potencial de substituição do aço e alumínio, e muitas vezes com melhor desempenho. A substituição de componentes de aço por componentes compósitos podem diminuir de 60 a 80% em peso da peça e 20 a 50% em peso na substituição de componentes de alumínio (MAZUMDAR, 2002).

Embora não exista uma definição universal para compósito, pode-se dizer que qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades das fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades. Porém alguns critérios devem ser atendidos como:

- Consiste de dois ou mais materiais, intrinsecamente insolúveis (mantém sua identidade no material final), com formas e/ou constituições e/ou propriedades diferentes.
- As propriedades do compósito precisam ser notadamente distintas daquelas dos constituintes (exclui-se assim a aditivação convencional, com lubrificantes, etc.).
- Os constituintes têm que estar em proporções razoáveis (e.g. 5%).

- Os diferentes materiais (fases) estão separados por uma interface de escala microscópica (AMICO, 2007).

Um compósito é composto por dois (ou mais) materiais individuais, como metais, cerâmicas e polímeros. A meta de projeto de um compósito consiste em se atingir uma combinação de propriedades que não é exibida por qualquer material isolado e, também, incorporar as melhores características de cada um dos materiais componentes. Existem vários tipos de compósitos, os quais são representados por diferentes combinações de metais, cerâmicas e polímeros. Adicionalmente, alguns materiais de ocorrência natural também são considerados materiais compósitos, como por exemplo, a madeira e o osso. Contudo, a maioria daqueles materiais considerados refere-se a compósitos sintéticos (CALLISTER JR., 2001).

Um compósito é projetado de modo que as cargas mecânicas a que a estrutura está submetida em serviço sejam suportadas pelo reforço. Suas propriedades dependem da matriz, do reforço e da camada limite entre os dois, chamada de interface. A matriz tem como função dar suporte e proteção ambiental adequados à fibra, evitando falhas catastróficas e suportar tensões de cisalhamento. Já o reforço deve ter pelo menos umas das dimensões pequenas (1-500mm) podendo ser particulado ou fibroso e ainda podendo ter seu arranjo randômico ou preferencial.

Dessa forma, há muitas variáveis a considerar ao projetar um compósito: o tipo de matriz (metálica, cerâmica e polimérica), a interface matriz-reforço (ligação adesiva), o tipo de reforço (fibras ou partículas), a geometria do reforço (forma, tamanho, distribuição e orientação) e as proporções relativas (matriz e reforço). Todas essas variáveis devem ser cuidadosamente controladas a fim de produzir um material estrutural otimizado para as circunstâncias sob as quais será usado (GIBSON, 1994). A interface matriz-reforço, por exemplo, desempenha um papel importante nas propriedades desses materiais. O limite de resistência à ruptura do compósito depende, em um alto grau de magnitude, da ligação adesiva, essencial para maximizar a transmissão da tensão da matriz para o reforço (CALLISTER JR., 2001).

Um esquema simples para classificação dos tipos de materiais compósitos é apresentado no fluxograma da Figura 3.1. Tanto a matriz quanto o reforço podem ser metálicos, cerâmicos ou poliméricos e os reforços podem estar em forma de partículas

(grandes ou dispersas) ou em forma de fibras (contínuas, descontínuas ou entrelaçadas, formando tecido) ou ainda estrutural (laminados ou painéis-sanduíche).

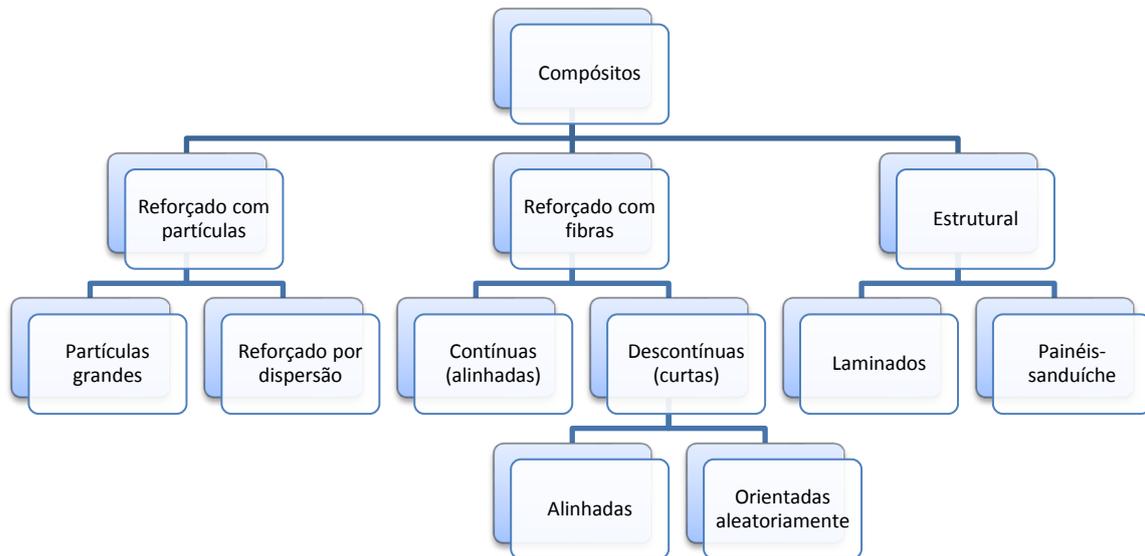


Figura 3.1 - Classificação dos Compósitos (CALLISTER JR., 2001)

3.1.1 Compósitos Poliméricos

Os compósitos poliméricos consistem na utilização de uma resina polimérica como matriz, com fibras como meio de reforço. Esses materiais são utilizados na mais ampla diversidade de aplicações dos compósitos, bem como nas maiores quantidades, em vista de suas propriedades à temperatura ambiente, de sua facilidade de fabricação e de seu custo (CALLISTER JR., 2001). Os materiais compósitos requerem uma fibra resistente, com forte adesão entre matriz e fibra para melhorar suas propriedades finais (MAZUMDAR, 2002). O comportamento mecânico do compósito reflete a interação entre as várias fases. Em resumo, se não há ligação entre os dois componentes, seja química ou física, a resposta do material, para pequenas deformações, será como se a matriz tivesse discontinuidades em tamanhos idênticos às dimensões do reforço. Se houver adesão entre as duas fases, o reforço irá compartilhar a tensão e, fazendo isso, agirá como um agente de reforço (SHELDON, 1982). Se a interface é muito rígida por

causa da forte interação, existe uma possibilidade de aumento de deterioração de algumas propriedades que requerem alguma flexibilidade da interface, a fim de dissipar o excesso de energia, como a tenacidade à fratura.

A boa interação entre polímero e reforço é dependente do baixo ângulo de contato entre matriz e reforço, ausência de trincas e poros na superfície do reforço, coeficientes de expansão térmica similares levam a uma boa interação polímero-reforço (FUKUDA, 1994). Outro fator que tem grande influência é a superfície limpa e livre de poeira (NETO e PARDINI, 2006). Também se deve levar em conta energia superficial dos componentes (GARTON, 1992).

No caso de fraca adesão, o processo de fratura destaca as fibras do compósito, enquanto para forte adesão menos arrancamento de fibra ocorre e qualquer fibra que tiver sido arrancada terá fragmentos mais fortes aderidos na matriz. Deve-se salientar que certas propriedades, como resistência ao impacto, devem ser aumentadas por fraca adesão interfacial, uma vez que o processo de arrancamento da fibra pode absorver uma grande quantidade de energia. Outras propriedades, como resistência transversal do compósito, requerem uma forte adesão interfacial (OLABISI, 1979).

Outros fatores importantes como grau de orientação da fibra, propriedades físicas e químicas também devem ser avaliadas para um maior entendimento do compósito como um todo (FUKUDA, 1994). Outro fator relevante é o teor de vazios que pode contribuir para a redução do desempenho dos compósitos, em termos de resistência mecânica e absorção de água. O teor médio de vazios calculado para os compósitos com fibras curtas está na faixa de até 10% (WOOL, 2004).

Os compósitos poliméricos podem ser divididos em naturais (madeira e fibras de sisal e curauá) e sintéticos (epóxi/fibra de vidro, poliéster/carbono). Os diferentes tipos de compósitos apresentam características bem diversas entre si, e os seus usos, em diferentes aplicações, dependem de fatores, tais como desempenho estrutural, preço e disponibilidade de matérias-primas, meios de fabricação, entre outros (NETO e PARDINI, 2006).

3.1.1.1 Matriz Termorrígida

As matrizes termorrígidas, também chamadas de termofixas, são as resinas mais utilizadas na fabricação de compósitos poliméricos. Isso se deve ao seu relativo baixo custo, facilidade de processamento, excelente molhabilidade dos reforços, boas propriedades e ampla variedade de grades disponíveis. As resinas mais comuns são as resinas epóxi, poliéster, e vinil-éster (CALLISTER JR., 2001).

As principais funções da matriz são:

- O material da matriz liga as fibras em conjunto e transfere a carga às fibras. Isso fornece rigidez e forma para a estrutura.
- A matriz isola as fibras de modo que as fibras individuais podem atuar separadamente. Isso impede ou retarda a propagação da trinca.
- A matriz promove uma superfície de boa qualidade.
- A matriz proporciona uma proteção para as fibras de reforço contra ataque químico e danos mecânicos (desgaste).
- Dependendo do material da matriz selecionado, as características de desempenho tais como ductilidade, resistência a ruptura, resistência ao impacto, etc., são também influenciadas. Uma matriz dúctil irá aumentar a tenacidade da estrutura, por isso se seleciona um compósito termoplástico.
- O modo de falha é fortemente afetado pelo tipo de material da matriz usado no compósito, bem como sua compatibilidade com a fibra (VAUGHAN, 1998).

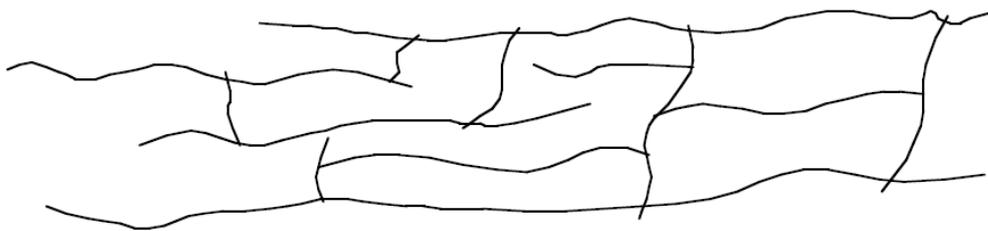


Figura 3.2 - Ligação cruzada de moléculas durante a cura (MAZUMDAR, 2002)

As resinas termorrígidas uma vez curadas não podem ser fundidas novamente ou reformadas, pois durante a cura elas formam uma ligação tridimensional cruzada (*cross-linking*), como apresentado na Figura 3.2 (MAZUMDAR, 2002).

3.1.1.1.1 Resina Epóxi

Epóxi é um sistema de resina muito versátil, permitindo uma ampla gama de propriedades e capacidades de processamento. Ele apresenta baixo encolhimento, bem como excelente aderência a uma variedade de materiais de substrato. Epóxis são os mais amplamente utilizados em materiais de resina e são usados em muitas aplicações, desde a indústria aeroespacial até artigos esportivos. Existem vários tipos de resina epóxi com diferentes níveis de desempenho para atender às necessidades de aplicação diferentes. Eles podem ser formulados com outros materiais ou pode ser misturado com outros compostos epoxídicos para satisfazer necessidades específicas de desempenho. Ao alterar a formulação, as propriedades dos epóxis podem ser alteradas; a taxa de cura pode ser modificada, a temperatura de processamento pode ser alterada, o tempo de ciclo pode ser mudado, a aderência pode ser variada, a tenacidade pode ser mudada, a resistência à temperatura pode ser melhorada, etc (NETO e PARDINI, 2006).

Os Epóxis são curados por reação química com aminas, anidridos, fenóis, ácidos carboxílicos e álcoois. Um Epóxi é uma resina líquida contendo grupos epóxido diversos, tais como éter diglicídico de bisfenol A (DGEBA), que tem dois grupos epoxidico. Em um grupo epoxidico, há um anel de três membros de dois átomos de carbono e um átomo de oxigênio. Além disso, o material de partida, outros líquidos, tais

como diluentes para reduzir a sua viscosidade e para aumentar a tenacidade são misturados. A reação de cura (reticulação) começa com a adição de um endurecedor ou agente de cura (por exemplo, dietilenotriamina [DETA]). Durante a cura, as moléculas de DGEBA formar reticulações um com o outro. Estas ligações cruzadas podem crescer numa rede tridimensional e finalmente formar uma resina epoxi sólida, como mostrado na Figura 3.3. As taxas de cura podem ser controladas através da seleção adequada dos agentes de cura e / ou catalisadores.

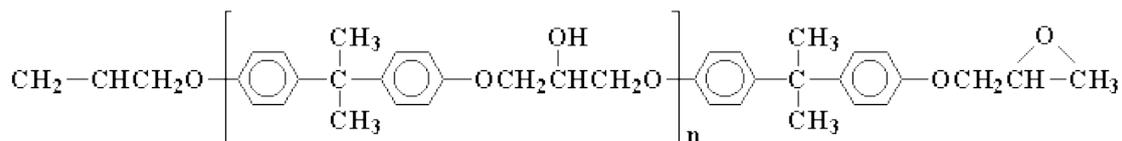


Figura 3.3 - Estrutura básica do DGEBA

Cada endurecedor fornece diferentes características de cura e diferentes propriedades para o produto final. A maior a taxa de cura, diminui o tempo e assim maiores taxas de volume de produção (MAZUMDAR, 2002).

Compósitos a base de resina Epóxi, pode proporcionar um bom desempenho em temperatura ambiente e em elevadas temperaturas. Epóxis podem operar sem comprometimento de suas propriedades de interesse até temperaturas de 93 a 121°C, e há epóxis que podem executar bem até 200 °C. O aumento do desempenho dos materiais compósitos a base de resina Epóxi, como aumento da resistência química, à corrosão e altas temperaturas, trazem como consequência o aumento dos custos.

Epóxis são fornecidos na forma de líquidos, sólidas e semi-sólido. Epóxis líquidos são utilizados em enrolamento filamental (*filament winding*), RTM (*Resin Transfer Molding*), pultrusão, hand lay-up, e outros processos com várias fibras de reforço, tais como vidro, carbono, aramida, boro, etc. Epóxi semi-sólido são utilizados em prepreg para vacuum bagging e os processos de autoclave.

As cápsulas de epóxi sólidas são utilizadas para fins de ligação. Os epóxis são mais caros do que o poliéster e vinilesters e, portanto não são usados em mercados específicos (por exemplo, automotivo e naval), a menos que o desempenho específico seja necessário.

Os epóxis são geralmente frágeis, mas para atender às necessidades das diversas aplicações, epóxis resistentes foram desenvolvidas que combinam as excelentes propriedades térmicas de um termofixo com a dureza de um termoplástico (MAZUMDAR, 2002).

3.1.1.2 Fibras

Os reforços para compósitos podem se apresentar na forma de fibras contínuas, fibras picadas e na forma de partículas. As fibras ou filamentos são o elemento de reforço que suportam o carregamento mecânico (D'ALMEIDA)

Tecnologicamente, os compósitos mais importantes são aqueles em que a fase dispersa encontra-se na fase de uma fibra. Os objetivos de projeto dos compósitos reforçados com fibras incluem frequentemente a resistência e/ou rigidez alta em relação ao seu peso (CALLISTER JR., 2001).

Uma característica importante da maioria dos materiais, especialmente daqueles que são frágeis, é que uma fibra com menor diâmetro é muito mais forte e resistente do que o material bruto, desde que tenha uma área superficial favorável (CALLISTER JR., 2001). A probabilidade de haver presente um defeito crítico na superfície que seja capaz de levar a uma fratura diminui com uma redução no volume de uma amostra, e essa característica é usada com vantagem nos compósitos reforçados com fibras. Ainda, os materiais usados como fibras de reforço possuem, elevados limites de resistência à tração.

As fibras se constituem em um meio efetivo de reforço porque apresentam menor número de defeitos que em sua forma mássica, assim tendo uma maior área interfacial fibra matriz para transferência de tensões. Acredita-se que foi Griffith o que primeiro demonstrou esse fato, em 1920. À medida que se tornam mais finos, os materiais tendem a apresentar defeitos menores que possam induzir a falhas e, dessa forma, a resistência tende a se aproximar da resistência teórica do material, representada pela resistência coesiva das camadas adjacentes de átomos (D'ALMEIDA, 2005). As fibras, de uma maneira geral, podem ser divididas em sintéticas e naturais.

As principais funções das fibras são:

- Suportar as cargas. Em um compósito estrutural, 70 a 90% do carregamento é suportado pelas fibras.
- Para aumentar ou diminuir a rigidez, resistência elétrica, estabilidade térmica e outras propriedades estruturais do compósito.
- Para proporcionar condutividade elétrica ou isolamento, dependendo do tipo de fibras utilizadas (MAZUMDAR, 2002).

3.1.1.2.1 Fibras Sintéticas

As fibras sintéticas foram desenvolvidas inicialmente com o objetivo de copiar e melhorar as características e propriedades das fibras naturais. À medida que suas aplicações foram crescendo, elas se tornaram uma necessidade, principalmente porque o crescimento da população mundial passou a demandar vestuários confeccionados com rapidez e a um custo mais baixo, reduzindo, ao mesmo tempo, a vulnerabilidade da indústria têxtil às eventuais dificuldades da produção agrícola (CARVALHO, 2006)

As fibras, entretanto, não têm utilidade estrutural se não forem aglutinadas por uma matriz. A configuração geométrica das mesmas, ou seja, pequeno diâmetro e a grande comprimento permitem um alto valor na relação área superficial/volume e, por consequência, a área interfacial fibra/matriz disponível para transferência por unidade de volume da fibra aumenta em função da relação comprimento/diâmetro (NETO e PARDINI, 2006). As fibras de vidro, carbono e aramida são alguns exemplos de fibras sintéticas mais utilizadas por apresentar uma alta resistência específica e módulo. Podemos citar como as principais fibras utilizadas a poliamida (náilon), poliacrílicos, elastômeros, fibras de carbono e fibras de vidro.

Fibras de Vidro

O tipo de fibra sintética mais utilizada em compósitos com matriz polimérica é a de vidro devido principalmente ao seu baixo custo, alta resistência à tração, e a grande

inércia química (WAMBUIA, 2003). As propriedades das fibras dependem de como a fibra foi produzida. Pela variação das quantidades de matérias-primas e dos parâmetros de processamento, podem-se produzir outros tipos de fibras de vidro. As matérias-primas são misturadas e fundidas em uma temperatura de 1300 a 1700°C (MAZUMDAR, 2002).

As desvantagens dessa fibra são associadas ao relativo baixo módulo de elasticidade, em relação a outras fibras sintéticas, auto-abrasividade e à baixa resistência à fadiga quando utilizada em compósitos. Composições típicas para fibras de vidro são mostradas na Tabela 3.1 (NETO e PARDINI, 2006).

Tabela 3.1 - Composição (%) típica das fibras de vidro

Constituintes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O
Vidro E	55,2	14,8	7,3	3,3	18,7	-
Vidro C	65	4	5	3	14	8,5
Vidro S	65	25	-	10	-	-

E= resistência elétrica, C= resistência química e S= resistência mecânica

A fibra de vidro é um material produzido a partir da aglomeração de finíssimos filamentos flexíveis de vidro. Este material é formado quando finos feixes de sílica são extrudados a partir de um fundido (VAUGHAN, 1998). A técnica de aquecimento e posterior transformação do vidro em pequenos filamentos é conhecida por milhares de anos. No entanto, o conceito de utilizar estas fibras para aplicações em compósito é mais recente.

Ela permite a produção de peças com grande variedade de formatos e tamanhos, tais como placas para montagem de circuitos eletrônicos, cascos e hélices de barcos, fuselagens de aviões, caixas d'água, piscinas, pranchas de surf, recipientes de armazenamento, peças para diversos fins em inúmeros ramos de atividade, carrocerias de automóveis, na construção civil e em milhares de outras aplicações (BARRERA, 2007).

A base da formulação da fibra de vidro é a sílica, conforme mostrado na Tabela 3.1. Em sua forma pura ela existe como um polímero (SiO₂)_n. Ela não possui um ponto de fusão definido, porém amolece em torno de 2000°C, quando começa a degradar. A

1713°C, a maioria das moléculas pode se mover livremente. Se o vidro é então resfriado rapidamente, elas serão incapazes de formar uma estrutura ordenada (KOTHARI, 1997). O estado vítreo e o estado cristalino da sílica possuem níveis energéticos similares, também implicando que a forma vítrea seja extremamente estável. A fim de induzir a cristalização, ele deve ser aquecido a uma temperatura maior que 1200°C por longos períodos de tempo.

Embora a sílica seja perfeitamente viável para a transformação em vidro, ela deve ser trabalhada em temperaturas muito altas, o que é uma desvantagem ao menos que propriedades químicas específicas sejam necessárias. É comum introduzir impurezas no vidro na forma de outros materiais, para baixar a temperatura de trabalho. Estas impurezas, por sua vez propiciam outras propriedades que são benéficas em diferentes aplicações. O primeiro tipo de vidro utilizado foi o Vidro-A, que possuía uma alta resistência a álcalis. Posteriormente, o Vidro-E foi formado, sendo um vidro de borossilicato de alumínio. Este foi o primeiro tipo de formulação utilizado para a formação de um filamento contínuo. O Vidro-E ainda é a fibra de vidro mais utilizada no mundo. A letra E é utilizada visto que ela foi desenvolvida originalmente para aplicações elétricas. O Vidro-S é uma formulação que fornece maior resistência mecânica e o Vidro-C foi desenvolvida para resistir a ataques químicos, na maioria ácidos, que prejudicam o Vidro-E (JUNIOR, 2009).

3.1.2 Processos de Fabricação

Originalmente, as técnicas de fabricação de compósitos consistiam exclusivamente em trabalho manual. No início dos anos 50, com a diversidade e o volume de aplicação destes materiais tornando-se consideráveis, a indústria iniciou uma busca por formas de automatização e desenvolvimento de verdadeiros sistemas de produção (MARGOLIS, 1985).

Existem diferentes técnicas de produção de materiais compósitos poliméricos, cada qual com suas vantagens e desvantagens. Muitas técnicas para o processamento dos materiais compósitos poliméricos são similares às mesmas utilizadas para os polímeros sem reforço, porém, necessitando de algumas modificações como, por

exemplo, maior pressão de moldagem devido à maior viscosidade. Alguns processos, no entanto, são específicos para uma classe particular de compósitos, devido a algumas necessidades especiais. O princípio do processamento dos compósitos é o mesmo para um polímero sem reforço, ou seja, ajustar as condições do processo em específico para se obter o produto final (NETO e PARDINI, 2006).

Moldagem por compressão, “*hand lay-up*” e “*spray-up*” são algumas das técnicas mais comumente empregadas para a fabricação de materiais compósitos poliméricos. Se a aplicação exige um procedimento muito mais minucioso pode-se utilizar as técnicas de enrolamento filamental ou “*filament winding*” e autoclave no qual se podem fabricar peças para setores na indústria que exijam um teor de vazios muito pequeno que não possam ser alcançados pelos demais processos (MAZUMDAR, 2002) (NETO e PARDINI, 2006).

3.1.2.1 Enrolamento Filamental ou “*Filament Winding*”

O enrolamento filamental foi originalmente desenvolvido como um método contínuo e barato para a fabricação de elementos cilíndricos. Com o desenvolvimento de máquinas e ferramentas mais versáteis, a fabricação de peças com geometrias mais complexas, e até mesmo assimétricas, tornou-se viável. A técnica abastece uma série de segmentos do mercado, incluindo a área automotiva, esportiva, aeroespacial e militar. Como exemplos de produtos fabricados pelo método podem-se citar tubos, vasos de pressão, tanques, eixos, mancais, seções de fuselagem de mísseis e raquetes de tênis (ROSER, 1994)

A seleção correta da fibra e da resina favorece a otimização do elemento compósito fabricado. A principal função das fibras é a de resistir ao carregamento e fornecer a rigidez necessária ao compósito. Quase todos os reforços contínuos podem ser utilizados no enrolamento filamental. As fibras de vidro são as mais utilizadas, sendo seguidas pelas de carbono e de aramida, cujos altos preços são compensados pelas suas excelentes propriedades. Outros tipos de fibras utilizadas como reforço incluem as de quartzo, de boro, de cerâmica, e fitas e arames metálicos. Os vários tipos de reforço podem ser misturados de forma a otimizar as propriedades do material compósito (ROSER, 1994)

No enrolamento filamentar, um dispositivo móvel enrola fibras contínuas em torno de um mandril giratório, em um padrão controlado de forma a se obter estruturas ocas. O método permite a utilização de resinas termoplásticas e termofixas. As fibras podem ser pré-impregnadas (*towpreg*), ou passadas por um banho de resina antes de serem aplicadas no mandril (enrolamento molhado), ou enroladas secas e depois imersas em resina, num segundo processo. No caso do tubo estudado, foi fabricado por enrolamento molhado, que será, portanto, o apresentado. Esse método é o mais empregado por vários motivos: o custo de material é mais baixo, o tempo de enrolamento é menor se comparado com o das fibras pré-impregnadas e a formulação da resina pode ser modificada de forma a atender necessidades específicas de diferentes partes do produto (BANNERJEE).

3.1.2.1.1 Enrolamento Molhado

No enrolamento molhado, reforços contínuos na forma feixe de filamentos (fibras paralelas) impregnados em resina são enrolados sobre um mandril rotatório. O mandril pode ser cilíndrico, esférico ou possuir qualquer outra forma que não possua reentrâncias (PETERS, HUMPREY e FORAL, 1991)

As fibras contínuas, fornecidas em bobinas, são desenroladas e passam por um cabeçote alimentador que se movimenta paralelamente ao eixo do mandril rotatório sobre o qual elas são enroladas. Geralmente o alimentador de fibras é acoplado a uma banheira fixada a um carrinho que se movimenta sobre trilhos. A resina que impregna a fibra é colocada, devidamente acelerada e catalisada, nessa banheira. As fibras passam na banheira, são impregnadas pela resina e daí seguem para o cabeçote alimentador antes de serem enroladas (AGARWAL, 1990). A Figura 3.4 ilustra o processo.

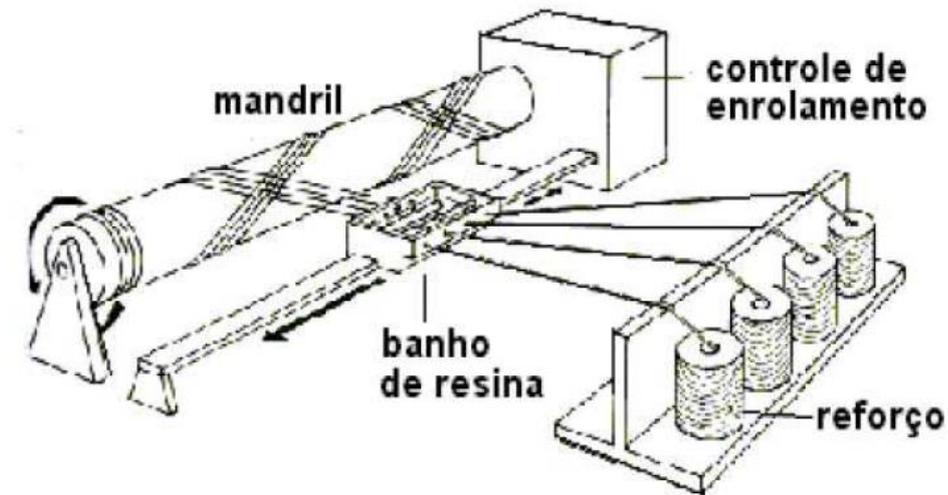


Figura 3.4 - Ilustração de um equipamento de enrolamento filamentar (SHEN, 1995)

A técnica permite a variação da tensão nas fibras, do ângulo de enrolamento e da quantidade de resina em cada camada de reforço, até que a espessura desejada e a quantidade de resina do compósito sejam alcançadas. Várias peças podem ser fabricadas simultaneamente no mesmo equipamento, com precisão no ângulo das fibras e bom controle da quantidade de resina (PETERS, HUMPREY e FORAL, 1991).

Durante o enrolamento, a tensão aplicada nas fibras gera pressão entre as camadas do compósito não-curado; esta pressão influencia na compactação e no volume de vazios do produto e contribui para uma mais completa utilização da resistência e rigidez das fibras de reforço. O mandril, que define a forma da peça, é removido após a cura se não for um elemento constituinte da estrutura (PETERS, 1998).

Controlar o processo do Enrolamento Filamentar pode incluir a especificação da tensão na fibra, a pressão extra de compactação e parâmetros geométricos (configuração do reforço ao longo do comprimento e da espessura), entre outros. A configuração do reforço é determinada pelas necessidades do projeto do produto e pode ser alcançada com alta precisão (PETERS, 1998).

A Figura 3.5 apresenta um exemplo de tubo sendo fabricados por enrolamento filamentar.



Figura 3.5 - Tubo fabricado pelo processo de enrolamento filamentar (S A Composites)

Configuração do Enrolamento

A orientação do reforço é um fator decisivo na resistência das estruturas reforçadas por fibras. No enrolamento filamentar ela é determinada pela combinação entre a velocidade de giro do mandril e a velocidade de translação do carrinho. Numa mesma peça podem ser aplicadas camadas com diferentes ângulos de enrolamento; a combinação ideal depende da magnitude e da natureza do carregamento a que o elemento será submetido (OLIVEIRA, 2008).

Sobre mandris cilíndricos, como os utilizados para a fabricação de tubos, as fibras podem ser enroladas com determinada angulação. Para cada rotação do mandril, a mecha de fibras é depositada a intervalos regulares de distância longitudinal, chamada de passo do enrolamento. Existe uma relação direta entre o diâmetro do mandril, o ângulo de enrolamento e o passo. Fibras enroladas com passo igual a zero e fibras depositadas axialmente ao mandril encontram-se a 90 e 0 graus respectivamente (STUART, 1985).

- **Enrolamento Circunferencial:** No enrolamento circunferencial, as fibras são depositadas lado a lado, o que resulta na cobertura completa do mandril com apenas um passe do carrinho. O passo do enrolamento circunferencial possui a mesma dimensão da largura de faixa, isto é, a largura da mecha de fibras. Um esquema é apresentado na

Figura 3.7, onde se pode observar que os ângulos se aproximam de 90 graus (STUART, 1985).

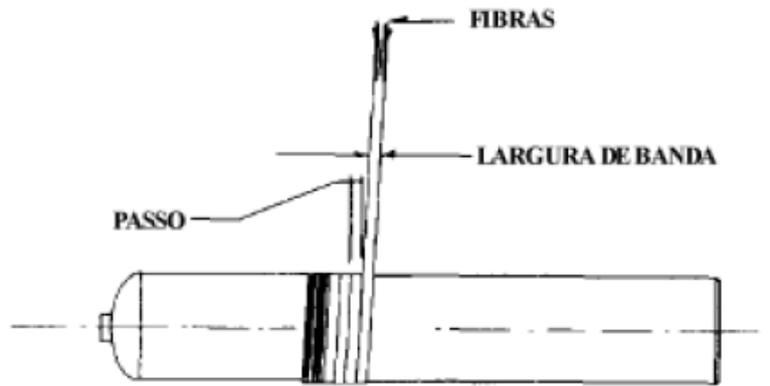


Figura 3.6 - Enrolamento circunferencial (SHEN, 1995)

- **Enrolamento Helicoidal:** No caso do enrolamento helicoidal, as fibras são depositadas com um ângulo que varia entre 5 e 80 graus (SHEN, 1995). Conforme observado na Figura 3.7, neste caso o passo do enrolamento é maior que a largura de banda (STUART, 1985).

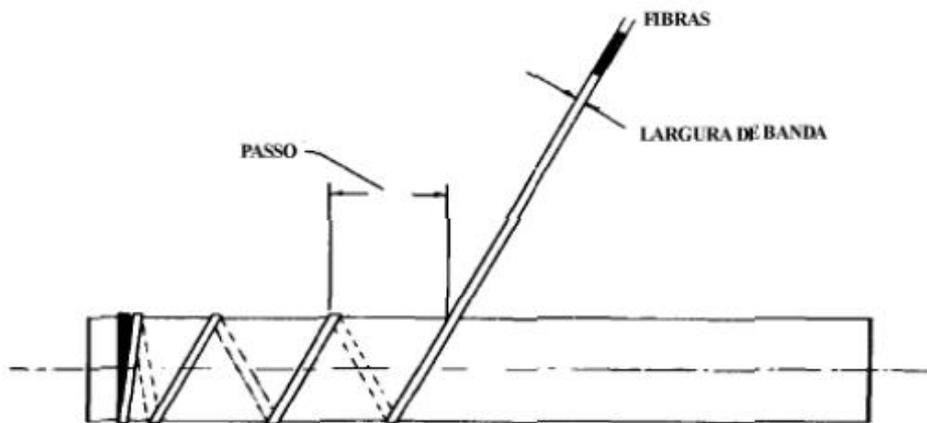


Figura 3.7 - Enrolamento helicoidal (SHEN, 1995)

No enrolamento helicoidal, o carrinho se move sucessivamente de um lado para o outro, paralelamente ao mandril, parando em cada extremidade e iniciando o ciclo inverso. Pode ser visto pela Figura 3.8 que o enrolamento é tal que a cobertura completa do mandril somente é obtida após várias idas e vindas do carrinho (AINSWORTH, 1971).

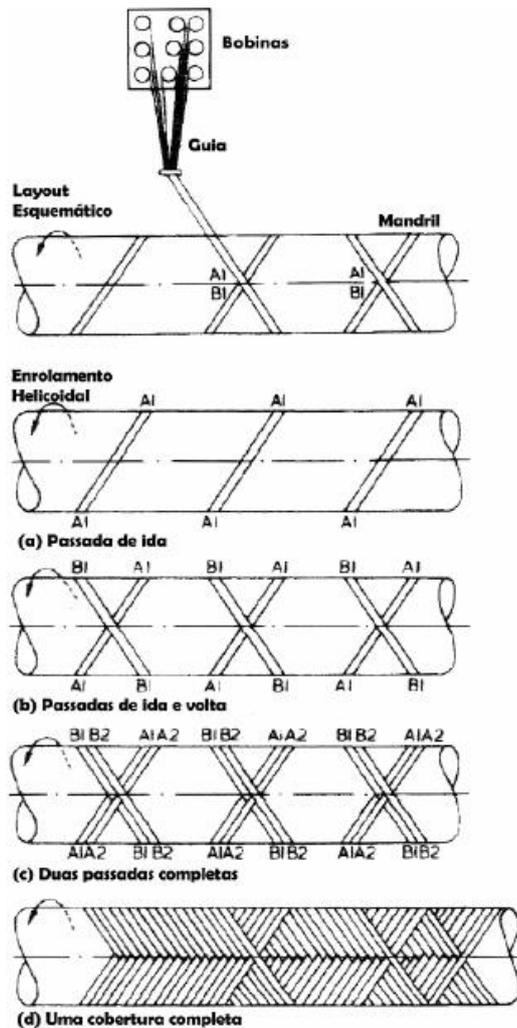


Figura 3.8 - Etapas do enrolamento helicoidal (SHEN, 1995)

Esta configuração de enrolamento é usualmente utilizada para a obtenção de elementos com necessidade de resistência nas duas direções principais. Para o caso de vasos de pressão cilíndricos simples, por exemplo, o ângulo de enrolamento é

determinado de forma a fornecer à estrutura uma resistência circunferencial que seja o dobro da longitudinal, satisfazendo a relação 2:1 das tensões (SHEN, 1995).

- **Enrolamento Polar:** Projetado especificamente para enrolar fibras sobre as extremidades das peças ou sobre esferas, este método se caracteriza pelo movimento relativo do carrinho em círculos em torno dos pólos do mandril, ao invés do movimento de ida e vinda paralelamente ao mandril. Este enrolamento pode ser obtido de duas maneiras: (a) pela rotação do carrinho em círculos em torno das extremidades do mandril, ou (b) pela rotação do mandril em torno de um eixo perpendicular ao eixo do próprio mandril, mantendo o carrinho estático conforme indicado na Figura 3.9.

Quando o enrolamento molhado é utilizado, não é desejável que o carrinho com a resina seja a parte móvel do processo (AINSWORTH, 1971).

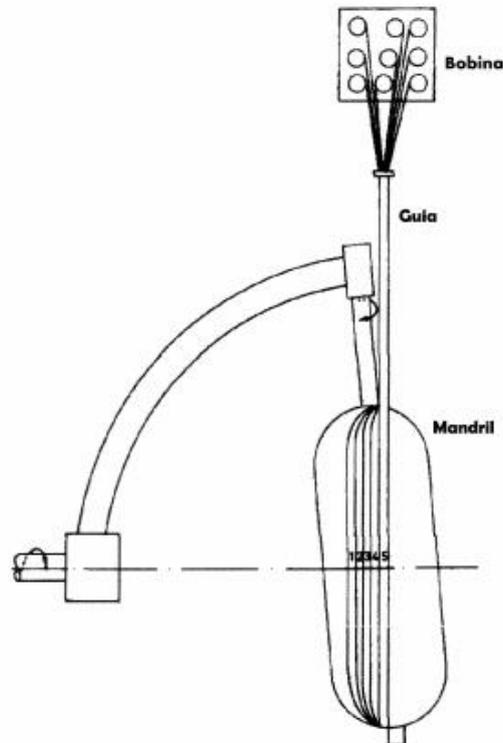


Figura 3.9 - Enrolamento polar (AINSWORTH, 1971)

3.2 Ultrassom

No ensaio de ultrassom são utilizadas as ondas sônicas com frequência superior à faixa audível pelo ouvido humano (20Hz a 20kHz). As frequências normalmente utilizadas situam-se na faixa de 1MHz a 25MHz. As ondas ultrassônicas são ondas mecânicas que se transmitem em qualquer meio sólido, líquido ou gasoso, não se transmitindo apenas no vácuo (BERUTTI, 2004).

No ensaio de ultrassom, um emissor induz ondas ultrassônicas que se propagam através do material a ser analisado. Pelo eco captado no receptor, determina-se a existência ou não de descontinuidades. O ensaio de ultrassom é um dos principais métodos de ensaio não destrutivo aplicados na indústria, porque permite inspecionar todo o volume da peça (COUREL FILHO, 2003).

A forma mais comum de produzir ultrassom para os ensaios não destrutivos é a que utiliza os cristais piezelétricos, como sulfato de lítio, o titanato de bário e o quartzo, entre outros.

Ao se aplicar corrente elétrica alternada de alta frequência, um cristal piezelétrico vibra na mesma frequência, gerando o ultrassom. Na recepção, ocorre o inverso: o ultrassom fará o cristal vibrar, gerando um sinal elétrico de alta frequência.

O ensaio de ultrassom, comparado com outros métodos não destrutivos, apresenta as seguintes vantagens:

- Localização precisa das descontinuidades existentes nas peças, sem processos intermediários, como, por exemplo, a revelação de filmes, como em técnicas de inspeção por raios X;
- Alta sensibilidade ao detectar pequenas descontinuidades;
- Maior penetração para detectar descontinuidades internas;
- Respostas imediatas.

Como desvantagens, pode-se citar:

- É um ensaio que necessita padrões de referência para calibração do equipamento;

- Necessidade de acoplantes (substâncias que fazem a ligação entre o equipamento de ensaio e a peça).
- Requer grande conhecimento teórico e experiência por parte do operador (KRAUTKRÄMER, 1983).

A técnica de ultrassom como ensaio não-destrutivo é largamente utilizada na indústria para detectar discontinuidades em todo o volume do material a analisar. As principais técnicas de ensaio, em relação à disposição dos transdutores estão listadas a seguir:

i) Transmissão (transparência): a peça é colocada entre os transdutores emissor e receptor, de forma que a onda ultrassônica percorra a peça de uma superfície até a outra. Não havendo discontinuidades no material, o receptor recebe aproximadamente 100% do sinal emitido. Havendo discontinuidades, o receptor recebe uma percentagem inferior ao sinal emitido.

ii) Pulso-eco: no caso de se utilizar apenas um cristal emissor/receptor, a medida do sinal de retorno deve ser feita quando o transdutor não está emitindo. Neste caso, as ondas ultrassônicas devem ser pulsantes. Para receber o sinal de retorno (eco) o cristal precisa estar em repouso, sem pulsar ou emitir a onda ultrassônica. O transdutor passa então a vibrar com o sinal do eco, o que é registrado na tela do aparelho (BERUTTI, 2004).

Transdutor ou cabeçote é todo o dispositivo que converte um tipo de energia em outro, no caso dos ensaios de ultrassom pelo método pulso-eco, energia elétrica (pulso) é aplicada ao cristal piezelétrico do transdutor e convertida em energia mecânica de vibração e as reflexões dessas ondas mecânicas (ecos) que retornam do interior da peça são convertidas em sinais elétricos pelo cristal. A Figura 3.12 apresenta esquematicamente um transdutor ultrassônico (BERUTTI, 2004).

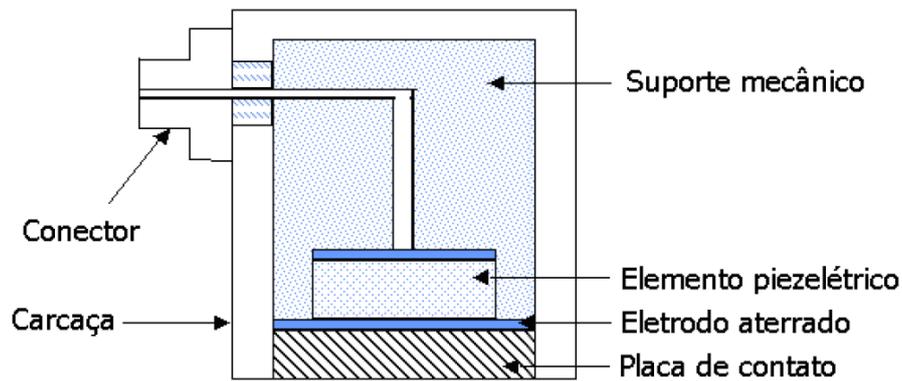


Figura 3.10 - Desenho esquemático de um transdutor ultrassônico (BERUTTI, 2004).

No ensaio por ultrassom, existe uma grande variedade de transdutores para atender a diversas aplicações. Os transdutores para ultrassom podem ser classificados quanto:

- ao ângulo de emissão/recepção do ultrassom (normais, angulares);
- ao cristal (monocristal, duplo cristal).

Como o ultrassom deve passar do transdutor para a peça com um mínimo de perdas, há necessidade de colocar um acoplante que faça esta ligação, evitando discontinuidades no acoplamento. Este acoplante pode ser óleo, água, vaselina, glicerina ou graxa, entre outros.

Nos ensaios com contato direto, o acoplante é colocado na forma de uma película entre a peça e o cabeçote. Nos ensaios por imersão, a peça e o cabeçote são mergulhados em um líquido, geralmente a água. A Figura 3.12 apresenta um desenho esquemático destes acoplamentos.

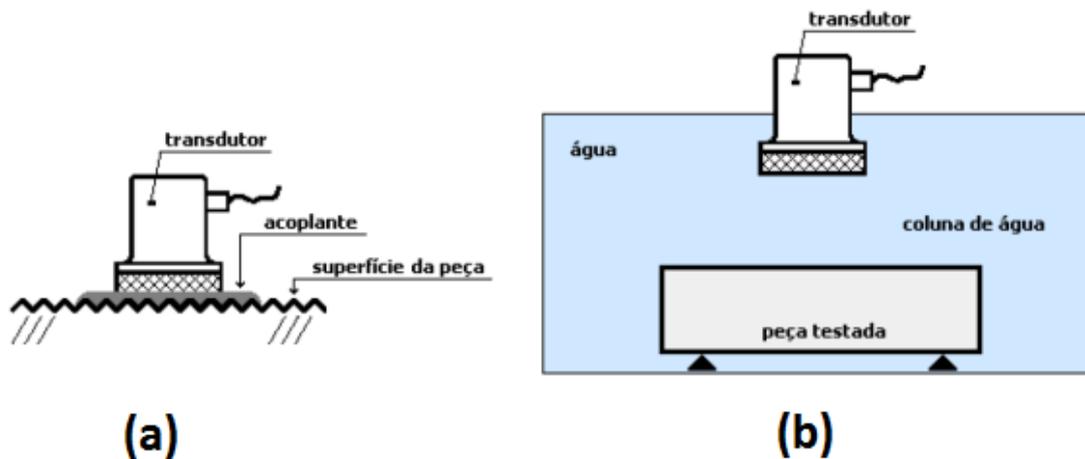


Figura 3.11 - Acoplamentos para ensaio de ultrassom. (a) contato direto. (b) imersão (BERUTTI, 2004)

Os ensaios de ultrassom também vem sendo muito utilizados para a determinação das propriedades mecânicas de materiais a partir das velocidades ultrassônicas medidas. Também são utilizados para a determinar o grau de anisotropia de um determinado material variando o ângulo de incidência da onda ultrassônica.

Existem trabalhos que apresentam técnicas de transmissão direta (utilizando um par de transdutores) e pulso-eco (utilizando um transdutor) em tanque com água para determinar a constante elástica de materiais compósitos de fibra de vidro/epóxi (BOERI, 2006).

3.2.1 Principais variáveis da técnica de ultrassom

3.2.1.1 Velocidade

Quando partículas atômicas ou moleculares de um material são deslocadas das suas posições de equilíbrio por uma força aplicada, uma tensão interna atua para restaurar as partículas nas suas posições originais. Devido às forças interatômicas entre partículas adjacentes de um material, um deslocamento em um ponto induz deslocamentos em pontos vizinhos e assim por diante, propagando uma onda tensão-deformação. O deslocamento real produzido pelas ondas ultrassônicas é muito pequeno.

Os conceitos de comprimento de onda, ciclo, frequência, amplitude, velocidade e atenuação aplicam-se em ondas ultrassônicas assim como em qualquer onda sonora. A relação entre velocidade v , frequência f e comprimento de onda λ é dada pela Equação 3.1.

$$V = f \cdot \lambda \qquad \text{Equação 3.1}$$

Dependendo da maneira como ocorre o deslocamento das partículas, as ondas ultrassônicas podem ser classificadas em longitudinais ou transversais.

Ondas longitudinais

Também conhecidas como ondas de compressão, é o tipo de onda ultrassônica mais comumente usada na inspeção de materiais. Propagam-se através do material como uma série alternada de compressões e rarefações nas quais as partículas vibram na direção da propagação da onda. A Figura 3.12 apresenta uma representação deste tipo de onda. O eixo vertical pode representar pressão ou deslocamento da partícula e o eixo horizontal pode representar tempo ou distância, uma vez que a velocidade do som em um determinado material é constante. Esta relação é utilizada nas medidas de velocidade de ultrassom (BERUTTI, 2004).

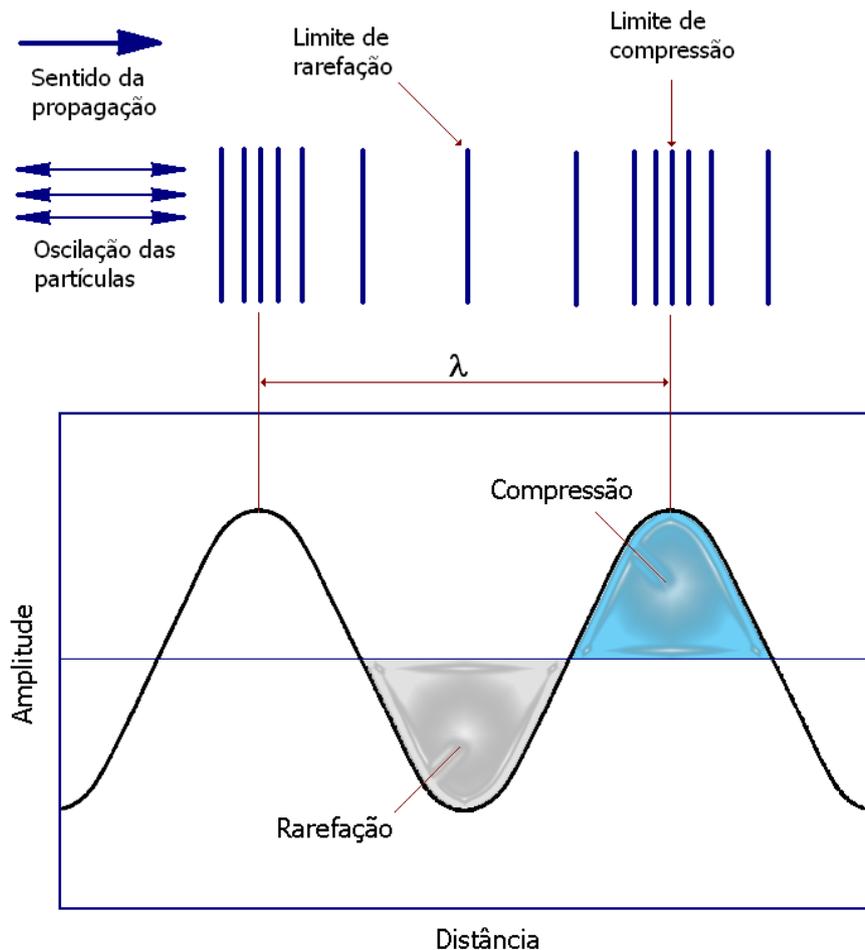


Figura 3.12 - Representação esquemática de uma onda ultrassônica longitudinal (BERUTTI, 2004)

Ondas transversais

As ondas transversais ou também chamadas de cisalhantes seguem a analogia de uma corda vibrando ritmadamente, na qual, cada partícula vibra para cima e para baixo no plano perpendicular a direção de propagação. Uma onda transversal está representada na Figura 3.13 que apresenta esquematicamente as oscilações das partículas, a frente de onda, a direção de propagação da onda e o correspondente comprimento de onda. Ao contrário das ondas longitudinais, a propagação das ondas transversais necessita que as interações entre as partículas vizinhas sejam de natureza forte, não se propagando em meios onde tal não ocorre (gases e líquidos). A velocidade de propagação da onda transversal é aproximadamente a metade da velocidade de propagação da onda longitudinal.

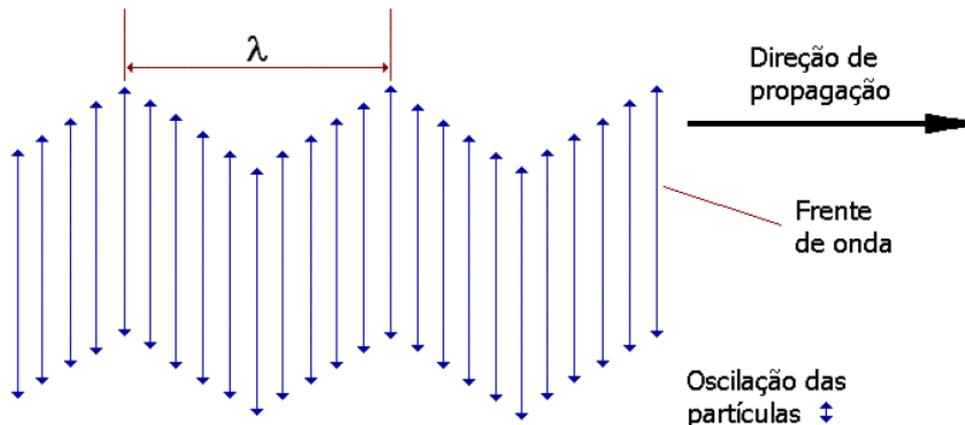


Figura 3.13 - Representação esquemática de uma onda ultrassônica transversal (BERUTTI, 2004)

3.3.1.2 – Atenuação

A onda sônica ao percorrer um material qualquer sofre, em sua trajetória efeitos de espalhamento e absorção, resultando na redução da sua energia ao percorrer um material qualquer.

Absorção

Ocorre absorção de energia sonora principalmente pela conversão da energia mecânica em calor. Um movimento elástico dentro de uma substância resultará em aquecimento durante a compressão e resfriamento durante a rarefação. Como o calor flui muito mais lentamente que as ondas ultrassônicas, as perdas térmicas ocorrem, o que progressivamente reduz a energia de propagação das ondas.

Adicionalmente, certas perdas podem ser causadas por efeitos de histerese elástica devido aos deslocamentos cíclicos em grãos ou fronteiras de grãos (DELSANTO, 2004).

A absorção pode ser tomada como um obstáculo ao movimento das partículas. Esta ação é mais pronunciada quando as oscilações são mais rápidas, isto é, altas

frequências. Para a maioria dos materiais, as perdas por absorção aumentam diretamente com o aumento da frequência.

Espalhamento

Em meios homogêneos, as ondas sonoras, analogamente às ondas eletromagnéticas, propagam-se diretamente da fonte com uma perda estável de energia devida à absorção pelo meio. Em meios heterogêneos, um desvio qualitativo nas características de propagação do som pode ser observado. As ondas sonoras são refletidas, refratadas e difratadas na fase dispersa de tal maneira que cada partícula age como uma nova fonte sonora, irradiando ondas sonoras em todas as direções (ANDREUCCI, 2011).

Este fenômeno ondulatório é chamado espalhamento. Diferentemente do espalhamento da luz, o espalhamento sonoro pode ser fortemente influenciado por efeitos de acoplamento mecânicos e térmicos entre as fases contínua e dispersa. Isto é consequência da natureza física das ondas sonoras, as quais nada mais são que propagação de distúrbios do equilíbrio compressional, coincidentes com variações de temperatura (BABICK e HINZE, 2000). Os efeitos de acoplamento mecânico e térmico influenciam a propagação das ondas de duas maneiras: alteram o perfil de espalhamento; e são de natureza dissipativa, reduzindo a quantidade total de energia ondulatória como absorção. A magnitude de cada efeito individual depende das propriedades do material das fases envolvidas, bem como do tamanho de partícula.

Partículas pequenas agem como radiadores isotrópicos de som ao mesmo tempo em que promovem uma troca de calor não estacionária com o fluido. A atenuação é quase que completamente determinada pelos processos dissipativos de acoplamento, os mecanismos de perdas térmicas e viscoinerciais. Contrariamente a isto, partículas muito grandes, quando comparadas com o comprimento da onda sonora, apenas produzem uma sombra sonora na direção de propagação, o que é evidenciado pelo som difratado (ANDREUCCI, 2011).

Ambos os efeitos, além da absorção do som pelas fases, dependem da relação entre o tamanho da partícula e o comprimento de onda. Isto oferece a oportunidade de

calcular distribuição de tamanhos de partículas de sistemas dispersos pelas medidas de atenuação acústica (ANDREUCCI, 2011).

Portanto, o resultado dos efeitos de espalhamento e absorção quando somados resultam na atenuação sônica. Na prática, este fenômeno poderá ser visualizado, quando observamos na tela do aparelho de ultrassom, vários ecos de reflexão de fundo provenientes de uma peça com superfícies paralelas. As alturas dos ecos diminuem com a distância percorrida pela onda.

3.3.1.3 Frequência

A frequência das ondas ultrassônicas utilizadas afetam os resultados dos ensaios de várias maneiras. Geralmente, um balanço entre os efeitos favoráveis e adversos deve ser considerado para minimizar as limitações impostas pelos equipamentos e materiais de teste (NELLIGAN)

A sensibilidade, ou seja, a capacidade do sistema de ultrassom de detectar uma descontinuidade muito pequena e é geralmente aumentada pelo uso de frequências mais altas (menores comprimentos de onda). A resolução, ou seja, a capacidade do sistema de separar as indicações de descontinuidades muito próximas, tanto em profundidade quanto lateralmente, não é afetada pela frequência. A penetração, isto é, a máxima penetração para detecção, é reduzida pelo uso de altas frequências (ANDREUCCI, 2011).

Este efeito é mais pronunciado em materiais com grãos mais grosseiros ou heterogeneidades muito pequenas, devido ao espalhamento resultante das ondas ultrassônicas. O espalhamento do feixe, ou seja, a divergência do feixe de ondas ultrassônicas em relação ao eixo central, também é afetada pela frequência.

Sensibilidade, resolução, penetração e espalhamento do feixe ultrassônico são principalmente determinados pela seleção do transdutor e apenas levemente modificados pelas alterações das outras variáveis de teste (ASM-HANDBOOK, 1976).

3.2.2 Tipos de Mostradores

As principais formas de representação apresentadas pela tela do aparelho de ultrassom são:

- A-scan
- B-scan
- C-scan

O aparelho de ultrassom deve incorporar circuitos eletrônicos especiais para cada forma de apresentação. Assim, deve-se identificar no aparelho quais as formas de apresentação disponíveis para uso.

A-scan

Esse tipo de representação é considerado a forma mais tradicional de visualização da tela, que consiste em apresentar os ecos de reflexão nas interfaces. Nesse trabalho foi utilizado esse tipo de mostrador. A Figura 3.14 mostra a representação do A-scan.

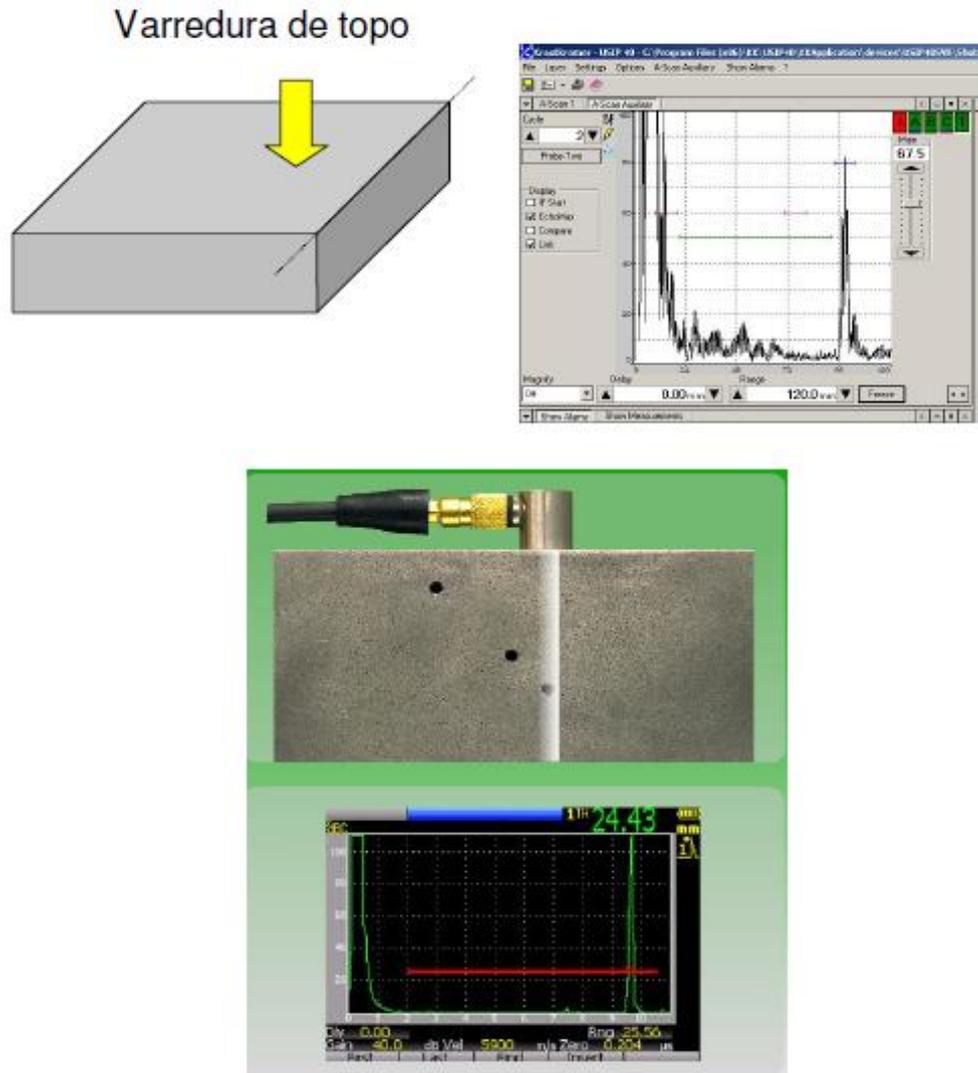


Figura 3.14 - Representação do A-scan (ANDREUCCI, 2011)

B-scan

Neste tipo de apresentação, a tela do aparelho mostra a seção transversal da peça, e, portanto a visualização da peça é feita em corte. Este tipo de apresentação não é convencional, e somente aparelhos dotados de funções especiais são capazes de mostrar esta forma de apresentação. A Figura 3.15 mostra a representação do B-scan.

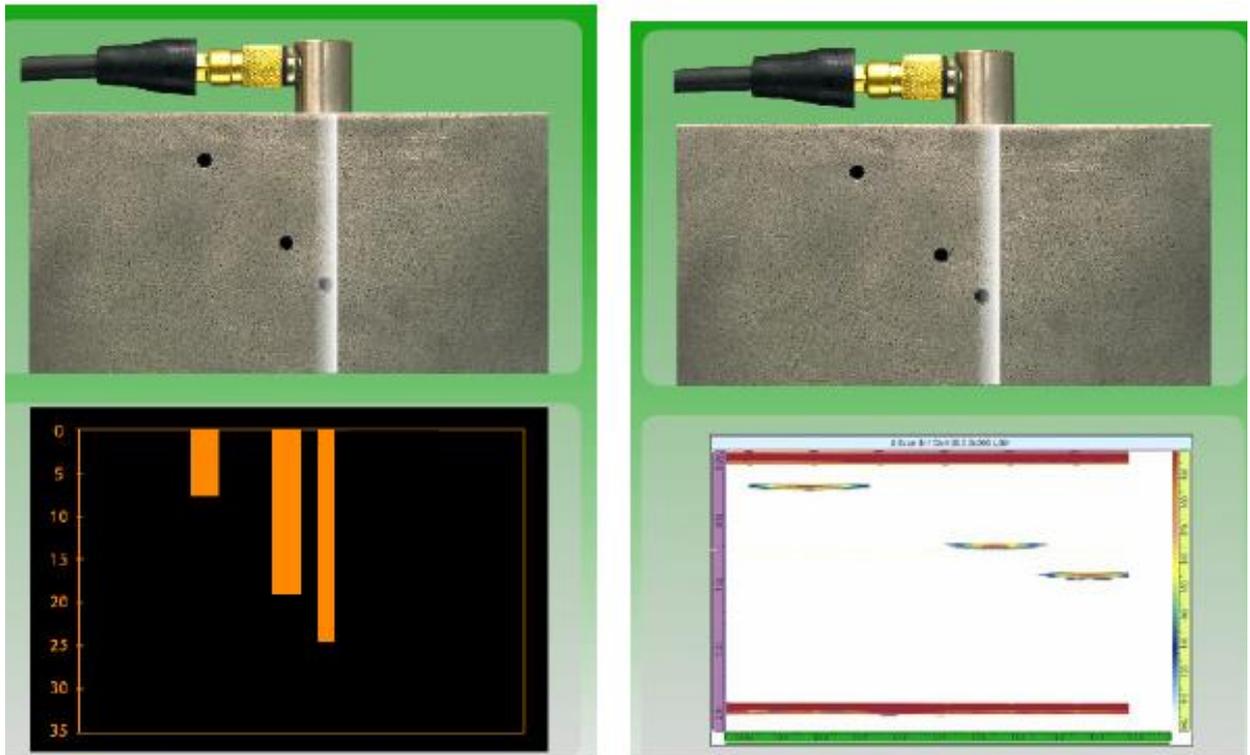


Figura 3.15 - Representação do B-scan (ANDREUCCI, 2011)

C-scan

Neste tipo de apresentação a tela do aparelho mostra a peça no sentido "planta", ou seja, a vista de cima da peça. A varredura do transdutor, geralmente mecanizada, mostra as indicações na tela do aparelho visualizadas por cima, no entanto o *software* permite que sejam obtidas mais informações sobre cada uma das indicações, tal como profundidade, amplitude, etc. A Figura 3.16 mostra a representação do C-scan (ANDREUCCI, 2011).

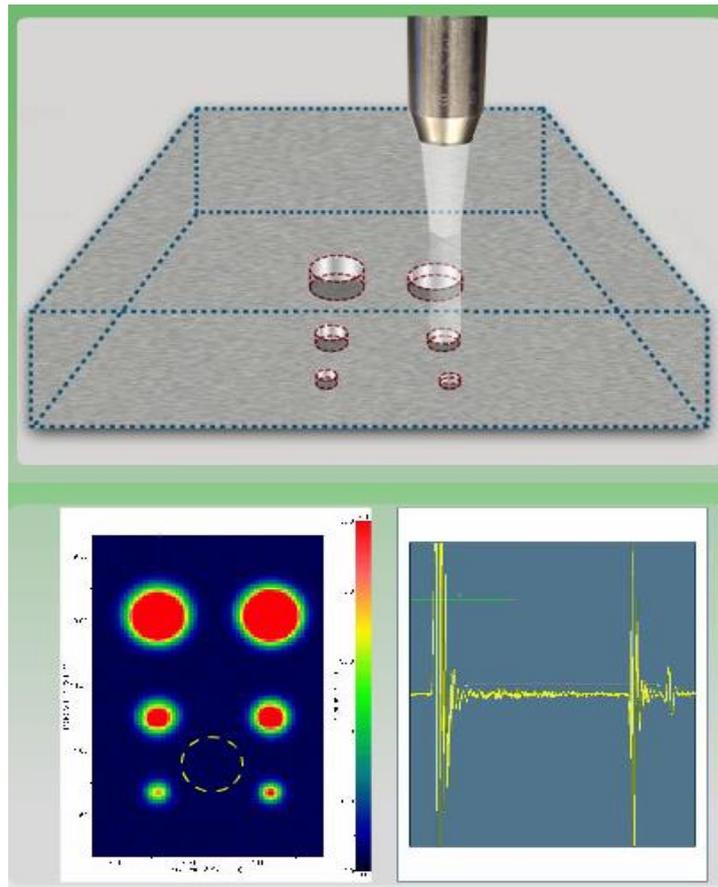


Figura 3.16 - Representação C-scan (ANDREUCCI, 2011)

3.3 Comportamento Elástico de Materiais Anisotrópicos

O estado de tensão em um elemento infinitesimal pode ser representado por nove componentes de tensão σ_{ij} (grandeza tensorial de segunda ordem) atuando nas faces de um elemento de volume infinitesimal com os lados paralelos aos eixos 1, 2, 3 de um sistema de coordenadas.

Na Figura 3.17, as tensões σ_{11} , σ_{22} , e σ_{33} são aplicadas na direção normal a face do elemento, sendo assim chamadas de tensões longitudinais, enquanto que as demais tensões são chamadas de tensão de cisalhamento (BOERI, 2006).

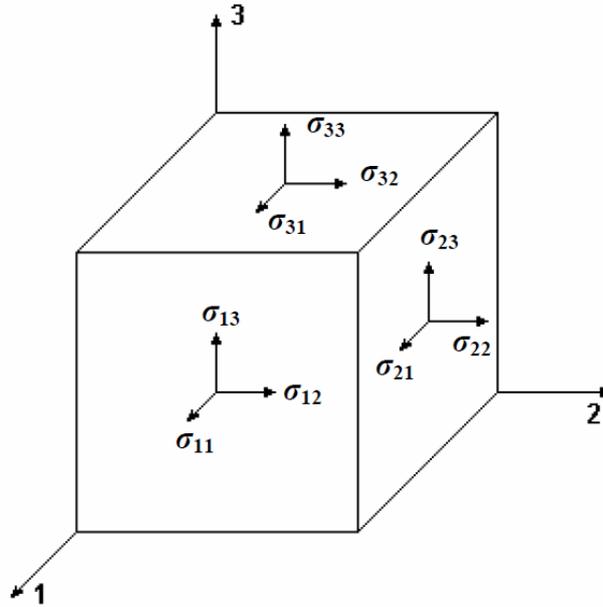


Figura 3.17 - Orientação das tensões em um elemento de volume infinitesimal (CHUNG, 1996).

O tensor das tensões pode ser representado na forma matricial apresentada na Equação 3.2 (CHUNG, 1996):

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad \text{Equação 3.2}$$

O elemento de volume da Figura 3.17, por estar em equilíbrio, implica que a soma dos momentos que agem sobre o corpo precisam ser igual a zero, ou seja:

$$\sigma_{12} = \sigma_{21}; \sigma_{13} = \sigma_{31}; \sigma_{23} = \sigma_{32} \quad \text{Equação 3.3}$$

Para pequenos deslocamentos, a relação entre a deformação e a tensão é dada pela lei de Hooke generalizada:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} S_{kl} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \quad \text{Equação 3.4}$$

ou

$$S_{ij} = s_{ijkl} S_{kl} \quad (i,j,k,l = 1,2,3) \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde, C_{ijkl} são as constantes elásticas de rigidez do material, s_{ijkl} as constantes de flexibilidade e S_{kl} as deformações. Nas Equações 3.4 e 3.5 há 6 constantes independentes no tensor de tensão, e mais 6 no tensor de deformação. No tensor de rigidez elástica há $3^4 = 81$ constantes, entretanto, o tensor de rigidez elástica é simétrico. A simetria dos tensores de tensão e deformação

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$$

$$S_{ij} = S_{ji}$$

reduz o número de constantes elásticas para 36.

Utilizando-se uma notação reduzida para os tensores de tensão e deformação, de acordo com a Tabela 3.2, tem-se:

$$\sigma_i = C_{ij} S_j \quad (i,j = 1,2,3,4,5,6) \quad \text{Equação 3.6}$$

ou

$$S_i = s_{ij} \sigma_j \quad (i,j = 1,2,3,4,5,6) \quad \text{Equação 3.7}$$

Tabela 3.2 - Tensor versus Notação Reduzida para tensões e deformações (JONES, 1999)

Tensões		Deformações	
Notação Tensorial	Notação Reduzida	Notação Tensorial	Notação Reduzida
σ_{11}	σ_1	S_{11}	S_1
σ_{22}	σ_2	S_{22}	S_2
σ_{33}	σ_3	S_{33}	S_3
σ_{23}	σ_4	S_{23}	S_4
σ_{31}	σ_5	S_{31}	S_5
σ_{12}	σ_6	S_{12}	S_6

Mas $C_{ij} = C_{ji}$ e $s_{ij} = s_{ji}$, isto é, a matriz de rigidez é simétrica. Portanto o estado de tensão ou deformação em um elemento infinitesimal poder ser descrito por seis componentes de tensão ou deslocamento, onde a relação tensão-deformação pode ser expressa em termos de 21 constantes de rigidez como descrito na Equação 3.8:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & \text{sim.} & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix}$$

Equação 3.8

3.3.1 Materiais Ortotrópicos

No caso de um material ortotrópico, há três planos de simetria mutuamente perpendiculares o que reduz o número de constantes elásticas para nove, pois vários termos de rigidez estão relacionados. Isto é visto quando o sistema de referência das coordenadas é paralelo ao plano principal de simetria do material, isto é, no caso de um material ortotrópico. Logo as relações tensão-deformação para um material ortotrópico reduzem-se a (NYE, 1993):

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix}$$

Equação 3.9

Três importantes observações podem ser feitas com respeito à relação tensão-deformação na Equação 3.9:

1. Não existe interação entre as tensões normais σ_1 , σ_2 , σ_3 e as deformações cisalhantes S_{23} , S_{31} , S_{12} , ou seja, tensões cisalhantes atuando ao longo da direção principal do material produzem somente deformações normais as faces.
2. Não há interação entre as tensões cisalhantes S_{23} , S_{31} , S_{12} e as deformações normais S_1 , S_2 , S_3 ; Uma tensão cisalhante atuando no plano principal do material produz somente deformações cisalhantes.

3. Não há interação entre tensões cisalhantes e deformações cisalhantes em planos diferentes, isto é, uma tensão cisalhante atuando no plano principal produz uma deformação cisalhante somente neste plano.

A lei de comportamento que relaciona tensão/deformação em materiais ortotrópicos pela matriz de flexibilidade s_{ijkl} , dentro do sistema de eixos de ortotropia (1, 2, 3), contém nove constantes elásticas independentes, e é expressa da seguinte maneira (PEREIRA, 2002):

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 3.10}$$

onde:

E_i = módulo de elasticidade na direção i

ν_{ij} = coeficiente de Poisson

G_{ij} = módulo de cisalhamento no plano ij

Como a matriz de comportamento é simétrica, tem-se que:

$$\frac{\nu_{23}}{E_3} = \frac{\nu_{32}}{E_2}, \frac{\nu_{13}}{E_3} = \frac{\nu_{31}}{E_1}, \frac{\nu_{12}}{E_2} = \frac{\nu_{21}}{E_1} \quad \text{Equação 3.11}$$

3.3.2 Materiais Transversalmente Isotrópicos

Um material é chamado transversalmente isotrópico quando um de seus planos principais é um plano de isotropia, isto é, a cada elemento infinitesimal há um plano em que as propriedades mecânicas são idênticas em todas as direções. Muitos materiais

compósitos unidirecionais podem ser considerados transversalmente isotrópicos, com o plano 1-2 (normal às fibras) sendo o plano de isotropia (Figura 3.18). Este é o caso de materiais compostos unidirecionais de fibra de vidro/epóxi com frações volumétricas relativamente altas.

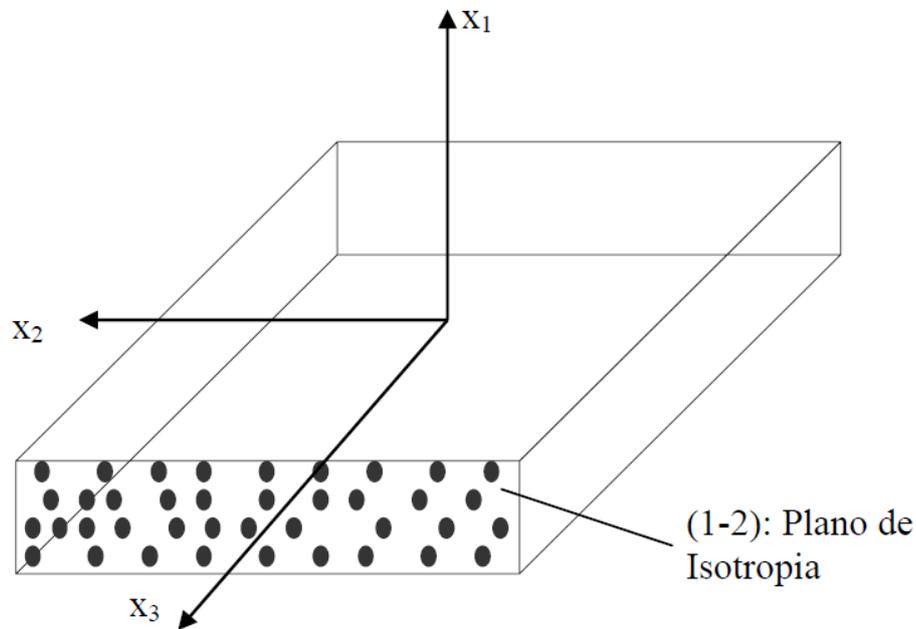


Figura 3.18 - Material Ortotrópico com isotropia transversal (NYE, 1993).

As relações tensão-deformação para um material transversalmente isotrópico são simplificadas notando que os índices 1 e 2 (para 1-2 o plano de isotropia) nas constantes do material são intercambiáveis na Equação 3.9, ou seja:

$$C_{22} = C_{11}$$

$$C_{23} = C_{13}$$

$$C_{55} = C_{44}$$

$$C_{66} = (C_{11} - C_{12})/2$$

Portanto as relações tensão-deformação para um material transversalmente isotrópico reduzem-se a (NYE, 1993).

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix}$$

Equação 3.12

As relações acima mostram que um material ortotrópico com isotropia transversal é caracterizado por cinco constantes elásticas independentes. No caso de materiais transversalmente isotrópicos, é possível considerar que as propriedades mecânicas nas direções 1 e 2 são idênticas, já que, como mostrado na Figura 3.18, estas direções são direções perpendiculares a direção 3. Nestes casos, a matriz de rigidez ou flexibilidade se simplifica, e conseqüentemente (PEREIRA, 2002):

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & -\nu_{23}/E_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{32}/E_1 & -\nu_{32}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{32} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}$$

Equação 3.13

3.3.3 Constantes Elásticas e Propriedades Mecânicas

As constantes elásticas podem ser obtidas não só a partir de métodos ultrassônicos, como também por holografia óptica eletrônica combinada ao método de ressonância mecânica. Este método consiste em da medição de amplitude de vibração da superfície da viga no primeiro modo de ressonância à flexão, pode-se caracterizar as mesmas propriedades elásticas do material, obtendo-se o módulo de elasticidade da mesma forma recomendada pela norma e o coeficiente de Poisson, através de imagens obtidas por holografia óptica eletrônica (SUTERIO, 1998).

O modelo de material transversalmente isotrópico foi adotado para relacionar as velocidades ultrassônicas com as constantes elásticas.

As propriedades elásticas de um compósito transversalmente isotrópico podem ser avaliadas através de medidas das velocidades das ondas longitudinais e transversais propagadas no material em diferentes direções de acordo com a direção das fibras.

Para o sistema cartesiano de coordenadas x , y e z no qual z coincide com a direção das fibras no material como mostrado na Figura 3.19.

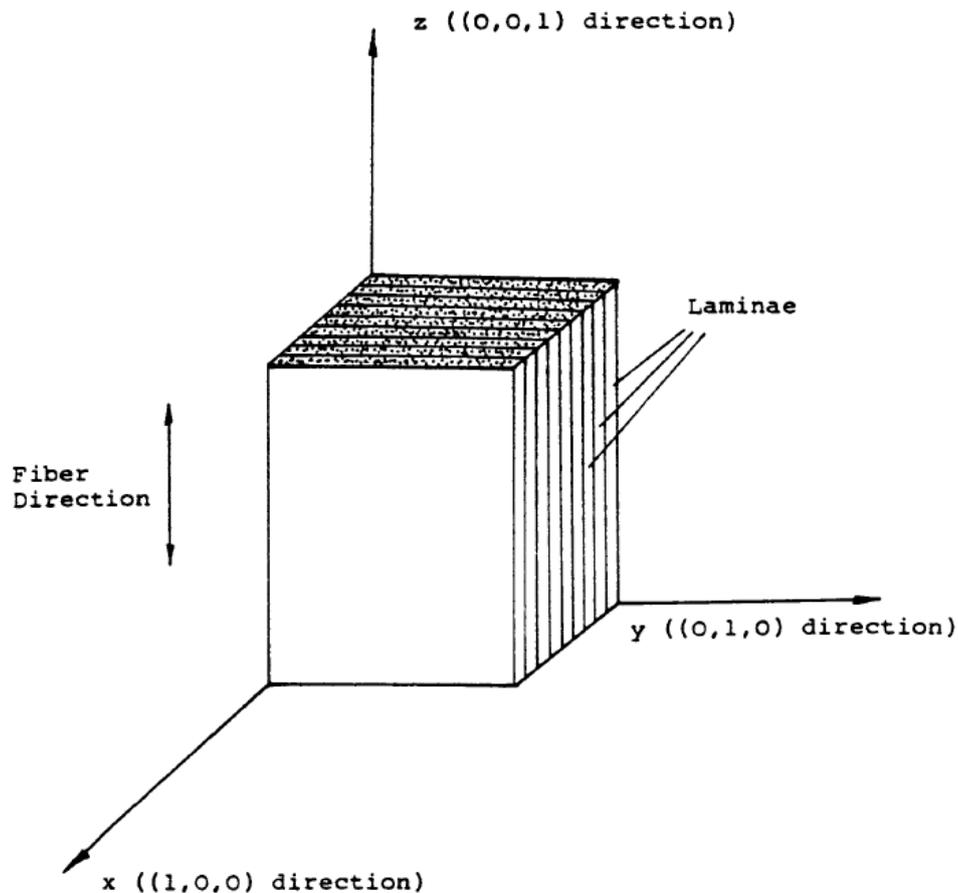


Figura 3.19 - Material compósito com as principais direções das fibras (MARQUES e WILLIAMS JR., 1986)

As relações entre as constantes elásticas da rigidez da matriz e as velocidades estão apresentadas na Tabela 3.3. Nela estão descritas a direção de propagação, tipo de onda, onde L é a onda longitudinal e T é a cisalhante ou transversal, e a equação. Os ângulos descritos na Tabela 3.3 são relação ao eixo z .

Tabela 3.3 - Relações entre constantes elásticas de rigidez da matriz e as velocidades ultrassônicas (MARQUES e WILLIAMS JR., 1986)

Direção de Propagação	Tipo de Onda	Equação
X	L	$C_{11} = \rho v_{xL}^2$
X	T	$C_{66} = \rho v_{xT}^2$
Z	T	$C_{44} = \rho v_{zT}^2$
Z	L	$C_{33} = \rho v_{zL}^2$
30°	L	$C_{13} = [(1/3)(3C_{33} + C_{44} - 4\rho v_{30^\circ L}^2)(3C_{44} + C_{11} - 4\rho v_{30^\circ T}^2)]^{1/2} - C_{44}$
30°	T	$C_{66}(3)^{1/2} + C_{44} = 2\rho v_{30^\circ T}^2$
45°	L	$C_{13} = [(C_{11} + C_{44} - 2\rho v_{45^\circ L}^2)(C_{44} + C_{33} - 2\rho v_{45^\circ T}^2)]^{1/2} - C_{44}$
45°	T	$C_{66}(3)^{1/2} + C_{44} = 2\rho v_{45^\circ T}^2$
60°	L	$C_{13} = [(1/3)(C_{33} + 3C_{44} - 4\rho v_{60^\circ L}^2)(C_{44} + 3C_{11} - 4\rho v_{60^\circ T}^2)]^{1/2} - C_{44}$
60°	T	$C_{66}(3)^{1/2} + C_{44} = 2\rho v_{45^\circ T}^2$

As constantes C_{11} , C_{33} , C_{44} e C_{66} podem ser determinados pela medida direta das velocidades das ondas apropriadas propagando nas mas direções principais x, y e z. A constante C_{13} deve ser determinada com a onda propagando numa direção intermediária entre os eixos x e z. A constante C_{12} pode ser calculada a partir das constantes C_{11} e C_{66} ($C_{12} = C_{11} - 2C_{66}$).

No modelo homogêneo, existe a correspondência entre as constantes elásticas de rigidez da matriz e os módulo de elasticidade e cisalhamento e coeficiente de Poisson. Essas relações estão apresentadas na Tabela 3.4 (MARQUES e WILLIAMS JR., 1986).

Tabela 3.4 - Relações entre as constantes elásticas e propriedades para material transversalmente isotrópico (MARQUES e WILLIAMS JR., 1986)

Propriedades
$E_x = (C_{11} - C_{12})(C_{11}C_{33} + C_{12}C_{33} - 2C_{13}^2) / (C_{11}C_{33} - C_{13}^2)$
$E_y = E_x$
$E_z = (C_{11}C_{33} + C_{12}C_{33} - 2C_{13}^2) / (C_{11} + C_{12})$
$\nu_{xy} = (C_{12}C_{33} - C_{13}^2) / (C_{11}C_{33} - C_{13}^2)$
$\nu_{yx} = \nu_{xy}$
$\nu_{xz} = C_{13} / (C_{11} + C_{12})$
$\nu_{zy} = \nu_{zx}$
$\nu_{zy} = -C_{13}(C_{12} - C_{11}) / (C_{11}C_{33} - C_{13}^2)$
$\nu_{zy} = \nu_{zx}$
$G_{xz} = C_{44}$
$G_{yz} = G_{xz}$
$G_{xy} = (C_{11} - C_{12}) / 2$

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Materiais

Para o desenvolvimento deste trabalho utilizou-se um tubo compósito feito com resina epóxi reforçado com fibra de vidro do tipo E, produzido pelo processo de enrolamento filamentar fornecido pela empresa EDRA de diâmetro nominal de 6,0 polegadas (152,4 mm) e comprimento de 2,0 m.

4.2 Métodos

A Figura 4.1 apresenta a metodologia aplicada no estudo para a caracterização do tubo compósito.

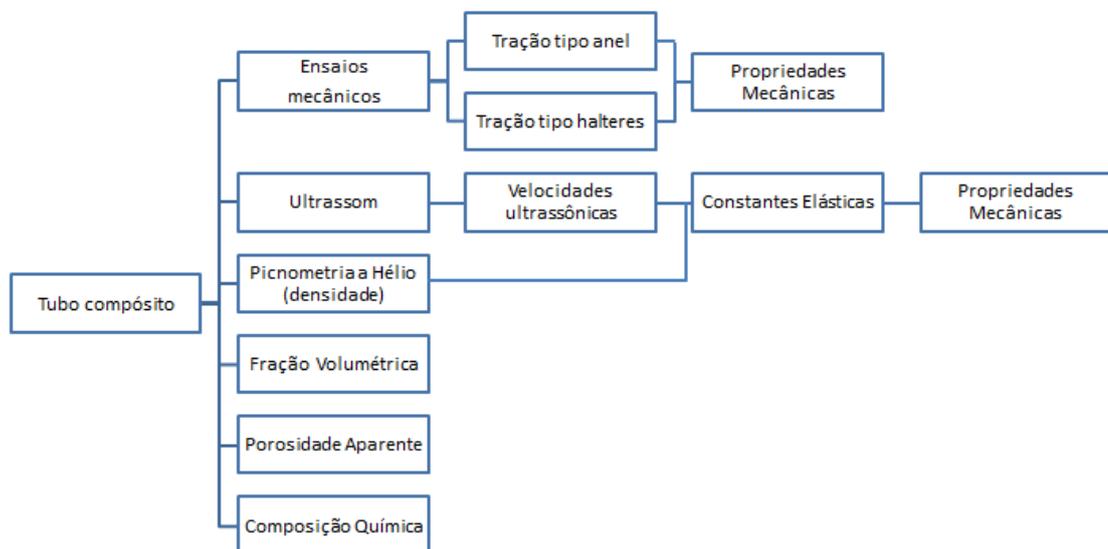


Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia aplicada.

4.2.1 Ensaios Mecânicos

4.2.1.1 Ensaio de tração em corpo de prova do tipo halteres

A caracterização mecânica dos tubos compósitos da empresa EDRA foi realizada a partir de ensaios de tração em corpos de prova do tipo halteres que foram conduzidos em uma máquina universal INSTRON, modelo 5585H com capacidade de 250 kN , no Laboratório de Metalurgia Física/UFRGS.

Esse ensaio teve como objetivo a obtenção do módulo de elasticidade na direção axial (direção z), resistência mecânica e coeficientes de Poisson nas direções zy e xz do tubo compósito para posterior comparação com resultados obtidos pelo ensaio de ultrassom.

Os dez corpos de prova destinados à execução desse ensaio foram obtidos a partir do corte no sentido longitudinal do tubo compósito baseado nas dimensões da norma ASTM D638. Após o corte e lixamento dos corpos de prova, procedeu-se a colagem dos extensômetros nas posições determinadas pela norma. Além da colagem dos extensômetros utilizou-se um clip-gage para a medida de deslocamento da amostra com comprimento útil de 25 mm. A geometria dos corpos de prova produzidos e o sentido do corte são apresentados na Figura 4.2.

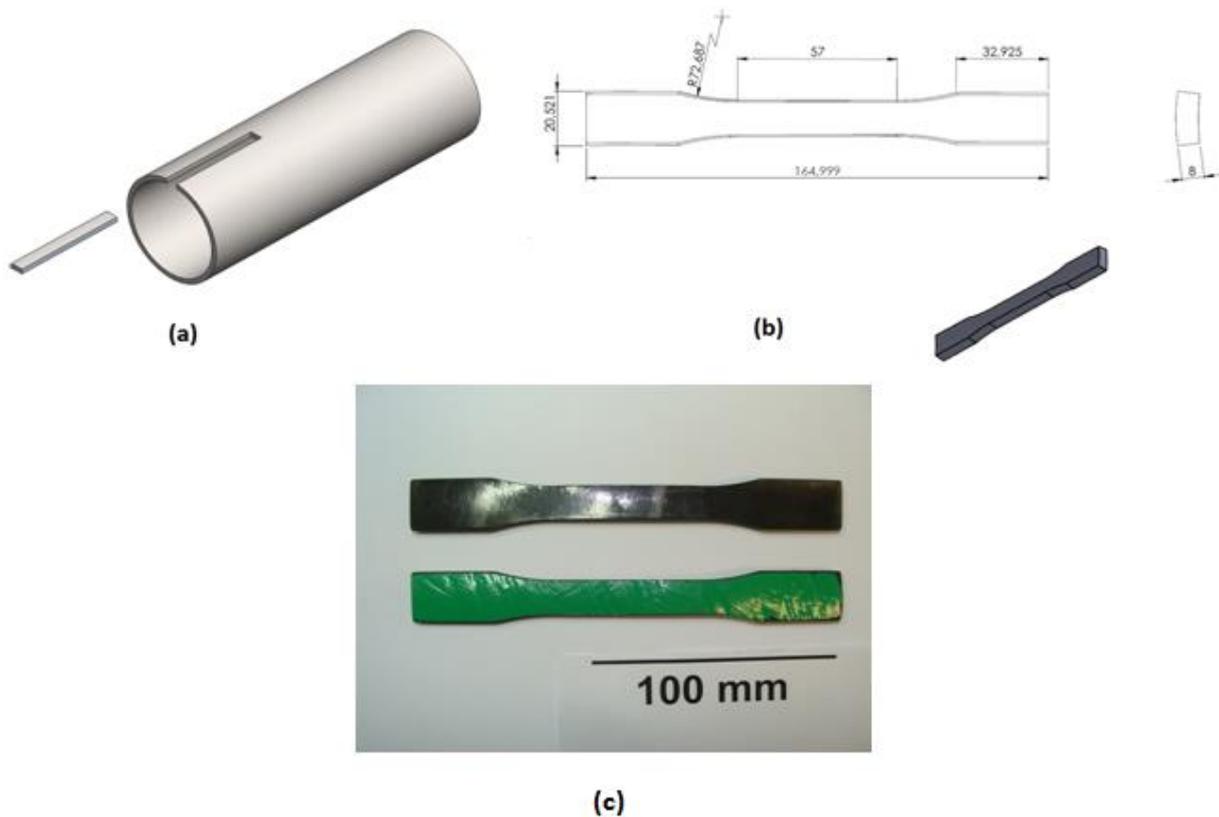


Figura 4.2 - Corpos de prova do tipo halteres. (a) sentido do corte do tubo. (b) dimensões do corpo de prova. (c) corpo de prova

O sistema de montagem da amostra na máquina de ensaios é apresentado na Figura 4.3. Utilizou-se uma pressão nas garras de 3 MPa para a fixação da amostra na máquina de ensaios e com isso foi iniciado o ensaio com uma velocidade constante de 5 mm/min (0,2 pol/min). Houve um controle rigoroso para que a amostra ficasse alinhada e que as garras ficassem com a mesma distância das extremidades do corpo de prova, para que se tivesse o mínimo de interferência delas na execução do ensaio.



Figura 4.3 - Sistema de ensaio de tração no corpo de prova tipo halteres

4.2.1.2 Ensaio de tração em corpo de prova do tipo anel com seção reduzida

Para os ensaios de tração em corpos de prova do tipo anel utilizou-se uma máquina universal MTS modelo Landmark com capacidade de 100 kN, no Laboratório de Metalurgia Física/UFRGS.

No ensaio de tração com corpo de prova tipo anel com seção reduzida se teve como objetivo a obtenção do módulo de elasticidade na direção circunferencial (direção x) e resistência mecânica do tubo compósito para posterior comparação com resultados obtidos pelo ensaio de ultrassom.

Para os testes de tração em anéis foi construído um dispositivo que é conectado a máquina de ensaios segundo a norma ASTM D2290-00. O modelo do corte transversal dos corpos de prova para os testes de anel com uma área reduzida, segundo a norma, bem como suas dimensões podem ser vistos na Figura 4.4.

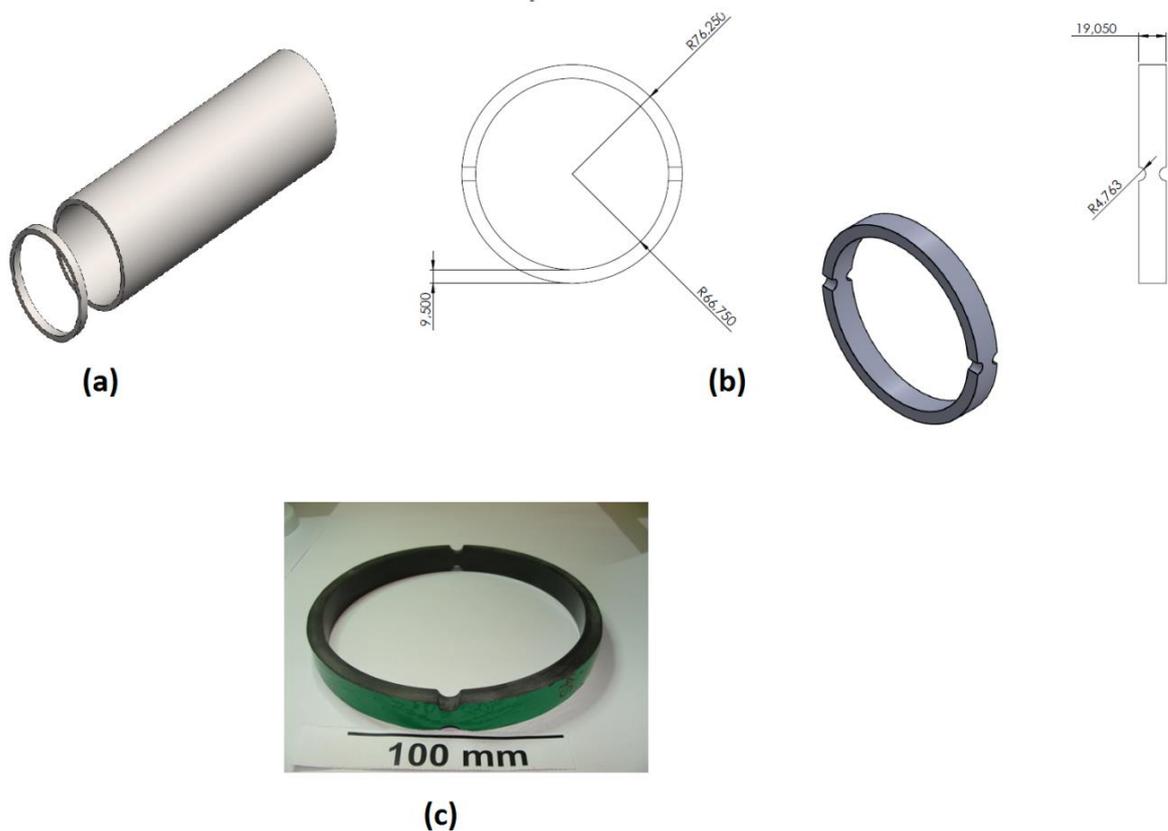


Figura 4.4 - Corpos de prova do tipo anel. (a) sentido do corte do tubo. (b) dimensões do corpo de prova. (c) corpo de prova

A montagem do ensaio inicia-se pela colocação do anel de compósito no dispositivo metálico por onde são puxados os anéis, nessa colocação deve ser observada a centralização da emenda entre as duas peças do miolo metálico com a seção reduzida do anel compósito. Em seguida, o miolo já com o anel é colocado nas garras (superior e inferior) com o auxílio de bastões metálicos através de orifícios existentes tanto nos miolos como nas garras. A montagem do sistema está apresentada na Figura 4.5.

Os testes foram realizados com uma velocidade de $2,54\text{mm/min}$ ($0,1\text{pol/min}$), dentro da faixa de velocidades descritas na ASTM D2290-00.

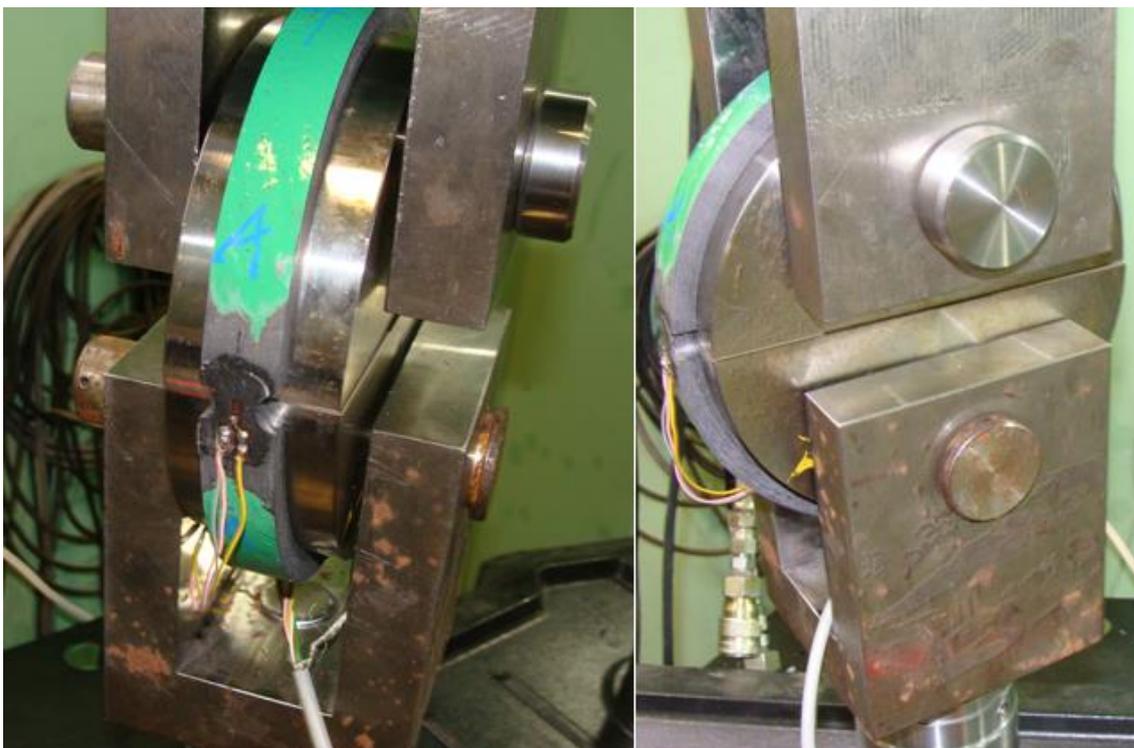


Figura 4.5 - Sistema de ensaio de tração no corpo de prova tipo anel com seção reduzida

Os valores de tensão circunferencial aparente para todos os corpos de prova foram obtidos da Equação 4.1, de acordo com a norma utilizada para procedimento dos testes.

$$\sigma = \frac{P}{(d_1b_1+d_2b_2)} \quad \text{Equação 4.1}$$

onde,

σ = tensão máxima, MPa.

P = carregamento máximo, N.

d_1, d_2 = espessura das seções reduzidas, mm.

b_1, b_2 = largura das seções reduzidas, mm.

4.2.2 Densidade e Fração Volumétrica de Fibras

A densidade das amostras foi determinada em um multi picnômetro a gás hélio Quantachrome, modelo MVP-1. O gás hélio é utilizado por ser inerte e por possuir um pequeno diâmetro, o que facilita que penetre nos poros abertos da amostra. As amostras foram retiradas do tubo compósito em formato de cubos de aproximadamente 1mm^3 .

O picnômetro a gás possui duas câmaras de volume conhecido: a da amostra e a de expansão, ambas conectadas por uma válvula. Depois de submetida à pressão atmosférica, a câmara de expansão é fechada e o gás hélio é pressurizado na câmara contendo a amostra de massa conhecida previamente. Então a câmara de expansão é aberta ocorrendo queda de pressão na câmara com a amostra e aumento de pressão na câmara de pressão. O equipamento fornece assim a densidade das amostras.

Para a determinação do percentual de fibras se utilizou o método de queima, que consiste em determinar a fração de massa de fibras (W_f) a partir de cinco amostras são retiradas do tubo compósito e cortadas mantendo-se a espessura do compósito. Em seguida os cadinhos vazios são pesados. Após, os cadinhos mais a amostra são pesados, sendo então levados para um forno onde permanecem durante duas horas à 900°C para queima da matriz. Depois de queimada a fase polimérica é determinada a fração em massa de fibra do compósito (W_f), através da pesagem do cadinho com as fibras como apresentada na Equação 4.2.

$$W_f = \frac{\omega_f}{\omega_c} \quad \text{Equação 4.2}$$

onde,

ω_f representa a massa de fibra após queima

ω_c representa a massa do compósito

Com a medida da densidade do compósito e fração mássica (W_f) pode-se determinar a fração volumétrica de fibras do material estudado pela Equação 4.3. A densidade da fibra foi fornecida pela empresa EDRA.

$$V_f = \frac{W_f \cdot \rho_c}{\rho_f} \quad \text{Equação 4.3}$$

onde,

V_f = fração volumétrica de fibras

W_f = fração de massa das fibras

ρ_c = densidade do compósito

ρ_f = densidade das fibras

4.2.3 Porosidade Aparente

A porosidade aparente é uma medida volumétrica dos poros abertos. Ela avalia o volume dos poros que são acessíveis ao fluido utilizado em sua determinação (no caso, a água). Poros conectados à superfície são mais prejudiciais à resistência mecânica, visto que muitas fraturas têm início em falhas estruturais superficiais, tais como poros.

As medidas de porosidade aparente foram determinadas a partir de 10 amostras retiradas do tubo. Primeiramente se determinou a massa seca da amostra (m_s), depois se deixou a amostra por 24h submersas dentro da água e medida a massa úmida (m_u) e por último se fez a medida da massa imersa (m_i). Através da Equação 4.4 se pode determinar a Porosidade Aparente (PA).

$$\%PA = \frac{m_u - m_s}{m_u - m_i} \times 100 \quad \text{Equação 4.4}$$

4.2.4 Medidas de ultrassom

As velocidades foram obtidas sabendo-se as dimensões do corpo de prova por isso, as medidas dimensionais dos corpos de prova foram feitas com um micrômetro Mitutoyo de capacidade 0-25 mm e precisão 0,01mm. Foram selecionados 2 pontos em

cada amostra e nesses pontos foram feitas 3 medidas das espessuras e posteriormente feita uma média desses pontos para que se tivesse uma maior precisão dimensional da amostra, visto que tanto o material original quanto a usinagem não tem uma homogeneidade dimensional.

Para as medidas de velocidades sônicas se fez necessária a usinagem de corpos de prova para que se tivesse uma maior interação entre o transdutor e o material compósito. As medidas foram feitas em três direções, na direção radial, axial e circunferencial como estão apresentadas na Figura 4.6.

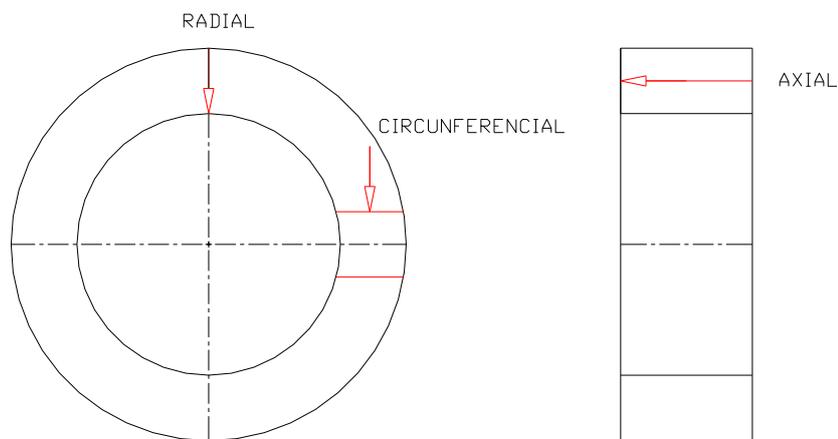


Figura 4.6 - Direções das medidas de velocidade ultrassônica

No Corpo de Prova do Tipo I (CP-I) foram medidas as velocidades longitudinais na direção radial do tubo (cálculo da constante C_{11}), a velocidade transversal no direção axial do tubo (C_{44}) e a velocidade longitudinal intermediária (C_{13}) entre os eixos x e z. Esse corpo de prova foi retirado na direção longitudinal do tubo.

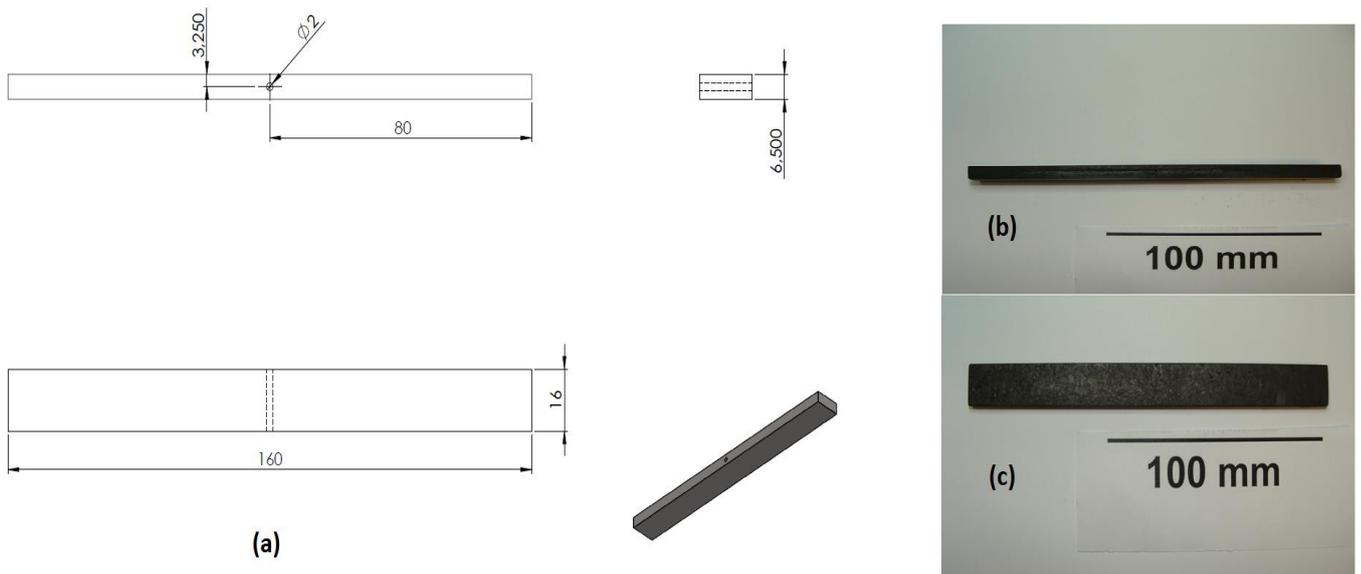


Figura 4.7 - Corpo de Prova do tipo I, (a) desenho com as dimensões do corpo de prova, (b) vista Lateral e (c) vista Frontal

A técnica de ultrassom utilizada para as medidas de velocidades sônicas foi o pulso-eco com o aparelho da empresa Olympus modelo Epoch XT. Para as velocidades longitudinais no sentido radial do tubo foi utilizado um cabeçote normal (ou reto) de frequência de 2MHz, com diâmetro de 6,0mm, modelo DS6 da marca Olympus. A escolha desse transdutor se deve ao melhor sinal obtido e maior interação com o material entre os transdutores testados. Como agente acoplante foi utilizada vaselina líquida para que se tivesse uma melhora de sinal.

A velocidade transversal no sentido axial do tubo foi determinada através de medidas de ultrassom com a técnica pulso-eco utilizando um transdutor angular de 1MHz de frequência e uma sapata de 45° da empresa Krautkramer. Como o transdutor angular é projetado para medidas das velocidades sônicas no aço, ela deve ser corrigida para se obter o ângulo correto de saída do feixe sônico. Essa correção foi feita utilizando a Lei de Snell apresentada na Equação 4.5:

$$\frac{v_i}{v_r} = \frac{\text{sen}\alpha_i}{\text{sen}\alpha_r} \quad \text{Equação 4.5}$$

onde:

v_i = velocidade de incidência;

v_r = velocidade de refração;

α_i = ângulo de incidência;

α_r = ângulo de refração.

Primeiramente foi calculado para o aço o ângulo incidente α_i para os cabeçotes de 45, 60 e 70° com as velocidades de incidência e refração de 2730 e 3240m/s (valores de referência do equipamento), respectivamente. Esses valores dos ângulos de incidência estão apresentados na tabela abaixo.

Tabela 4.1 - Valores dos ângulos de incidência calculados para o aço.

Aço	
α_r	α_i
45 °	36,56 °
60 °	46,87 °
75 °	54,47 °

Posteriormente ao cálculo dos ângulos de incidência, foi calculado o ângulo refratado para o material compósito em questão, admitindo a velocidade do compósito de 1400m/s. Esses valores foram obtidos a partir de alguns testes prévios e encontrados na literatura (BOERI, 2006). Os resultados encontrados estão descritos na tabela abaixo.

Tabela 4.2 - Valores dos ângulos refratados para compósito.

Compósito	
α_i	α_r
36,56 °	19,10 °
46,87 °	23,64 °
52,35 °	25,78 °

Após a correção dos ângulos foram calculadas as distâncias projetadas (DP) e percurso sônico (PS) a partir das medidas da distância da superfície até o furo (h) e o ângulo de refração corrigida (α_r) por uma relação trigonométrica como apresentado na Figura 4.8 abaixo.

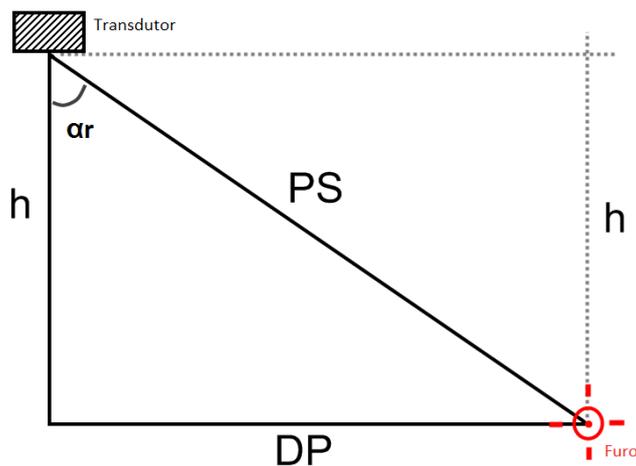


Figura 4.8 - Desenho esquemático apresentando as variáveis DP (Distância Projetada), PS (Percurso Sônico), α_r (Ângulo de refração corrigida) e h (Distância entre a Superfície da amostra e o furo) no interior da amostra.

Com os cálculos para cada ângulo de refração se concluiu que seria mais coerente, devido a geometria da amostra, à utilização do ângulo de $19,1^\circ$ a partir das distâncias medidas entre a superfície e o furo. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Valores de h medido, DP, PS.

Corpo de Prova	h (mm)	PS (mm)	DP (mm)
I	2,90	3,06	1,00
II	3,30	3,49	1,14
III	3,20	3,38	1,10
IV	3,20	3,38	1,10

Nessas condições foram medidas as velocidades transversais dos corpos de prova, agora utilizando um transdutor de 1MHz e uma sapata de 45° (para o aço) com ângulo refratado corrigido de $19,10^\circ$ (para compósito) para se obter as velocidades corrigidas. Foi utilizado como artifício um fio de aço dentro do furo da amostra servindo como um refletor e amplificador do sinal medido.

Para a velocidade longitudinal intermediária a 45° entre os eixos x e z (utilizada no cálculo da constante C_{13}) se utilizou um transdutor da empresa Krautkramer com sapata de 60° (para o aço), com ângulo corrigido para o material compósito de aproximadamente 45°.

Com os ângulos de incidência (Tabela 4.1), foi calculado o ângulo refratado para o material compósito, admitindo a velocidade longitudinal do compósito de 2900m/s. Esses valores foram obtidos a partir de alguns testes prévios e valores obtidos na bibliografia (BOERI, 2006). Os resultados encontrados estão descritos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Valores dos ângulos refratados para compósito

Compósito	
α_i	α_r
36,56 °	34,45 °
46,87 °	44,08 °
52,35 °	48,76 °

A sapata de 60° foi selecionada, pois ela tem um ângulo de refração de 44,08°, se aproximando dos 45° que se deve ter para se obter a velocidade longitudinal na direção intermediária entre os eixos x e z.

Com os ângulos corrigidos foram calculadas as distâncias projetadas (DP) e percurso sônico (PS) a partir das medidas da distância da superfície até o furo (h) e o ângulo de refração corrigida (α_r) por uma relação trigonométrica como apresentado na Figura 4.6. A Tabela apresenta os valores de h, PS e DP

Tabela 4.5 - Valores de h medido e DP e PS calculados.

h (mm)	PS (mm)	DP (mm)
2,80	3,89	2,70

O Corpo de Prova do Tipo II (CP-II) foi produzido para medidas das velocidades longitudinais no sentido axial para o cálculo da constante C_{33} . O CP-II foi obtido a partir de um corte transversal no sentido do tubo. As dimensões estão apresentadas na Figura 4.9.

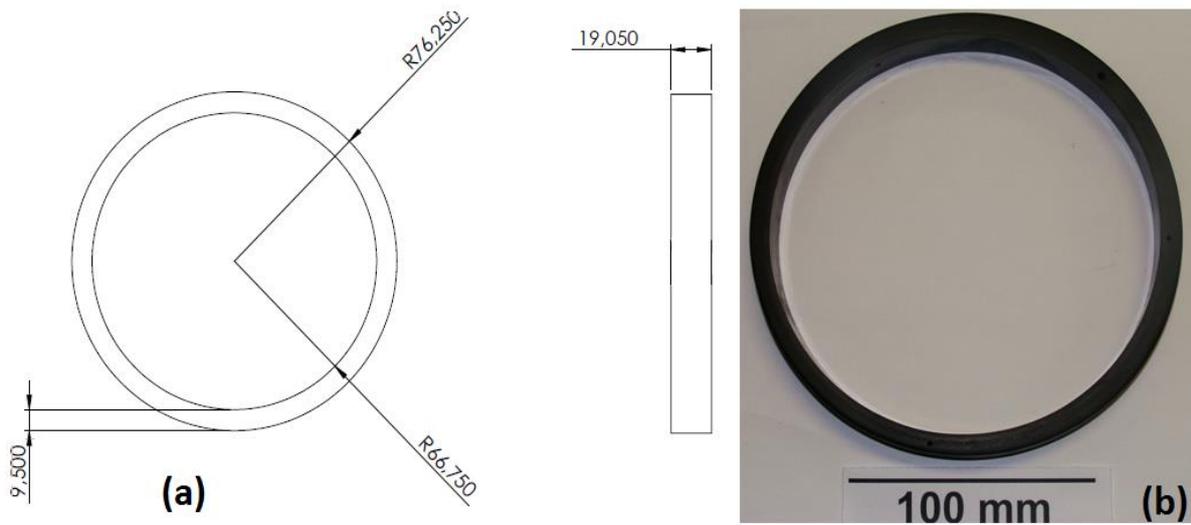


Figura 4.9 - Corpo de Prova do Tipo II, (a) desenho com as dimensões do corpo de prova e (b) vista superior.

As medidas da velocidade transversal no sentido radial para a determinação de C_{66} . Foi desenvolvido o Corpo de Prova do Tipo III (CP-III), que tem suas dimensões apresentadas na Figura 4.10.

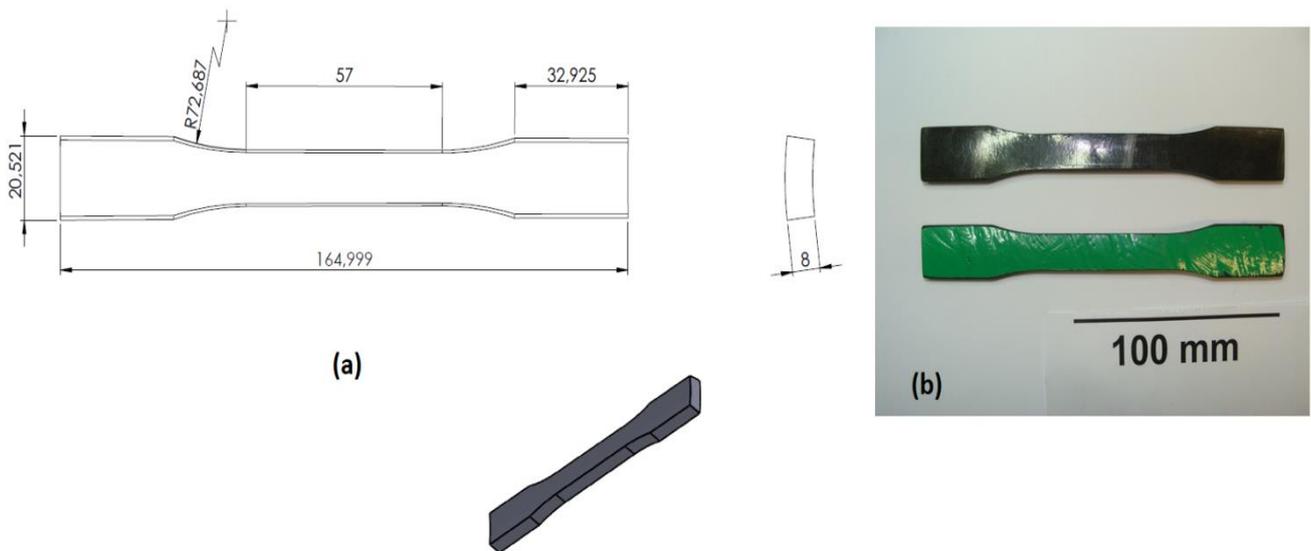


Figura 4.10 - Corpo de Prova do Tipo III, (a) desenho com as dimensões do corpo de prova e (b) vista superior.

4.2.5 Composição Química

A análise química do material estudado foi feita utilizando-se um Espectrômetro de Fluorescência de raios X da marca Shimadzu FX, modelo XRF – 1800 no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER-UFRGS). A amostra foi retirada do tubo compósito com formato cilíndrico, com altura de 5,0 mm e 46,5 mm de diâmetro.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ensaio Mecânicos

5.1.1 Ensaio de tração em corpos de prova do tipo halteres

A curva tensão-deformação características do ensaio de tração de um dos corpos de prova pode ser vistas na Figura 5.1.

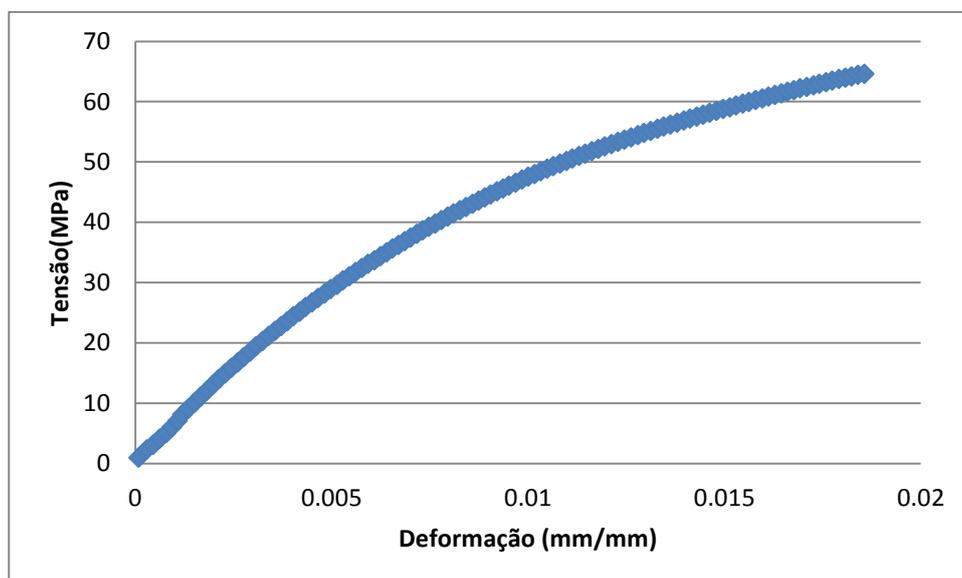


Figura 5.1 – Curva tensão-deformação do corpo de prova tipo halteres

Foi necessário a utilização de uma linha de tendência apresentada na Figura 5.2 para se obter a curva, pois quando as camadas do tubo começam a trincar, o extensômetro desliza no corpo de prova, fazendo com que o ele varie em sua aquisição de dados.

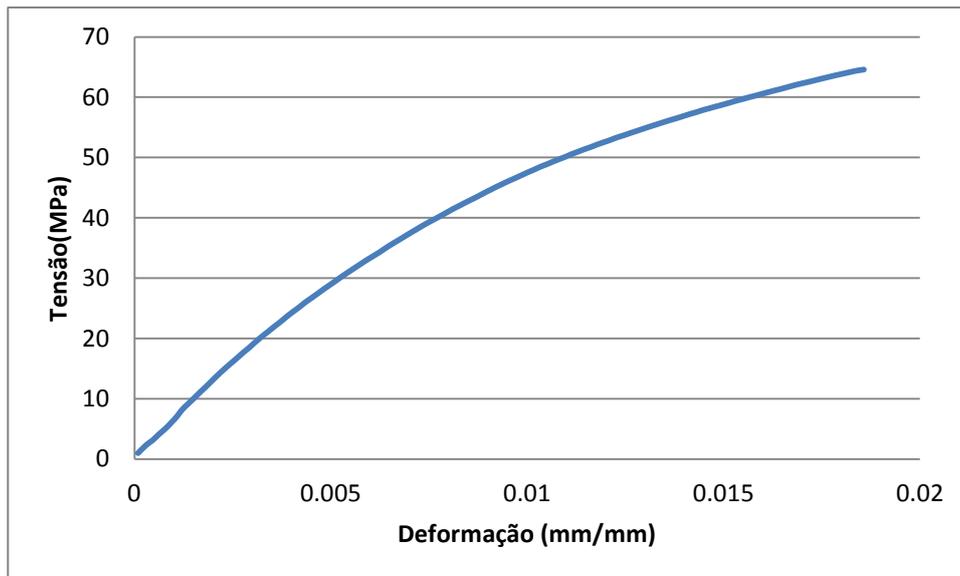


Figura 5.2 - Curva tensão-deformação do corpo de prova do tipo halteres corrigida.

O limite de resistência dos corpos de prova testados tiveram um valor médio de 58,59 MPa com desvio padrão de 6,70MPa, com módulo de elasticidade médio de 10,30 GPa (desvio de 2,90 GPa) e coeficientes de Poisson no sentido circunferencial (zy) e axial (xz) de $0,30 \pm 0,01$ e $0,29 \pm 0,01$ respectivamente. O módulo de elasticidade foi calculado a partir do segmento inicial da curva na região elástica, pelo coeficiente angular da reta.

5.1.2 Ensaio de tração em corpos de prova do tipo anel com seção reduzida

A curva tensão-deformação característica dos anéis do tubo epóxi/vidro pode ser observado na Figura 5.3 que apresenta um dos ensaios realizados. A parte inicial da curva corresponde ao ajuste do sistema (acomodação do anel e do dispositivo de aço).

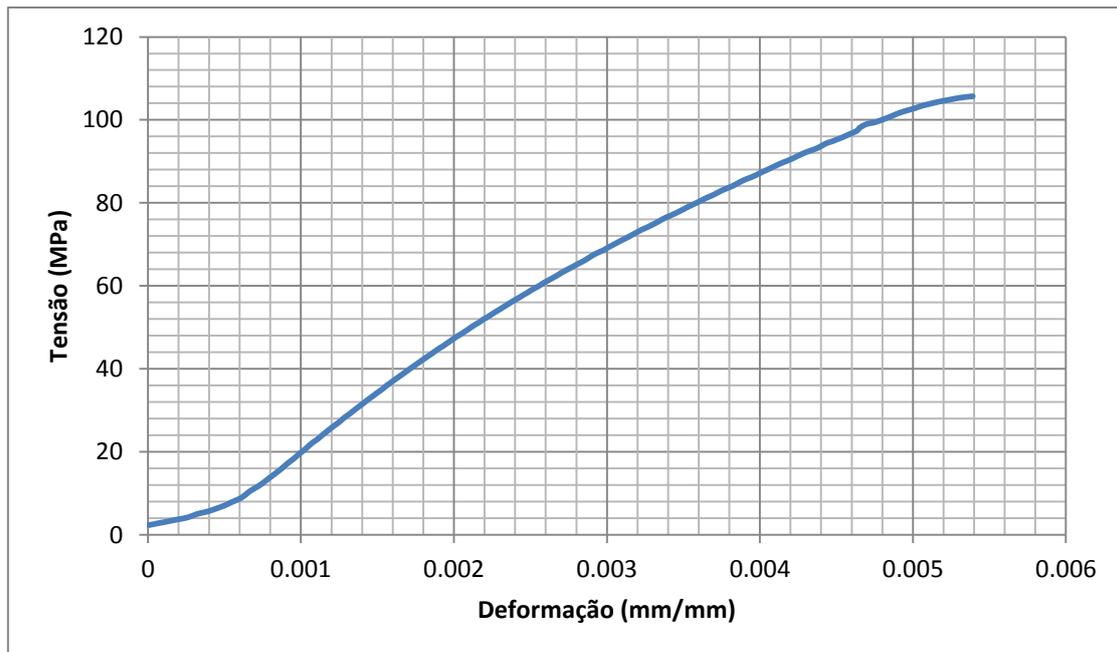


Figura 5.3 - Curva tensão-deformação dos corpos de prova testados do tipo anel

O valor médio de tensão máxima obtido dos corpos de prova ensaiados foi de $135,63 \pm 30$ MPa e módulo de elasticidade de $22,04 \pm 2,12$ GPa, retirado do coeficiente angular da região elástica da curva .

5.2 Densidade e Fração Volumétrica de Fibras

A densidade medida pela análise de picnometria a hélio teve um valor médio de $1,640 \pm 0,00$ g/cm³. A medida foi feita a partir de amostras de vários pontos do tubo compósito. Pelo método da queima para a determinação da fração mássica de fibras se teve um decréscimo de 56,76% no seu peso que corresponde a matriz, ou seja, a fração mássica de fibra medida foi de 44,34%. A fração volumétrica da fibra, obtida das medidas a partir da densidade do tubo compósito, da densidade da fibra fornecida pela empresa EDRA de 2,600g/cm³ e da fração volumétrica da fibra, foi de 27,27%.

5.3 Porosidade Aparente

A porosidade aparente medida a partir das 10 amostras retiradas do tubo compósito, a partir das massas seca, submersa por 24h e massa imersa teve um valor médio de $0,34\% \pm 0,01\%$.

5.4 Medidas de Ultrassom

As medidas de ultrassom para a determinação da constante C_{11} foram obtidas através das velocidades no sentido radial do tubo no CP-I, com valor médio de 3250 m/s. Na Figura 5.4 está apresentada a tela do equipamento Olympus-Epoch XT.



Figura 5.4 - Tela do equipamento Olympus-Epoch XT para a medida da velocidade longitudinal no sentido radial do tubo.

A velocidade transversal no sentido axial do tubo foi determinada a partir de medidas com ângulo de incidência corrigido de $19,10^\circ$ e frequência de 1MHz no CP-I. A média da velocidade transversal medida foi de 1500 m/s. Os parâmetros utilizados estão apresentados na Figura 5.5.



Figura 5.5 - Tela do equipamento Olympus-Epoch XT para a medida da velocidade transversal no sentido axial do tubo.

Apesar de haver ruído entre os picos, os valores medidos da distância projetada, profundidade da superfície ao furo e o percurso sônico coincidem com os valores medidos e calculados. Para se ter certeza da medida do pico a ser analisado, se movimentou o fio de aço (utilizado como refletor) e o pico mais alto também se movimentou.

Para a velocidade longitudinal na direção intermediária entre os eixos x e z utilizou-se um transdutor de 60° com ângulo corrigido de 44° para o material compósito. Os parâmetros utilizados nessa medida estão apresentados na Figura 5.6. A velocidade média foi de 2024 m/s no CP-I.



Figura 5.6 - Tela do equipamento Olympus-Epoch XT para a medida da velocidade longitudinal no sentido intermediário a 44° entre os eixo x e z

O CP-II foi utilizado para se obter a constante C_{33} medindo a velocidade longitudinal no sentido circunferencial do tubo compósito. Para isso utilizou-se uma frequência de 2,00 MHz. A velocidade média obtida desse ensaio foi de 2958 m/s e seus parâmetros estão apresentados na Figura 5.7.



Figura 5.7 - Tela do equipamento Olympus-Epoch XT para a medida da velocidade longitudinal no sentido circunferencial do tubo.

A velocidade transversal no sentido radial do tubo foi determinada com o objetivo de se obter a constante C_{66} . Para essa medida se utilizou o CP-III e o transdutor de 30° para o aço com ângulo corrigido de 19,10° para material compósito. A velocidade média medida foi de 2200 m/s.



Figura 5.8 - Tela do equipamento Olympus-Epoch XT para a medida da velocidade transversal no sentido radial do tubo.

Apesar de haver ruído entre os picos, os valores medidos da distância projetada, profundidade da superfície ao furo e o percurso sônico coincidem com os valores medidos e calculados. Por essa razão se utilizou o artifício de colocar um arame de aço dentro do furo, para que se tivesse uma maior reflexão e facilitando a identificação do pico.

A constante C_{12} pode ser calculada a partir das constantes C_{11} e C_{66} ($C_{12} = C_{11} - 2C_{66}$) e não precisa de medida de velocidade ultrassônica. Na Tabela 5.1 se tem um resumo das velocidades, sentido de propagação, tipo de onda e a constante que é determinada a partir da velocidade medida.

Tabela 5.1 - Resumo das velocidades medidas

Velocidade (m/s)	Sentido de propagação no tubo	Tipo de Onda	Constante
3250	Radial	Longitudinal	C_{11}
1500	Axial	Transversal	C_{44}
2024	Intermediária	Longitudinal	C_{13}
2958	Circunferencial	Longitudinal	C_{33}
2200	Radial	Transversal	C_{66}

5.5 Cálculo das Constantes Elásticas e Propriedades Mecânicas

O cálculo das constantes elásticas foi feito baseado nas equações descritas na Tabela 3.3 e com os resultados das velocidades medidas por ultrassom e com a densidade do material (1640 kg/m^3) obtidos pela picnometria a hélio. A Tabela 5.2 apresenta os resultados das constantes elásticas calculadas.

Tabela 5.2 - Valores das constantes elásticas da matriz

Constante	Valores Experimentais (GN/m^2)
C_{11}	17,322
C_{44}	3,690
C_{33}	14,350
C_{66}	7,937
$C_{13} (45^\circ)$	2,215
C_{12}	1,447

Com a obtenção das constantes elásticas pode-se determinar os módulos de elasticidade, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson de acordo com a Tabela 3.4. O resultado dessas propriedades é apresentado na Tabela 5.3 nas suas respectivas direções.

Tabela 5.3 - Valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson

Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson	Valores Experimentais
$E_x=E_y$	16,908 GN/m ²
E_z	13,826GN/m ²
$\nu_{xy}=\nu_{yx}$	0,018
ν_{xz}	0,110
ν_{zx}	0,144
$G_{xz}=G_{yz}$	3,690 GN/m ²
G_{xy}	7,937 GN/m ²

5.6 Composição Química

A partir do resultado do método da queima foi possível avaliar o percentual mássico do material orgânico do tubo compósito, ou seja, a matriz que teve um resultado de 56,76%. Na Tabela 5.4 estão apresentados os compostos e seus respectivos percentuais.

Tabela 5.4 - Composição química da amostra cilíndrica do tubo compósito

Composto	Percentual (%)
SiO ₂	24,3807
CaO	12,0525
Al ₂ O ₃	4,8459
Cl	0,5542
TiO ₂	0,2932
Fe ₂ O ₃	0,2845
K ₂ O	0,2274
Na ₂ O	0,2054
MgO	0,1814
SO ₃	0,1070
ZrO ₂	0,0345
P ₂ O ₅	0,0335
Co ₂ O ₃	0,0211
SrO	0,0187
Matriz	56,7600

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na realização dos trabalhos investigativos desenvolvidos no escopo deste trabalho permitem inferir as seguintes conclusões:

- Os ensaios mecânicos tiveram importância na obtenção das propriedades como o módulo de elasticidade na direção x de 22,04 MPa (corpo de prova do tipo anel com seção reduzida) e na direção z de 10,30 MPa (corpo de prova do tipo halteres). Também se obteve os coeficientes de Poisson de 0,30 e 0,29 nas direções zy e xz, respectivamente.

- A densidade medida pela análise de picnometria a hélio teve valor médio de 1,640 g/cm³. No método da queima para a determinação da fração mássica de fibras se teve um decréscimo de 56,76% no seu peso que corresponde a matriz, ou seja, a fração mássica de fibra medida foi de 44,34%. A fração volumétrica de fibra contida no tubo compósito foi de 27,27%.

- A porosidade aparente medida a partir das amostras retiradas do tubo compósito foi 0,34%. Esse valor é alto, visto que ela interfere diretamente na resistência mecânica e nas demais propriedades mecânicas.

- Com os ensaios realizados a partir do ultrassom foi possível determinar as velocidades sônicas no material, as constantes elásticas e posteriormente as propriedades mecânicas que tiveram os valores de 16,90 MPa para o módulo de elasticidade na direção x e 13,82 MPa na direção z. Podem-se calcular também os coeficientes de Poisson nas direções que tiveram valores de 0,11 e 0,14 nas direções zy e xz, respectivamente. O módulo de cisalhamento no sentido xz foi de 3,69 GPa e no xy foi de 7,93 GPa.

- A diferença relativa entre os módulos de elasticidade obtidos a partir dos ensaios de tração e das medidas de ultrassom no eixo x foi de 23% enquanto no eixo z foi de 34%. Os valores dos coeficientes de Poisson tiveram uma diferença relativa de 51% em zy e 59% em xz. Nesse trabalho foi possível estimar os módulos de elasticidade com maior aproximação.

- Através da análise por fluorescência por raios X pode-se determinar a composição química do tubo compósito. Além da matriz orgânica que foi de 56,76%, foi constatada a presença de 24,38% de SiO₂, 12,05% de CaO, 4,85% de Al₂O₃ e outros compostos (Cl, TiO₂, Fe₂O₃, K₂O, Na₂O, MgO, SO₃, ZrO₂, P₂O₅, Co₂O₃, SrO) que somados totalizam 1,96%.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilização de sapatas de diferentes ângulos nos transdutores para a obtenção das velocidades transversais;
- Realização de ensaio de tração no sentido axial do tubo íntegro;
- Consideração do tubo totalmente anisotrópico;
- Realização de testes mecânicos de impacto.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, B. D. . B. L. J. Analysis and performance of fiber composites. **2ª Edição**. ed. [S.l.]: EUA: John Wiley & Sons, 1990.

AINSWORTH, L. The state of filament winding. **Composites**, v. 2, p. 14-28, 1971.

AKLONIS, J. J.; MACKNIGHT, W. J.; SHEN, M. **Introduction to polymer Viscoelasticity**. [S.l.]: Wiley-Interscience, 1972.

AMICO, S. www.ufrgs.br/lapol/compositos. **LAPOL**, 2007. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/lapol/compositos/index.html>>. Acesso em: 2013.

ANDREUCCI, R. **Ensaio Ultrassom**. [S.l.]: [s.n.], 2011.

ASM-HANDBOOK, M. **Nondestructive Inspection and Quality Control**. 8ª Edição. ed. [S.l.]: American Society for Metals, v. 11, 1976.

BABICK, F.; HINZE, F. E. R. S. Dependence of ultrasonic attenuation on the material properties. In: _____ **Colloids and Surfaces Physicochemical and Engineering Aspects**. [S.l.]: [s.n.], v. 172, 2000. p. 33-46.

BANNERJEE, A. . S. . M. C. . C. **Model and experimental study of fiber motion in wet filament winding**. In: **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. [S.l.]: [s.n.], v. 29.

BARRERA, E. V. . K. V. N. . L. K. . C. R. . I. A. Z. J. Processing a glass fiber reinforced vinyl ester composite with nanotube enhancement of interlaminar shear strength.. **Composites Science and Technology**, v. 67, p. 1509-1517, 2007.

BARRERA, E. V. . K. V. N. . L. K. . C. R. . I. A. Z. J. Processing a glass fiber reinforced vinyl ester composite with nanotube enhancement of interlaminar shear strength..

BERUTTI, F. A. **Aplicação de métodos de ultra-som para avaliação e caracterização da microestrutura de materiais cerâmicos à base de alumina e sua associação com propriedades mecânicas.** Porto Alegre: [s.n.], 2004.

BOERI, D. V. **Caracterização de Materiais Compostos por Ultra-Som.** São Paulo: [s.n.], 2006.

CALLISTER JR., W. D. **Fundamentals of Materials Science and Engineering.** 5ª Edição. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001.

CANEVAROLO, S. V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros.** [S.l.]: Artliber, 2004.

CARVALHO, L. H. . F. V. M. . N. M. M. S. Uso de fibras de caroá e macambira em compósitos de matriz polimérica. **8º Congresso Brasileiro de Polímeros**, 2006. 1231-1232.

CHERIAN, A. B.; VARGHESE, L. A.; THACIL, E. T. Epoxy-modified, unsaturated polyester hybrid networks. **European Polymer Journal**, v. 43, p. 1460-1469, 2007.

CHUNG, T. J. **Applied Continuum Mechanics.** New York - EUA: Cambridge University Press, 1996.

COUREL FILHO, H. Ensaio por ultra-som. **Metalurgia & Materiais**, v. 59, p. 346-348, 2003.

COWIE, J. M. G. **Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials.** [S.l.]: Intertext books, 1973.

D'ALMEIDA, J. R. M. . B. D. W. . C. V. . D. A. L. F. S. Acetilação da fibra de bucha (luffa cylindrica).. **Polímeros : Ciência e Tecnologia**, v. 15, p. 59-62, 2005.

D'ALMEIDA, J. R. M. . B. D. W. . C. V. . D. A. L. F. S. Flexural mechanical behavior of sponge gourd – resin matrix composites as a function of fiber's surface treatment. **6th International Symposium on Natural Polymers and Composites.**

DELSANTO, P. P. **A unified treatment of nonclassical.** [S.l.]: [s.n.], v. 42, 2004.

FELISBERTI, M. I. . C. S. N. Comportamento dinâmico-mecânico e relaxações em polímeros e blendas poliméricas. **Química Nova**, v. 28, p. 255-263, 2005.

- FERRY, J. D. **Viscoelastic Properties of Polymers**. Nova York: Wiley, 1980.
- FUKUDA, T. . M. Z. . F. T. **Advances in Fiber Composite Materials**. Amsterdam-London-New York-Tokyo: Elsevier, 1994.
- GARTON, A. **Infrared Spectroscopy of Polymer Blends, Composites and Surfaces**. Munich-Vienna-New York-Barcelona: Hanser Publishers, 1992.
- GARWE, F. . S. K. . B. M. . L. H. . S. A. D. E. Influence of cooperative dynamics on local relaxation during the development of the dynamic glass transition in poly (n-alkyl methacrylate)s. **Macromolecules**, v. v.29, , 199, p. 247-253, 1996.
- GIBSON, R. F. **Principles of Composite Material Mechanics**. 1ª Edição. ed. [S.l.]: Mc Graw Hill, 1994.
- HIEMENS, P. C. **Polymer Chemistry: The Basic Concepts**. [S.l.]: Marcel Deckker Inc., 1984.
- JONES, R. M. **Mechanics of Composite Materials**. 2ª Edição. ed. EUA: Taylor e Francis, 1999.
- JUNIOR, H. L. O. **Caracterização Mecânica e Dinâmico-Mecânica de Compósitos Híbridos Vidro/Sisal Moldados por RTM**. Porto Alegre: [s.n.], 2009.
- KOTHARI, V. K. **Manufactured Fibre Technology**. [S.l.]: Chapman and Hall, 1997.
- KRAUTKRÄMER, J. **Ultrasonic Testing of Materials**. [S.l.]: Springer-Verlag, 1983.
- MALLARINO, S.; CHAILAN, J. F.; VERNET, J. L. Glass fibre sizing effect on dynamic mechanical properties of cyanate ester composites. I. Single frequency investigations.. **European Polymer Journal**, v. 41, p. 1804-1811, 2005.
- MARGOLIS, J. M. **Advanced Thermoset Composites**. [S.l.]: EUA: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1985.
- MARQUES, E. R. C.; WILLIAMS JR., J. H. Ultrasonic Determination of the Elastic Constants of the Stiffness Matrix for Unidirectional Fiberglass Epoxy Composites, Massachusetts, n. Massachusetts Institute of Technology, Dezembro 1986.

MAZUMDAR, S. K. **Composites Manufacturing - Materials, Product, and Process Engineering**. 1ª Edição. ed. [S.l.]: CRC Press LLC, 2002.

NELLIGAN, T. J. An introduction to ultrasonic material analysis. Disponível em: <<http://www.olympus-ims.com/en/applications-and-solutions/introductory-ultrasonics/introduction-material-analysis/>>. Acesso em: 01 Março 2012.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais – Ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

NYE, J. F. **Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors**. New York: Oxford University Press, 1993.

OLABISI, O. **Polymer-Polymer Miscibility**. London: Academic Press, 1979.

OLIVEIRA, J. G. Á. D. Microscopia Digital e Análise de Imagens para Caracterização de Tubos Compósitos Fabricados por Enrolamento Filamentar, Rio de Janeiro, Abril 2008.

PEREIRA, J. C. **Curso de projeto estrutural com materiais compostos**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

PETERS, S. T. **Handbook of Composites**. 2ª Edição. ed. Londres: Chapman & Hall, 1998.

PETERS, S. T.; HUMPREY, W. D.; FORAL, R. F. **Filament Winding Composite Structure Fabrication**. 2ª Edição. ed. [S.l.]: Sampe, 1991.

POTHAN, L. A.; OOMMEN, Z.; THOMAS, S. Dynamic mechanical analysis of banana fiber reinforced polyester composites.. **Composites Science and Technology**, v. 63, p. 283-293, 2003.

ROSER, R. R. Filament winding: basic principles and new technology. **Reinforced Plastics**, v. 38, p. 38-41, 1994.

S A Composites. S A **Composites**. Disponível em: <http://www.sacomposites.com/filament_winding_carbon_fiber.html>. Acesso em: 11 Setembro 2012.

S.T., P.; HUMPREY, W. D.; FORAL, R. F. **Filament Winding Composite Structure Fabrication**. 2ª Edição. ed. [S.l.]: Sampe, 1991.

SCIENCEDIRECT. **Filament winding**: basic principles and new technology. In: Reinforced Plastics. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 01 dez. 2011.

SHELDON, R. P. **Composite Polymeric Materials**. London and New York: Applied Science Publishers, 1982.

SHEN, F. C. A filament-wound structure technology overview. **Material Chemistry and Physics**, v. 42, p. 96-1000, 1995.

STUART, D. S. Filament Winding – Materials and Engineering. **Materials & Design**, v. 6, n. 3, p. 140-144, 1985. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 01 dezembro 2011.

SUTERIO, R. Caracterização de Constantes Elásticas de Materiais Isotrópicos por Holografia Óptica Eletrônica combinada ao Método de Ressonância Mecânica. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC**, Florianópolis, Dezembro 1998.

VAUGHAN, D. J. **Handbook of Composites. Fiberglass reinforcement**. [S.l.]: [s.n.], 1998.

WAMBUA, P. . I. J. . V. I. Natural fibers: Can they replace glass in fibre reinforced plastics?. **Composites Science and Technology**, v. 63, p. p. 1259-1264, 2003.

WOOL, R. . P. D. M. A. . O. A. Natural fiber composites with plant oil-based resin. **Composites Science and Technology**., v. 64, p. 1135-1145, 2004.