

COMPORTAMENTO EM FLEXÃO A QUATRO PONTOS DE TUBOS
COMPÓSITOS PRODUZIDOS PELA TÉCNICA DE ENROLAMENTO
FILAMENTAR.

Denis Scaringi

PROJETO DE FORMATURA SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS DA
ESCOLA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA DE MATERIAIS.

Aprovado por:

Prof. Fernando Luiz Bastian, Ph.D.

Prof.^a Marysilvia Ferreira da Costa, D. Sc.

Prof. Luiz Antonio Lourenço Martins, M.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JULHO DE 2010

“Dedico este trabalho a minha família, meus amigos e todos que acreditaram no meu potencial”

Em memória ao meu grande mestre e amigo

Prof. Tsuneharu Ogasawara

Agradecimentos

Primeiramente, a Deus por me dar forças para seguir em frente... Sempre!

A minha mãe, Rosana, pela sua compreensão, carinho e afeto, além de me ajudar nos momentos difíceis de duvida. Ao meu pai, Orlando, por ter muita paciência comigo e acreditar no meu potencial. Amo vocês!

Ao meu irmão, Vinicius, por ser meu maior companheiro em tudo o que faço.

Aos meus alunos do instituto politécnico de Cabo Frio, que me fazem acreditar que luto por um mundo melhor e contribuo para a formação de verdadeiros cidadãos. Com certeza, hoje sou uma pessoa mais feliz por dar aula pra vocês.

Aos meus camaradas, Assef, Pablo, Calé, “Rauls”, Laercio e todos os sobreviventes da Metalmat. Valeu pela força galera.

Ao Flavio da oficina do Instituto de Física da UFRJ, por me ajudar a construir os dispositivos utilizados nos ensaios.

Ao meu orientador Prof. Fernando Luiz Bastian, por me ensinar, apoiar e orientar como um grande mestre. Obrigado professor.

Aos companheiros de trabalho: Carolina, Daniel, Rafael, Luis Antônio, Otávio, Camila, “Marcelos”, Victor, Miguel, por tornarem o trabalho mais prazeroso.

A grande amiga Ledjane, por me ajudar e me orientar sempre o melhor caminho.

Índice

1. Introdução	10
2. Revisão bibliográfica	13
2.1. Materiais compósitos	13
2.1.1. Matriz	16
2.1.1.1. Resina Epoxi	17
2.1.2. Reforço	18
2.1.2.1. Fibras de vidro	18
2.1.3. Propriedades mecânicas dos materiais compósitos	20
2.1.3.1. Regra das misturas	20
2.1.3.2. Módulo de elasticidade longitudinal	22
2.1.3.3. Módulo de elasticidade transversal	23
2.1.4. Processamento e métodos de fabricação	24
2.1.4.1. Enrolamento filamentar	24
2.2. Ensaio de flexão	27
2.2.1. Flexão a quatro pontos	27
3. Materiais e métodos	29
3.1. Materiais	29
3.1.1. Resina polimérica	29
3.1.2. Fibras	30
3.2. Métodos	31
3.2.1. Preparação da resina	31
3.2.2. Fabricação do tubo compósito	31
3.2.3. Massa específica e fração volumétrica de fibras dos tubos	34
3.2.3.1. Picnometria	35
3.2.3.2. Queima da matriz polimérica	35
3.2.4. Construção do dispositivo de flexão	36
3.2.5. Ensaio de flexão a quatro pontos	36

4. Resultados e discussão	39
4.1. Picnometria	39
4.1.1. Tubo 1	39
4.1.2. Tubo 2	39
4.1.3. Tubo 3	39
4.2. Ensaio de queima da matriz polimérica	40
4.2.1. Tubo 1	40
4.2.2. Tubo 2	40
4.2.3. Tubo 3	41
4.3. Ensaio de flexão	41
4.3.1. Análise do tubo 1	43
4.3.2. Análise do tubo 2	44
4.3.3. Análise do tubo 3	46
5. Conclusões	49
6. Sugestões para trabalhos futuros	50
7. Bibliografia	51

Lista de figuras

Figura 1 - Pontes de material compósito	10
Figura 2 - Diagrama de Resistência <i>versus</i> Densidade	13
Figura 3 - Distribuição de tensões ao longo das fibras	15
Figura 4 - Gráfico Módulo de elasticidade <i>versus</i> volume de fibra	15
Figura 5 - Estrutura química da resina epoxi tipo DGEBA	17
Figura 6 - Regra das misturas direta e inversa	20
Figura 7 - Arranjo hexagonal das fibras	21
Figura 8 - Elemento tracionado na direção axial das fibras	22
Figura 9 - Elemento tracionado na direção transversal as fibras	23
Figura 10 - Enrolamento filamental	25
Figura 11 - Laminado cortado ao longo da geratriz	26
Figura 12 - Flexão a quatro pontos	27
Figura 13 (a) - Diagrama de esforços Cortantes	28
Figura 13 (b) - Diagrama de Momento Fletor	28
Figura 14 - Rovings de fibra de vidro	30
Figura 15 - Mandril colapsável com reforço interno	32
Figura 16 - Desenho esquemático do empilhamento das camadas	33
Figura 17 - Remoção do excesso de resina	34
Figura 18 - Representação do dispositivo de flexão	36
Figura 19 - Norma ASTM D-6272	37
Figura 20 - Prensa Shimadzu 10000 kN	37
Figura 21 - Sistema de acoplamento do LVDT	38
Figura 22 - Gráfico de Carga <i>versus</i> deflexão dos tubos 1, 2 e 3	41
Figura 23 - Gráfico de Momento Fletor <i>versus</i> Raio de curvatura dos tubos 1, 2 e 3 ...	42
Figura 24 - Raio de curvatura	42

Figura 25 - Gráfico Carga <i>versus</i> deflexão do tubo 1	43
Figura 26 - Gráfico Momento <i>versus</i> Raio de Curvatura do tubo 1	44
Figura 27 - Região de fratura do tubo 1	44
Figura 28 - Gráfico Carga <i>versus</i> deflexão do tubo 2	45
Figura 29 - Gráfico Momento <i>versus</i> Raio de curvatura do tubo 2	45
Figura 30 - Região de fratura do tubo 2	46
Figura 31 - Gráfico Carga <i>versus</i> deflexão do tubo 3	46
Figura 32 - Gráfico Momento <i>versus</i> Raio de Curvatura do tubo 3	47
Figura 33 - Região de fratura do tubo 3	47

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Tabela comparativa de fibras para reforço de compósitos	18
Tabela 2 - Composição química dos principais tipos de fibras de vidro	19
Tabela 3 Propriedades da resina Huntsman	29
Tabela 4 - Propriedades da fibra de vidro do tipo E	30
Tabela 5 - Preparação da resina	31
Tabela 6 - Picnometria do tubo 1	39
Tabela 7 - Picnometria do tubo 2	39
Tabela 8 - Picnometria do tubo 3	40
Tabela 9 - Ensaio de queima do tubo 1	40
Tabela 10 - Ensaio de queima do tubo 2	40
Tabela 11 - Ensaio de queima do tubo 3	41
Tabela 12 - Principais valores obtidos nos ensaios	48

1- Introdução

Muitas das tecnologias modernas exigem materiais cada vez mais leves e com elevada resistência mecânica, o que limita a utilização de materiais convencionais para determinadas aplicações. Com a evolução e a descoberta de novos materiais, os limites, antes impostos pela inviabilidade de projetos devido ao custo ou elevadas solicitações mecânicas, tem sido quebrados e a utilização de materiais tradicionais tem se tornado obsoleta.

Seja na medicina, nos esportes ou na indústria aeroespacial, o desenvolvimento de materiais compostos tem revolucionado essas áreas do conhecimento, em todos os âmbitos da sociedade atual.

Os materiais compósitos têm sido muito utilizados em aplicações estruturais como túneis e pontes, em equipamentos de alto desempenho, como automóveis e aviões e reparos de estruturas, principalmente as que são submetidas a ambientes corrosivos. A Figura 1 ilustra duas pontes de material compósito produzidas pelo processo de pultrusão.



Figura 1 – Pontes de material compósito [2]

Uma das vantagens dos materiais compósitos em relação a outros materiais é a liberdade de formas que o produto final pode assumir, além de poder ser produzido em grande ou pequena escala.

Em geral, estruturas metálicas são tradicionalmente as mais utilizadas devido a suas excelentes propriedades, como a resistência a tração, soldabilidade tenacidade à fratura e usinabilidade. Estruturas tubulares de aço são muito utilizadas em estruturas fixas e instalações provisórias, como andaimes, passarelas, arquibancadas, palcos de shows.

Para tais aplicações, os tubos de aço são os mais comuns. Paralelamente ao desenvolvimento de tubos compósitos, a descoberta de novas ligas metálicas e aços mais resistentes tornam a aplicação desses tubos metálicos uma excelente opção para a indústria petrolífera. Isso ocorre devido à possibilidade de reduzir a espessura da parede dos tubos, economizando material e aumentando a área livre na seção transversal do tubo, aumentando o fluxo de fluidos transportados [3].

No entanto, os aços de maior resistência mecânica apresentam menor tenacidade à fratura. A adição de um reforço de material compósito é uma boa alternativa a este problema, pois a camada envoltória aumenta a tenacidade à fratura do tubo [3].

Para aplicações em exploração off-shore de petróleo, assim como nas etapas intermediárias de refino, a utilização de estruturas tubulares para o escoamento de seus derivados é de fundamental importância. Suas características de forma dão a este tipo de estrutura características únicas, como a simetria ao longo do eixo longitudinal, o que confere aos tubos a distribuição uniforme de tensões quando submetido a pressões internas e externas.

Além de possuir as excelentes propriedades de escoamento de substâncias líquidas e gasosas, os tubos de seção circular também possuem propriedades estruturais extremamente notórias como a resistência à aplicação de torque ao longo do eixo longitudinal, sendo assim a melhor configuração para elementos de transmissão de momento. Eixos de manivela, eixos do tipo Cardin, são exemplos de elementos mecânicos que possuem um formato tubular. [4]

Sendo assim, o presente trabalho trata especificamente de tubos compósitos produzidos pela técnica de enrolamento filamentar. A aplicação desses tubos é de grande abrangência e contempla desde aplicações na indústria petrolífera, como risers, gasodutos e oleodutos, até aplicações puramente estruturais, como quadros de bicicletas, mastros de embarcações e postes de iluminação.

O objetivo deste trabalho é a produção e a análise do comportamento de tubos compósitos, quando submetidos a ensaios de flexão a quatro pontos. Os tubos são constituídos por uma matriz epoxídica e uma fase de reforço constituída por fibras de vidro tipo E.

Os tubos são constituídos por camadas circunferenciais e helicoidais alternadamente. É esperado que com o aumento da angulação da camada interna, o tubo apresente menor rigidez.

2- Revisão bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão sobre os materiais compósitos, o processo de enrolamento filamental e os ensaios de flexão.

2.1- Materiais Compósitos

Os compósitos são materiais que possuem, em sua composição, duas ou mais fases presentes em proporções significativas, de tal forma que as propriedades de cada uma das fases contribua para que as propriedades do compósito sejam estabelecidas.

Normalmente, a combinação de dois ou mais materiais é feita para que seja obtida uma melhor combinação de propriedades, o que seria impossível de se obter em materiais monofásicos. Ou seja, se queremos um material com elevada resistência e baixo peso específico, a razão entre esses dois valores (σ_{max}/ρ) deve ser a maior possível. A Figura 2 ilustra as classes de materiais no respectivo diagrama.

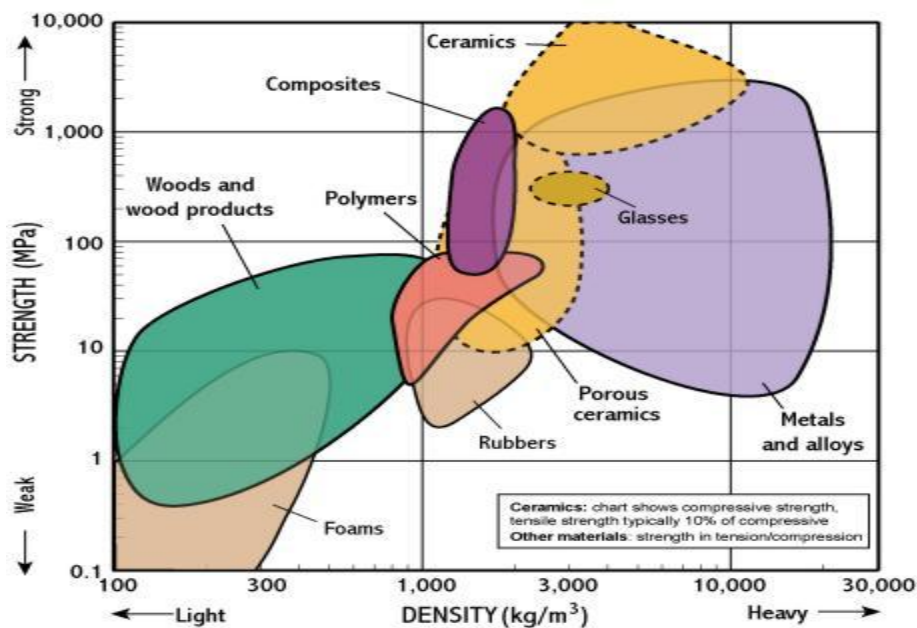


Figura 2 – Diagrama de resistência *versus* densidade [5]

Na maioria dos materiais compósitos, as fases presentes são a matriz, que é a fase contínua, e a fase de reforço, que é a fase dispersa na matriz [1]. A fase de reforço pode ser encontrada na forma de partículas, fibras, flocos e “fillers”[6]. No entanto, a utilização de um tipo de reforço não impede que o outro tipo possa também ser incorporado a matriz. Existem materiais compósitos que podem utilizar dois ou mais tipos de reforço.

Os compósitos particulados são geralmente utilizados para resistência à abrasão. Para esta aplicação, materiais como a alumina, quartzo e nanotubos de carbono são excelentes abrasivos, podendo ser aplicados em discos de corte. Além disso, estudos recentes comprovam que a adição de nanopartículas em compósitos de matriz epoxídica também aumentam a tenacidade à fratura. As nanopartículas funcionam como defletores de trincas e mitigam a propagação das mesmas, necessitando de mais energia para a fratura ocorrer [7].

Os compósitos reforçados com fibras são normalmente utilizados para solicitações mecânicas de elevada resistência à tração, flexão e baixo peso específico. As fibras podem ser conformadas no sentido unidirecional, onde as propriedades estarão direcionadas no sentido axial das fibras, bidirecional (na forma de tecidos de reforço), onde as fibras são entrelaçadas formando um ângulo específico entre as mesmas, ou aleatórias (na forma de manta ou picadas), onde as fibras não possuem um sentido definido.

Além disso, as fibras podem ser curtas quando possuem o comprimento inferior ao tamanho crítico, ou longas quando possuem o tamanho superior ao tamanho crítico [1]. A figura 3 mostra a distribuição de tensões ao longo da fibra em função de seus comprimentos.

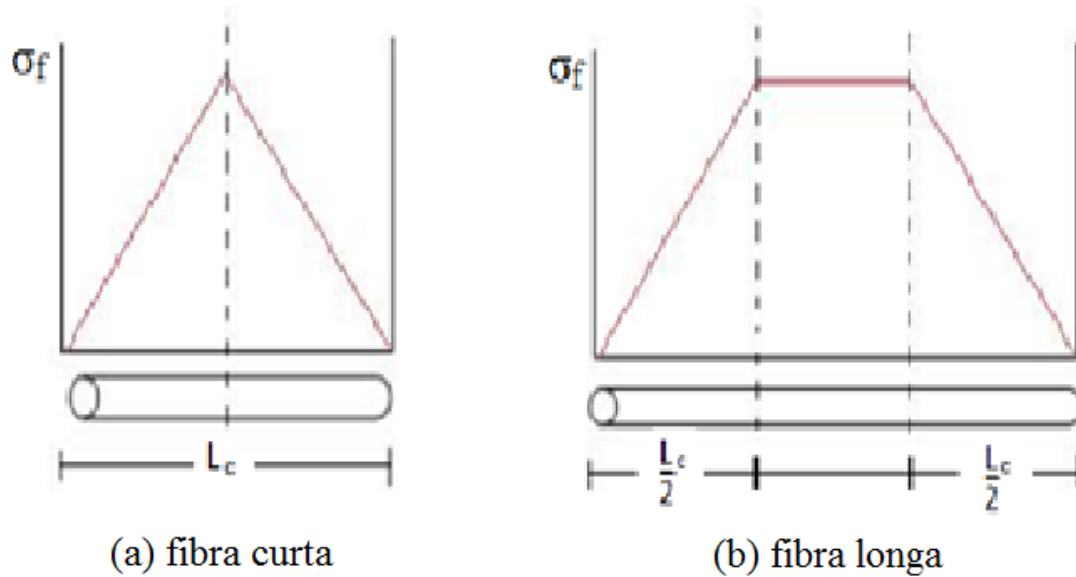


Figura 3 – Distribuição de tensões ao longo das fibras [1]

Para que o reforço seja realmente efetivo, as fibras devem possuir a razão de aspecto $\frac{L}{D} \approx 100$ ou maior. Quando esta condição é respeitada, as fibras e a matriz possuem maior superfície de contato entre elas, facilitando a adesão e aumentando a transferência de carga. A Figura 4 ilustra a influência do tamanho de fibra no módulo de elasticidade.

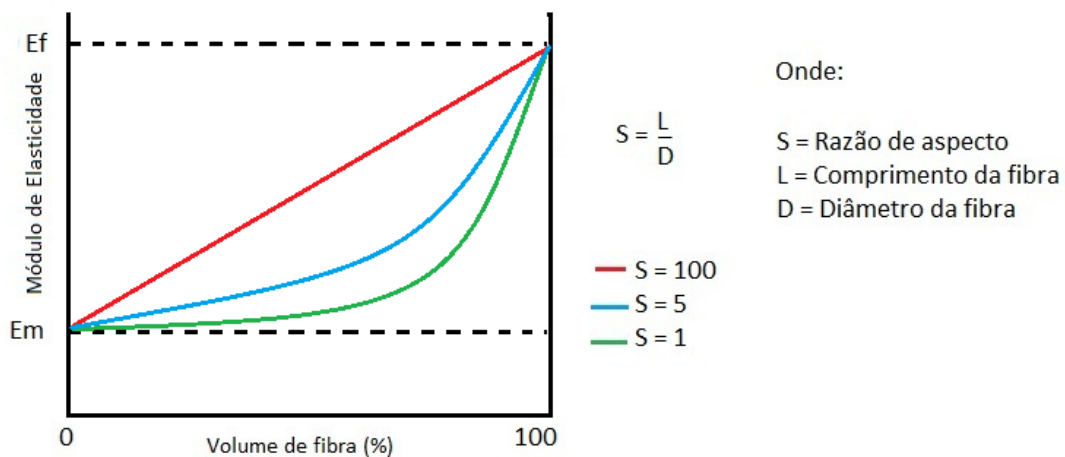


Figura 4 – Ilustração representando a influência do tamanho de fibra no gráfico Módulo de elasticidade *versus* volume de fibra.

É muito importante que a adesão entre as fibras e a matriz seja adequada, pois caso isso não ocorra, a resistência mecânica pode ser inferior a do material monofásico, pois as fibras atuarão como concentradores de tensão [9]. Para que a adesão entre as fases seja melhorada, é adicionada uma fina camada de silano na superfície das fibras. O silano é um material que se liga com os radicais do polímero em uma das extremidades, e se liga as fibras, garantindo boa adesão entre as fases presentes.

2.1.1 – Matriz

A matriz é a fase contínua que preenche os espaços e envolve os elementos de reforço. Além de acomodar as fibras, a matriz possui a função de distribuir o carregamento entre as fibras e proteger o compósito de processos degradativos, como a delaminação, a oxidação e a absorção de água [2].

Materiais cerâmicos, metálicos e poliméricos podem ser utilizados como matriz. No entanto, os polímeros são atualmente os materiais mais utilizados. Isso se deve ao fato de que o fácil processamento quando líquidos confere aos polímeros a alternativa econômica mais viável para a produção de materiais compósitos.

Uma das características mais importantes das matrizes poliméricas é a capacidade de absorver energia e reduzir a concentração de tensão, devido sua ótima tenacidade à fratura e ductilidade, reduzindo os danos causados pelo impacto e, conseqüentemente, a durabilidade do compósito [10].

Os polímeros são cadeias longas de unidades repetitivas, ligadas covalentemente, chamadas de meros. Eles podem ser classificados em termofixos e termoplásticos de acordo com a influência da temperatura nas suas características [11].

Os termofixos (ou termorrígidos) são polímeros que possuem ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas. A formação de ligações cruzadas é chamada de reticulação, que é uma reação química não reversível para formar um produto rígido e infusível [12].

Já os termoplásticos são polímeros que não possuem reticulação entre as cadeias, sendo a interação entre elas somente através de ligações secundárias do tipo Van der

Waals e pontes de hidrogênio. Além das ligações secundárias, as moléculas são unidas fisicamente através do enovelamento das cadeias poliméricas.

Ambos os tipos de polímeros citados acima podem ser utilizados como matriz em sistemas compósitos. Porém, a utilização de resinas termofixas é mais comum, devido à sua baixa viscosidade, o que facilita o processamento.

A principal aplicação de matrizes termoplásticas é em peças para a indústria automotiva, como por exemplo hélices de radiador, parte superior do radiador, grades e turbo-compressores[13].

No entanto, a utilização de termoplásticos como matriz requer sistemas de aquecimento incorporados ao processamento, pois estes são necessários para que as ligações secundárias sejam temporariamente quebradas, dando ao polímero fluidez e capacidade de conformação. A incorporação deste tipo de sistema aumenta os custos do processo, tornando economicamente viável apenas para algumas aplicações específicas.

2.1.1.1 – Resina Epóxi

As resinas epoxi são resinas termofixas que possuem excelentes propriedades como a alta resistência à tração, baixa contração no processo de cura (aproximadamente 2%), excelente adesão, boa estabilidade térmica e dimensional e alta molhabilidade, o que torna este polímero adequado para muitas aplicações em materiais compósitos [14].

É considerada uma resina epoxídica um composto que contém dois ou mais grupos epóxis, capaz de formar estruturas tridimensionais, através do processo de reticulação [15].

No presente trabalho, a matriz utilizada é a resina epoxídica do tipo DGEBA. Ela é obtida a partir da reação da epicloriglicidrina com o bisfenol-A, formando o diglicidil éter de bisfenol A. A Figura 5 mostra a estrutura química do epoxi do tipo DGEBA.

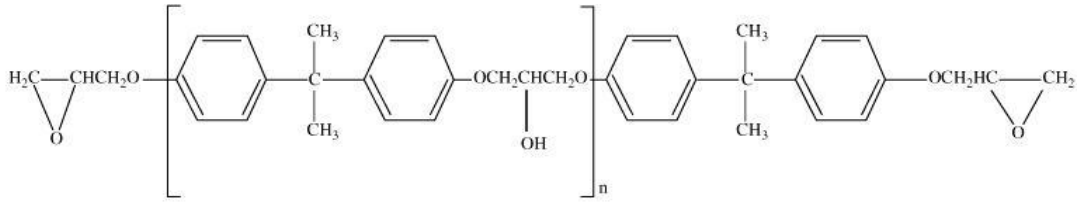


Figura 5 – Estrutura química da resina epoxi tipo DGEBA

2.1.2 – Reforço

As fibras são o principal tipo de reforço para materiais compósitos estruturais. Elas podem se classificadas de acordo com a composição química, estrutura morfológica e função comercial. Os principais tipos de fibras são: fibras naturais, fibras de vidro, fibras de aramida e fibras de carbono.

Em compósitos de matriz polimérica, a principal função das fibras é elevar a rigidez e a resistência da matriz, modo que as propriedades resultantes podem satisfazer os requisitos de projeto ou substituir uma parte existente em igual resistência, rigidez e maior peso específico [11]. A Tabela 1 mostra os tipos mais comuns de fibras e sua propriedades.

Trade name	Generic name	Manufacturer	Composition	Ref	Density		Elastic modulus		Tensile strength		Specific modulus ^(a)		Break elongation	Coefficient of thermal expansion		Fiber diameter		
					g/cm ³	lb/in. ³	GPa	10 ⁶ psi	MPa	ksi	Mm	Mm		%	10 ⁻⁶ /K	10 ⁻⁶ /°F	µm	10 ⁻⁵ in.
Natural fibers																		
...	Kenaf	Kafus	63% cellulose	6	1.52	0.0549	90	13.0	1000	145	6.0	0.067	2
Oxide glass fibers																		
...	E-glass	Owens-Corning, PPG, Vetrotex	Borosilicate	1, 2	2.54	0.0918	76–79	11.0–11.5	3100–3800	450–550	3.1–3.2	0.124–0.153	4.8	5	2.78	5–20	200–800	
...	S-glass	Owens-Corning, Vetrotex, Nittobo	Mg/Al silicate	1, 3	2.48	0.0896	88–91	12.7–13.2	4400	638	3.6–3.7	0.181	5.7	2.9	1.61	5–10	200–900	
Astro-quartz	Quartz	Vetrotex	Silica 90.999%	1, 3	2.15	0.0777	69	10.0	3400	493	3.3	0.161	5	0.5	0.28	9	350	
Aramid fibers																		
Technora T-200	LM	Teijin	Poly p-phenylene-terephthalamide	1, 3	1.39	0.0502	70	10.2	3000	435	5.1	0.220	4.4	...	...	12	472
Twaron	IM	Akzo	Poly p-phenylene-terephthalamide	1, 3	1.45	0.0524	121	17.6	3100	450	8.5	0.218	2	–3.5	–1.94	12	472	
Kevlar 149	HM	DuPont	Poly p-phenylene-terephthalamide	1, 3	1.47	0.0531	179	26.0	3500	508	12.4	0.243	2	–2	–1.11	12	472	

Tabela 1 – Tabela comparativa de fibras para reforço de compósitos de matriz polimérica [11].

2.1.2.1 – Fibras de vidro

A fibra de vidro é o tipo de reforço mais utilizado em compósitos de matriz polimérica por várias razões: é facilmente produzida, possui alta resistência específica, pode ser utilizada em vários processos de fabricação, possui baixo custo de fabricação e alta inércia química, o que torna útil a sua aplicação em diversos tipos de meios corrosivos [1]. A Tabela 2 apresenta a composição química dos principais tipos de fibras de vidro.

Fiber	Ref	Composition, wt%												
		SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	ZnO	TiO ₂	Zr ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Li ₂ O	Fe ₂ O ₃	F ₂
General-purpose fibers														
Boron-containing E-glass	1, 2	52–56	4–6	12–15	21–23	0.4–4	...	0.2–0.5	...	0–1	Trace	...	0.2–0.4	0.2–0.7
Boron-free E-glass	7	59.0	...	12.1	22.6	3.4	...	1.5	...	0.9	...	...	0.2	...
	8	60.1	...	13.2	22.1	3.1	...	0.5	...	0.6	0.2	...	0.2	0.1
Special-purpose fibers														
ECR-glass	1, 2	58.2	...	11.6	21.7	2.0	2.9	2.5	...	1.0	0.2	...	0.1	Trace
D-glass	1, 2	74.5	22.0	0.3	0.5	...	...	...	...	1.0	<1.3	...	...	...
	2	55.7	26.5	13.7	2.8	1.0	...	...	...	0.1	0.1	0.1	...	...
S-, R-, and Te-glass	1, 2	60–65.5	...	23–25	0–9	6–11	...	...	0–1	0–0.1	...	...	0–0.1	...
Silica/quartz	1, 2	99.9999	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Tabela 2 – Composição química dos principais tipos de fibras de vidro [11].

2.1.3 - Propriedades mecânicas dos materiais compósitos

As propriedades como a alta rigidez e alta resistência a tração, confere aos compósitos reforçados com fibras propriedades únicas, muito requisitadas em aplicações estruturais. Os modelos teóricos de previsão das propriedades dos compósitos serão apresentados a seguir.

2.1.3.1 – Regra das misturas

Uma das características mais relevantes dos materiais compósitos é a liberdade de ajuste do módulo de elasticidade do material. O volume de fibras é um parâmetro fundamental para que esta propriedade seja estabelecida. Em materiais fibrosos, o módulo de elasticidade varia entre os valores do módulo de elasticidade da matriz (E_m) o módulo de elasticidade da fibra (E_f). A Figura 6 o representa a variação do módulo de elasticidade em função da fração volumétrica de fibras.

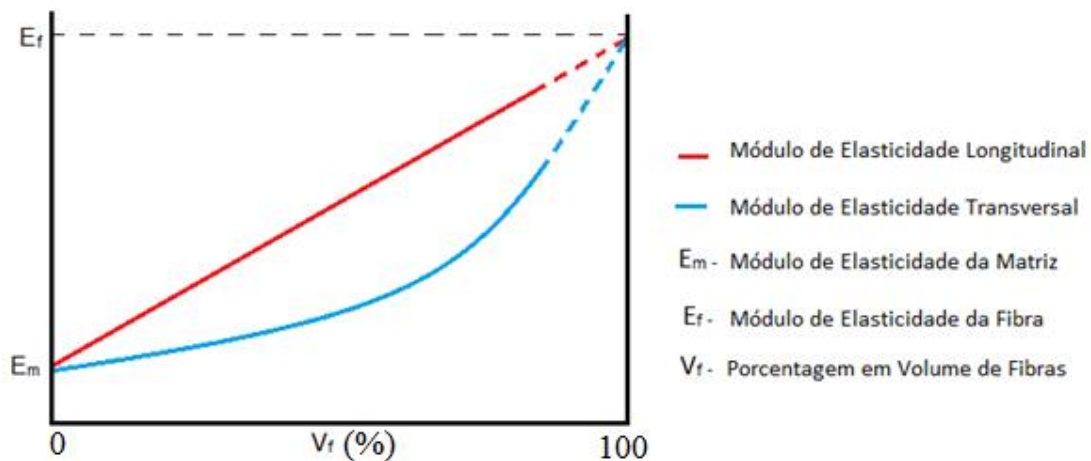


Figura 6 – Regra das misturas direta e inversa.

Geralmente as fibras possuem a seção transversal circular. Neste caso, o limite máximo para a o volume de fibras é de aproximadamente 90% considerando o arranjo hexagonal, e 78,53% considerando o arranjo cúbico. É claro que esses elevados valores

são quase impossíveis de se obter na prática, já que o compósito possui uma distribuição heterogênea das fibras, além de apresentar poros áreas que apresentam ausência de fibras. A Figura 7 representa o modelo hexagonal.

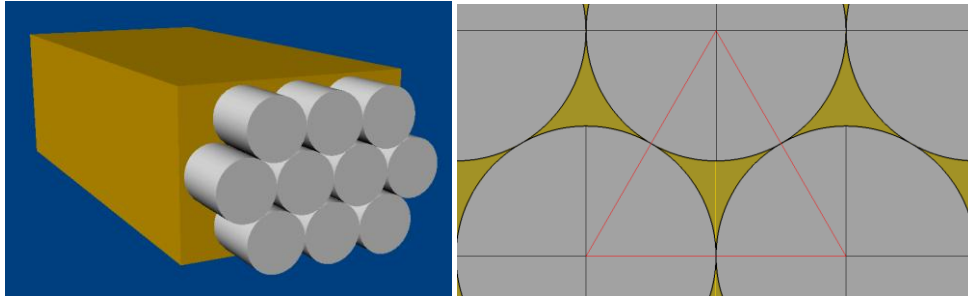


Figura 7 – Arranjo hexagonal das fibras

O cálculo da fração volumétrica máxima de fibras é dado por:

$$\frac{A_f}{A_t} = \frac{\frac{D^2\pi}{8}}{\frac{D^2\sqrt{3}}{4}} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cong 0,907$$

Onde:

A_f = área ocupada pela fibra na seção transversal

A_t = área total da seção transversal

Para que a resistência mecânica e o módulo de elasticidade sejam aumentados, utiliza-se maior volume de fibras. No entanto, quanto maior o volume de fibras, menor é a distância entre elas, dificultando a incorporação da resina entre as fibras, ocasionando defeitos (poros) e, conseqüentemente, possíveis problemas de delaminação.

A seguir, veremos como obter os módulos de elasticidade longitudinal e transversal teóricos utilizando a regra das misturas direta e inversa, respectivamente. Apesar de ser um modelo teórico idealizado, os valores obtidos são uma boa aproximação dos valores obtidos na prática.

2.1.3.2 - Módulo de elasticidade longitudinal

A Figura 8 ilustra um elemento de material compósito de fibras contínuas unidirecionais, tracionado paralelamente ao sentido das fibras.

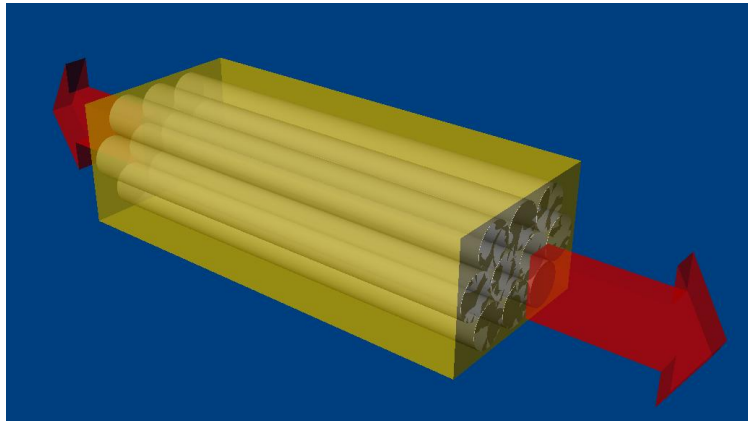


Figura 8 – Elemento tracionado na direção axial das fibras

Levando em consideração a igualdade das deformações entre a matriz e as fibras, temos que:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Além disso, força que traciona o conjunto é o somatório das tensões que atuam na seção, multiplicadas pelas suas respectivas áreas. Neste caso, a área relativa de cada componente é idêntica ao seu volume relativo, pois estes possuem o mesmo comprimento na direção longitudinal. Portanto:

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot \frac{A_f}{A_t} + \sigma_m \cdot \frac{A_m}{A_t} = \sigma_f \cdot v_f + \sigma_m \cdot v_m$$

Como:

$$\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c \text{ e } v_f + v_m = 1$$

Então:

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

Com este modelo é possível prever algumas outras propriedades de extrema importância, como a densidade e a razão de poisson.

$$\rho_c = \rho_f \cdot v_f + \rho_m \cdot (1 - v_f)$$

$$\vartheta_c = \vartheta_f \cdot v_f + \vartheta_m \cdot (1 - v_f)$$

2.1.3.3 - Módulo de elasticidade transversal

A Figura 9 ilustra um elemento de material compósito, tracionado perpendicularmente ao sentido das fibras.

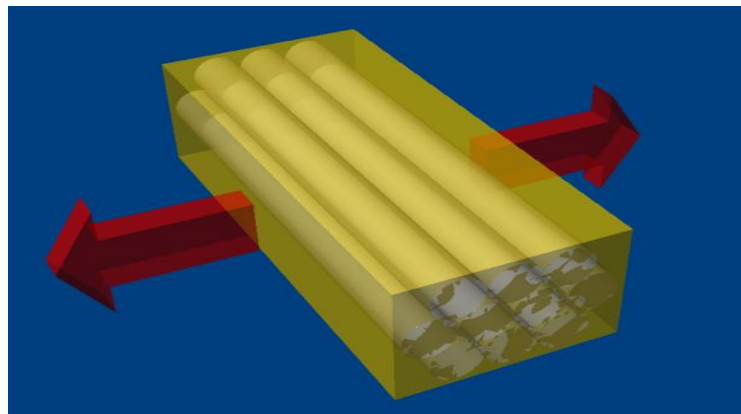


Figura 9 - Elemento tracionado na direção transversal as fibras

Para a obtenção do módulo de elasticidade transversal, a regra das misturas inversa é utilizada, pois leva-se em consideração a igualdade das tensões entre a matriz e as fibras. Supondo a igualdade das tensões, temos:

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f v_f + \varepsilon_m v_m$$

Como:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \text{e} \quad v_f + v_m = 1$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{v_f}{E_f} + \frac{v_m}{E_m}$$

Portanto:

$$E_c = \frac{E_f \cdot E_m}{E_m \cdot v_f + E_f \cdot (1 - v_f)}$$

Com a regra das misturas inversa também é possível determinar o módulo de cisalhamento do compósito.

$$G_c = \frac{G_f \cdot G_m}{G_m \cdot v_f + G_f \cdot (1 - v_f)}$$

2.1.4 - Processamento e métodos de fabricação

Os materiais compósitos são fabricados por diversos processos. Entre eles estão: laminação, pultrusão e enrolamento filamental.

2.1.4.1 – Enrolamento Filamental

A técnica de enrolamento filamental consiste em envolver um molde (mandril) com um reforço contínuo na forma de fibras, impregnados com um sistema polimérico de cura à quente ou à frio. De acordo com a solicitação mecânica requerida no produto final, a quantidade de camadas compósitas, a angulação das fibras em relação ao eixo longitudinal e a largura de faixa podem ser alterados para obter um produto de melhor desempenho.

Após o processo de enrolamento, o mandril envolvido pelo compósito é levado a uma estufa rotativa, cujo objetivo é a cura da resina, tornando o compósito uma estrutura rígida. Após o processo de cura, o mandril pode ser retirado, restando apenas o compósito de fibra e resina externo. Para algumas aplicações, o mandril pode ser incorporado ao produto final. Neste caso, o mandril é chamado de *liner* e sua função é proteger o sistema polimérico de agentes agressivos em tubos de escoamento (corrosão e erosão). Além disso, o liner atua também como distribuidor de tensões em estruturas que solicitem pressões interna, como tubulações e vasos de pressão.

Durante a operação de enrolamento, os filamentos (rovings) são impregnados pela resina contida no cabeçote alimentador e enroladas sobre o mandril, descrevendo uma faixa helicoidal sobre o molde. O cabeçote alimentador se movimenta paralelamente ao eixo do mandril e, de acordo com os parâmetros adequados, é possível descrever configurações desejadas no tubo. A Figura 10 ilustra esta etapa do processo.

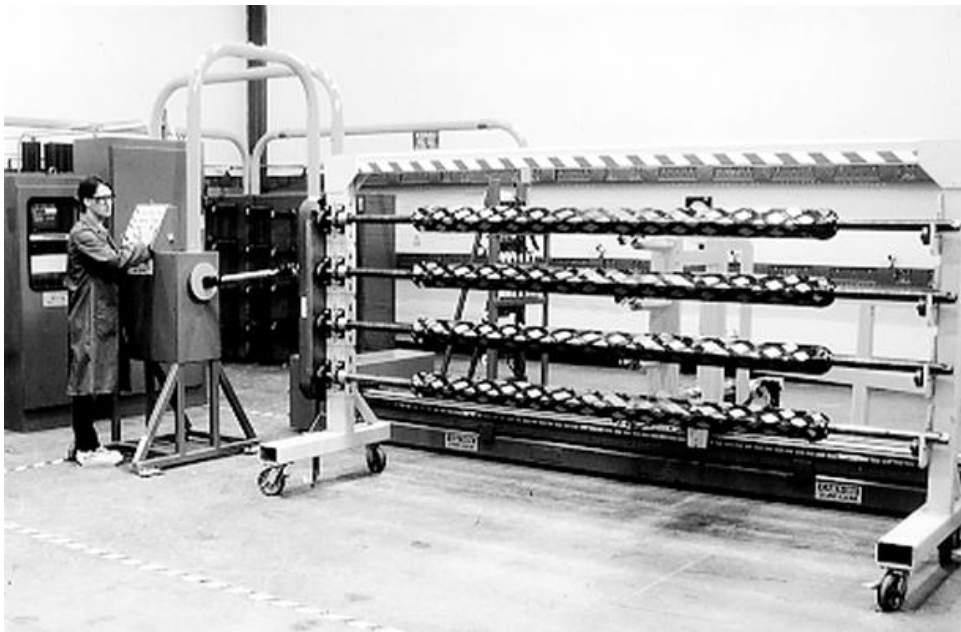


Figura 10 – Enrolamento filamental [11]

Os principais parâmetros de enrolamento são:

- D - diâmetro do mandril
- θ - ângulo de enrolamento
- P - passo do hélice

n - número de passes para preencher o mandril

w - largura de faixa

O cabeçote alimentador (mais comumente chamado de carrinho) percorre a distância necessária para aplicar uma faixa de material compósito sobre o mandril, formando um ângulo (θ). O mesmo acontece na volta do carrinho, porém formando um ângulo($-\theta$) sendo necessárias n vezes para formar a primeira camada intertravada de material compósito. A figura 11 ilustra um laminado cilíndrico cortado ao longo da geratriz e planificado.

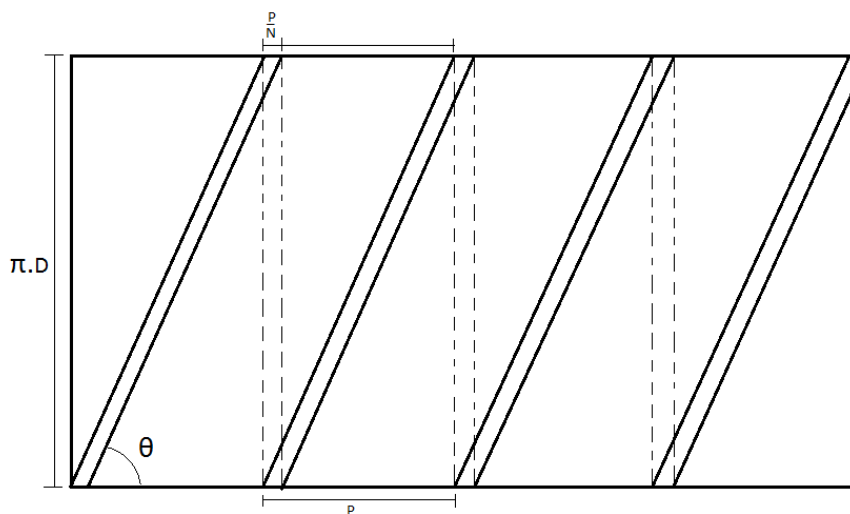


Figura 11 - Laminado cortado ao longo da geratriz

A largura de faixa é dada por:

$$w = \frac{P}{n} \cdot \sin \theta$$

$$\tan \theta = \frac{P}{\pi \cdot D} = \frac{\frac{w \cdot n}{\sin \theta}}{\pi \cdot D}$$

O número de passos é dado por:

$$n = \frac{\pi \cdot D \cdot \sin \theta \cdot \tan \theta}{w} = \frac{\pi \cdot D \cdot (\sin \theta)^2}{w \cdot \cos \theta}$$

Como n deve ser um número inteiro, os valores dos demais parâmetros devem ser devidamente ajustados para que as faixas não se superponham. Se os parâmetros D , w ou θ não puderem sofrer alterações, o número de passos deve assumir o próximo maior valor inteiro.

2.2- Ensaio de Flexão

2.2.1 – Flexão a quatro pontos

No ensaio de flexão a quatro pontos, o momento entre os apoios internos permanece constante. Com isso, no espaço entre os apoios internos, apenas tensões trativas e compressivas atuam ao longo da seção transversal. A Figura 12 mostra as forças que atuam no ensaio de flexão a quatro pontos.

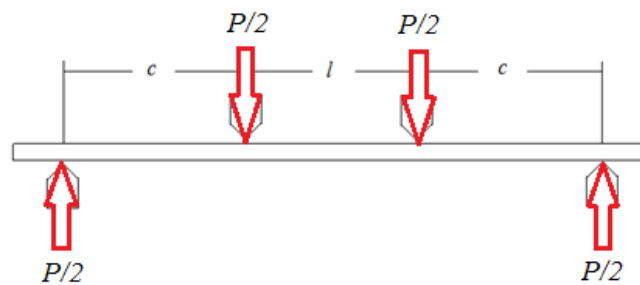


Figura 12 – Flexão a quatro pontos

As Figuras 13 a e b ilustram os gráficos de esforços cortantes e momento fletor, respectivamente, ao longo do corpo de prova.

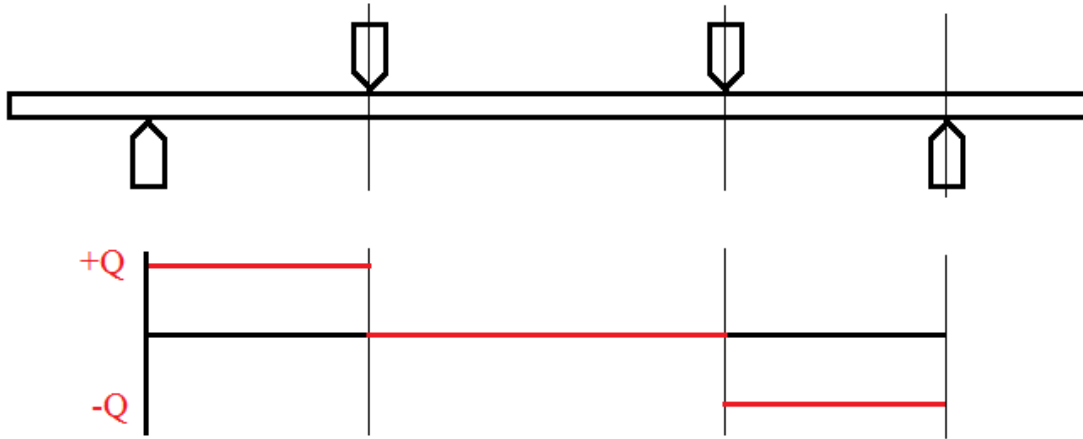


Figura 13(a): Diagrama de Esforços Cortantes



Figura 13(b): Diagrama de Momento Fletor

O momento máximo é dado por:

$$M = \frac{P}{2} \cdot c$$

Onde:

P = Carga aplicada pela máquina

c = Distância entre o apoio externo e o apoio interno

3 – Materiais e métodos

A seguir será feita a descrição de todos os materiais utilizados no processo de fabricação dos tubos, assim como a metodologia adotada nos testes realizados.

3.1 – *Materiais*

A seguir serão apresentados os materiais utilizados nos processos de fabricação e análise.

3.1.1 – Resina Polimérica

Na preparação da matriz polimérica, foi utilizada uma epóxi DGEBA, de cura à quente, denominada LY 1556, de nome comercial Araldite[®], o acelerador DY 070 e o endurecedor Aradur 917, todos da marca Huntsman.

Este sistema polimérico é muito utilizado em processos como enrolamento filamentar, pultrusão e moldagem por pressão, pois essa composição confere à matriz boas propriedades de impregnação da fibra, baixa viscosidade, longo tempo de armazenamento e grande inércia química. A Tabela 3 apresenta as propriedades da resina Huntsman.

Módulo de elasticidade “E” (GPa)	Resistência à tração (MPa)
3,1 a 3,3	83 a 93

Tabela 3 - Propriedades da resina Huntsman[®]

Fonte: site da Huntsman

3.1.2 – Fibras

As fibras utilizadas na fabricação dos tubos foram as fibras de vidro tipo E da marca Owens Corning, comercialmente vendidas na forma de rovings. As propriedades das fibras utilizadas estão apresentadas na Tabela 4:

E_{vidro} (GPa)	$\sigma_{\text{resis.}}$ (MPa)	τ_{12} (MPa)	ρ (g/cm ³)	G_{12} (GPa)
80	2560	69,80	2,58	30

Tabela 4 - Propriedades da fibra de vidro do tipo E

Fonte: Site Owens Corning®

A Figura 14 mostra o tipo de roving utilizado no processo de enrolamento filamentar.



Figura 14 – Rovings de fibra de vidro

Fonte: Site Owens Corning®

3.2 Métodos

Neste tópico, serão apresentadas as técnicas adotadas em cada etapa do processo de fabricação e análise.

3.2.1 - Preparação da resina

Para a preparação da mistura epóxi foi utilizada uma proporção de 90% em massa de endurecedor em relação à quantidade de resina e de 2% de acelerador em massa para cada porção de resina. A Tabela 5 mostra a quantidade dos constituintes utilizados na produção de cada tubo.

Amostra	Massa de resina (g)	Massa de endurecedor (g)	Massa de Catalisador (g)
Tubo 1	2000	1800	40
Tubo 2	1900	1710	38
Tubo 3	1900	1710	38

Tabela 5 – Preparação da resina

3.2.2 - Fabricação do tubo compósito

Para a fabricação do tubo compósito utilizou-se a máquina de enrolamento filamental da Tecservice que comporta mandris de 30 a 500 mm de diâmetro e até 3 metros de comprimento.

Como mandril utilizou-se um tubo de aço de duas polegadas de diâmetro, dividido em duas metades ao longo do eixo longitudinal.

Inicialmente foi produzido um tubo em um mandril colapsável sem o reforço interno. Porém, durante o enrolamento, o tubo colapsou na parte central, transformando a seção transversal em um formato elíptico, inutilizando este tubo para a aquisição de resultados. No entanto, este tubo foi utilizado para testar o dispositivo de flexão posteriormente.

Foi desenvolvido pelo Laboratório de Compósitos um mandril colapsável com dois pontos de reforço interno. Os tubos produzidos por este mandril não apresentaram ovalização na parte central. A Figura 15 mostra o sistema de reforço.



Figura 15 – Mandril colapsável com reforço interno

O mandril foi acoplado à máquina de enrolamento filamentar, e em seguida aplicou-se uma camada de agente desmoldante (produto separador QZ 13BR, Huntsman) sobre toda a superfície.

Logo após, enrolou-se uma camada de teflon com o intuito de facilitar o escorregamento do tubo compósito sobre o mandril na hora da extração.

Em seguida, foi colocado um véu de poliéster sobre o teflon e aplicou-se manualmente com o auxílio de uma espátula o sistema polimérico, com o intuito de molhar completamente o véu. Este procedimento é feito para melhorar o acabamento interno do tubo, facilitando a extração do mandril e o escoamento de substâncias líquidas.

Finalmente, foi despejado o sistema polimérico no reservatório do carrinho e prenderam-se as fibras já impregnadas de resina que saem do carrinho na extremidade do mandril, iniciando o processo de enrolamento filamentar.

No total foram produzidos três tubos compósitos com diâmetro interno de duas polegadas (50,8 mm) possuindo cada um deles quatro camadas (ABBA). A Figura 16 mostra o esquema de empilhamento das camadas.

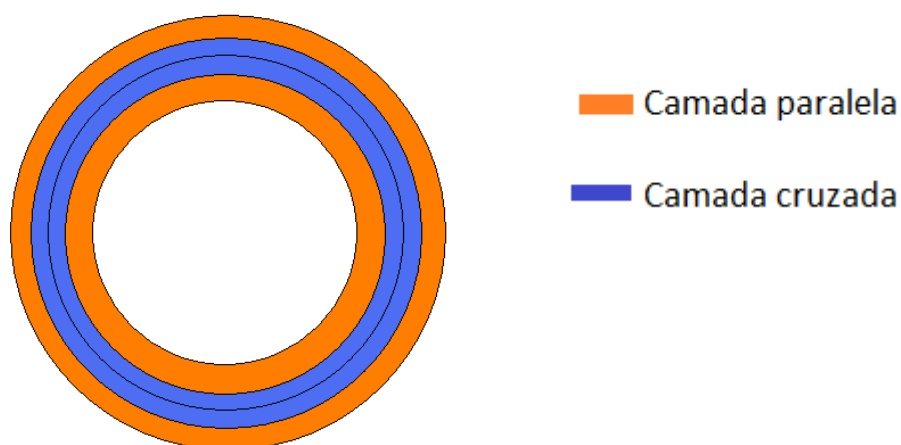


Figura 16 – Desenho esquemático do empilhamento das camadas.

Todos os tubos possuem as camadas interna e externa paralelas (tipo A, com angulação de 88°). O Tubo 1 possui duas camadas cruzadas intermediárias (tipo B) a 30° . O Tubo 2 possui duas camadas tipo B a 45° . O tubo 3 possui as camadas tipo B a 60° .

Durante a produção dos tubos, a resina em excesso que estava impregnada nos filamentos foi retirada com o auxílio de uma espátula e reutilizado no banho de resina. Esse processo deve ser feito constantemente. A figura 17 ilustra este procedimento.



Figura 17 – Remoção do excesso de resina.

Após a máquina concluir a programação desejada, o mandril foi retirado da máquina de enrolamento e levado à estufa Tecservice para um ciclo térmico de cura de 4 horas a 80°C e 4 horas a 120 °C. Após a cura da resina, o mandril fica envolvido pelo tubo composto rígido.

Após o resfriamento lento dentro da estufa, foi feita a extração do tubo do mandril. Para a retirada do mandril foi necessário apenas retirar as extremidades e puxar manualmente a vara metálica que segura o reforço interno desmontando-o, tornando assim, possível a extração manual do tubo composto do conjunto.

Os tubos foram cortados nas extremidades para a obtenção das amostras para a caracterização do material.

3.2.3 - Massa específica e fração volumétrica de fibras dos tubos

Foram retiradas dos tubos pequenas amostras para a realização de ensaios de queima da matriz e picnometria.

3.2.3.1 – Picnometria

A picnometria foi utilizada para determinar a densidade do compósito. O picnômetro foi pesado com água destilada. Depois as amostras foram pesadas separadamente do picnômetro que em seguida foi novamente pesado com as amostras dentro do mesmo. A determinação da densidade do compósito foi feita dividindo a massa do compósito pelo volume de água deslocado, que é também o volume da amostra. Foram utilizadas cinco amostras e a densidade foi determinada pelo cálculo da média aritmética dos valores de massa específica de todas as amostras.

3.2.3.2 – Queima da matriz polimérica

A fração volumétrica de fibras foi obtida através da queima de 3 amostras de cada tubo. As amostras possuem formato retangular de 1,0 cm de largura e 1,5 cm de comprimento.

Depois de pesadas, as amostras são levadas a um forno a temperatura de 500°C durante 2 horas. Em elevadas temperaturas, a matriz polimérica queima, restando apenas os resíduos de fibras, que após a queima são pesados..

Então, conhecendo-se a massa específica das fibras e do compósito e as massas das amostras compósitas e de fibras calculou-se a fração volumétrica de fibras, por meio da equação abaixo:

$$v_f = \frac{m_f \cdot \rho_c}{m_c \cdot \rho_f}$$

3.2.4 - Construção do dispositivo de flexão

O dispositivo de flexão a quatro pontos utilizado para a realização dos testes foi desenvolvido no Laboratório de Compósitos. A Figura 18 ilustra a representação do dispositivo.

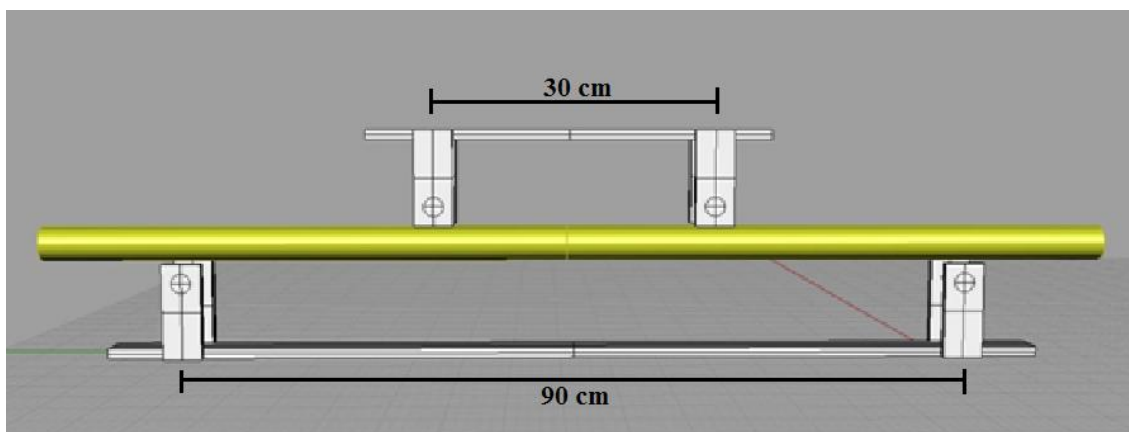


Figura 18 – Representação do dispositivo de flexão

Para a construção do dispositivo foi utilizada uma chapa grossa de 2,5'x3/4' polegadas de aço 1020 de 6 metros de comprimento, 4 roletes de Nylon 6,6, e quatro eixos de parafuso.

Nos pontos onde o dispositivo atua no corpo de prova, foram utilizados roletes de Nylon 6,6. Os roletes atuam como dissipadores de tensão, evitando que a falha se inicie nos pontos de apoio.

O dispositivo de flexão foi desenvolvido e construído com o apoio da oficina do Instituto de Física da UFRJ.

3.2.5 – Ensaio de flexão a quatro pontos

Foram ensaiados três tubos, de acordo com a norma ASTM D-6272. As medidas dos corpos de prova e do dispositivo são apresentadas na Figura 19.

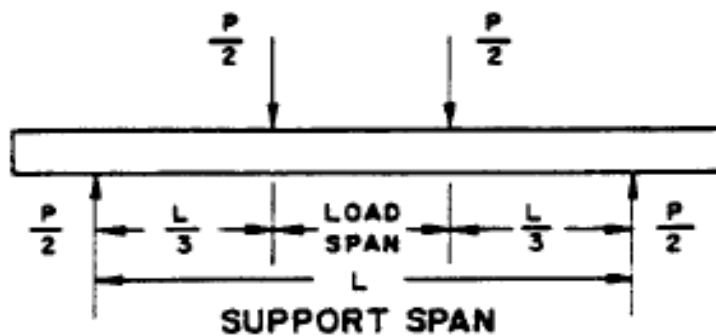


Figura 19 – Norma ASTM D-6272

No presente trabalho, foi utilizado o tamanho $L = 90$ cm.

O ensaio de flexão dos tubos foi realizado na prensa Shimadzu 10000 kN, no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. A Figura 20 mostra o equipamento utilizado no ensaio de flexão.



Figura 20 – Prensa Shimadzu 10000 kN

Para a aquisição de dados, foi utilizado um LVDT com curso de leitura de +/- 50 mm. Para que os erros de leitura fossem minimizados, o sistema de acoplamento do LVDT se apóia apenas nos pontos onde pontos de carga são aplicados. Com isso evita-se que a deformação das polias internas interfira na leitura da deflexão. O sistema de acoplamento do LVDT foi desenvolvido pelo Laboratório de Compósitos da UFRJ. A Figura 21 ilustra o LVDT e o sistema de acoplamento.

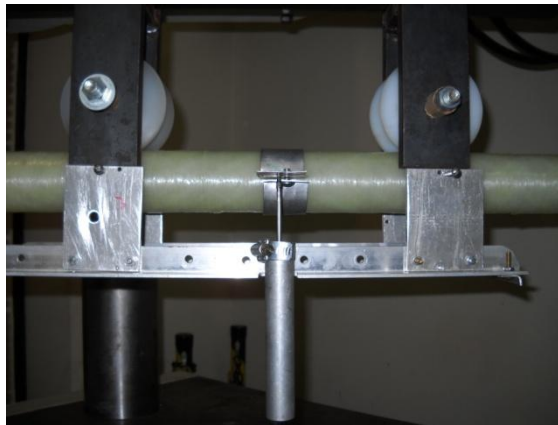


Figura 21 – Sistema de acoplamento do LVDT

A taxa de velocidade do travessão da máquina foi de 5 mm/min.

4 – Resultados e discussão

4.1 – Picnometria

4.1.1 - Tubo 1

Os dados do ensaio de picnometria do tubo 1 são apresentados na Tabela 6.

Amostra	Massa do compósito (g)	Picnômetro + amostra (g)	Massa de água deslocada (g)	Volume de água deslocado (mL)	Densidade compósito (g/mL)
1	0,5602	82,2155	0,3080	0,3088	1,8143
2	0,6185	82,2270	0,3548	0,3557	1,7389
3	0,5429	82,1920	0,3142	0,3150	1,7236
4	0,5243	82,2119	0,2757	0,2764	1,8970
5	0,6014	82,2262	0,3385	0,3393	1,7723

Tabela 6 – Picnometria do tubo 1

$$\rho_{\text{médio}} = 1,7892 \text{ g/cm}^3$$

4.1.2 - Tubo 2

Os dados do ensaio de picnometria do tubo 2 são apresentados na Tabela 7.

Amostra	Massa do compósito (g)	Picnômetro + amostra + água	Massa de água deslocada (g)	Volume de água deslocado (mL)	Densidade compósito (g/mL)
1	0,6452	82,1274	0,4927	0,4939	1,3063
2	0,6831	82,2501	0,4079	0,4089	1,6705
3	0,73924	82,2768	0,43734	0,4384	1,6861
4	0,7581	82,2596	0,4734	0,4746	1,5974
5	0,8256	82,2834	0,51710	0,5184	1,5927

Tabela 7 - Picnometria do tubo 2

$$\rho_{\text{médio}} = 1,6113 \text{ g/cm}^3$$

4.1.3 – Tubo 3

Os dados do ensaio de picnometria do tubo 3 são apresentados na Tabela 8.

Amostra	Massa do compósito (g)	Picnômetro + amostra (g)	Massa de água deslocada (g)	Volume de água deslocado (mL)	Densidade compósito (g/mL)
1	0,5602	82,2155	0,3080	0,3088	1,8143
2	0,6185	82,2270	0,3548	0,3557	1,7389
3	0,5429	82,1920	0,3142	0,3150	1,7236
4	0,5243	82,2119	0,2757	0,2764	1,8970
5	0,6014	82,2262	0,3385	0,3393	1,7723

Tabela 8 – Picnometria do tubo 3

$$\rho_{\text{médio}} = 1,6865 \text{ g/cm}^3$$

4.2 – Ensaio de queima da matriz polimérica.

4.2.1 – Tubo 1

Os dados do ensaio de queima da matriz polimérica do tubo 1 são apresentados na Tabela 9.

Cadinho	Peso do cadinho (g)	Amostra (g)	Cadinho + amostra (g)	Cadinho + cinzas (g)	Massa de fibras (g)	Massa de resina (g)	Fração volumétrica de fibras
1	33,2201	1,2686	34,4887	34,3559	1,1358	0,1328	0,5592
2	31,4735	1,2729	32,7464	32,4544	0,9809	0,292	0,4813
3	35,0976	1,0135	36,1111	36,1312	1,0336	0,1201	0,6369

Tabela 9 – Ensaio de queima do tubo 1

$$v_f = 0,5591$$

4.2.2 - Tubo 2

Os dados do ensaio de queima da matriz polimérica do tubo 2 são apresentados na Tabela 10.

Cadinho	Peso do cadinho (g)	Amostra (g)	Cadinho + amostra (g)	Cadinho + cinzas (g)	Massa de fibras (g)	Massa de resina (g)	Fração volumétrica de fibras
1	35,1577	0,9564	36,1141	35,8665	0,7088	0,2476	0,5140
2	33,5478	1,1117	34,6595	34,3855	0,8377	0,274	0,5226
3	35,1388	1,2135	36,3523	36,0062	0,8674	0,3461	0,4957

Tabela 10 – Ensaio de queima do tubo 2

$$v_f = 0,5107$$

4.2.3 – Tubo 3

Os dados do ensaio de queima da matriz polimérica do tubo 3 são apresentados na Tabela 11.

Cadinho	Peso do cadinho (g)	Amostra (g)	Cadinho + amostra (g)	Cadinho + cinzas (g)	Massa de fibras (g)	Massa de resina (g)	Fração volumétrica de fibras
1	33,0184	1,2376	34,2560	33,9986	0,9802	0,2574	0,5177
2	31,3738	0,8562	32,2300	32,1279	0,7541	0,1021	0,5757
3	35,0668	1,3251	36,3919	36,2045	1,1377	0,1874	0,5612

Tabela 11 – Ensaio de queima do tubo 3

$$v_f = 0,5516$$

4.3 – Ensaio de Flexão

As Figuras 22 e 23 mostram comparativamente os gráficos de carga *versus* deflexão e Momento *versus* Raio de curvatura, respectivamente, para cada uma das amostras.

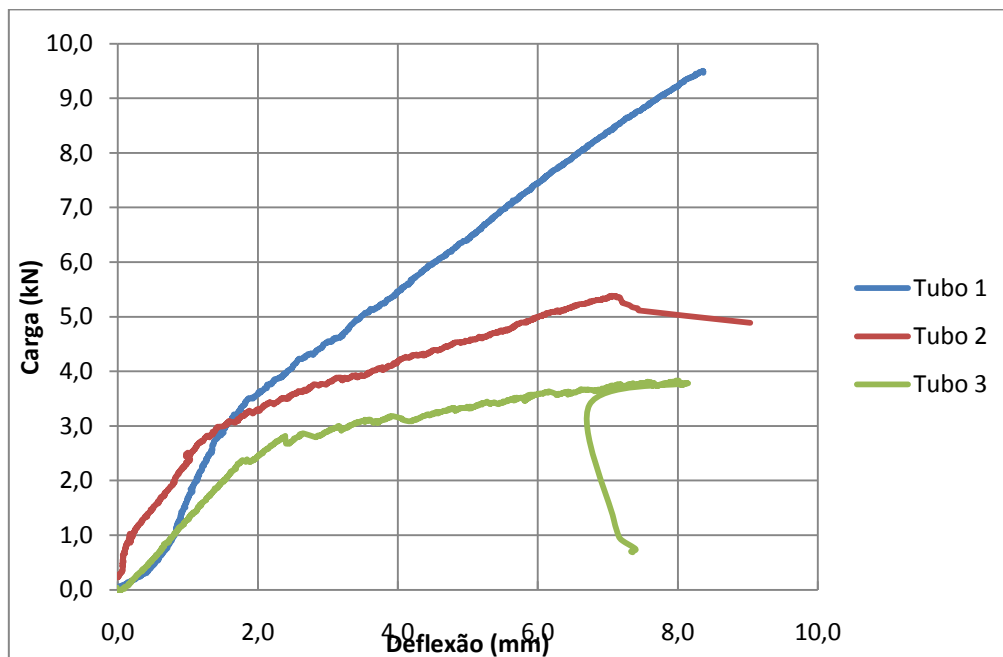


Figura 22 – Gráfico de Carga *versus* deflexão dos tubos 1, 2 e 3

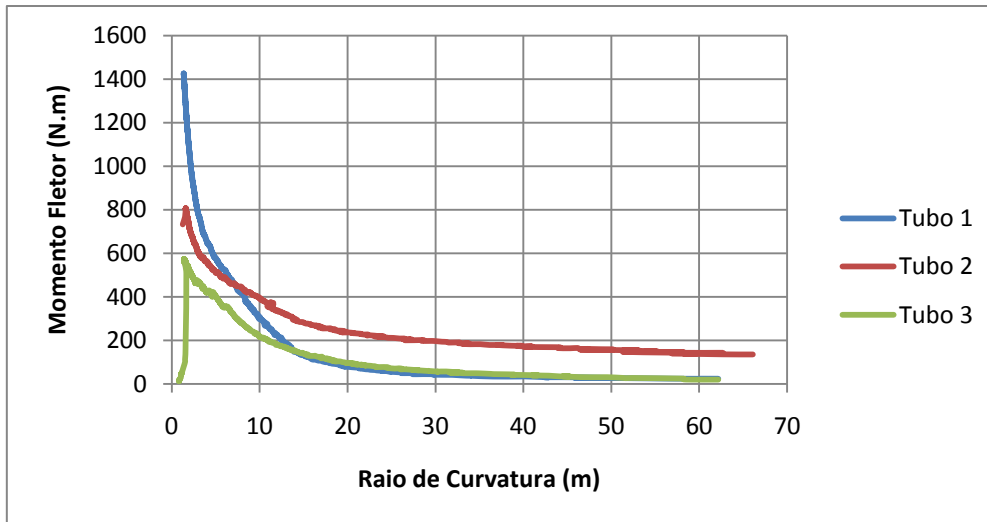


Figura 23 – Gráfico de Momento Fletor *versus* Raio de curvatura dos tubos 1, 2 e 3

Tanto a carga quanto a deflexão foram registradas a cada 0,5 segundos.

Determinação do raio de curvatura

Para todas as amostras, o momento aplicado na parte central do tubo é calculado através da equação:

$$M = \frac{P}{2} \cdot \frac{L}{3} = \frac{P \cdot c}{2}$$

O raio de curvatura R é assumido como constante na superfície superior do tubo, entre os apoios internos do dispositivo. O modelo para a obtenção do raio de curvatura será apresentado a seguir:

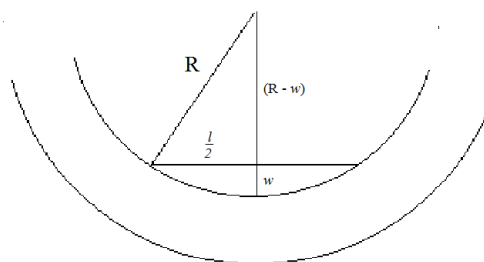


Figura 24 – Raio de curvatura

Por considerações geométricas, temos que:

$$R^2 = \left(\frac{l}{2}\right)^2 + (R - w)^2 = \left(\frac{l}{2}\right)^2 + R^2 - 2 \cdot R \cdot w + w^2$$

Portanto:

$$R = \frac{w^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}{2w}$$

Onde:

R = Raio de curvatura

w = deflexão obtida pelo LVDT

l = distância entre os apoios internos

O raio de curvatura é, na prática, o raio do carretel que o tubo pode ser enrolado. É desejável que os tubos apresentem o menor raio de curvatura antes de a falha ocorrer. No entanto, todos os tubos apresentaram pequenas falhas na camada externa durante o carregamento, provocando oscilações nas curvas obtidas a partir dos ensaios realizados.

4.3.1 – Análise do tubo 1

A Figuras 25 e 26 mostram as curvas de Carga *versus* Deflexão e Momento fletor *versus* Raio de curvatura, respectivamente, características do tubo 1.

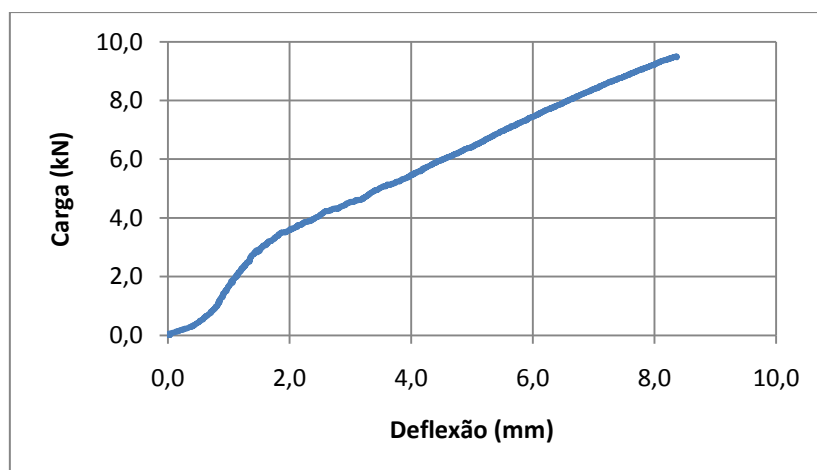


Figura 25 – Gráfico Carga *versus* deflexão do tubo 1

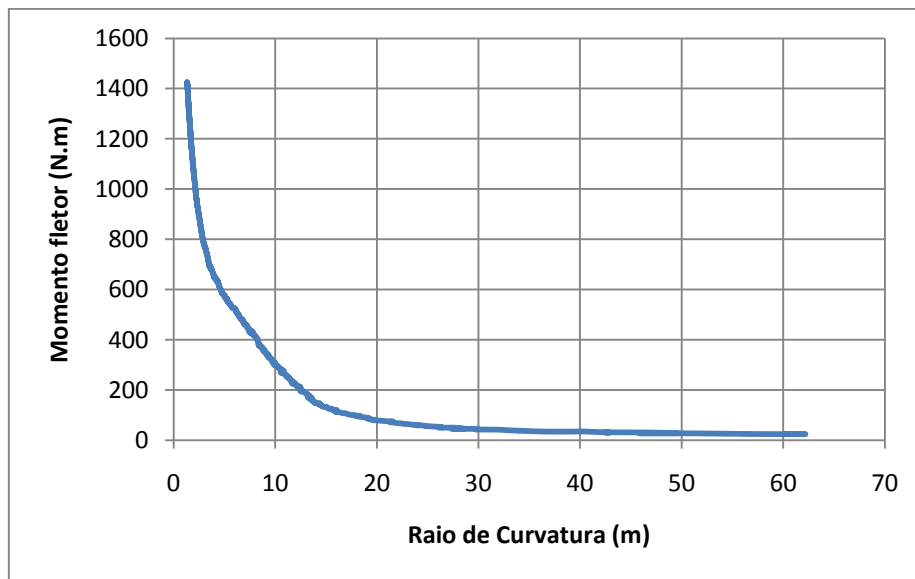


Figura 26 – Gráfico Momento *versus* Raio de Curvatura do tubo 1

A Figura 27 mostra a região de fratura do tubo 1.



Figura 27 – Região de fratura do tubo 1

4.3.2 – Análise do tubo 2

As Figuras 28 e 29 mostram as curvas de Carga *versus* Deflexão e Momento fletor *versus* Raio de curvatura, respectivamente, que são características do tubo 2.

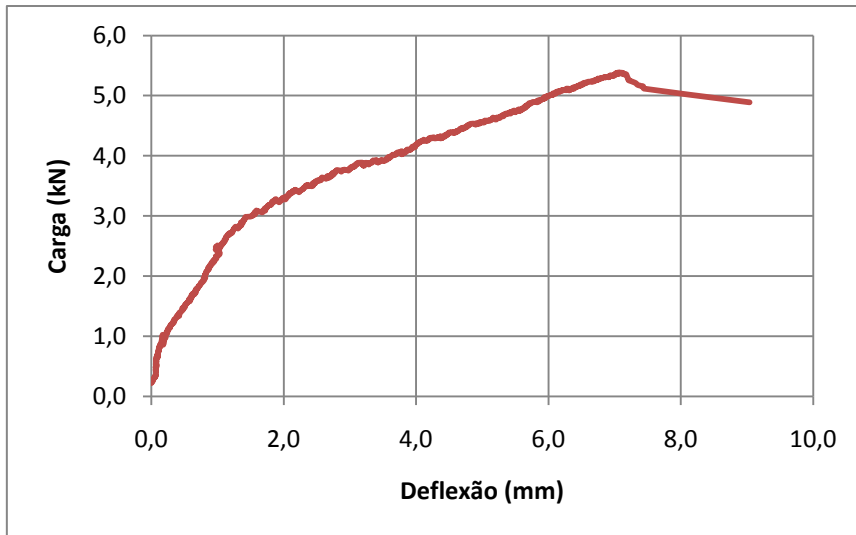


Figura 28 – Gráfico Carga *versus* deflexão do tubo 2

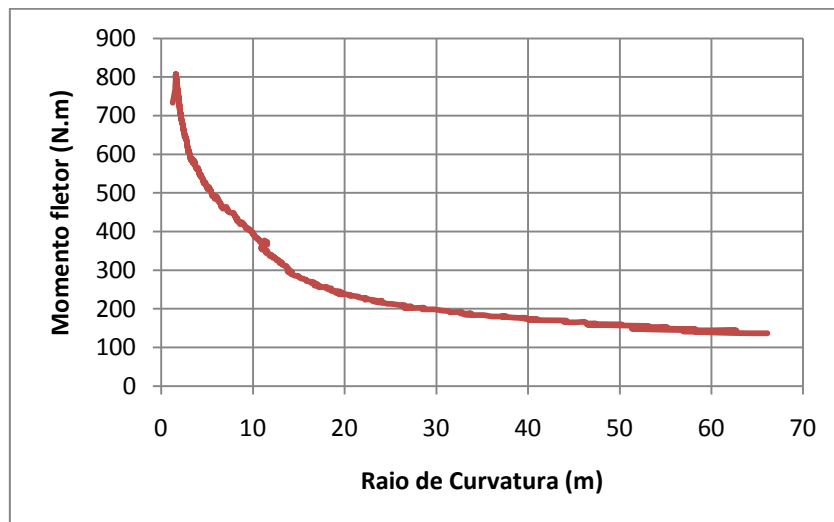


Figura 29 – Gráfico Momento *versus* Raio de curvatura do tubo 2

O tubo 2 apresentou a falha no centro da região de flexão pura. A falha ocorreu de forma menos catastrófica que no tubo 1. A Figura 30 mostra a região de fratura do tubo.



Figura 30 – Região de fratura do tubo 2

4.3.3 – Análise do tubo 3

As Figuras 31 e 32 mostram as curvas de Carga *versus* Deflexão e Momento fletor *versus* Raio de Curvatura, respectivamente, que são características do tubo 3.

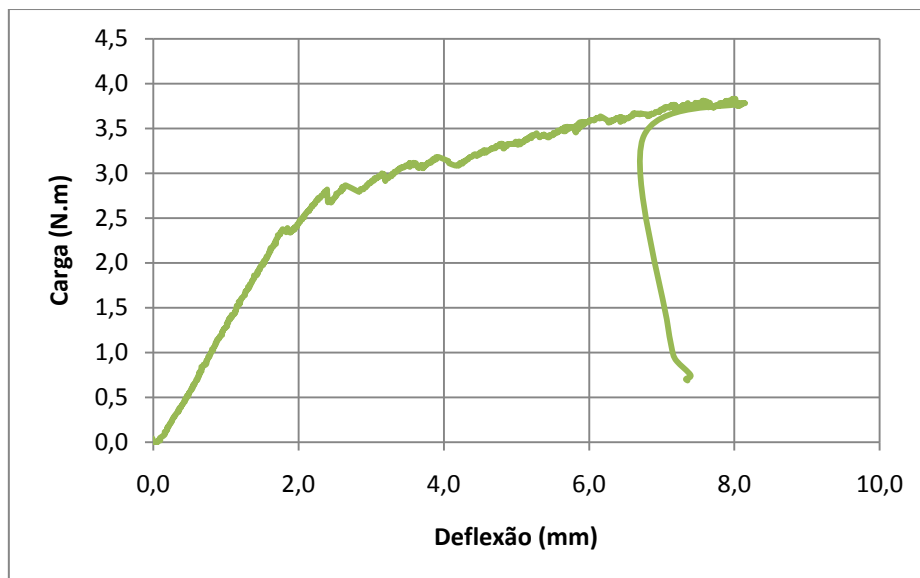


Figura 31 – Gráfico Carga *versus* deflexão do tubo 3

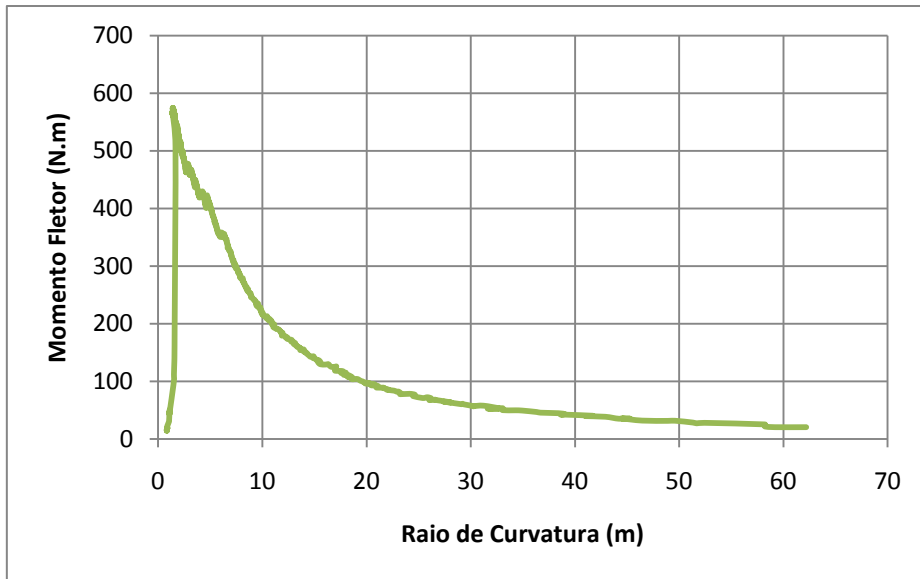


Figura 32 – Gráfico Momento *versus* Raio de Curvatura do tubo 3

O tubo apresentou a falha no centro da região de flexão pura. A falha ocorreu de forma mais lenta e gradual em relação aos tubos 1 e 2. A Figura 33 mostra a região de fratura do tubo 3.



Figura 33 – Região de fratura do tubo 3

A Tabela 11 mostra os valores dos resultados obtidos nos ensaios.

Amostra	Densidade ρ_c (g/cm^3)	Volume de fibras v_f (%)	Deflexão Máxima w (mm)	Momento Máximo ($N.m$)	Ráio de Curvatura Mínimo (m)
Tubo 1	1,7892	0,5591	8,30	1410	1,39
Tubo 2	1,6113	0,5107	9,04	787	1,67
Tubo 3	1,6865	0,5516	7,99	545	1,85

Tabela 12 – Principais valores obtidos nos ensaios

5 – Conclusões

Os tubos apresentaram a região de falha entre os apoios internos do dispositivo de flexão.

O tubo 1 apresentou maior comportamento elástico, tendo sua falha ocorrida de forma mais catastrófica. Para valores de raio de curvatura maiores que 20 metros, a rigidez à flexão é muito próxima aos valores de rigidez do tubo 3. Isso se deve ao fato de que para deflexões muito pequenas, o comportamento é regido pelas camadas mais externas, que são paralelas (tipo A). Para deflexões maiores, a camada mais externa sofre pequenas fissuras (podendo ser ouvidos pequenos estalos durante o ensaio) diminuindo a atuação desta camada na resistência mecânica.

Após a falha da camada externa, o comportamento começa a ser regido pela camada intermediária (tipo B). No caso do tubo 1, que possui as fibras mais direcionadas no sentido longitudinal, a rigidez aumenta drasticamente, sendo a partir deste ponto o tubo com maior rigidez.

A deflexão máxima dos tubos apresentou valores próximos entre si. O momento aplicado no tubo 1 para ocorrer a fratura apresentou-se o maior do que os outros tubos. Isso se deve ao fato de que as fibras da camada intermediária apresentam menor ângulo em relação ao sentido longitudinal do tubo.

O tubo 3 apresentou a menor rigidez e menor raio de curvatura, sendo ele o tubo que apresenta as propriedades menos desejadas para aplicações puramente estruturais.

O menor raio de curvatura apresentado antes da falha foi do tubo 2. No entanto, quando o tubo atinge o raio de curvatura de 1,51 metros, ocorre um dano mais severo, porém não rompendo totalmente. Para pequenas deflexões, o tubo 2 apresentou maior rigidez em relação aos tubos 1 e 3.

Os ensaios apresentaram resultados satisfatórios, que comprovam a influência da angulação das fibras na camada intermediária. Porém, a existência de múltiplas fissuras na camada mais externa pode comprometer o desempenho do material quando submetido a elevadas pressões interna e externa.

6 – Sugestões para trabalhos futuros

Realizar ensaios de explosão e colapso com tubos previamente submetidos a flexão a quatro pontos, já que os tubos apresentaram múltiplos danos superficiais.

Utilizar dispositivos de emissão acústica durante os ensaios de flexão, para obter o raio de curvatura mínimo sem que ocorra qualquer dano na superfície do material.

Investigar a influência de outras sequências de empilhamento das camadas compósitas no comportamento dos tubos durante os ensaios de flexão.

7 - Bibliografia

- [1] – CALLISTER JR, W. D., 2002, *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 5 ed. Rio de Janeiro, LTC.
- [2] – TEIXEIRA, ANA MARIA A. J. , 2007, *Ponte de Material Compósito de Fibra de Vidro*. Dissertação de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
- [3] – SOBRINHO, L. L., 2005, *Desenvolvimento de Matriz Polimérica para Material Compósito Visando o Reforço de Dutos de Aço*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [4] – HIBBELER, RUSSEL C. 2001, *Resistência dos materiais*, 5 ed. Prentice Hall
- [5] – ASM Metals HandBook Vol. 20, 1997 – *Material Selection and Design*, ASM International
- [6] – SALLABERRY, ROBERTA D. 2005 *Limite de Deformação das Fibras de Carbono usadas no Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado*.Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [7] – KUMAR, ANNAMALAI P. Kumar, *Nanoscale particles for polymer degradation and stabilization—Trends and future perspectives*, Elsevier Progress in polymer Science
- [8] – CHAWLA, K. K., 1987, *Composite Materials*. 1 ed. Springer-Verlag New York.
- [9] – PILATO, L. A., MICHNO, M. J., 1994, *Advanced Composite Materials*. Springer-Verlag, New York.
- [10] – ASM Metals HandBook Vol. 21, 2001 – *Composites* ASM International
- [11] - CANEVAROLO JR, S. V., 2002, *Ciência dos Polímeros um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros*. 1 ed. São Paulo, Artliber ABpol.
- [12] – DE PAOLI, MARCO AURÉLIO, 2008, *Degradação e Estabilização de Polímeros*, Chemkeys.
- [13] – MALLICK, P. K., 2007, *Fiber-Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design*. 3 ed. Michigan, LLC.

[14] – MAY, C. A., 1988, *Epoxy Resins Chemistry and Technology*. 2 ed. Nova York, Marcel Dekker.