

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Caracterização do Comportamento Mecânico de
Materiais Compósitos Ortotrópicos**

Augusto Cezar Rotolo Barreto
Matheus de Carvalho Duncan

**Rio de Janeiro
Novembro de 2017**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

Caracterização do Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos Ortotrópicos

Augusto Cezar Rotolo Barreto
Matheus de Carvalho Duncan

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior do
CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Orientador: Paulo Pedro Kenedi

**Rio de Janeiro
Novembro de 2017**

AGRADECIMENTOS

Ao professor Paulo Pedro Kenedi, a quem somos gratos pela ajuda, paciência e atenção. Sem seu auxílio, este projeto não poderia ser concluído.

Aos nossos pais, Joaquim Coelho Barreto Neto e Cibele Rotolo Barreto, pais de Augusto Cezar Rotolo Barreto; Carlos Eduardo Duncan e Elisabete Gomes de Carvalho Duncan, pais de Matheus de Carvalho Duncan, pelo amor, paciência e dedicação à nossa formação profissional que resultaram neste trabalho.

Ao professor Silvio Romero de Barros, pela permissão de uso do Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES) para a realização da parte experimental deste trabalho.

Ao aluno de mestrado Jorge de Souza e Silva Neto, pela preparação das amostras utilizadas para elaboração deste trabalho.

E ao técnico de laboratório Brenno Tavares Duarte, por ter nos auxiliados em todos os ensaios mecânicos realizados neste trabalho.

Ao CEFET/RJ - Maracanã, por todo o auxílio durante nossa graduação.

RESUMO

Uma das aplicações que vem ganhando força na utilização de materiais compósitos é o seu uso para fins estruturais como forma de substituição dos materiais metálicos, que tradicionalmente são os mais utilizados, visando buscar uma redução do peso das estruturas mantendo a sua resistência a elevadas cargas. Porém, apesar do crescente uso desses materiais e dos estudos que vem sendo realizados sobre eles, têm-se poucas informações quanto uma série de características que são de suma importância para sua maior utilização. Nesse trabalho foi conduzido um estudo de caráter experimental, a fim de se determinar propriedades mecânicas de um material compósito reforçado com fibra de vidro unidirecional, uma vez que, dos compósitos de matrizes poliméricas, esse é um dos mais utilizados atualmente.

Palavras-chaves: materiais estruturais, materiais compósitos, fibra de vidro unidirecional, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

One of the applications that has been gaining strength in the use of composite materials is its application for structural purposes as a way of replacing metallic materials that traditionally are the most used, concerning to seek weight reduction of structures while maintaining their resistance for high loads. However, despite the increasing use of these materials and studies being carried out, few information is available on a series of characteristics that are of major importance for their greater use. In this work, an experimental study was conducted in the interest of discovering properties of a composite material reinforced with unidirectional fiberglass, since related to polymer matrix composites, this is one of the most used nowadays.

Keywords: structural materials, composite materials, unidirectional fiberglass, mechanical properties.

SUMÁRIO

Introdução.....	1
1.1 – Motivação.....	2
1.2 – Justificativa.....	2
1.3 – Objetivos.....	2
1.4 – Metodologia e Trabalho Realizado.....	3
Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 – Anisotropia e Ortotropia.....	4
2.2 – Matriz.....	5
2.3 – Reforço.....	7
2.4 – Métodos de Fabricação.....	10
2.4.1 – Laminados.....	11
2.4.2 – Defeitos Comuns em Laminados de Fibra de Vidro.....	13
Preparação dos Corpos de Prova.....	15
3.1 – Montagem da Placa de Fibra de Vidro para Ensaio de Tração.....	15
3.1.1 – Extração dos Corpos de Prova para Ensaio de Tração.....	17
3.2 – Montagem da Placa de Fibra de Vidro para Ensaio de Tração.....	22
3.2.1 – Extração dos Corpos de Prova para Ensaio de Flexão.....	22
Realização dos Ensaios.....	24
4.1 – Ensaio de Tração.....	24
4.1.1 – Ensaio de Tração com as Fibras a 0°, 45° e 90°.....	24
4.2 – Ensaio de Flexão.....	26
4.2.1 – Ensaio de Flexão com as Fibras a 0°, 45° e 90°.....	27
Resultados e Discussão.....	29
5.1 – Resultados do Ensaio de Tração com Fibras a 0°.....	29
5.2 – Resultados do Ensaio de Tração com Fibras a 45°.....	32
5.3 – Resultados do Ensaio de Tração com Fibras a 90°.....	35
5.4 – Resultados do Ensaio de Flexão com Fibras a 0°.....	38
5.5 – Resultados do Ensaio de Flexão com Fibras a 45°.....	39
5.6 – Resultados do Ensaio de Flexão com Fibras a 90°.....	41
5.7 – Comparação dos Resultados.....	43
Conclusão.....	46
Sugestões para Trabalhos Futuros.....	47
Bibliografia.....	48
Anexo A.....	49
Anexo B.....	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Madeira e os seus três eixos perpendiculares [2].....	4
Figura 2: Curva de tensão-deformação das resinas epóxi de diferentes módulos [4 Modificado].....	6
Figura 3: Curvas de tensão-deformação das três matrizes típicas [4 Modificado].	7
Figura 4: Classificação de materiais compósitos pelo tipo de reforço [3].	8
Figura 5: Compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e aleatoriamente orientadas [6].....	9
Figura 6: Sistema de resina epóxi.	16
Figura 7: Resina após mistura e pronta para ser aplicada.	16
Figura 8: Prensa hidráulica com controle de temperatura utilizada.	17
Figura 9: Esquema da extração dos corpos de prova na orientação das fibras a 0°, 45° e 90°.	18
Figura 10: Placa de fibra de vidro montada para extração dos corpos de prova.	18
Figura 11: Corpos de prova prontos para serem ensaiados.	19
Figura 12: Máquina de tração utilizada nos ensaios.	25
Figura 13: Posicionamento do corpo de prova na máquina de tração.....	25
Figura 14: Corpos de prova após o ensaio.	26
Figura 15: Corpos de prova antes do ensaio de flexão.....	27
Figura 16: Ensaio de flexão.	28
Figura 17: Gráfico Força x Deslocamento do ensaio de tração a 0°.	30
Figura 18: Gráfico Tensão x Deformação comparativo dos ensaios de tração a 0°.	31
Figura 19: Dois tipos de falha nos corpos de prova a 0° no ensaio de tração.	32
Figura 20: Gráfico Força x Deslocamento do ensaio de tração a 45°.	33
Figura 21: Gráfico Tensão x Deformação comparativo dos ensaios de tração a 45°.	34
Figura 22: Falha no corpo de prova a 45° no ensaio de tração.	35
Figura 23: Gráfico Força x Deslocamento do ensaio de tração a 90°.	36
Figura 24: Gráfico Tensão x Deformação comparativo dos ensaios de tração a 90°.	37
Figura 25: Falha no corpo de prova a 90° no ensaio de tração.	37
Figura 26: Gráfico da Força x Deslocamento do ensaio de flexão a 0°.	38
Figura 27: Falha no corpo de prova a 0° no ensaio de flexão.	39
Figura 28: Gráfico da Força x Deslocamento do ensaio de flexão a 45°.	40
Figura 29: Falha no corpo de prova a 45° no ensaio de flexão.	40
Figura 30: Gráfico da Força x Deslocamento do ensaio de flexão a 90°.	41
Figura 31: Falha no corpo de prova a 90° no ensaio de flexão.	42
Figura 32: Gráfico Tensão x Deformação comparativo dos ensaios de tração.	44
Figura 33: Gráfico comparativo Força x Deslocamento do ensaio de tração.	45
Figura 34: Gráfico comparativo Força x Deslocamento transversal do ensaio de flexão.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades de materiais compósitos unidirecionais [4].	13
Tabela 2: Medidas dos corpos de prova de ensaio de tração.	20
Tabela 3: Medidas dos corpos de prova de ensaio de flexão.	22
Tabela 4: Resultados do ensaio a 0°.....	29
Tabela 5: Resultados do ensaio a 45°.....	33
Tabela 6: Resultados do ensaio a 90°.....	36
Tabela 7: Comparação das tensões e deformações máximas nas orientações de 0°, 45° e 90°.	43
Tabela 8: Comparação das médias dos deslocamentos máximos dos corpos com as fibras de 45° e 90° nos ensaios de tração e flexão.	44
Tabela 9: Comparação das médias das deformações máximas dos corpos com as fibras de 45° e 90° nos ensaios de tração.	45

Capítulo 1

Este capítulo faz uma breve abordagem dos conceitos básicos sobre um material compósito quanto a sua definição, fases constituintes e cita exemplos de alguns tipos materiais compósitos definindo o período histórico de seu surgimento. Em seguida são tratadas as motivações deste trabalho, as justificativas para fazê-lo, o que pretende-se com a sua realização e a metodologia utilizada na sua elaboração.

Introdução

O desenvolvimento dos plásticos foi muito importante, por serem materiais que apresentam uma baixa densidade, além de duráveis e práticos. Mas os plásticos sozinhos não possuem as propriedades mecânicas exigidas para aplicações mais complexas da engenharia, embora a baixa densidade seja uma característica fundamental nessas aplicações em função da diminuição do peso. Por isso, pode-se dizer que mais importante que a descoberta dos plásticos, foi a descoberta dos compósitos. Um compósito é um material feito a partir da combinação de dois ou mais materiais de propriedades físicas distintas, em que as propriedades desse material combinado, são superiores às desses materiais constituintes agindo independentemente. A estrutura dos compósitos é dividida em uma fase chamada reforço, ou fase dispersa, que é descontínua e que reforça as propriedades mecânicas do compósito como um todo, enquanto a matriz confere estrutura, preenchendo espaços vazios que ficam entre os reforços. E ainda, dependendo das interações químicas ou efeitos de processamento, uma fase chamada interfase pode existir entre o reforço e a matriz.

Por conta da demanda no mercado mundial para reduzir custos, facilitar montagem de equipamentos e aumentar a qualidade, para garantir maior competitividade, os compósitos mostram-se como uma ótima alternativa para aplicações que busquem inovação.

Embora pareça que os materiais compósitos tenham surgido muito recentemente como uma tecnologia inovadora, tomando cada vez mais espaço na indústria automobilística, naval, civil, militar e aeroespacial, esse conceito de compósitos reforçados com fibras já vem desde a antiguidade. Existem referências bíblicas para tijolos de argila reforçados com palha, ou ainda, materiais cimentados sendo reforçados com crina de cavalo. Um outro exemplo seriam as barras de “ferro” que eram usadas para reforçar a alvenaria desde o século XIX, levando ao desenvolvimento do concreto armado. Em 1942, um barco de fibra de vidro foi

construído, enquanto aeronaves já utilizavam plásticos reforçados em sua estrutura. Pulando alguns anos de desenvolvimento e chegando a 1973 quando a empresa americana DuPont criou a fibra sintética Kevlar, que é um compósito feito de fibras de aramida muito resistentes e leves, sendo cinco vezes mais resistente que o aço por unidade de peso. E, finalmente, na década de 80, houve significativo crescimento da utilização de módulos de fibra e que vem ganhando força até hoje, em aplicações em elevadas temperaturas, alta performance aliada ao baixo peso, elevada resistência à corrosão e facilidade de aplicação.

1.1 – Motivação

Com o aumento na utilização de materiais compósitos e as inúmeras possibilidades de aplicações, que incluem desde equipamentos esportivos até naves espaciais da NASA, os compósitos vem mostrando que serão os materiais mais utilizados na engenharia em um futuro próximo. Embora diversas pesquisas já venham sendo realizadas, ainda existem poucas informações sobre as características e propriedades destes materiais, por ser um campo de estudo muito extenso.

1.2 – Justificativa

O tema foi escolhido devido ao grande interesse em materiais compósitos, reconhecendo sua importância como uma solução viável para diversos problemas na engenharia. Tomando como um exemplo, a constante demanda por eficiência energética no âmbito global, que tende a impulsionar a utilização de compósitos de maneira exponencial, gerando desafios ainda maiores para fabricantes de máquinas e ferramentas. Por isso a necessidade da caracterização e de expansão de conhecimentos sobre este tipo de material.

1.3 – Objetivos

A intenção deste trabalho é poder ampliar o conhecimento sobre os materiais compósitos e caracterizar suas propriedades mecânicas, por meio de métodos experimentais de um compósito de matriz epóxi reforçado com fibra de vidro, tendo os corpos de prova retirados com três diferentes orientações, a 0° , 45° e 90° , para haver um estudo da influência da ortotropia no desempenho mecânico do material compósito.

1.4 – Metodologia e Trabalho Realizado

O presente trabalho foi dividido nas seguintes etapas: Revisão Bibliográfica, Preparação dos Corpos de Prova, Realização dos Ensaios, Resultados e Discussão, Conclusão e Trabalhos Futuros.

Na revisão bibliográfica, foi feito um estudo para o melhor conhecimento do tema e conceitos, visando o aprofundamento do embasamento teórico e aspectos importantes para uma análise do comportamento mecânico dos compósitos. Na Preparação dos Corpos de Prova, são descritos os procedimentos para a montagem de uma placa de fibra de vidro e epóxi e a retirada dos corpos de prova, em seguida. Em Realização dos Ensaios, são explicadas as etapas seguidas para ser realizado o experimento. Na parte de Resultados e Discussão, uma análise dos resultados obtidos é feita com base no conhecimento teórico sobre o comportamento do material. E finalmente, as conclusões obtidas deste experimento são mostradas e alguns possíveis trabalhos futuros sendo apresentados tomando este como base.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Nesse capítulo são apresentadas as fases que compõem um material compósito, uma série de conceitos que são importantes para o entendimento e realização desse trabalho, as formas de produção dos compósitos e algumas propriedades importantes para a caracterização desses materiais.

2.1 – Anisotropia e Ortotropia

Quando as propriedades elásticas do material são diferentes em direções distintas, como por exemplo na maior parte dos materiais compósitos, o material pode apresentar comportamento ortotrópico ou mesmo anisotrópico. Os materiais apresentam comportamento ortotrópico quando as propriedades num plano são iguais, mas distintas das que ocorrem numa direção ortogonal a esse plano. Terá comportamento anisotrópico quando as propriedades do material diferirem com uma dada direção considerada [1].

Um exemplo de material ortotrópico é a madeira, apresentando propriedades mecânicas independentes nas direções de três eixos perpendiculares, como é mostrado na Figura 1.

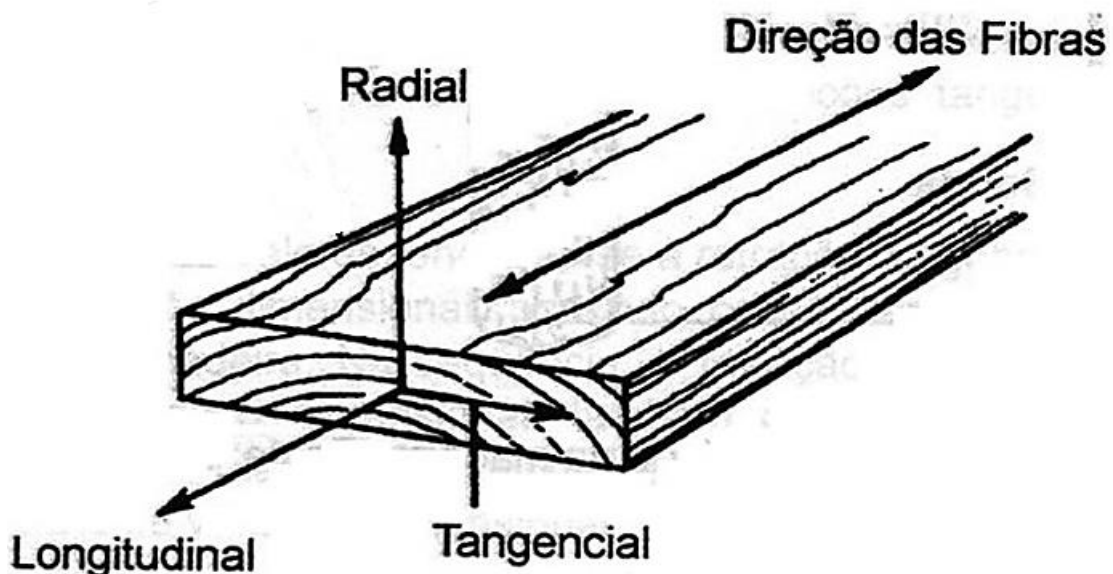


Figura 1: Madeira e os seus três eixos perpendiculares [2].

2.2 – Matriz

Em compósitos com reforço com fibras, a matriz serve para unir as fibras e funciona como um meio para que a tensão aplicada externamente seja distribuída para todas as fibras, restando apenas uma pequena carga a ser suportada pela própria matriz. Ela também protege as fibras individualmente, evitando danos superficiais decorrentes de abrasão, o que poderia gerar trincas e falha precoce do material. A matriz ainda previne que trincas propaguem-se catastróficamente, devido a sua baixa dureza e maior plasticidade. É graças a ela que mesmo que algumas fibras sejam rompidas, a fratura total do compósito não ocorrerá até que um grande número de fibras adjacentes tenham falhado [3].

São utilizados três tipos de matrizes em compósitos, sendo elas: poliméricas, metálicas e cerâmicas. As matrizes poliméricas são as mais utilizadas, já que os polímeros apresentam baixa densidade, facilidade de processamento e certa ductilidade. Elas podem ser divididas em termoplásticas e termofixas. As termoplásticas são as com a maior tenacidade, maior resistência ao impacto, são recicláveis e facilmente processadas por injeção ou termoformação, tendo como exemplo a PSU (polisulfona) e poli-éter-éter-cetona. As termofixas possuem uma maior facilidade de impregnação do reforço, assumem forma permanente após o aquecimento e precisam de pressão e calor para que a cura (endurecimento de material polímero por reticulação) ocorra; alguns exemplos são os epóxis, poliimidas e poliéster. Existem dois tipos de epóxi: os que são curados em baixas temperaturas, a até 120°C, utilizados em aplicações de baixas ou médias variações de temperatura e aqueles com cura à maiores temperaturas, em torno de 175°C, para aplicações de exposição à altas temperaturas [4]. A Figura 2 indica a faixa de rigidez da resina epóxi de acordo com diferentes módulos.

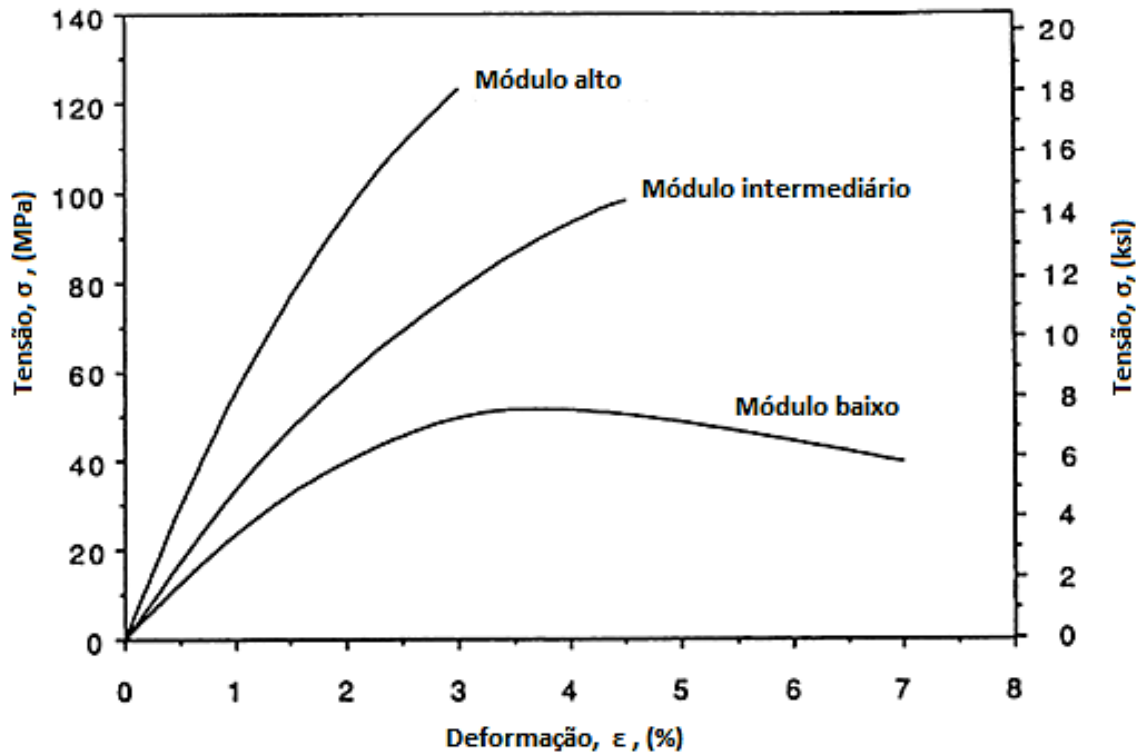


Figura 2: Curva de tensão-deformação das resinas epóxi de diferentes módulos [4 Modificado].

As matrizes metálicas são combinações de componentes metálicos, agregando as propriedades do metal de matriz com as do metal de reforço. Mesmo obtendo-se propriedades com vantagens superiores do que as obtidas com materiais poliméricos, as matrizes metálicas ainda têm pequena aplicação, devido ao preço de produção elevado. Algumas matrizes metálicas usadas comumente são de ligas de alumínio, magnésio e titânio.

Já as matrizes cerâmicas são constituídas de elementos metálicos e não metálicos, sendo leves, resistentes à oxidação em altas temperaturas, rígidas e susceptíveis à fratura frágil. Alguns exemplos de matrizes cerâmicas são as LAS (aluminosilicato) e as CAS (aluminosilicato de cálcio) [4].

Uma comparação pode ser feita para os três diferentes tipos de matrizes na Figura 3.

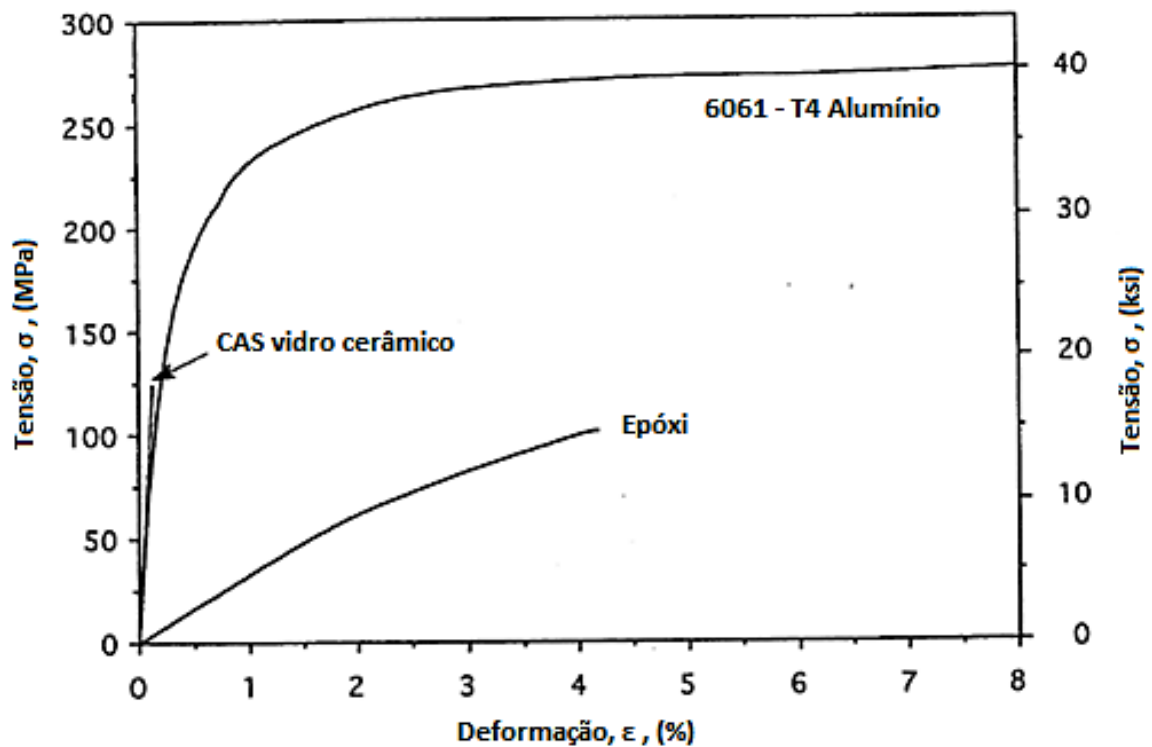


Figura 3: Curvas de tensão-deformação das três matrizes típicas [4 Modificado].

O comportamento dos compósitos unidirecionais na direção da fibra, principalmente com a relação à rigidez, é na maior parte influenciado pelas propriedades da fibra. Entretanto, transversalmente à direção da fibra, o comportamento é majoritariamente influenciado pelas propriedades da matriz, especialmente em relação à resistência mecânica.

2.3 – Reforço

O reforço, ou fase dispersa, é o responsável por realçar algumas das propriedades mecânicas, químicas ou eletromagnéticas desejadas, como a dureza e a resistência a tração.

Os tipos de reforços podem ser agrupados em compósitos reforçados com partículas, compósitos estruturais e compósitos reforçados por fibras. Na Figura 4 mostra-se um esquema dessa divisão.

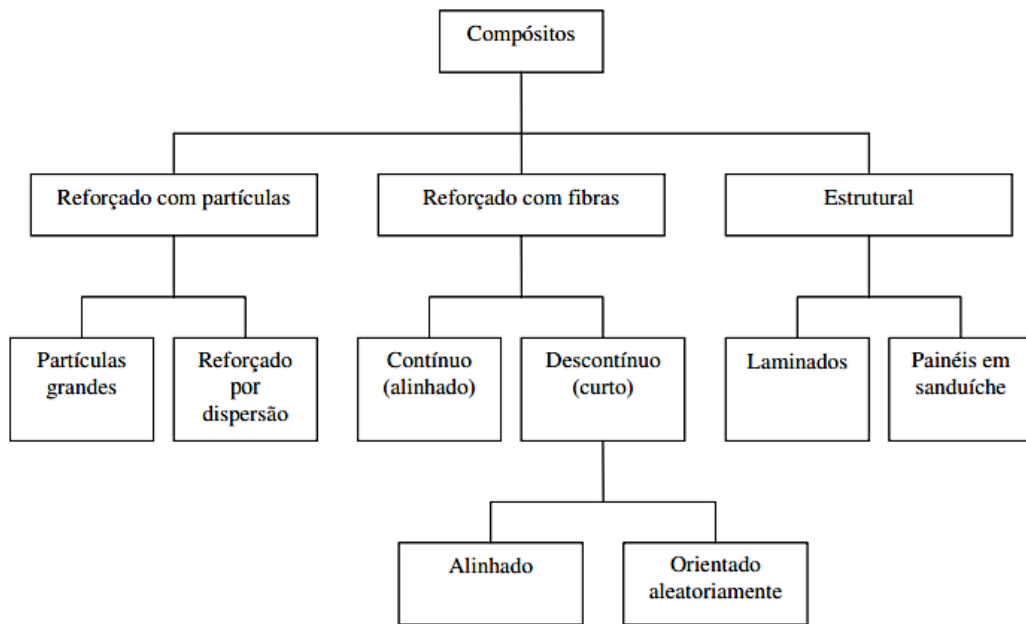


Figura 4: Classificação de materiais compósitos pelo tipo de reforço [3].

Neste trabalho, aborda-se apenas os compósitos reforçados com fibras, considerando que eles são os mais importantes para aplicações voltadas para estruturas mecânicas.

As fibras em uma matriz tendem a reforçar o compósito sobre todos os modos de carregamento que induzem a tensões de tração, além de também melhorar a tenacidade e a ductilidade de uma matriz mais frágil. Estes materiais tem o desempenho afetado diretamente pelo comprimento, propriedades físicas e teor de massa ou volume das fibras. Por esse motivo, fibras curtas, que não provocam uma boa transmissão da carga aplicada, não causam grandes aumentos na resistência do material. Enquanto que, as fibras longas possuem maior resistência ao impacto e melhor estabilidade dimensional, mas são mais caras, mais difíceis de trabalhar e possuem um procedimento de fabricação mais demorado, além de apresentarem um número maior de defeitos. É importante ainda ressaltar que a orientação de uma fibra em relação ao plano de ruptura tem uma grande influência na sua capacidade de transferir cargas. Uma fibra que é posicionada paralela ao plano de ruptura não apresenta nenhum efeito, mas tem máximo efeito caso seja posicionada perpendicularmente [5].

As fibras podem estar alinhadas ou orientadas de maneira aleatória, afetando as propriedades mecânicas. Normalmente, as fibras alinhadas e de comprimentos maiores, apresentam o melhor conjunto de propriedades. A Figura 5 indica as possíveis orientações das fibras em um compósito.

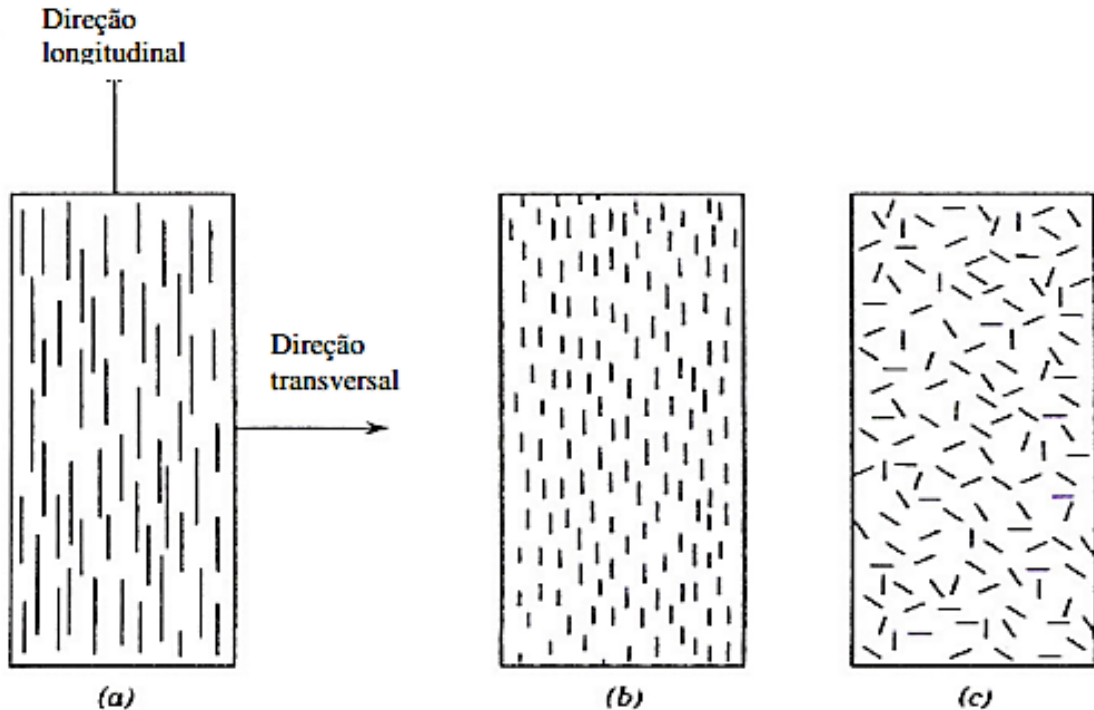


Figura 5: Compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e aleatoriamente orientadas [6].

No caso de fibras contínuas, a resistência à tração é muito alta na direção longitudinal às fibras e muito baixa na direção transversal. Há diversos fatores que podem afetar as suas propriedades mecânicas, como os comportamentos mecânicos das fases fibra e matriz, frações volumétricas das fases e a direção de aplicação da carga.

A fibra de vidro é o reforço mais utilizado, sendo fabricada por meio do estiramento de vidro fundido através de uma fieira com dimensões precisas, em temperaturas acima de 1200°C. Possui três tipos: fibra de vidro C (chemical), fibra de vidro E (electrical) e fibra de vidro S (stiffness). A fibra de vidro E é a mais aplicada em matrizes poliméricas, pois possui como vantagens, elevada resistência química, baixo custo quando comparada às outras fibras e elevada resistência à tração. No entanto apresenta desvantagens como sensibilidade à abrasão, elevada massa específica em comparação com os demais tipos de fibras, módulo de elasticidade reduzido e baixa resistência à fadiga.

As fibras de aramida têm origem orgânica e sintética, feitas por meio de trefilação de poliamidas aromáticas. Foram inventadas pela empresa americana DuPont e conhecidas comercialmente como KEVLAR. Possuem aplicações em cabos, raquetes de tênis, estruturas de barcos, automóveis e coletes à prova de balas. Possuem baixa massa específica, elevada resistência ao impacto, à tração, à abrasão, baixa condutividade térmica e excelente

comportamento sob temperaturas elevadas de serviço. Entretanto, tem um custo alto, elevada absorção de umidade e difícil adesão às resinas.

As fibras de carbono são produzidas a partir da decomposição térmica de precursores orgânicos, por meio das operações de oxidação, carbonatação e grafitação, obtendo-se um elevado grau de orientação da estrutura. De modo geral, elas sofrem um tratamento superficial com ácido sulfúrico ou nítrico, para a superfície da fibra passar a ter alta adesão a matriz. Têm as vantagens de possuir baixo coeficiente de dilatação térmica, baixa massa específica, elevada resistência à tração, elevada estabilidade dimensional e boas características de amortecimento estrutural. Mas possui resistência ao impacto reduzida, custo elevado e baixa resistência à compressão [7].

2.4 – Métodos de Fabricação

As propriedades finais dos compósitos são extremamente afetadas pelo modo de produção e da forma como os materiais são inseridos no compósito, não sendo apenas resultantes das propriedades individuais dos materiais constituintes. Por esse motivo, o desenvolvimento de diferentes técnicas de fabricação têm sido experimentadas e a ampla variedade de métodos, só tende a aumentar. Basicamente, os processos podem ser agrupados em dois grupos, que seriam os processos em molde fechado e em molde aberto. Nos de molde fechado, há uma menor emissão de materiais nocivos, fácil reprodutibilidade e ótimo acabamento em ambas as superfícies. Nos moldes abertos é possível a obtenção de peças com formatos complexos e de maiores dimensões, embora só uma das superfícies tenha bom acabamento em consequência da menor pressão exercida.

O processo de moldagem por contato manual é o mais econômico e simples, consiste na colocação e impregnação da resina manualmente nas camadas de reforço em molde aberto, com um auxílio de um pincel. E o material é deixado para curar em condições atmosféricas normais em seguida. Sendo indicado a realização onde exista uma ventilação adequada, pois produtos voláteis são liberados. Apesar de não necessitar de mão de obra especializada, tem a desvantagem de a qualidade variar dependendo da dispersão homogênea ou não da resina no reforço.

O processo de moldagem em saco de vácuo é bem semelhante ao de moldagem por contato manual, mas tem-se pressão aplicada para melhorar a consolidação. O vácuo é criado no saco de vácuo flexível por uma bomba e a pressão atmosférica comprime a peça durante o

processo de cura. O saco de vácuo também reduz a formação de bolhas de ar e a quantidade de substâncias voláteis.

No processo de moldagem por transferência de resina ocorre o empilhamento das camadas de reforço no molde inferior. Estas camadas são pressionadas diversas vezes na forma do molde e ligadas por um ligante. Um outro molde é posicionado por cima do primeiro e a resina é injetada para a cavidade entre os dois. Quando a resina tiver impregnado todo o reforço, o compósito é deixado para curar. Esta técnica é muito utilizada na fabricação de peças feitas de compósito e possibilita um material com poucas imperfeições [8].

2.4.1 – Laminados

Laminado é o nome dado quando ocorre o empilhamento de camadas unidirecionais ou de camadas reforçadas por tecidos, com fibras colocadas em diferentes orientações. Os compósitos laminados são os materiais utilizados em aplicações estruturais. Suas propriedades podem ser alteradas dependendo da espessura, orientação e da sequência de empilhamento, o que gera maior flexibilidade das características que se quer obter. Quando os empilhamentos são simétricos o laminado na qual as camadas estão dispostas de modo a apresentar um plano de simetria entre elas, os laminados não apresentam acoplamento de componentes mecânicas em tração com componentes de corte ou componentes de torção, enquanto os laminados não simétricos apresentam. Este é o motivo dos empilhamentos simétricos serem os mais utilizados, oferecendo uma resposta mecânica mais uniforme. Sendo importante deixar explícito qual a sequência de empilhamento pretendido para cada laminado.

A lâmina de um compósito é um material heterogêneo, mas pode ser representada como homogênea a partir da determinação das suas propriedades com base nas dos seus constituintes. Este material homogêneo equivalente é assumido ortotrópico. Sendo assim, são necessárias constantes de rigidez elástica para descrever os comportamentos tensão-deformação de uma lâmina ortotrópica no seu plano [8].

Conforme descrito por DANIEL & ISHAI [4], um laminado unidirecional, que é o laminado mais básico de qualquer estrutura formada por compósitos, é caracterizado pelas seguintes propriedades:

- E_1, E_2, E_3 = Módulo de Young ao longo das direções principais do laminado.
- G_{12}, G_{23}, G_{13} = Módulo de cisalhamento nos planos 1-2, 2-3 e 1-3, respectivamente. Esses

valores são iguais aos de G_{21}, G_{32}, G_{31} .

- $\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$ = Coeficiente de Poisson (o primeiro algarismo refere-se à direção do carregamento, enquanto o segundo refere-se às direções das tensões. Esses valores são diferentes de $\nu_{21}, \nu_{32}, \nu_{31}$).
- F_{1t}, F_{2t}, F_{3t} = Resistência à tração ao longo das direções principais do laminado.
- F_{1c}, F_{2c}, F_{3c} = Resistência à compressão ao longo das direções principais do laminado.
- F_{12}, F_{23}, F_{31} = Resistência ao cisalhamento nos planos 1-2, 2-3 e 3-1, respectivamente. Esses valores são iguais aos de F_{21}, F_{32}, F_{13} .
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ = Coeficientes de expansão térmica.
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = Coeficientes de expansão de umidade.
- k_1, k_2, k_3 = Coeficientes de condutividade térmica.

Sendo caracterizado também pelas seguintes relações:

1. Relação de volume da fibra: $V_f = \frac{\text{Volume das fibras}}{\text{Volume do compósito}}$

2. Relação de peso da fibra: $W_f = \frac{\text{Peso das fibras}}{\text{Peso do compósito}}$

3. Relação de volume da matriz: $V_m = \frac{\text{Volume da matriz}}{\text{Volume do compósito}}$

4. Relação de peso da matriz: $W_m = 1 - W_f = \frac{\text{Peso da matriz}}{\text{Peso do compósito}}$

5. Taxa de vazios no volume: $V_v = 1 - V_f - V_m = \frac{\text{Volume de vazios}}{\text{Volume do compósito}}$

Algumas propriedades foram listadas para determinados tipos de materiais compósitos, conforme observado na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades de materiais compósitos unidirecionais [4].

Propriedades:	Fibra de vidro E/ Epóxi	Fibra de vidro S/ Epóxi	Fibra de carbono AS4 / Epóxi 3501-6
Relação de volume da fibra, V_f	0,55	0,5	0,63
Densidade, ρ [g/cm ³]	2,1	2	1,58
Módulo de elasticidade longitudinal, E_1 [GPa]	39	43	142
Módulo de elasticidade transversal, E_2 [GPa]	8,6	8,9	10,3
Módulo de cisalhamento no plano, G_{12} [GPa]	3,8	4,5	7,2
Coefficiente de Poisson principal, ν_{12}	0,28	0,27	0,27
Coefficiente de Poisson secundaria, ν_{21}	0,06	0,06	0,02
Resistência à tração longitudinal, F_{1t} [MPa]	1080	1280	2280
Resistência à tração transversal, F_{2t} [MPa]	39	49	57
Resistência à compressão longitudinal, F_{1c} [MPa]	620	690	1440
Resistência à compressão transversal, F_{2c} [MPa]	128	158	228
Coefficiente de expansão térmica longitudinal, α_1 [10 ⁻⁶ /°C]	7	5	-0,9
Coefficiente de expansão térmica transversal, α_2 [10 ⁻⁶ /°C]	21	26	27

2.4.2 – Defeitos Comuns em Laminados de Fibra de Vidro

Alguns tipos de defeitos influenciam em muito nas propriedades e desempenho dos compósitos, afetando os valores obtidos durante os ensaios. Os mais comuns são:

Delaminação: ocorre quando duas ou mais camadas da tela de fibra de vidro se separam, surgindo espaços ocupados por bolhas. Normalmente causado por erros durante o processo de produção do laminado.

Trincas: é uma separação que acontece internamente ou pouco abaixo da superfície do laminado e poder ser facilmente visualizada.

Fissuras: é o conjunto de várias trincas no mesmo laminado, que podem ser tão finas como um fio de cabelo, tornando-se uma região de concentração de tensões. Este tipo de defeito é extremamente negativo porque prejudica a transmissão dos esforços da matriz para

as fibras.

Bolha: elevação em forma de bolha, podendo ser superficial ou interna. Podem ocorrer no laminado como um local de delaminação, estando cheia de gás, abaixo de uma camada superficial. Se apresentarem um diâmetro pequeno, são chamadas de poros. Caso contrário, são denominadas de vazios.

Cura insuficiente: quando o processo de cura é incompleto em alguma parte da resina, provocando redução nas propriedades mecânicas, principalmente, na dureza. Pode ser causada pela má escolha do catalisador ou por temperatura insuficiente durante a cura.

Capítulo 3

Preparação dos Corpos de Prova

Este capítulo aborda o método utilizado para a fabricação do material compósito utilizado para o desenvolvimento deste trabalho e a forma utilizada para extração dos corpos de prova que foram ensaiados.

3.1 – Montagem da Placa de Fibra de Vidro para Ensaio de Tração

Todo os materiais, equipamentos e processos de montagem da placa de fibra de vidro foram realizados dentro da instituição de ensino superior CEFET/RJ, no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES).

A placa de fibra de vidro foi feita por meio de processo de moldagem por contato manual, em que a tela de fibra de vidro unidirecional da marca Barracuda de modelo VEW 130/50, foi montada com dimensões de 290 X 290 mm. Essas telas foram empilhadas unidirecionalmente, num total de 3 camadas. Entre cada camada, foi utilizada o sistema de resina epóxi AMPREG 21 misturada antes da aplicação a um endurecedor A21 FAST, ambos da marca Barracuda, como mostrado na Figura 6. Foi utilizada a proporção de 100 g de resina para 33 g de endurecedor, que foi calculada com base no peso total das 3 camadas da fibra de vidro pré-moldagem e na indicação do fabricante. A substância foi misturada até obter uma textura homogênea, não apresentando mais de uma fase visível a olho nu, conforme mostra a Figura 7. Em todos os processos foram utilizadas luvas descartáveis, máscaras de proteção contra voláteis e o laboratório estava com janelas abertas para garantir uma melhor ventilação.



Figura 6: Sistema de resina epóxi.

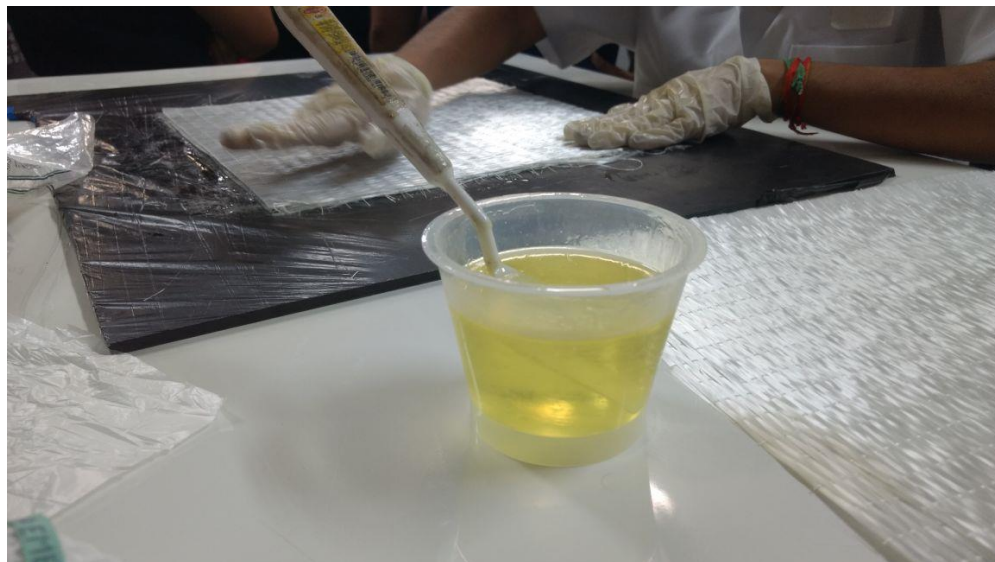


Figura 7: Resina após mistura e pronta para ser aplicada.

Após todas as camadas terem sido montadas, uma a uma, com a aplicação da resina, uma prensa hidráulica, mostrada na Figura 8, com controle de temperatura modelo SL - 12/20 da marca Solab foi utilizada para acelerar o processo de cura e garantir que a resina fosse

homogeneamente distribuída, obtendo uma placa de qualidade e propriedades superiores à de uma curada em condições atmosféricas normais. Este processo durou 6 horas e a prensa manteve a temperatura de 80°C.



Figura 8: Prensa hidráulica com controle de temperatura utilizada.

3.1.1 – Extração dos Corpos de Prova para Ensaio de Tração

Após a placa ter resfriado e chegado na temperatura ambiente, sua espessura foi medida com um paquímetro e apresentou um valor médio de 1,2 mm. A placa foi demarcada para obtenção de 15 corpos de prova retangulares nas dimensões de 0,5" X 8", com diferentes orientações a 0°, 45° e 90°, conforme mostrado nas Figuras 9 e 10.

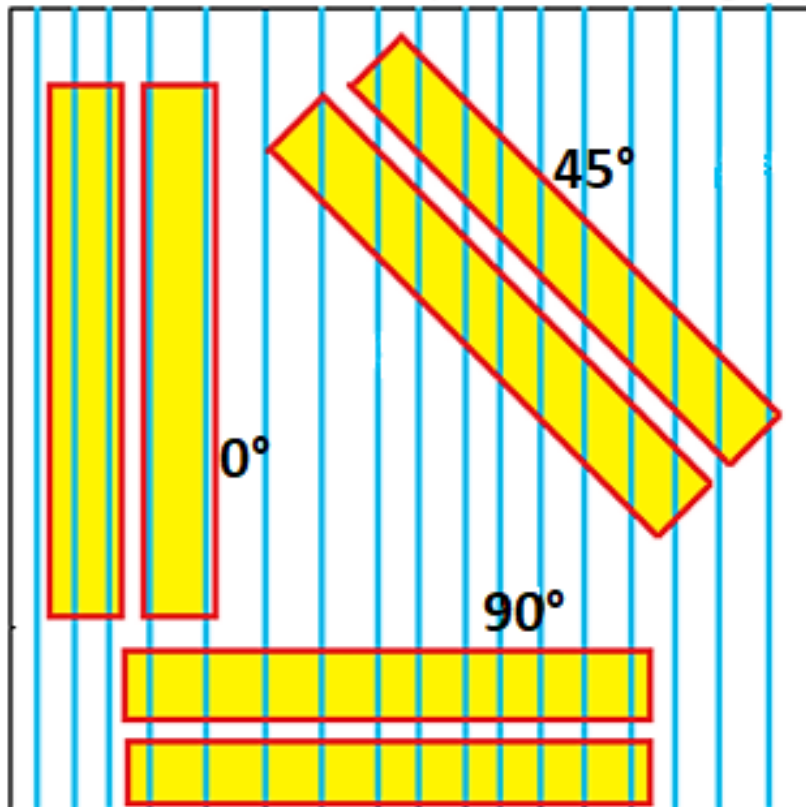


Figura 9: Esquema da extração dos corpos de prova na orientação das fibras a 0° , 45° e 90° .

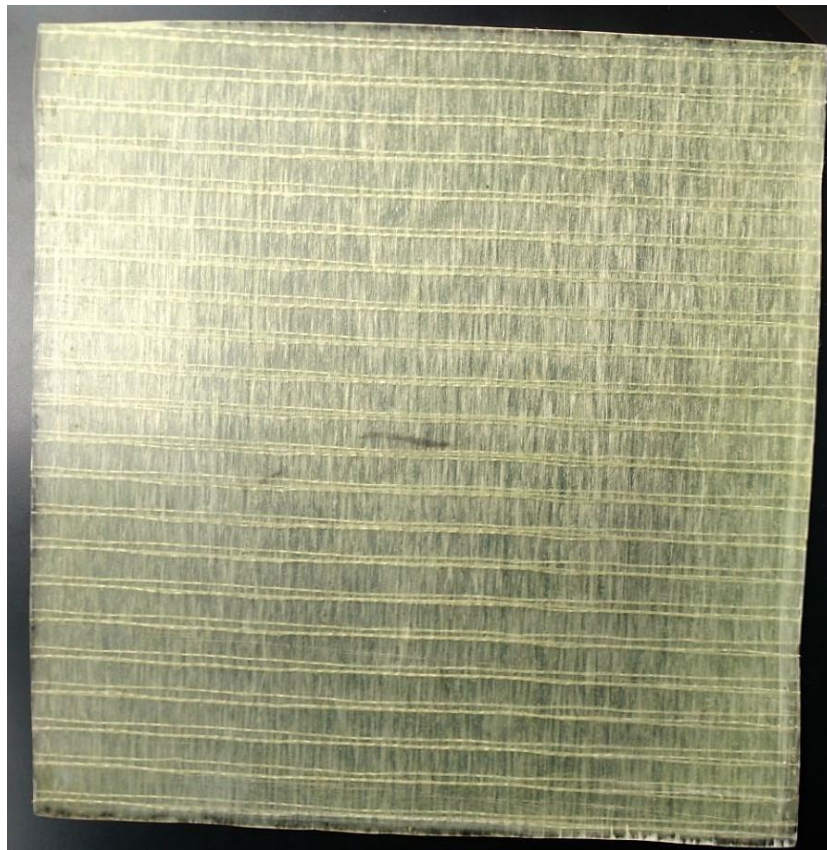


Figura 10: Placa de fibra de vidro montada para extração dos corpos de prova.

Para a extração dos corpos de prova, a placa foi fixada numa bancada e foi utilizada uma serra manual de aço rápido da marca Starrett com 24 dentes por polegada. Após a retirada dos corpos de prova foi utilizada uma lixa d'água P100 231Q da marca Wetordy para garantir o alinhamento e um melhor acabamento superficial das laterais e, em seguida, todos foram devidamente numerados para facilitar a identificação e controle durante os ensaios, como mostrado na Figura 11. Na limpeza dos corpos de prova, para retirar os resíduos provenientes do corte e lixamento, utilizou-se acetona, devido ao caráter higroscópico da fibra de vidro. Caso fosse feito o mesmo com água, isso poderia alterar as propriedades do material e comprometer a validade dos resultados dos ensaios.

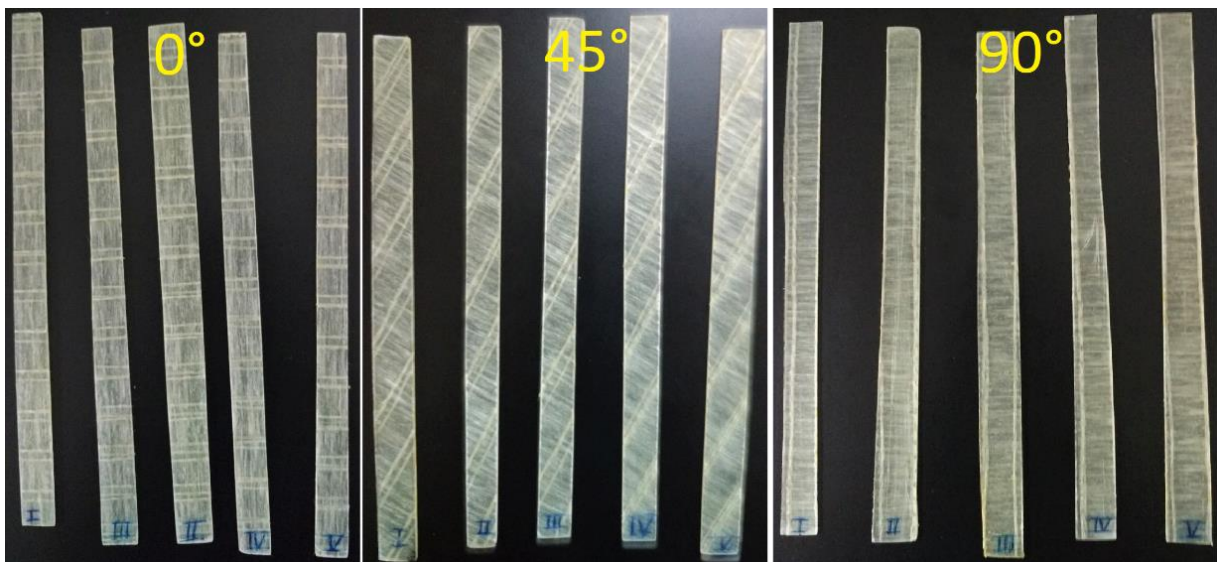


Figura 11: Corpos de prova prontos para serem ensaiados.

Os corpos de prova também foram medidos em 5 pontos diferentes ao longo de sua extensão com o auxílio de um paquímetro, para que uma média desses valores pudesse ser colocada como parâmetro na hora de realizar os ensaios com a máquina e obter resultados mais concisos. A Tabela 2 mostra esses valores.

Tabela 2: Medidas dos corpos de prova de ensaio de tração.

Medições	CP1 fibra 0°	CP2 fibra 0°	CP3 fibra 0°	CP4 fibra 0°	CP5 fibra 0°
Medida de largura 1 (mm)	11,76	12,75	12,54	11,05	11,36
Medida de largura 2 (mm)	11,87	13,18	12,35	11,14	10,82
Medida de largura 3 (mm)	11,45	13,84	11,59	11,39	10,76
Medida de largura 4 (mm)	11,22	13,83	10,82	11,63	10,51
Medida de largura 5 (mm)	11,10	13,33	10,78	10,14	10,32
Média das larguras (mm)	11,48	13,39	11,62	11,07	10,75
Desvio da média das larguras (mm)	0,27	0,36	0,66	0,38	0,27
Desvio padrão das larguras (mm)	0,33	0,46	0,83	0,57	0,39
Espessura 1 (mm)	1,64	1,62	1,26	1,13	1,09
Espessura 2 (mm)	1,51	1,72	1,14	1,10	1,12
Espessura 3 (mm)	1,36	1,63	1,23	1,09	1,09
Espessura 4 (mm)	1,30	1,88	1,40	1,08	1,04
Espessura 5 (mm)	1,24	1,79	1,42	1,00	1,25
Média das espessuras (mm)	1,41	1,73	1,29	1,08	1,12
Desvio médias das espessuras (mm)	0,13	0,09	0,10	0,03	0,05
Desvio padrão das espessuras (mm)	0,16	0,11	0,12	0,05	0,08
Medições	CP1 fibra 45°	CP2 fibra 45°	CP3 fibra 45°	CP4 fibra 45°	CP5 fibra 45°
Medida de largura 1 (mm)	13,16	11,01	11,86	12,09	13,58
Medida de largura 2 (mm)	13,62	11,74	11,85	12,36	14,11
Medida de largura 3 (mm)	14,17	12,02	11,65	12,99	14,70
Medida de largura 4 (mm)	14,05	12,24	11,96	13,11	14,86
Medida de largura 5 (mm)	13,54	12,05	12,45	13,16	14,98
Média das larguras (mm)	13,71	11,81	11,95	12,74	14,45
Desvio da média das larguras (mm)	0,32	0,35	0,20	0,41	0,48
Desvio padrão das larguras (mm)	0,41	0,48	0,30	0,49	0,59
Espessura 1 (mm)	1,76	1,40	1,44	1,28	1,24
Espessura 2 (mm)	1,81	1,25	1,33	1,26	1,26
Espessura 3 (mm)	1,57	1,30	1,57	1,23	1,23
Espessura 4 (mm)	1,28	1,38	1,45	1,23	1,23
Espessura 5 (mm)	1,44	1,26	1,21	1,34	1,30
Média das espessuras (mm)	1,57	1,32	1,40	1,27	1,25
Desvio médias das espessuras (mm)	0,17	0,06	0,10	0,03	0,02
Desvio padrão das espessuras (mm)	0,22	0,07	0,14	0,05	0,03

Medições	CP1 fibra 90°	CP2 fibra 90°	CP3 fibra 90°	CP4 fibra 90°	CP5 fibra 90°
Medida de largura 1 (mm)	11,79	12,13	13,00	13,37	14,64
Medida de largura 2 (mm)	12,27	12,40	12,79	13,07	14,24
Medida de largura 3 (mm)	11,30	13,30	13,58	12,24	13,19
Medida de largura 4 (mm)	11,20	14,00	14,09	11,14	12,41
Medida de largura 5 (mm)	11,71	14,40	13,76	10,99	12,92
Média das larguras (mm)	11,65	13,25	13,44	12,16	13,48
Desvio da média das larguras (mm)	0,32	0,69	0,44	0,88	0,77
Desvio padrão das larguras (mm)	0,43	0,98	0,54	1,08	0,93
Espessura 1 (mm)	1,16	1,44	1,16	1,19	1,19
Espessura 2 (mm)	1,27	1,27	1,32	1,31	1,29
Espessura 3 (mm)	1,20	1,12	1,38	1,20	1,20
Espessura 4 (mm)	1,08	1,33	1,14	1,12	1,10
Espessura 5 (mm)	1,38	1,29	1,54	1,25	1,43
Média das espessuras (mm)	1,22	1,29	1,31	1,21	1,24
Desvio médias das espessuras (mm)	0,09	0,08	0,13	0,05	0,09
Desvio padrão das espessuras (mm)	0,11	0,12	0,17	0,07	0,12

3.2 – Montagem da Placa de Fibra de Vidro para Ensaio de Flexão

Uma segunda placa de vidro foi montada utilizando o mesmo procedimento, materiais e itens de segurança já relatados no item 3.1. A única diferença seria o fato de possuir 5 camadas de fibra de vidro unidirecional, ao invés de 3 camadas. Isso foi feito visando atender os requisitos de espessura de acordo com a norma para ensaios de flexão.

3.2.1 – Extração dos Corpos de Prova para Ensaio de Flexão

Após a placa ter passado pelo processo de cura na prensa térmica e ter resfriado, foi observado que a mesma possui uma variação relativamente grande da espessura. Isso foi causado por conta de um desalinhamento da prensa do térmica do CEFET/RJ. Entretanto, decidiu-se demarcar a placa e retirar apenas 3 corpos de prova para cada uma das orientações de 0°, 45° e 90°, evitando a retirada dos corpos de prova nas extremidades da placa de fibra de vidro, que foram as áreas mais afetadas pelo desalinhamento. Os corpos de prova também foram cortados e lixados utilizando os mesmos procedimentos e equipamentos do item 3.1.1, inclusive, nas mesmas dimensões 0,5" x 8".

Foi feita a medição com o paquímetro das variações de espessura e largura, para um melhor controle do experimento, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3: Medidas dos corpos de prova de ensaio de flexão.

Medições	CP1 fibra 0°	CP2 fibra 0°	CP3 fibra 0°
Medida de largura 1 (mm)	11,14	12,62	13,11
Medida de largura 2 (mm)	11,19	12,75	13,25
Medida de largura 3 (mm)	11,01	13,84	13,27
Medida de largura 4 (mm)	11,05	13,83	13,19
Medida de largura 5 (mm)	11,18	13,33	12,98
Média das larguras (mm)	11,11	13,27	13,16
Desvio da média das larguras (mm)	0,07	0,47	0,09
Desvio padrão das larguras (mm)	0,08	0,58	0,12
Espessura 1 (mm)	1,67	1,50	1,76
Espessura 2 (mm)	1,77	1,59	1,84
Espessura 3 (mm)	1,91	1,70	1,97
Espessura 4 (mm)	1,79	1,62	1,65
Espessura 5 (mm)	1,55	1,51	1,51
Média das espessuras (mm)	1,74	1,58	1,75

Desvio médias das espessuras (mm)	0,10	0,06	0,13
Desvio padrão das espessuras (mm)	0,14	0,08	0,18
Medições	CP1 fibra 45°	CP2 fibra 45°	CP3 fibra 45°
Medida de largura1 (mm)	13,03	12,01	11,97
Medida de largura 2 (mm)	13,20	12,25	11,84
Medida de largura 3 (mm)	13,36	12,67	11,63
Medida de largura 4 (mm)	13,67	12,45	11,20
Medida de largura 5 (mm)	13,80	12,58	11,06
Média das larguras (mm)	13,41	12,39	11,54
Desvio da média das larguras (mm)	0,26	0,21	0,33
Desvio padrão das larguras (mm)	0,32	0,27	0,40
Espessura 1 (mm)	1,42	1,46	2,27
Espessura 2 (mm)	1,81	1,69	2,88
Espessura 3 (mm)	2,23	2,15	2,57
Espessura 4 (mm)	2,56	2,46	2,01
Espessura 5 (mm)	2,46	2,41	1,52
Média das espessuras (mm)	2,10	2,03	2,25
Desvio médias das espessuras (mm)	0,38	0,37	0,39
Desvio padrão das espessuras (mm)	0,48	0,44	0,52
Medições	CP1 fibra 90°	CP2 fibra 90°	CP3 fibra 90°
Medida de largura1 (mm)	12,53	13,35	13,46
Medida de largura 2 (mm)	12,92	13,71	13,67
Medida de largura 3 (mm)	12,88	14,03	13,20
Medida de largura 4 (mm)	13,03	13,68	13,01
Medida de largura 5 (mm)	12,61	13,34	13,26
Média das larguras (mm)	12,79	13,62	13,32
Desvio da média das larguras (mm)	0,18	0,22	0,20
Desvio padrão das larguras (mm)	0,21	0,29	0,25
Espessura 1 (mm)	1,88	1,51	1,44
Espessura 2 (mm)	2,18	1,69	1,57
Espessura 3 (mm)	2,10	1,84	1,42
Espessura 4 (mm)	1,88	1,95	1,30
Espessura 5 (mm)	1,65	1,90	1,26
Média das espessuras (mm)	1,94	1,78	1,40
Desvio médias das espessuras (mm)	0,16	0,14	0,09
Desvio padrão das espessuras (mm)	0,21	0,18	0,12

Capítulo 4

Realização dos Ensaios

Este capítulo aborda a definição dos ensaios de tração e flexão, os quais foram os ensaios utilizados durante a parte experimental desse trabalho e descreve as tentativas realizadas para o ensaio dos corpos de prova. Todos os ensaios de tração e de flexão foram realizados no laboratório de Compósitos e adesivos (Lades) do CEFET/RJ. Foi utilizada para a realização dos ensaios de tração, uma máquina de ensaio de bancada da marca Instron, com capacidade de carga de até 10 kN e garras do tipo recartilhada para o ensaio de tração. No ensaio de flexão foi utilizada a mesma máquina, mas com uma célula de carga de 1 kN.

4.1 – Ensaio de Tração

Em um ensaio de tração, um corpo de prova de dimensões padronizadas é tracionado uniaxialmente de forma gradativa, até que haja a ruptura do corpo de prova. Esse ensaio é muito comum na indústria, devido à sua simplicidade e possibilidade de obtenção de diferentes dados de propriedades mecânicas do material [9]. De modo geral, a seção reta dos corpos de prova é circular, mas seções retangulares também são muito utilizadas quando materiais compósitos são ensaiados, como neste trabalho.

Durante o ensaio foi obtido o gráfico carga-deslocamento registrado pela máquina durante o ensaio. A norma utilizada para conduzir os parâmetros dos ensaios foi a ASTM D3039, responsável por reger todos os parâmetros para os testes de tração em materiais compósitos de matriz polimérica.

4.1.1 – Ensaio de Tração com as Fibras a 0°, 45° e 90°

Os corpos de prova com orientação das fibras a 0°, 45° e 90° foram posicionados, um de cada vez, entre as garras na máquina de tração com a distância entre elas de 75 mm, conforme as Figuras 12 e 13. Essa distância foi calculada tendo em vista que pelo menos 50% do tamanho da garra tem que estar em contato com o corpo de prova, com o objetivo de evitar deslizamentos entre a garra e o material. Para os ensaios de tração estabeleceu-se a velocidade de deslocamento padrão de 2 mm/min, para todos os 15 ensaios, conforme a ASTM D3039.



Figura 12: Máquina de tração utilizada nos ensaios.



Figura 13: Posicionamento do corpo de prova na máquina de tração.

Foram utilizados 5 corpos de prova de cada orientação, para garantir resultados com condições válidas, como mostrado na Figura 14.

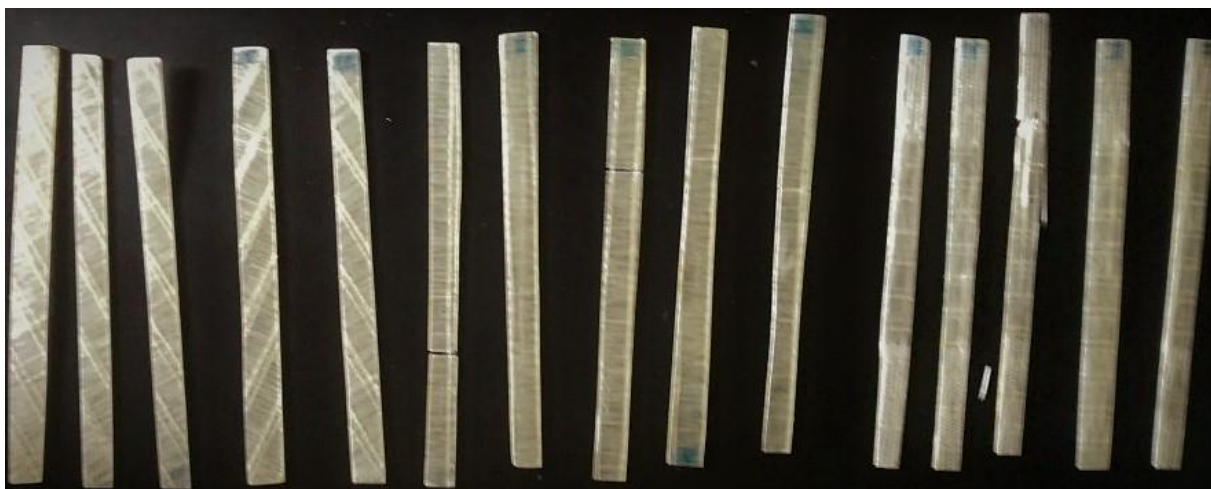


Figura 14: Corpos de prova após o ensaio.

Embora a fibra de vidro seja bem dura e apresente superfície lisa, os corpos de prova tinham uma espessura bem fina e as garras conseguiram dar um aperto suficiente ao ponto de evitar o escorregamento.

4.2 – Ensaio de Flexão

Pode-se afirmar que o ensaio de flexão é o teste de fácil execução e muito utilizado em materiais frágeis como cerâmicas, metais duros e polímeros. Consiste na aplicação de uma carga crescente a meio distância entre as extremidades do corpo de prova. Neste trabalho, foi utilizado o ensaio de flexão de 3 pontos, ou seja, um ponto de aplicação de carga e dois pontos de apoio.

A partir da utilização do transdutor de deslocamento da máquina de ensaio, foi possível medir a flecha máxima que o corpo de prova sofre até a sua ruptura. A parte superior do corpo de prova é comprimida, enquanto que a inferior, é tracionada durante o ensaio. A norma utilizada para conduzir os parâmetros dos ensaios foi a ASTM D790, responsável por reger todos os cuidados e parâmetros para os testes de flexão em materiais plásticos reforçados.

4.2.1 – Ensaio de Flexão com as Fibras a 0°, 45° e 90°

Foi a partir das dimensões de 0,5” x 8” que foi possível calcular a velocidade do ensaio de flexão, com base na seguinte equação da norma ASTM D790:

$$R = \frac{ZL^2}{6d} = \frac{(0,01)(100)^2}{6(12,7)} = 1,31 \text{ mm/min}$$

R: velocidade de ensaio [mm/min]

L: vão do suporte [mm]

d: largura da barra [mm]

Z: taxa de esforço da fibra externa. Z deve ser igual a 0,01 mm/mm/min.

Mesmo com o desalinhamento da prensa térmica que gerou diferentes espessuras ao longo dos corpos de prova, mostrados na Figura 15, não houve problemas no momento dos ensaios e todos foram realizados de forma bem-sucedida, conforme pode ser visto na Figura 16.



Figura 15: Corpos de prova antes do ensaio de flexão.

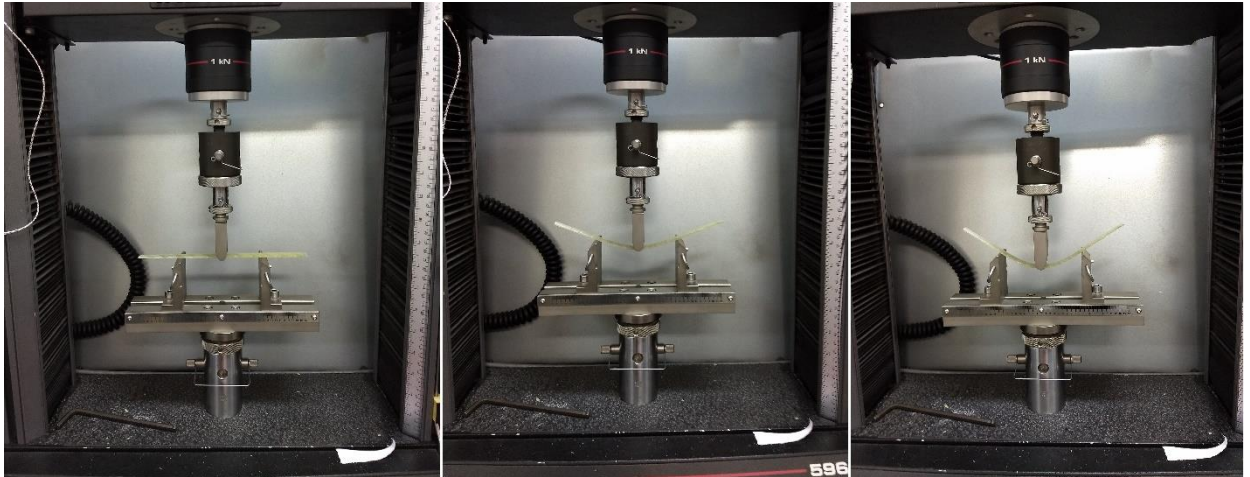


Figura 16: Ensaio de flexão.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

Este capítulo aborda os resultados dos ensaios mecânicos de tração e flexão realizados. Foi possível obter os valores da carga de ruptura e a tensão máxima, além da análise do tipo de fratura sofrida em cada experimento.

5.1 – Resultados do Ensaio de Tração com Fibras a 0°

Os primeiros corpos de prova a serem ensaiados foram os com orientação das fibras a 0°. Teoricamente, essa condição deveria ser a mais resistente, pois as fibras das camadas estão alinhadas na direção dos esforços de tração, sendo responsáveis pela maior parte da resistência à tração. A Tabela 4 mostra os resultados.

Tabela 4: Resultados do ensaio a 0°.

Corpo de prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Compr. Base (mm)	Carga Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Carga Ruptura (N)
CP 1	11,48	1,41	75,00	6839,11	422,51	6837,42
CP 2	13,39	1,73	75,00	7558,92	326,79	7171,20
CP 3	11,62	1,29	75,00	7144,23	476,77	6330,01
CP 4	11,07	1,08	75,00	6936,88	580,22	6933,51
CP 5	10,75	1,12	75,00	6729,53	559,72	6721,10
Número CPs	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Média	11,66	1,33	75,00	7042,00	473,20	6799,00
Desvio Padrão	1,02	0,26	0,00	326,90	103,60	309,90
Coef. Var.(%)	8,77	19,74	0,00	4,64	21,90	4,56
Mínimo	10,75	1,08	75,00	6730,00	326,80	6330,00
Máximo	13,39	1,73	75,00	7559,00	580,20	7171,00

A Figura 17 mostra as curvas força x deslocamento obtidas após a realização dos ensaios de tração dos corpos de prova.

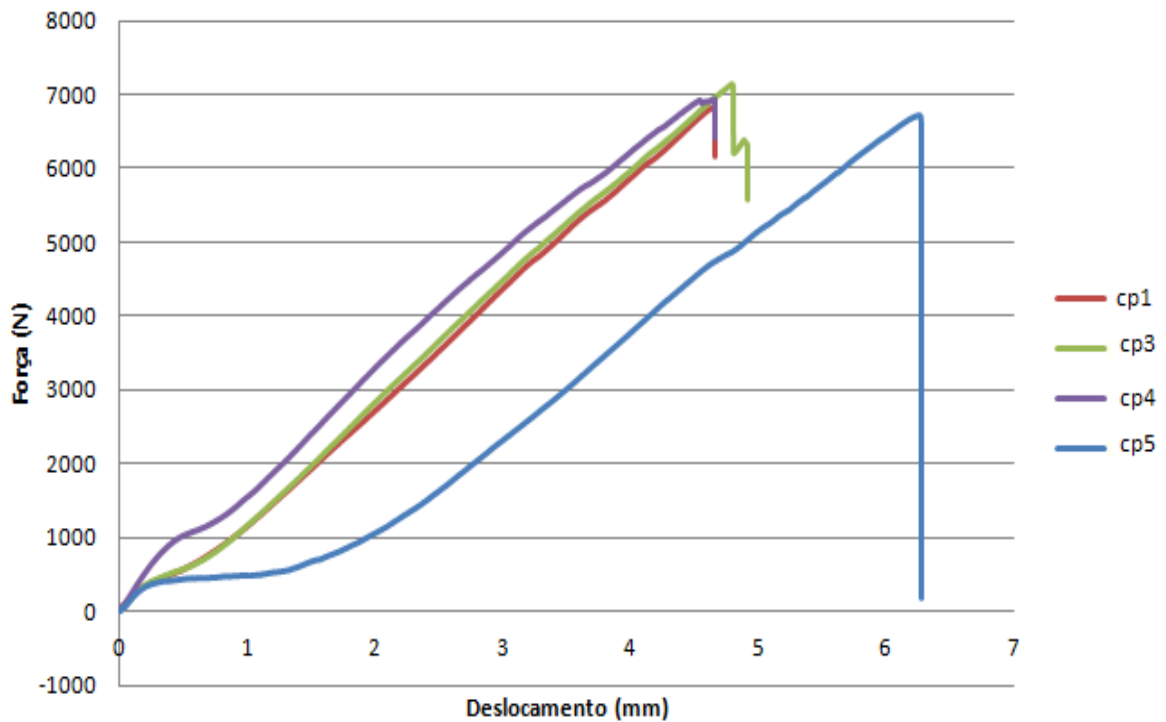


Figura 17: Gráfico Força x Deslocamento do ensaio de tração a 0°.

A curva do corpo de prova 2 foi retirada por apresentar característica discrepante em relação as demais. Isso ocorreu, provavelmente, devido ao corpo de prova 2 apresentar largura e espessura muito diferentes das demais.

Na Figura 18 mostram-se os valores de σ_1 , tensão paralela ao carregamento e consequentemente paralela a orientação das fibras.

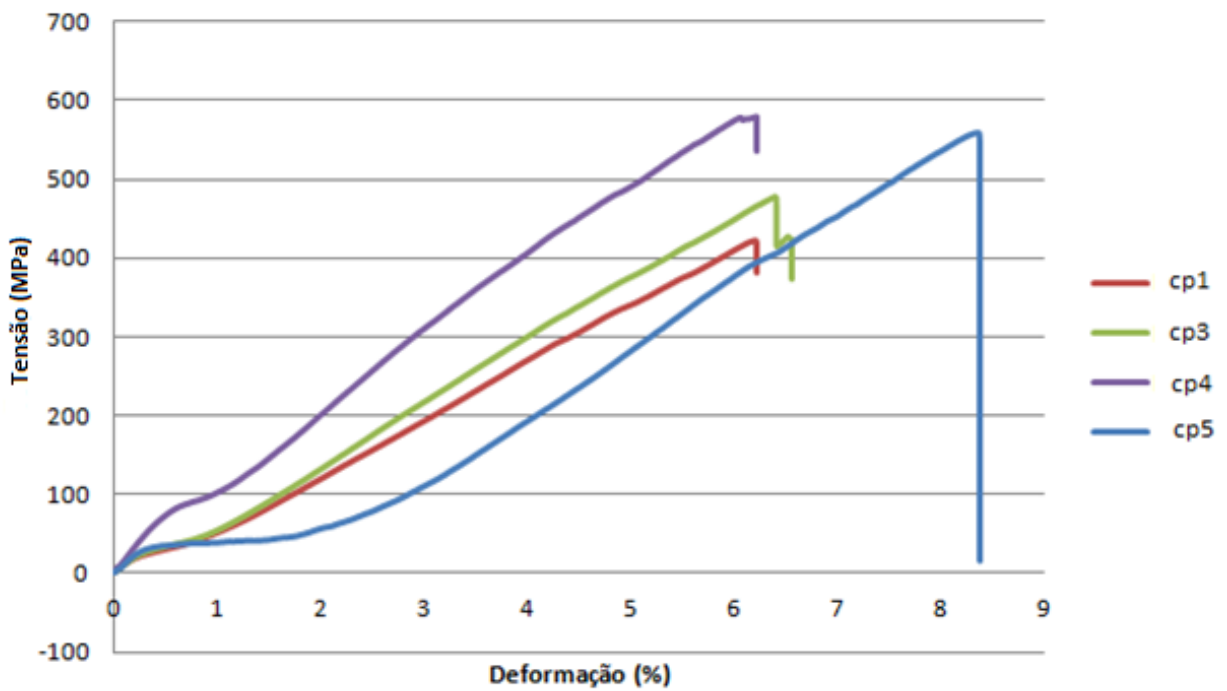


Figura 18: Gráfico Tensão x Deformação comparativo dos ensaios de tração a 0°.

O ensaio do corpo de prova 5, apresentou a maior deformação, quando comparado aos demais. Tanto o 5 quanto o 4, suportaram valores de tensão próximos, que foram superiores aos dos corpos de prova 1 e 3.

Percebe-se que existem dois tipos de falha do material. Na Figura 19A, não há a ruptura final do corpo de prova. Enquanto, a segunda falha, que é demonstrada pela Figura 19B, há a ruptura final do corpo de prova.

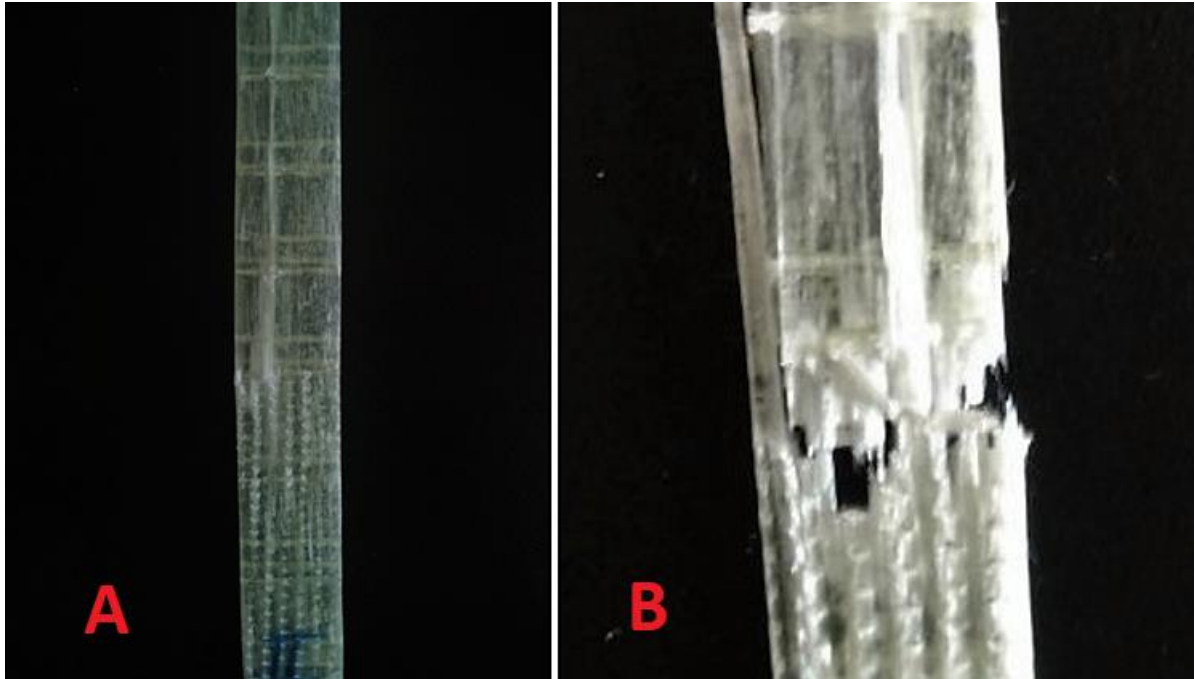


Figura 19: Dois tipos de falha nos corpos de prova a 0° no ensaio de tração.

Na primeira situação ocorre o deslocamento das fibras em relação a matriz, além da falha ser paralela a orientação das fibras. Ao passo que, no segundo caso, pediu-se ao operador que no ensaio do corpo de prova 5, o carregamento permanecesse até a ruptura final, diferentemente dos demais corpos de prova. Essas duas formas de falha são concorrentes e o deslocamento da fibra em relação a matriz tende a ocorrer antes da ruptura total das fibras.

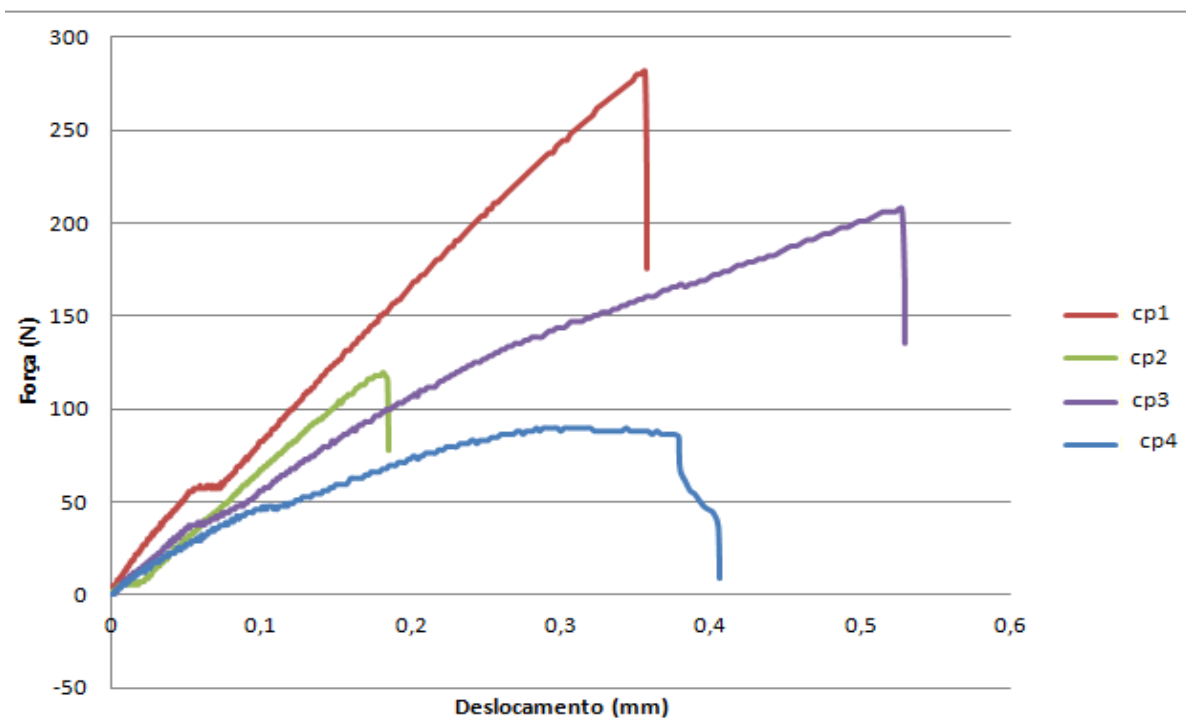
5.2 – Resultados do Ensaio de Tração com Fibras a 45°

Os corpos de prova com orientação das fibras a 45° foram o segundo grupo a ser testado. Era esperado uma resistência a tração inferior quando comparada com a do corpo de prova com orientação a 0° . Os resultados são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados do ensaio a 45°.

Corpo de prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Compr. Base (mm)	Carga Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Carga Ruptura (N)
CP 1	13,71	1,57	75,00	281,52	13,06	279,84
CP 2	11,81	1,32	75,00	119,69	7,69	118,00
CP 3	11,95	1,40	75,00	207,35	12,39	205,66
CP 4	12,74	1,27	75,00	89,34	5,53	43,83
CP 5	14,45	1,25	75,00	134,86	7,46	112,95
Número CPs	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Média	12,93	1,36	75,00	166,60	9,23	152,10
Desvio Padrão	1,13	0,13	0,00	77,53	3,31	91,66
Coef. Var.(%)	8,77	9,60	0,00	46,55	35,91	60,28
Mínimo	11,81	1,25	75,00	89,34	5,53	43,83
Máximo	14,45	1,57	75,00	281,50	13,06	279,80

A Figura 20 mostra as curvas força x deslocamento obtidas após a realização dos ensaios de tração dos corpos de prova.

**Figura 20:** Gráfico Força x Deslocamento do ensaio de tração a 45°.

A curva do corpo de prova 5 foi retirada por apresentar comportamento muito diferente das demais, pois a carga caiu bruscamente inicialmente, seguido por uma queda mais suave.

Na Figura 21 mostram-se os valores de tensão x deformação com as fibras formando um ângulo de 45° em relação ao carregamento externo.

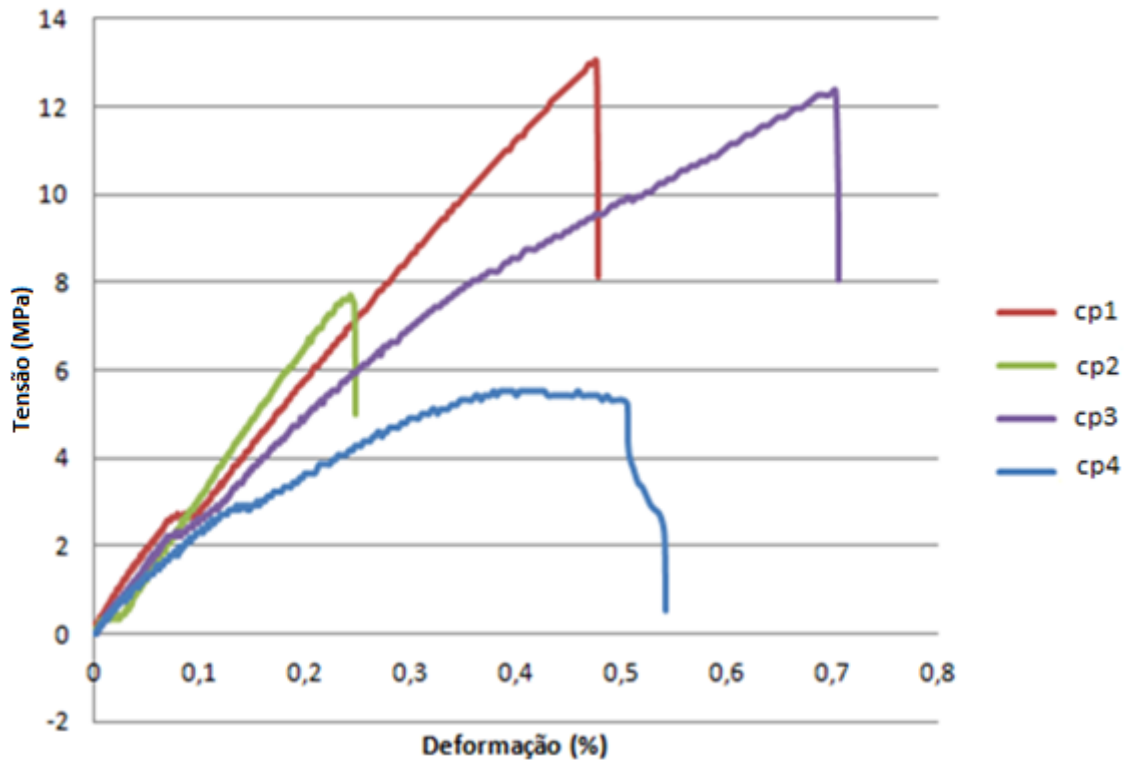


Figura 21: Gráfico Tensão x Deformação comparativo dos ensaios de tração a 45°.

Os corpos de prova 1 e 3 apresentaram valores maiores de tensão comparados com os corpos de prova 2 e 4. O corpo de prova 3, por sua vez, apresentou a maior deformação, enquanto o 4 a menor.

Enquanto o σ_1 é bem definido pela literatura, assim como o σ_2 , como será visto a seguir, o mesmo não ocorre para o carregamento a 45°. Isso é devido à uma complexidade maior com relação a interação entre matriz e reforço, o que dificulta a simplificação dos cálculos e definição.

Como esperado, houve uma queda significativa dos valores de tensão máxima dos corpos de prova de 45° em relação aos de 0°. Esse resultado deve-se ao fato das fibras não estarem mais alinhadas paralelamente ao carregamento externo. É mostrado o tipo de falha do corpo de prova após a realização do ensaio de tração na Figura 22.



Figura 22: Falha no corpo de prova a 45° no ensaio de tração.

Durante o ensaio ocorre o surgimento de uma trinca que leva à ruptura total do corpo de prova. Essa trinca formada é paralela a orientação das fibras, ou seja, forma um ângulo de 45° em relação ao carregamento.

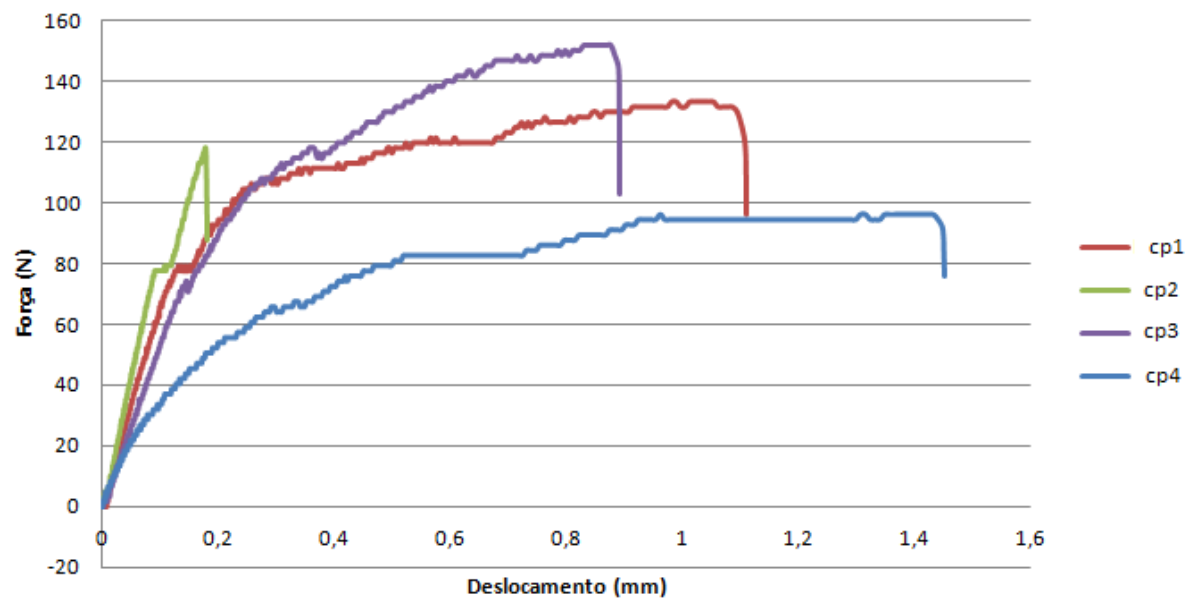
5.3 – Resultados do Ensaio de Tração com Fibras a 90°

Por último foram realizados os ensaios nos corpos de prova com orientação das fibras a 90° . Foi o ensaio com a menor resistência, isso se deve ao fato das fibras estarem perpendiculares a direção a qual está sendo exercida a carga, ou seja, as fibras não apresentam influência alguma neste ensaio. Logo, o que acaba por ser testado é a resistência da resina epóxi (matriz) utilizada para a montagem da placa que deu origem aos corpos de prova. A Tabela 6 mostra o resultado desses ensaios.

Tabela 6: Resultados do ensaio a 90°.

Corpo de prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Compr. Base (mm)	Carga Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Carga Ruptura (N)
CP 1	11,65	1,22	75,00	133,17	9,38	129,80
CP 2	13,25	1,29	75,00	118,00	6,91	118,00
CP 3	13,44	1,31	75,00	151,72	8,63	148,35
CP 4	12,16	1,21	75,00	96,09	6,51	82,60
CP 5	13,48	1,24	75,00	119,69	7,15	118,00
Número CPs	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Média	12,80	1,25	75,00	123,70	7,72	119,40
Desvio Padrão	0,84	0,04	0,00	20,53	1,23	24,00
Coef. Var.(%)	6,53	3,39	0,00	16,59	15,93	20,11
Mínimo	11,65	1,21	75,00	96,09	6,51	82,60
Máximo	13,48	1,31	75,00	151,70	9,38	148,30

Na Figura 23 são mostradas as curvas de tensão x deformação com as fibras formando um ângulo de 90° em relação ao carregamento externo.

**Figura 23:** Gráfico Força x Deslocamento do ensaio de tração a 90°.

Na Figura 24 mostram-se os valores de σ_2 , tensão paralela ao carregamento e formando um ângulo de 90° em relação a orientação das fibras.

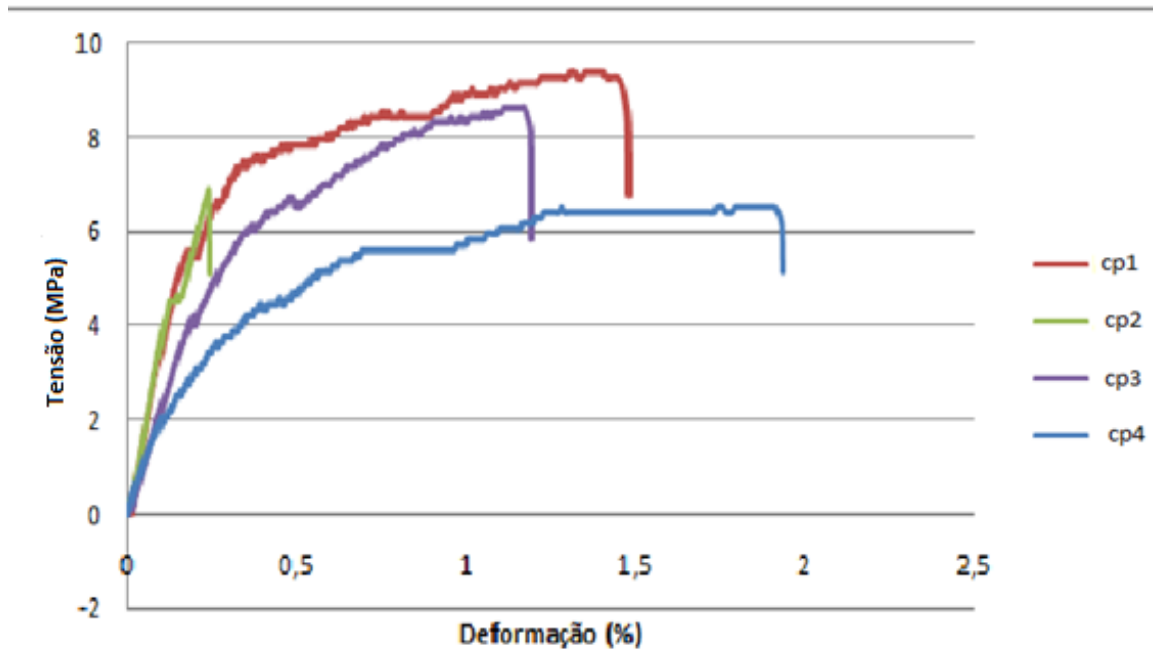


Figura 24: Gráfico Tensão x Deformação comparativo dos ensaios de tração a 90°.

A curva que representa o comportamento do corpo de prova 5, foi retirada por estar muito fora do padrão comparada com as demais. Uma explicação provável para o ocorrido é o fato das dimensões da largura e espessura deste corpo de prova serem bem diferentes dos demais, assim influenciando no valor da área de seção transversal.



Figura 25: Falha no corpo de prova a 90° no ensaio de tração.

Após o ensaio percebeu-se que ocorreu a ruptura total do corpo de prova e a falha é paralela a orientação das fibras, ou seja, formando um ângulo de 90° com o carregamento externo.

5.4 – Resultados do Ensaio de Flexão com Fibras a 0°

Os primeiros corpos de prova ensaiados foram os com orientação das fibras a 0°. O gráfico dos ensaios dos três corpos de prova pode ser visto na Figura 26.

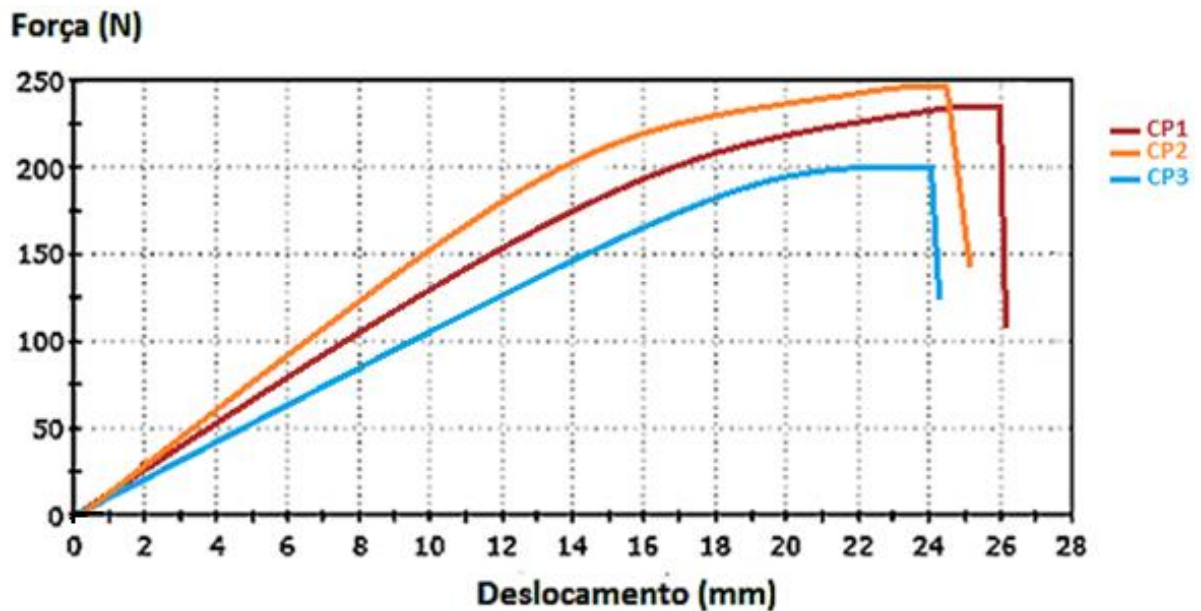


Figura 26: Gráfico da Força x Deslocamento do ensaio de flexão a 0°.

Os 3 corpos de prova apresentaram um comportamento parecido durante os ensaios, rompendo com deslocamentos transversais próximos e sem uma diferença muito expressiva na carga de ruptura. Como esperado, foram os que suportaram as maiores cargas, além de também apresentar os maiores deslocamentos transversais, quando comparados com os corpos de prova a 45° e a 90°.

Na Figura 27 é mostrada o tipo de falha que ocorre no corpo de prova a 0° durante o ensaio de flexão.



Figura 27: Falha no corpo de prova a 0° no ensaio de flexão.

A falha ocorre devido à quebra das fibras, perpendicular ao carregamento. Deve-se também levar em conta que o cutelo, de raio de curvatura de 8 mm, do teste de flexão de três pontos influenciou na falha final.

5.5 – Resultados do Ensaio de Flexão com Fibras a 45°

Os corpos de prova com orientação das fibras a 45° foram ensaiados após os com orientação a 0° . A Figura 28 mostra o resultado gráfico do ensaio para os três corpos de prova.

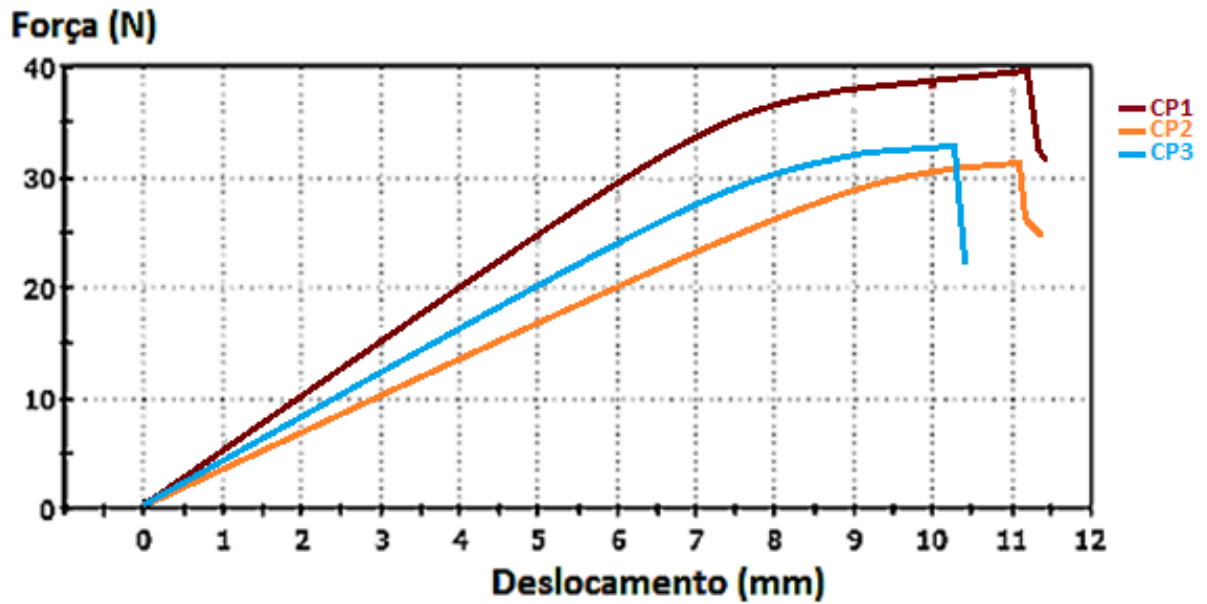


Figura 28: Gráfico da Força x Deslocamento do ensaio de flexão a 45°.

A carga máxima suportada ficou entre 30 e 40 N, ao passo que, os deslocamentos transversais máximos variaram entre 10 e 12 mm. Os corpos de prova a 45° suportaram uma carga bem menor do que os a 0°, além de terem deslocamentos transversais menores também.

Na Figura 29 mostra-se o tipo de falha do corpo de prova a 45°.



Figura 29: Falha no corpo de prova a 45° no ensaio de flexão.

Durante a realização do ensaio, houve a formação de uma trinca que levou o corpo de prova a falhar, em que tal falha ocorre na mesma orientação das fibras, ou seja, formando um ângulo de 45° com o carregamento externo.

5.6 – Resultados do Ensaio de Flexão com Fibras a 90°

Este foi o ensaio que apresentou os menores valores médios de carga máxima e de deslocamento transversal. A Figura 30 mostra esses resultados.

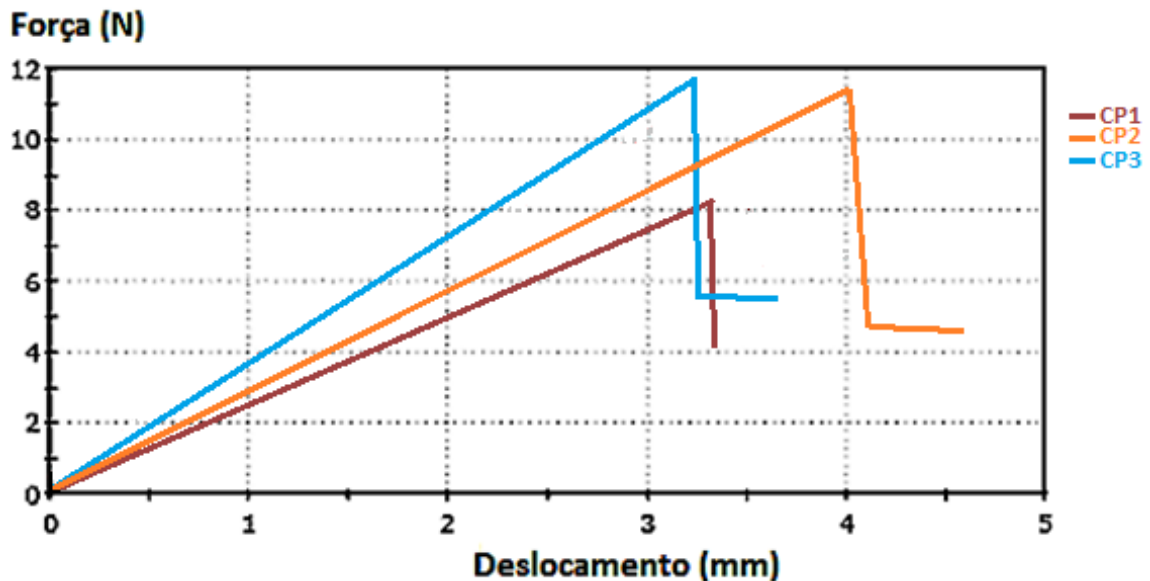


Figura 30: Gráfico da Força x Deslocamento do ensaio de flexão a 90° .

Como as fibras estão orientadas a 90° em relação ao esforço, a matriz de epóxi que é a responsável, neste caso, pela resistência ao carregamento trativo, o que explica esses valores tão baixos de deslocamento transversal e de resistência a carga aplicada.

Na Figura 31 é mostrada o corpo de prova após a realização do ensaio de flexão e a trinca formada, responsável por levar o corpo de prova até a sua falha.

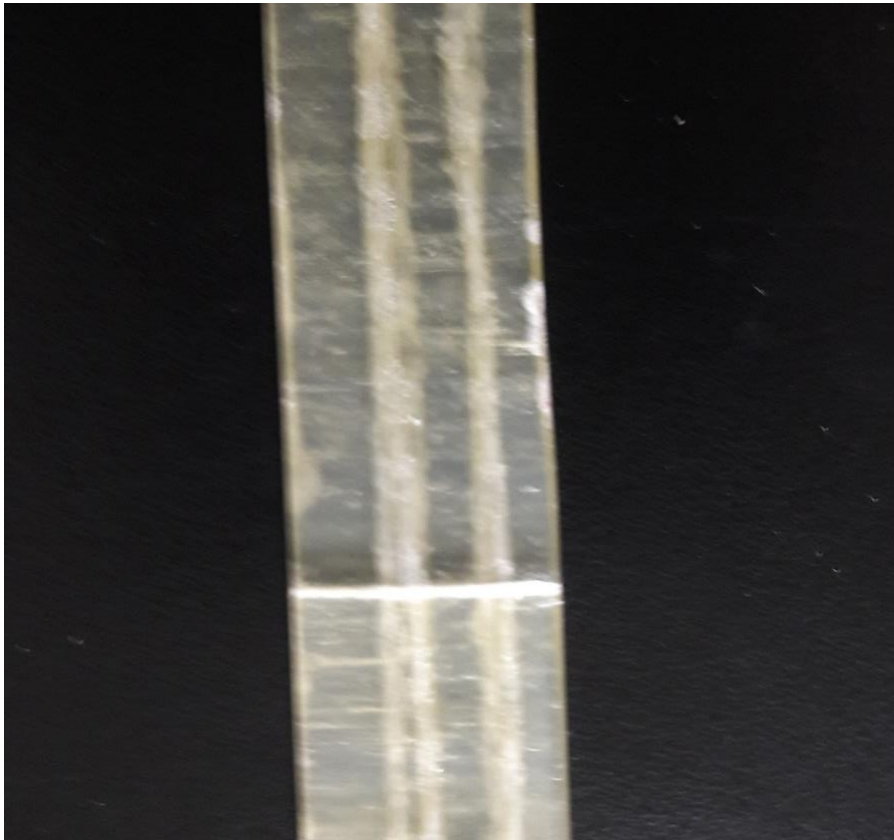


Figura 31: Falha no corpo de prova a 90° no ensaio de flexão.

Durante a realização do ensaio há a formação de uma trinca que levou à fratura. Essa fratura, por sua vez, possui a mesma direção das fibras presentes no corpo de prova.

5.7 – Comparação dos Resultados

Pode-se observar um desvio padrão relativamente alto, especialmente no ensaio das fibras com orientação a 0° , o que não tem nenhuma relação com as propriedades da matriz. No caso das solicitações de tração uniaxiais, as propriedades das fibras é que interferem diretamente na resistência estática.

Analisando os gráficos gerados pelos ensaios de tração, na Figuras 18, 21 e 24, é notável a diminuição da resistência mecânica com o aumento do ângulo de orientação das fibras em relação ao carregamento.

Com os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados, foi evidenciado que os corpos que possuíam as fibras formando ângulo de 0° com o carregamento externo apresentaram o melhor desempenho mecânico quanto aos valores de tensão mecânica suportada e de deformação percentual dos corpos de prova e que tal discrepância não é visualizada entre os corpos de prova com as fibras nas orientações de 45° e 0° , como pode ser visto de acordo com a Tabela 7 e na Figura 32.

Tabela 7: Comparação das tensões e deformações máximas nas orientações de 0° , 45° e 90° .

Orientação das Fibras	Média das Tensões Máximas (MPa)	Média das Deformações Máximas (%)
0°	473,20	6,84
45°	9,23	0,49
90°	7,72	1,21

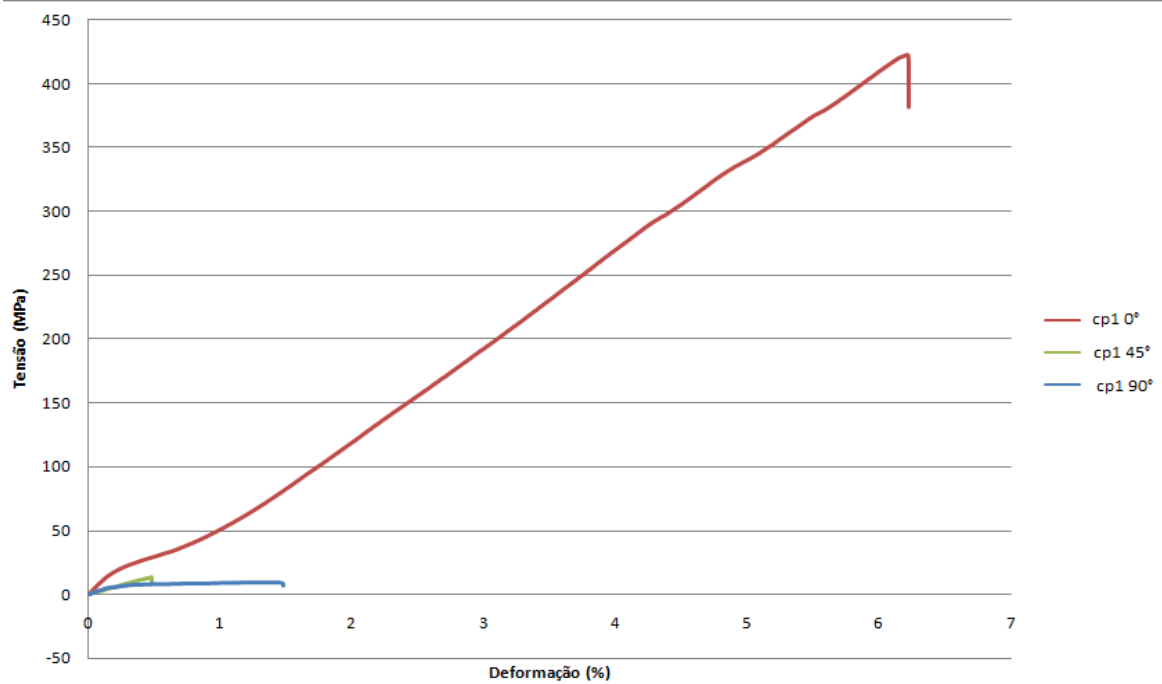


Figura 32: Gráfico Tensão x Deformação comparativo dos ensaios de tração.

Os corpos de prova com a orientação das fibras em 45° apresentaram, surpreendentemente, deslocamentos e deformações inferiores aos dos de 90° durante os ensaios de tração, o que não se repete durante os ensaios de flexão, como é mostrado nas Tabelas 8 e 9 e nas Figura 33 e 34.

Tabela 8: Comparação das médias dos deslocamentos máximos dos corpos com as fibras de 45° e 90° nos ensaios de tração e flexão.

Orientação das Fibras	Média dos Deslocamentos Máximos em Tração (mm)	Média dos Deslocamentos Máximo em Flexão (mm)
45°	0,37	11,09
90°	0,91	3,92

Tabela 9: Comparação das médias das deformações máximas dos corpos com as fibras de 45° e 90° nos ensaios de tração.

Orientação das Fibras	Média das Deformações Máximas (%)
45°	0,49
90°	1,21

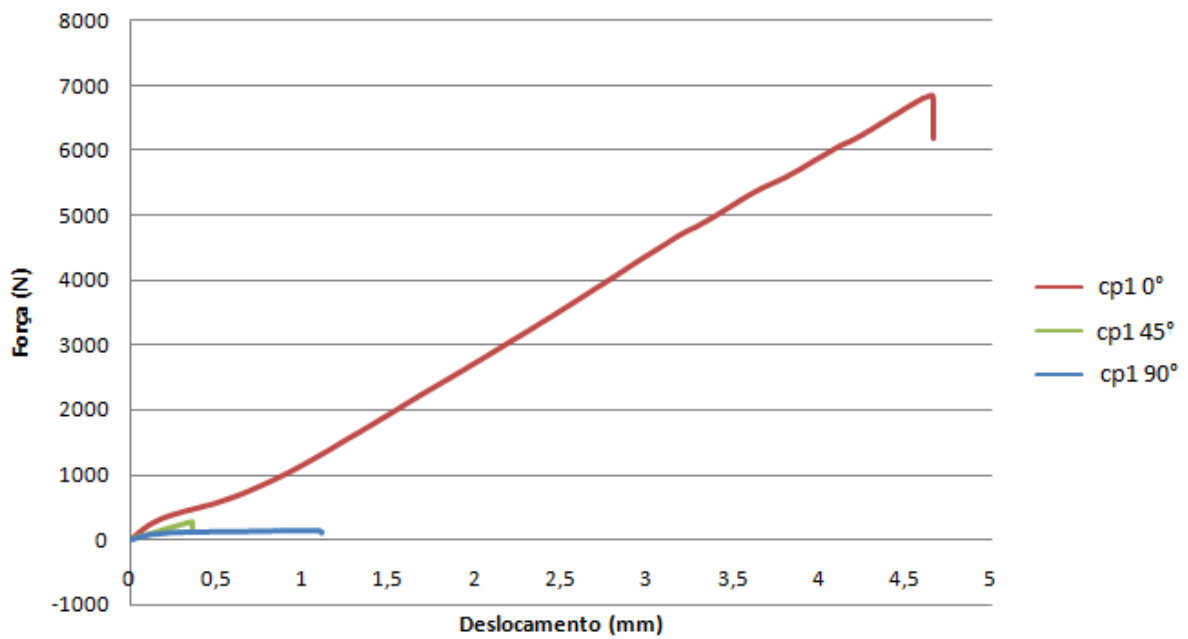


Figura 33: Gráfico comparativo Força x Deslocamento do ensaio de tração.

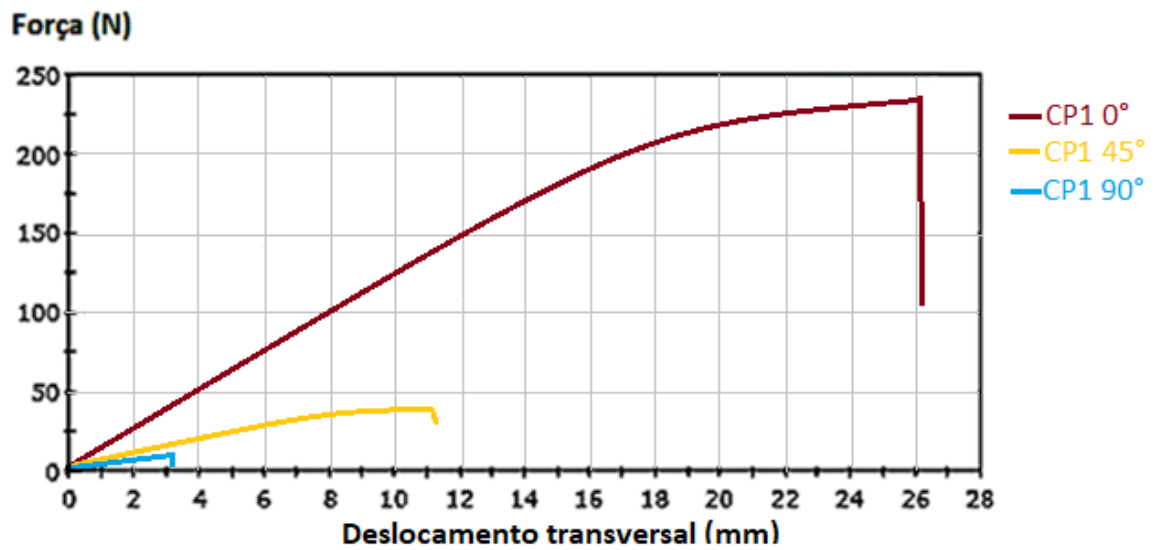


Figura 34: Gráfico comparativo Força x Deslocamento transversal do ensaio de flexão.

Capítulo 6

Conclusão

Com os resultados dos ensaios de tração realizados pode-se notar que a resistência a ruptura está diretamente ligada com a orientação das fibras. Ficou claro que os corpos de prova com orientações a 0° , quando submetidos a uma carga longitudinal, são muito mais resistentes dos que os a 45° , que, por conseguinte, apresentam maior resistência que os a 90° .

Constata-se que para os ângulos de orientação baixos, próximos a 0° , o reforço (as fibras) exerce uma influência majoritária nas propriedades mecânicas, fazendo com o que o corpo de prova suporte cargas de ruptura muito maiores. Já no caso dos ângulos próximos a 90° , a grande responsável pelas propriedades mecânicas do compósito é a matriz polimérica, pois as fibras estão mais afastadas da direção onde a força de tração está sendo aplicada.

Foi importante constatar que, embora já fosse esperado que a fibra com orientação a 0° possuísse uma resistência a carregamentos trativos superior quando comparada com as fibras a 45° e 90° , não era aguardado que essa queda fosse tão significativa. Este fato demonstra claramente o caráter ortotrópico da fibra de vidro. Essa ortotropia do material precisa ser considerada em projetos de engenharia que utilizem compósitos reforçados por fibra de vidro, pois apesar deles agregarem grandes vantagens com a redução de peso estrutural, podem apresentar grandes falhas dependendo da direção do carregamento a que forem expostos, comprometendo a segurança de um projeto.

Capítulo 7

Sugestões Para Trabalhos Futuros

- Testar corpos de prova em outras orientações, além de 0° , 45° e 90° ;
- Utilização de métodos mais precisos para a extração dos corpos de prova, que garantam um melhor controle dimensional;
- Microscopia ótica dos corpos de prova ensaiados, para melhor visualização das características das fraturas quando os corpos sofrem a ruptura;
- Uso de extensômetros elétricos para obtenção de dados de deformação.

Bibliografia

- [1] BARROS, J.A.O. Conceitos básicos da teoria da elasticidade. Azurém: UM, 2004. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1822/13006>>. Acesso em: 23 mai. 2017.
- [2] FOREST PRODUCTS LABORATORY. Wood Handbook. Abr. 2010. Disponível em: <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2017.
- [3] CALLISTER, W. D., *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*, 5 ed., Rio de Janeiro, LTC, 2002.
- [4] DANIEL, I. M.; ISHAI, O., *Engineering Mechanics of Composite Materials*, 1 ed., New York, Oxford University Press, 1994.
- [5] JOHNSTON, C. D. *Fibre-reinforced cement and concrete*. In: V. M. Malhorta. *Advances in concrete technology*. 2 ed., V. M. Malhotra, 1994.
- [6] DE MOURA, M. S. F. S.; DE MORAIS, A. B.; DE MAGALHÃES, A. G., *Materiais Compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, 2 ed, Porto, Publindústria, 2011.
- [7] MOREIRA, A. M. **Materiais de Construção I**. Tomar: IPT, 2008. Disponível em: <http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2932__Compositos_MC1.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2017.
- [8] DA SILVA, H. P.; *Comportamento Mecânico De Compósitos De Fibra De Vidro/Epoxy Nano-Reforçados*, Tese de D.Sc., Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2014.
- [9] GARCIA, A.; SPIM, J. A.; DOS SANTOS, C. A.; *Ensaio dos Materiais*, 2 ed. , Rio de Janeiro, LTC, 2012.

Anexo – A: Ficha de Dados da Resina Ampreg 21

Descrição

Sistema de resina epóxi de alta performance Ampreg21, de baixa viscosidade e ideal para a laminação manual, vaccum bag e infusão a vácuo. O sistema AR21 foi desenvolvido no Reino Unido com distribuição exclusiva para a Barracuda Advanced Composites. O sistema possui disponibilidade de endurecedores slow e fast, com proporção de mistura de 100:33 e que apresenta excelentes propriedades mecânicas quando curado à temperatura ambiente. Se o sistema for pós curado durante 6 horas à 80°C, ele proporciona extrema resistência mecânica e módulo de elasticidade que dificilmente outro sistema de resinas epóxi pode proporcionar. À temperatura de 25°C o tempo de laminação do sistema varia de 30 a 75 minutos, dependendo do endurecedor escolhido.

Propriedades dos Componentes			
	Resina	Endurecedor	
		Fast	Slow
Relação da mistura (por peso)	100	33	33
Viscosidade @ 20°C (cP)	2870	1222	121
Viscosidade @ 25°C (cP)	1562	762	90
Viscosidade @ 30°C (cP)	901	560	66
Cor (Índice Gardner)	2	5	7
Densidade do componente (g/cm3)	1,135	1,018	1,007
Densidade da mistura (g/cm3)	-	1104	1100

Propriedades de Trabalho		
	Resina/Endurecedor Fast (@25°C)	Resina/Endurecedor Slow (25°C)
Viscosidade da mistura inicial	1194	481
Tempo gel-150g de mist. na água(hrs:mins)	00:30:00	01:41:00

Propriedades do Sistema Curado		
	Resina / Endurecedor Fast (@25°C)	Resina / Endurecedor Slow (25°C)
Tg Ult - DMTA (°C)	98,4	106,3
Est. HDT (°C) 77 67 66 74 73	63	48
Densidade curada (g/cc)	1,183	1,159
Redução linear (%)	1,60	1,60
Resist. à tração do molde de resina	84,90	58,30
Mód. tração do molde de resina(GPa)	3,91	3,75
Deform. p/ falha molde de resina(%)	3,20	1,80

*Pós curado (24 hrs @ 21°C + 16hrs @ 50°C)

Anexo – B: Ficha de Dados do Tecido de Fibra de Vidro VEW 130

Descrição

Tecido unidirecional híbrido (0 graus) de fibra de vidro produzido com exclusividade nos USA para a Barracuda Advanced Composites. Utilizando a trama Unidirecional em fibra de vidro com filamentos transversais em termoplástico. O tecido VEW130 produz um laminado altamente resistente com quase a totalidade dos fios correndo longitudinalmente ao tecido. Com peso nominal de 450 g/m², ele tem uma espessura de 0,42 mm, sendo ideal para laminados de alta resistência unidirecional com alta qualidade de acabamento superficial. O tecido VEW130 com 600 mm de largura é compatível com resinas epóxi, estervinílica e poliéster, podendo ser laminado manualmente ou com auxílio de um vacuum bag. O tecido VEW130 é embalado em tubos de 60 mm.

Informações Técnicas	
Tipos de fibra	Fibra de vidro E
Tipo de trama	Unidirecional
Peso total	450g/m ²

Peso do laminado

	Unidade	Infundido	Molde Aberto
Fibra	Kg/m ²	0,64	0,64
Resina	Kg/m ²	0,29	0,54
Total	Kg/m ²	0,93	1,17

Propriedades físicas

	Unidade	Infundido	Molde Aberto
Densidade	g/cm ³	1,85	1,65
Porcentagem de fibra	%/peso	69%	53%
Espessura	mm	0,02	0,029

Tensão máxima

(MPa)	Infundido	Molde Aberto
Tração longitudinal	682,58	496,42
Compressão longitudinal	682,58	496,42
Tração transversal	220,63	158,58
Compressão transversal	220,63	158,58
Cisalhamento no plano	103,42	75,84
Flexão longitudinal	689,48	496,42
Flexão transversal	206,84	151,68

Módulo de elasticidade

(GPa)	Infundido	Molde Aberto
Ex	36,13	26,27
Ey	11,03	8,00
Gxy	5,24	3,65
Ex, flexão	34,34	24,96
Ey, flexão	10,48	7,58