

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

**Estudo Experimental das Propriedades  
Mecânicas para Compósito em Fibra de  
Carbono e Matriz Epóxi Pipefix (CFRP –  
Carbon Fiber Reinforced Polymer)**

Clayton Pereira da Silva Santos

Jorge Ricardo Ribeiro Bichara

Prof.: Orientador: Hector Reynaldo Meneses Costa

Co-Orientador: Silvio Romero de Barros

**Rio de Janeiro**

**Junho de 2015**

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

**Estudo Experimental das Propriedades  
Mecânicas para Compósito em Fibra de  
Carbono e Matriz Epóxi Pipefix (CFRP –  
Carbon Fiber Reinforced Polymer)**

Clayton Pereira da Silva Santos

Jorge Ricardo Ribeiro Bichara

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: Hector Reynaldo Meneses Costa

Co-Orientador: Silvio Romero de Barros

**Rio de Janeiro**

**Junho de 2015**

Estudo Experimental das Propriedades Mecânicas para Compósito em Fibra de Carbono e Matriz Epóxi Pipefix (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer) —2015

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2015.

Orientador: Hector Reynaldo Meneses Costa

Co-Orientador: Silvio Romero de Barros

## **DEDICATÓRIA**

Dedicamos primeiramente a Deus que nos honrou e nos carregou em todos os momentos difíceis de nossas vidas. Também agradecemos a nossas famílias e, em especial aos nossos pais, que sempre batalham com muita força para nos ajudar a seguir em frente.

Dedicamos também aos professores: Hector Reynaldo Meneses Costa, Ricardo Amar (que acreditaram em nossa empreitada para realização deste trabalho de conclusão de curso, atenciosos e solícitos em suas colocações) e Silvio de Barros (que proporcionou o viés experimental deste trabalho, abraçando a causa e nos ajudando com suas orientações).

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus, meus pais e à minha noiva Alana Mendes (minha preta), que com seu amor e carinho adoçou a minha vida no amargor dos períodos difíceis da faculdade. Agradeço aos amigos que fiz durante minha passagem pelo CEFET-RJ, pois com eles estudei, aprendi, ri e também chorei, me tornando assim, uma pessoa melhor. Por fim, agradeço a todos os professores da minha querida instituição, pois sem eles não seria possível o desenvolvimento desta monografia.

**Clayton Pereira da Silva Santos**

Não tenho palavras para medir minha gratidão com Deus, pois em todas as adversidades Ele demonstrou-se fiel, sendo o verdadeiro apoio de toda a minha trajetória. Agradeço muito a minha família que sempre me ajudou, aos meus grandes amigos e a minha namorada Christiane, uma companheira única que me deu toda a compreensão, carinho e amor.

**Jorge Ricardo Ribeiro Bichara**

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o estudo experimental dos materiais compósitos do tipo (CFRP - Carbon Fiber Resin Polymer). Conforme crescente aplicabilidade e importância desses materiais para a engenharia (sobretudo no setor aeronáutico) foram abordados neste projeto conceitos importantes como: composição das fases, processos de fabricação, micro e macromecânica, estudo das principais normas experimentais aplicáveis para propriedades mecânicas, lei das misturas e sua aplicação como mecanismo investigador de propriedades mecânicas, e por fim, a realização de ensaios mecânicos de tração e flexão em conformidade a norma ASTM para estudo do comportamento desses materiais do ponto de vista da engenharia mecânica.

**Palavras-chave:** compósitos, lei das misturas, ensaios mecânicos.

## ABSTRACT

This work aims to study the composite type materials (CFRP - Carbon Fiber Resin Polymer). As increasing applicability and importance of these materials for engineering (especially in the aircraft industry) will be addressed in this project important concepts such as phase composition, manufacturing processes, micro and macro mechanics, law of mixtures and its application as a researcher mechanism of mechanical properties, and finally, the tensile and flexure testing in accordance with ASTM standards for study of behavior of these materials from the mechanical engineering point of view.

**Keywords:** composites, law of mixtures, mechanical tests.

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	13
1.1 Considerações iniciais .....	13
1.2 Motivação.....	14
1.3 Objetivos .....	14
1.4 Organização.....	15
2. Revisão Bibliográfica.....	16
2.1 Vantagens e desvantagens dos materiais compósitos.....	16
2.2 Caracterizações do material compósito.....	17
2.2.1 Matriz .....	18
2.2.2 Reforço ou Carga .....	19
2.3 Processos de fabricação.....	21
2.3.1 Moldagem Manual e por Compressão.....	23
2.3.2 Moldagem por injeção.....	23
2.3.3 Autoclave .....	24
2.3.4 Enrolamento Filamentar .....	25
2.3.5 Processo de Pultrusão.....	26
2.3.6 Moldagem por centrifugação .....	26
2.3.7 Visão geral acerca dos processos de fabricação .....	26
2.4 Estudo da Micro e Macromecânica.....	27
2.4.1 Micromecânica da camada .....	27
2.4.2 Macromecânica da camada .....	29
2.5 Compósitos multidirecionais.....	32
2.6 Ensaio Mecânicos .....	33
2.7 Ensaio Experimentais e Constantes de Engenharia .....	34
2.7.1 Ensaio de Tração para um laminado genérico:.....	34
2.7.2 Ensaio de Tração de Laminados $\pm 45^\circ$ : .....	34
2.7.3 Ensaio Iosipescu.....	35
2.7.4 Ensaio de Flexão .....	36
2.7.5 Diretrizes experimentais para Constantes de Engenharia .....	37
3. Desenvolvimento Experimental .....	38
3.1 Preparações dos corpos de prova .....	38
3.2 Normas e Ensaio .....	40
3.2.1 Ensaio de Tração .....	41
3.2.2 Ensaio de Flexão.....	45
4. Desenvolvimento Analítico.....	50
4.1 Aplicações da Lei das Misturas.....	50

4.1.2 Estimando Propriedades Mecânicas via Lei das Misturas .....	51
5. Análise dos resultados .....	54
6. Conclusão .....	66
7. Sugestão de Futuros Trabalhos .....	67
Referências Bibliográficas .....	68
ANEXO A .....	71
APÊNDICE I .....	72
APÊNDICE II .....	77

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Linha cronológica da evolução dos materiais na indústria .....	13
FIGURA 2: Distribuição de materiais do Boeing 787. ....	14
FIGURA 3: Fases de um material compósito. ....	18
FIGURA 4: Distribuição dos reforços dos compósitos: (a) reforçado em partículas aleatórias; (b) reforçados com fibras curtas alinhadas; (c) reforçado com fibras curtas aleatórias; (d) reforçados em fibras contínuas alinhadas. ....	19
FIGURA 5: Divisão dos materiais compósitos quanto ao tipo de reforço ou carga. ....	20
FIGURA 6: Curva tensão-deformação, comparação entre as propriedades da matriz, fibra e compósito. ....	21
FIGURA 7: Formas de fibras: roving (a.), fibra unidirecional (b.), entrançados ou “Braids”(c.) e fibras perpendiculares entre si: “plane wave” (d.), “twill weave”(e.) e “satin weave”(f.) .....	22
FIGURA 8: Típico sistema de injeção de plástico com parafuso helicoidal.....	24
FIGURA 9: Processos de fabricação por moldação manual (a.) e por injeção com aplicação de vácuo (b. e c.).....	24
FIGURA 10: Autoclave utilizado na Formula 1 .....	25
FIGURA 11: processo de Pultrusão (a.) e enrolamento filamentar (b.).....	25
FIGURA 12: Níveis de estudo em compósitos .....	27
FIGURA 13: Detalhamento da célula elementar das leis das misturas.....	28
FIGURA 14: Laminado multidirecional com cada uma das camadas em uma orientação diferente....	29
FIGURA 15: Representação da isotropia transversal no plano $\langle 23 \rangle$ . ....	31
FIGURA 16: Sequência de empilhamento das camadas de um laminado multidirecional.....	32
FIGURA 17: Tipos de falha: Fratura intralaminar (a); fratura interlaminar (b); fratura translaminar (c) .....	33
FIGURA 18: Posicionamento dos extensômetros ou strain gages no compósito $\pm 45^\circ$ . Fonte slides extensimetria. ....	35
FIGURA 19: Posicionamento dos sensores no CP .....	35
FIGURA 20: (a) Ensaio segundo a norma ASTM D 5379; (b) detalhamento da carga P1.....	36
FIGURA 21: Diretrizes experimentais para as constantes de engenharia independentes.....	37
FIGURA 22: Máquina de ensaios universal Instron modelo 5966. ....	38
FIGURA 23: Geometrias dos corpos de prova .....	40
FIGURA 24: Posicionamento do corpo de prova montado para ensaio de tração. ....	42
FIGURA 25: Posicionamento do corpo de prova para o ensaio de flexão em três pontos no Laboratório de Compósitos e Adesivos do Cefet/RJ. ....	45
FIGURA 26: Exemplos de gráficos x tensão deformação: (a) rompimento depois do limite de escoamento; (b) escoamento e rompimento antes dos 5%; (c) amostra sem rompimento antes dos 5% de deformação. ....	46
FIGURA 27: Alinhamento e nivelamento da máquina de ensaio universal, mostrando em detalhes os itens em vermelho. ....	49
FIGURA 28: Fluxograma de cálculo das propriedades através da lei das misturas.....	52
FIGURA 29: Gráfico Força [N] x deslocamento [mm] do corpo de prova nº5 para o ensaio de tração. ....	54
FIGURA 30: Gráfico Força [N] x deslocamento [mm] do corpo de prova nº6 para o ensaio de tração. ....	55
FIGURA 31: Solicitação do corpo de prova nº2 até a ruptura do mesmo.....	56

FIGURA 32: Gráfico Tensão x deformação para os corpos de prova do tipo $0^{\circ}/90^{\circ}$ .....	57
FIGURA 33: Região de falhas no compósito orientado a $0^{\circ}/90^{\circ}$ .....	58
FIGURA 34: Modos de falha em ensaios de flexão de 3 pontos ].....	58
FIGURA 35: Gráfico tensão deformação para o corpos de prova n°4 orientado à $\pm 45^{\circ}$ .....	59
FIGURA 36: Ensaio de flexão no corpos de prova de $\pm 45^{\circ}$ com espaçamento de 150 mm. ....	60
FIGURA 37: Gráfico Tensão x deformação para os corpos de prova do tipo $\pm 45^{\circ}$ .....	61
FIGURA 38: Gráficos de tensão [Mpa] x deformação [%] para flexão dos corpos de prova do tipo 1 e espaçamento de 110 mm. ....	62
FIGURA 39: Gráficos de tensão [Mpa] x deformação [%] para flexão dos corpos de prova do tipo 2 e espaçamento de 200 mm. ....	62
FIGURA 40: Representação dos Esforços nos sentidos longitudinal (setas azuis) e transversal à fibra (setas vermelhas). ....	63
FIGURA 41: Simplificação de um corpo de prova carregado em flexão, demonstrando os elementos trativos, compressivos e a transformação de referências do eixo ortotrópico em função de $\theta$ .....	64
FIGURA 42: Modelo simplificado com identificação das camadas no experimento. ....	65

## LISTA DE TABELAS

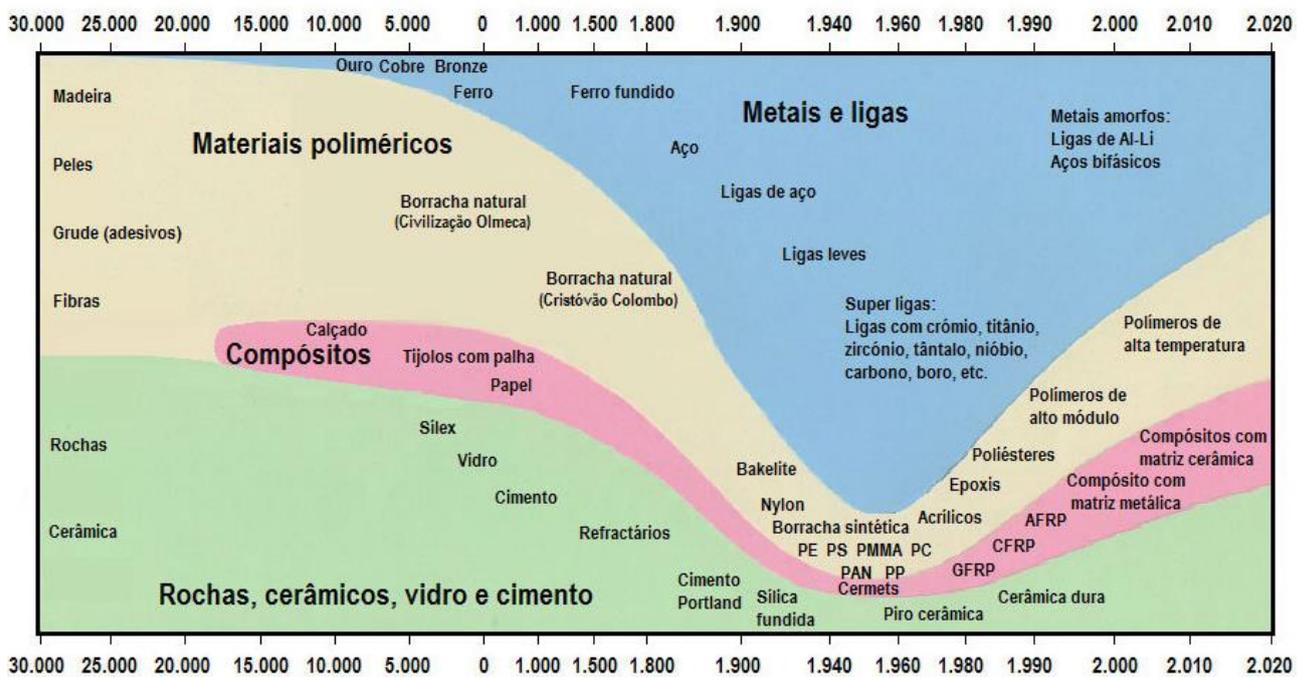
TABELA 1: Comparação de propriedades mecânicas.....	17
TABELA 2: Número de constantes independentes para vários tipos de materiais.....	30
TABELA 3: Propriedades do Laminado.....	39
TABELA 4: Propriedades do adesivo.....	39
TABELA 5: Requerimentos Geométricos para Ensaio de Tração da norma ASTM D3039.....	43
TABELA 6: Descrição resumida dos corpos de prova.....	48
TABELA 7: Propriedades Mecânicas da Fibra Estimadas via Lei das Misturas.....	52
TABELA 8: Propriedades do Laminado estimadas via lei das misturas.....	53
TABELA 9: Valores experimentais das propriedades mecânicas.....	65

# Capítulo 1

## 1. Introdução

### 1.1 Considerações iniciais

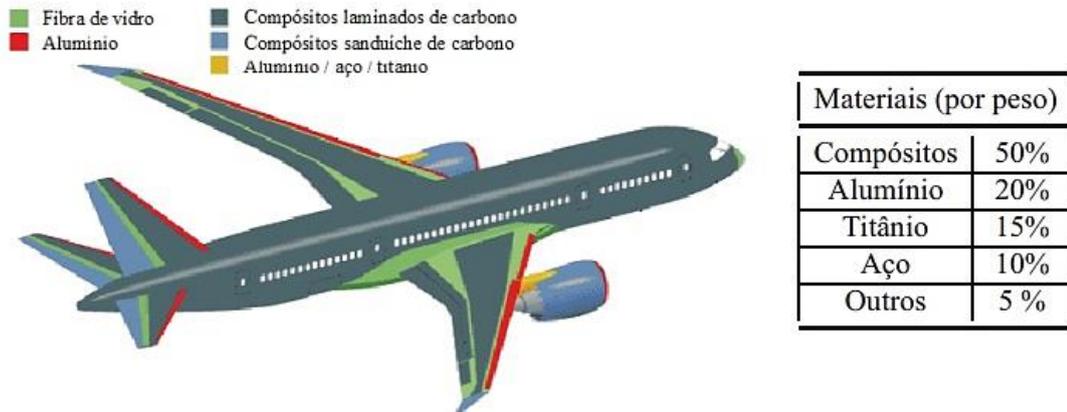
Em diversos ramos da indústria, os materiais compósitos são utilizados com o objetivo de conseguir componentes de grande leveza e resistência estrutural (propriedades mecânicas importantes). Através do princípio da ação combinada, garante-se a adição/sobreposição de duas ou mais propriedades mecânicas desejáveis no compósito resultante de dois ou mais materiais empregados. Conforme o crescimento e aprimoramento de novas tecnologias pode-se notar uma evolução deste tipo de material, conforme a figura 1. Percebe-se a tendência ao equilíbrio na indústria de materiais, com um aumento crescente do uso de polímeros, compósitos e cerâmicos.



**Figura 1:** Linha cronológica da evolução dos materiais na indústria (CAETANO, 2010).

A aplicação de materiais compósitos em componentes estruturais de elevada responsabilidade é cada vez mais frequente em diversos setores, como a automobilística,

naval, construção civil e, principalmente, aeronáutica. Neste último segmento, a possibilidade de se projetar componentes com uma redução do peso das aeronaves, apesar do alto custo de fabricação, tem vantagens significativas: o aumento de carga útil ou transportada, diminuição dos gastos operacionais e de combustível. Ao analisarmos o Boeing 787 (Figura 2) pode-se perceber uma aplicação mais nítida da utilização de compósitos poliméricos de fibra de carbono e resina epóxi.



**Figura 2:** Distribuição de materiais do Boeing 787 (ANGÉLICO, 2009).

## 1.2 Motivação

A natureza do aeromodelo do projeto Aerodesign do CEFET/RJ, em especial o trem de pouso, é usualmente confeccionado em material compósito. A utilização de materiais compósitos com reforço em fibra de carbono e matriz epóxi demonstrou ser complexa e multidisciplinar.

O contato com esse projeto foi, de fato, uma fonte motivadora para um estudo mais aprofundado dessa gama de materiais. Para melhor compreensão do assunto, se faz necessário o estudo dos comportamentos mecânicos, principalmente via análise experimental.

## 1.3 Objetivos

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar este segmento industrial crescente, e aprofundar-se em termos de propriedades mecânicas aplicadas a compósitos, especificamente a previsão do módulo de elasticidade, resistência à tração e resistência a flexão.

## **1.4 Organização**

Além deste capítulo introdutório, este trabalho foi dividido em mais 7 capítulos. No capítulo 2º será esclarecida a revisão bibliográfica, abordando as definições mais importantes, bem como os processos de fabricação envolvendo compósitos. Em seguida, serão apresentadas as metodologias experimentais aplicadas aos mesmos tipos de materiais. No capítulo 3º será descrito o desenvolvimento experimental, relatando os corpos de prova e ensaios realizados neste projeto final. No capítulo 4, será apresentado o desenvolvimento analítico, aplicando-se a lei das misturas. Por fim, os capítulos de Resultados e Conclusões; Sugestões para Trabalhos Futuros e Bibliografia utilizada.

## Capítulo 2

### 2. Revisão Bibliográfica

#### 2.1 Vantagens e desvantagens dos materiais compósitos

Ao compararmos os materiais compósitos com os materiais tradicionalmente utilizados em aplicações de engenharia, pode ser observada uma série de pontos favoráveis e desfavoráveis ao seu uso. Segundo PINHEIRO (2010), algumas das principais vantagens são enumeradas:

- Devido ao seu processo de fabricação, poderão ajudar a reduzir o número de peças soltas e montagens (agrupando-as em uma peça única caso fossem feitas em um material tradicional, caso do metal).
- Conseguem oferecer uma maior “rigidez específica” (razão entre rigidez e densidade), ou seja, a mesma rigidez de um material metálico, com aproximadamente um quinto do seu peso, ou no caso do alumínio com a metade do seu peso.
- Maior “resistência específica” razão entre resistência e densidade. Ao analisarmos a Tabela 1, podemos visualizar esta comparação entre os materiais compósitos, em especial o CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), com o aço.
- Elevada resistência à fadiga. As ligas de aço/alumínio são projetadas para trabalharem com cerca de 50% de sua tensão máxima estática. Nos casos de materiais compósitos, este valor sobe para cerca de 90%.
- Oferecem grande resistência à corrosão, devido a sua superfície exterior ser de origem polimérica.

Apesar das vantagens citadas, as principais desvantagens são:

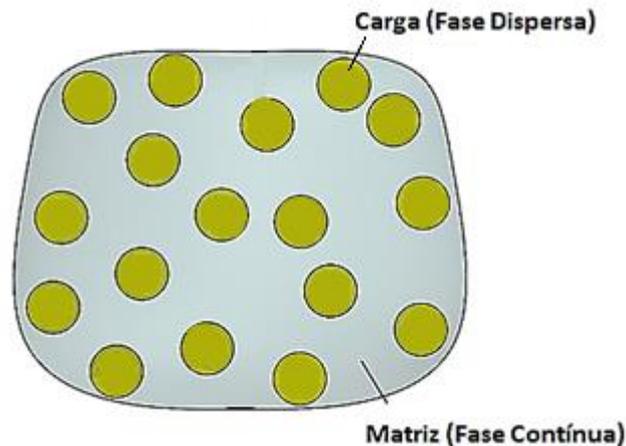
- O custo elevado. Em relação às ligas de aço ou alumínio, o preço por kg poderá ser de 5 a 20 vezes mais caro.
- Escassez em métodos de produção de grande escala, o que favorece o alto custo.
- Limitação em termos de temperatura, devido a influencia das propriedades térmicas da matriz polimérica utilizada.
- Podem ter pouca estabilidade dimensional, de acordo com a matriz escolhida.

**Tabela 1:** Comparação de propriedades mecânicas. (MARQUES, 2015)

Material	Densidade $\rho$ (Mg m <sup>-3</sup> )	Modulo de Elastic. E (GPa)	Resistência $\sigma$ (MPa)
<b>Fibras</b>			
Carbono	1,95	390	2200
Vidro	2,56	76	1400 – 2500
Kevlar	1,45	125	2760
<b>Matrizes</b>			
Epóxi	1,2 – 1,4	2,1 – 5,5	40 – 85
Poliéster	1,1 – 1,4	1,3 – 4,5	45 – 85
<b>Compósitos</b>			
CFRP em Epóxi	1,5	189	1050
GFRP em Poliéster	2,0	48	1240
<b>Metais</b>			
Aço	7,8	207	1000
Liga de alumínio	2,8	71	500

## 2.2 Caracterizações do material compósito

Um material compósito é definido como o resultado da combinação de dois ou mais materiais distintos. Tipicamente, os compósitos são classificados pelo material que forma a matriz que é a fase contínua, e de acordo com a outra fase chamada de carga, reforço ou fase dispersa, conforme a figura 3.



**Figura 3:** Fases de um material compósito (GUAMÁ, 2012).

### 2.2.1 Matriz

As funções fundamentais da matriz são de dar forma estável ao compósito, assegurando a coesão do material como um todo, e proteger as fibras de reações com o meio ambiente, ver figura 3. Apesar de existirem outros tipos de matrizes, o presente trabalho tem enfoque para o universo das matrizes poliméricas.

O termo “materiais poliméricos” contempla um grande número de materiais de origem orgânica que constitui um grupo importante de materiais não metálicos empregados na indústria, os chamados “materiais plásticos”. Estes são divididas em três categorias principais: termoplásticos, termoendurecíveis (também conhecidos como termofixos ou termoestáveis) e elastômeros. Em compósitos são aplicados com maior frequência os dois primeiros tipos.

O princípio do processamento dos termoplásticos se dá por mudança de fase, o aquecimento causa um amolecimento progressivo até o ponto de fusão. O material chega até à fusão sem que ocorram modificações expressivas em suas propriedades. Este processo é totalmente reversível, ou seja, este pode ser amolecido, fundido e reaproveitado repetidas vezes.

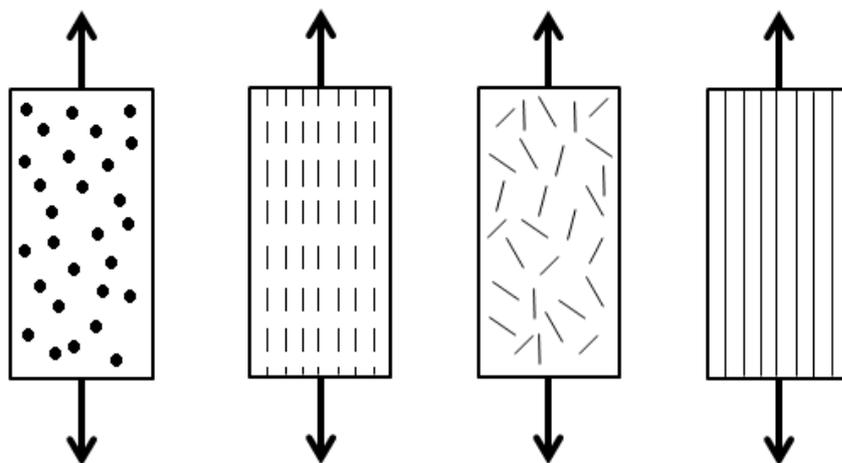
Os termoendurecíveis são polímeros em que o endurecimento é consequência de reações químicas irreversíveis. Este processo se faz sob a forma de mistura de dois ou três componentes: resina, acelerador e catalisador. Depois de misturados na proporção adequada, ocorre a constituição da estrutura rígida, descrevendo o processo de “cura”. Portanto, estes

últimos apresentam uma desvantagem considerável: não podem ser reprocessados facilmente, pois o aquecimento progressivo provocará a degradação completa do material.

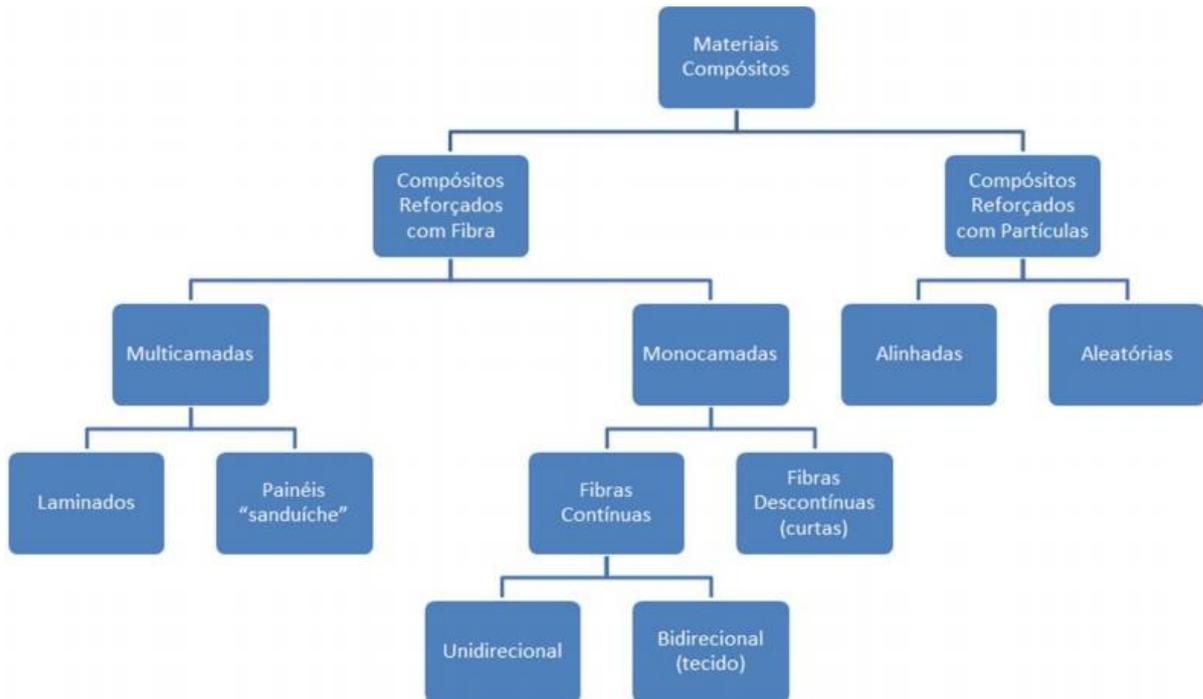
### 2.2.2 Reforço ou Carga

A maior responsabilidade em termos de resistência mecânica é garantida por esta fase, que é normalmente composta por carbono, vidro ou aramida. A incorporação de cargas também tem o objetivo de melhorar propriedades físicas, térmicas e características de processamento. Em geral, utilizam-se 2 tipos de reforço: em partículas ou em fibra.

O desempenho do compósito é fortemente influenciado pela disposição do reforço, tendo duas configurações básicas em relação à orientação: um alinhamento paralelo ao eixo longitudinal da fibra numa só direção e um alinhamento totalmente aleatório (Figura 4). A escolha de cada um depende do tipo de carregamento, por exemplo: reforços aleatórios são aplicados onde as tensões são predominantemente multidirecionais, enquanto que os alinhados tem a característica de resistirem mais na direção da fibra, sendo bem inferior na direção perpendicular a mesma. Portanto apresentam propriedades mecânicas ótimas na direção da fibra e propriedades mínimas no sentido perpendicular à orientação da mesma. A Figura 5 resume a divisão dos materiais compósitos quanto ao tipo de reforço.



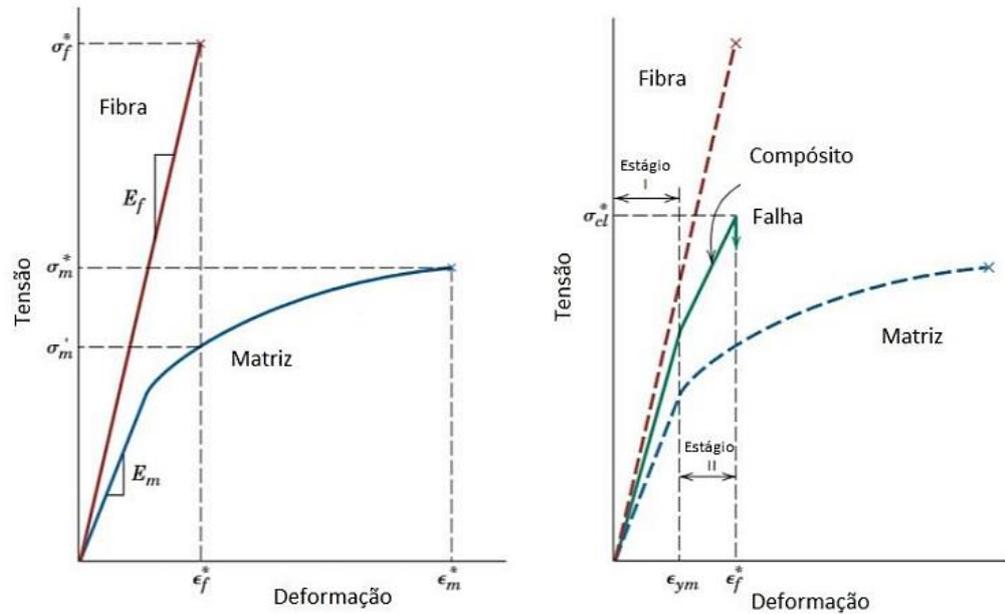
**Figura 4:** Distribuição dos reforços dos compósitos: (a) reforçado em partículas aleatórias; (b) reforçados com fibras curtas alinhadas; (c) reforçado com fibras curtas aleatórias; (d) reforçados em fibras contínuas alinhadas.



**Figura 5:** Divisão dos materiais compósitos quanto ao tipo de reforço ou carga GUAMÁ (2012).

Apesar das diferenças, um fator de grande destaque é o fato que o quão mais aleatório for à distribuição do reforço mais próximo do isotrópico é o comportamento do compósito (MOURA, 2009). Em contrapartida, a tendência à anisotropia é uma característica marcante das fibras alinhadas.

Vale lembrar que cada um dos constituintes descritos (matriz e reforço) têm características próprias, no entanto quando misturados formam um composto com propriedades diferentes de cada um deles separadamente, conforme a Figura 6.



**Figura 6:** Curva tensão-deformação, comparação entre as propriedades da matriz, fibra e compósito (CALLISTER JUNIOR, 2008).

### 2.3 Processos de fabricação

A fabricação é, de fato, uma etapa decisiva na determinação das propriedades mecânicas de uma peça em compósito e, apesar abordada simplificada, merece um destaque neste trabalho.

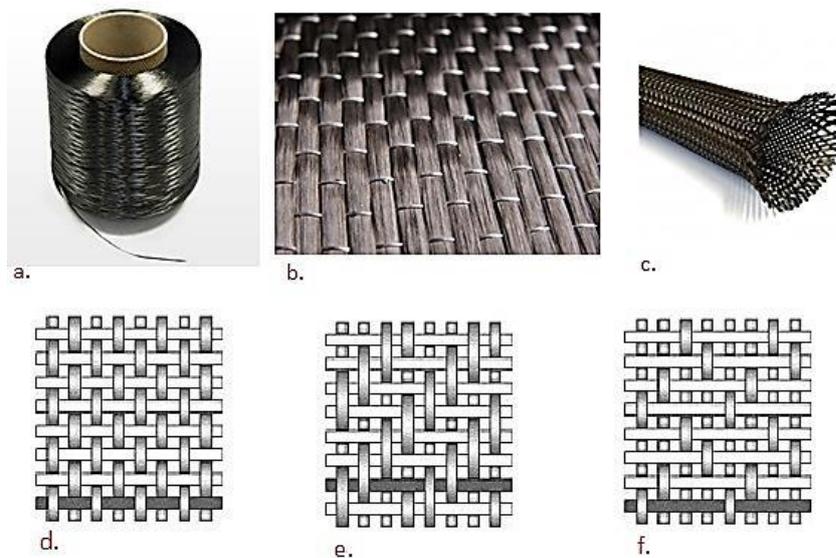
Um fator de relevância é a avaliar a natureza da matriz, que, lembrando, pode ser termoendurecível ou termoplástica. No primeiro caso, os ciclos de aquecimento e arrefecimento tem o objetivo de controlar o processo de cura. Nas matrizes termoplásticas, o aquecimento controla a energia necessária para o “amolecimento” e fusão, tornando viável o preenchimento dentro do molde.

Muitos dos processos de fabricação apresentados a seguir farão uso de fibras contínuas e alinhadas, portanto começaremos pela descrição de seus principais e mais comuns formatos:

- “Roving”
- Entrançados ou “Braids”
- Tecidos

A descrição do roving é, basicamente, um cordão de filamentos contínuos e enrolados helicoidalmente em bobinas, Figura 7 (a).

Os entrançados ou “Braids” são geralmente estão disponíveis em configuração tubular e plana, sendo utilizados na fabricação de produtos como raquetes de tênis, “sticks” de hóquei ou em componentes aeronáuticos, Figura 7 (c).



**Figura 7:** Formas de fibras: roving (a.), fibra unidirecional (b.), entrançados ou “Braids”(c.) e fibras perpendiculares entre si: “plane wave” (d.), “twill weave”(e.) e “satin weave”(f.) (MOURA, 2009).

Outra apresentação do reforço em carbono pode ser vista sob a forma de tecidos. Estes são caracterizados pela orientação e disposição das fibras, e podem ser classificados como unidirecionais ou entrelaçados. A principal função da trama no tecido serve apenas garantir o posicionamento das fibras para a aplicação da matriz, Figura 7 (b). Sob uma disposição um pouco mais complexa, os tecidos entrelaçados são produzidos em fibras de direções perpendiculares entre si. Dentre os tipos mais comuns são: “plane wave”, “twill weave” e “satin weave”, conforme a figura 7 (d), (e), (f).

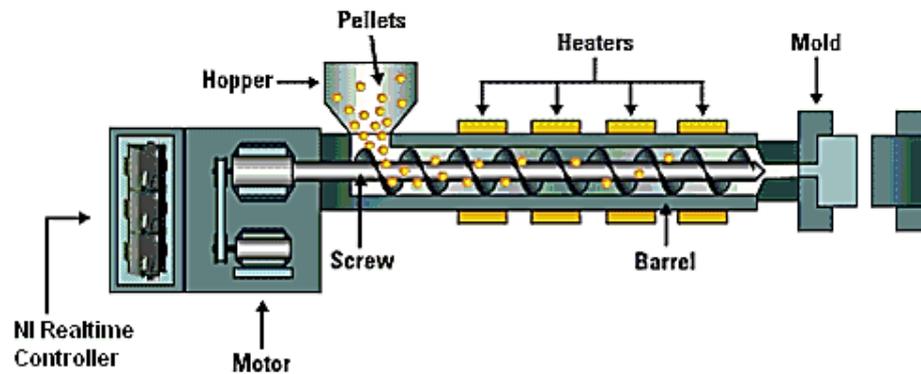
### **2.3.1 Moldagem Manual e por Compressão**

Os primeiro processo a ser abordado será o método de fabricação manual, caracterizado pelo empilhamento e a impregnação de sucessivas camadas em molde aberto. Cada camada de reforço colocada é impregnada com resina e compactada com ajuda de rolos, verificado na figura 7(a). Percebe-se a utilização de uma resina especial na face do molde utilizado, chamada de “gel-coat”. Esta tem a função de garantir um bom acabamento superficial e proteção da peça contra o meio externo. As principais vantagens deste método são: simplicidade, reduzidos investimentos iniciais e poucas restrições de geometria. Tipicamente a porcentagem de fibras no produto final realizado por este processo é de 25% (MOURA, 2009).

Ao se utilizar um molde e “contramolde” em compressão, caracterizamos outro processo de fabricação. Apesar de apresentar a possibilidade de ser feito a frio, quando ocorre o pré-aquecimento do molde é dita a fabricação por compressão a quente.

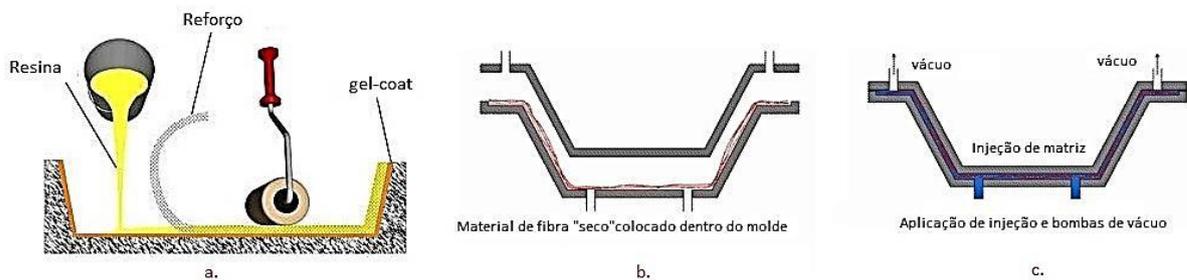
### **2.3.2 Moldagem por injeção**

A moldagem por injeção é um processo muito utilizado para a produção de grandes séries de peças, e pode ser aplicada a matriz endurecível ou termoplástica. Em ambos os casos, a matéria prima é alimentada através de um embolo ou de um parafuso helicoidal para dentro da cavidade de moldação, figura 8. Inúmeros sensores e microprocessadores permitem a monitorização e correção em tempo real de alguns parâmetros, como a dosagem conveniente da matéria prima, temperatura de injeção, temperatura do molde, velocidade de injeção, pressão de injeção, velocidade de rotação do parafuso, etc.



**Figura 8:** Típico sistema de injeção de plástico com parafuso helicoidal. (NATIONAL INSTRUMENTS BRASIL, 2014).

Existem alguns tipos de variações deste processo, no entanto o procedimento mais simplificado pode ser esquematizado na figura 9 (b). O reforço é colocado na parte inferior do molde e, após fechado, injeta-se resina sob pressão dentro da cavidade de moldação. Pode-se utilizar o processo a vácuo, permitindo que a resina impregne mais facilmente o reforço, reduzindo porosidade e aumentando os teores de fibra até 70% (MOURA et al, 2009).



**Figura 9:** Processos de fabricação por moldação manual (a.) e por injeção com aplicação de vácuo (b. e c.) (DESIGN INSITE, 2015).

### 2.3.3 Autoclave

Para alguns casos de matrizes, a cura, ou seja, etapa de solidificação da peça fabricada, só pode ocorrer em temperaturas elevadas. A fabricação por autoclave atende esta necessidade, pois consiste em submeter moldes injetados ou a peça pré-fabricada que ainda possa estar em vácuo, dentro de um “forno” com rígidos controles de temperatura e pressão, figura 8. Neste processo é comum a utilização de materiais pre-pregs, ou seja, pré-

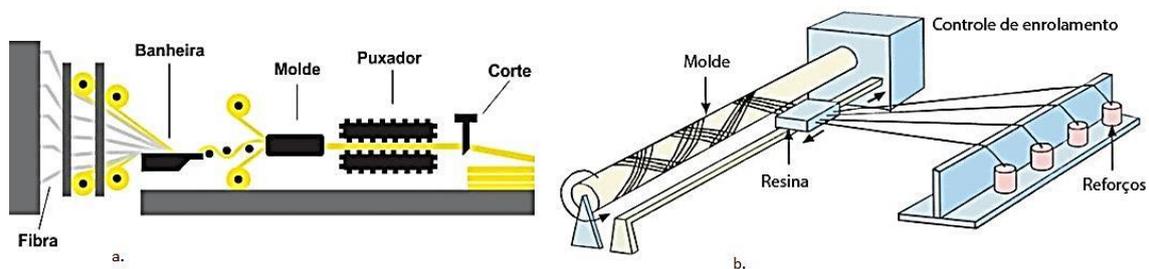
impregnados com resina já pelo fabricante da fibra. Praticamente toda produção de materiais compósitos avançados, o que inclui a indústria aeroespacial, faz uso de autoclaves.



**Figura 10:** Autoclave utilizado na Formula 1(FORMULA 1,2014).

### 2.3.4 Enrolamento Filamentar

A fabricação do tipo enrolamento filamentar também merece destaque. Este consiste em depositar ou enrolar sobre um mandril rotativo fibras na forma de roving e impregnadas com resina. Os movimentos de translação do carro e de rotação do mandril definem a orientação da fibra durante a fabricação, figura 11(b). Podem ser produzidas peças como reservatórios de pressão, peças esféricas ou cilíndricas e tubos com diversos perfis de seção transversais, com taxas de reforço de significativas.



**Figura 11:** Processo de Pultrusão (a.) e enrolamento filamentar (b.) (STRATUS, 2015).

### **2.3.5 Processo de Pultrusão**

Para a fabricação de perfis de geometria contínua, é utilizado o processo de pultrusão, que consiste em “puxar” as fibras impregnadas de resina através molde, figura 11(a). O aquecimento do molde, que tem a forma da seção transversal do perfil desejado, provoca a cura da resina durante a passagem no seu interior, resultando em um produto contínuo e com excelente acabamento superficial (STRATUS, 2015).

### **2.3.6 Moldagem por centrifugação**

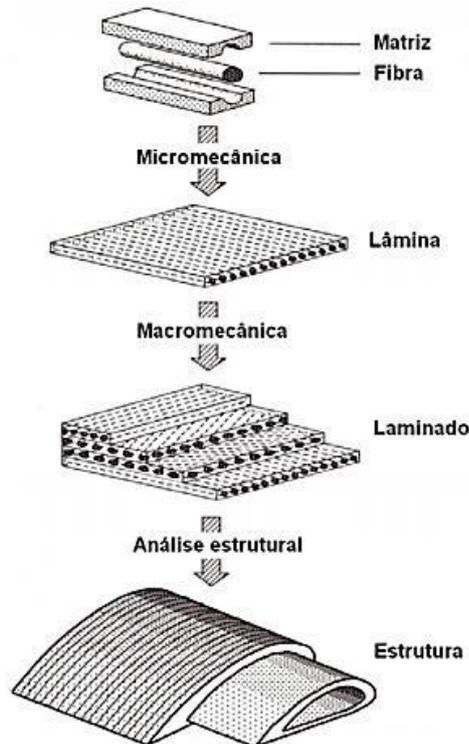
Outra forma de produção por rotação é o moldagem por centrifugação. Dentro de um molde metálico e rotativo com forma cilíndrica, é inserida a resina e o reforço, sob a forma de roving, tecido ou materiais mais complexos. Por efeito da força centrífuga, ocorre a impregnação do reforço e forma-se um produto final de estrutura cilíndrica. Uma característica desse processo é a distribuição uniforme da resina e eliminação de bolhas de ar, além de uma elevada porcentagem de reforço.

### **2.3.7 Visão geral acerca dos processos de fabricação**

De uma forma mais ampla, cada processo de fabricação tem suas vantagens e desvantagens em termos de custos iniciais e produtividade. E em termos de qualidade do produto final, um dos critérios de maior destaque é o teor de fibra, que é medido pela porcentagem volumétrica. Este parâmetro é uma consequência direta do processo escolhido, e interfere de forma crítica na definição das propriedades mecânicas globais do laminado. No entanto, para garantir uma boa impregnação das fibras, a matriz limita o teor de fibra máximo em aproximadamente 70% (MOURA, 2009).

## 2.4 Estudo da Micro e Macromecânica

O estudo em materiais compósitos pode ser abordado em vários níveis e escalas, isso fica bem claro ao visualizarmos a figura 10. Cada nível será abordado de forma separada e em uma secção específica.



**Figura 12:** Níveis de estudo em compósitos (GUAMÁ, 2012).

### 2.4.1 Micromecânica da camada

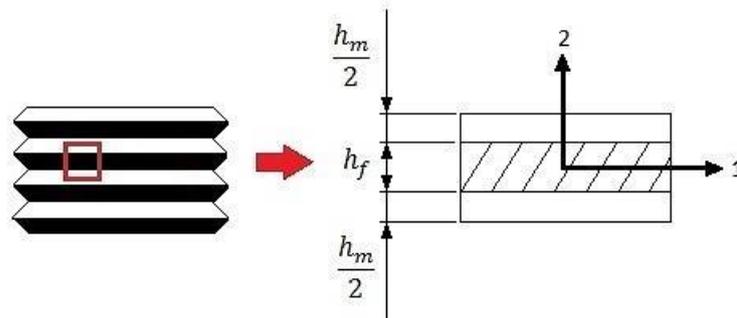
O objetivo principal da Micromecânica é prever as propriedades da camada a partir do teor e propriedades dos constituintes. A camada é constituída por uma infinidade de fibras, logo, se recorre a modelos do tipo “célula elementar”, assumindo que seu comportamento represente toda a camada.

Neste tópico, o modelo apresentado trata apenas de camadas unidirecionais, ou seja, as expressões não se aplicam a compósitos reforçados por tecidos bidirecionais. O seguinte conjunto de hipóteses é utilizado:

- Fibra e matriz como únicos constituintes, excluindo vazios e bolhas.
- Comportamento linear elástico para a fibra
- Admite-se a matriz como material isotrópico
- Perfeita adesão interfacial fibra/matriz.

Em análise mais simples, verifica-se uma célula elementar bidimensional, constituída por uma região de fibras envolvida por duas camadas de matriz conforme a figura 13. As suas dimensões reproduzem a fração volumétrica de fibra do compósito,

$$V_f = \frac{h_f}{(h_f + h_m)} \quad (2.1)$$



**Figura 13:** Detalhamento da célula elementar das leis das misturas.

As propriedades mecânicas, como o módulo de elasticidade e a resistência a tração, são fortemente influenciadas pelo conceito fração volumétricas. O caso mais simples é o compósito constituído por duas fases, por meio de fibras contínuas, representadas pela Lei das Misturas, e aplicado as constantes de engenharia:

$$E_1 = V_f E_{f1} + (1 - V_f) E_m \quad (2.2)$$

$$v_{12} = V_f v_{12} + (1 - V_f) v_m \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_{f2}} + \frac{(1-V_f)}{E_m} \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{(1-V_f)}{G_m} \quad (2.5)$$

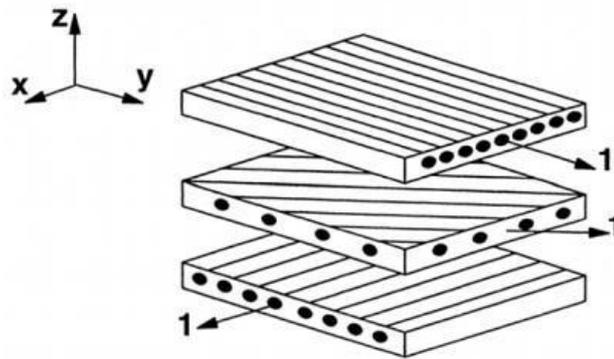
Onde E e V são o módulo de elasticidade e a fração em volume, respectivamente, e f e m são os índices correspondentes à fibra e matriz. De acordo com PINHEIRO (2010), obtemos  $G_{12}$  através da eq. 2.6:

$$G_f = \frac{E_2}{2(1+V_f)} \quad (2.6)$$

Fica evidente a importância do processo de fabricação para a maximização de  $V_f$ , uma vez que este caracteriza o compósito. Isso também explica a preferência de fibras contínuas para aplicações estruturais em relação a fibras curtas, que, tipicamente, apresentam frações volumétricas de reforço de 20%, enquanto que os reforços em fibras contínuas têm, em média, aproximadamente 65% (MOURA, 2009).

### 2.4.2 Macromecânica da camada

O estudo das relações tensão-deformação da camada unidirecional dos compósitos de fibra contínua, é definido como Macromecânica. Como citado anteriormente, essas matérias possuem geralmente uma estrutura laminada, isto é, são constituídos por varias camadas, cada uma com a sua orientação, nas quais as fibras estão todas alinhadas na mesma direção, ver figura 14.



**Figura 14:** Laminado multidirecional com cada uma das camadas em uma orientação diferente.

A camada possui uma enorme quantidade de fibras, dessa forma, o mais conveniente é trata-la como um sólido para descrever o seu comportamento mecânico. Em função do comportamento do compósito, ou seja, tendências à anisotropia são adotados modelos mais sofisticados em termos de resistências de materiais. As relações de tensões e deformações podem ser representadas na forma de matricial.

As simplificações dessas matrizes ocorrem a partir de uma série de considerações e artifícios matemáticos partindo de 36 constantes elásticas até, figurarem finalmente, duas que caracterizam o material como isotrópico. Tais considerações fogem do propósito desta obra, mas podem ser demonstradas no trabalho de SILVA (2005) tabela 1. Tratando-se de materiais compósitos, as considerações frequentemente adotadas são de um material ortotrópico transversalmente isotrópico.

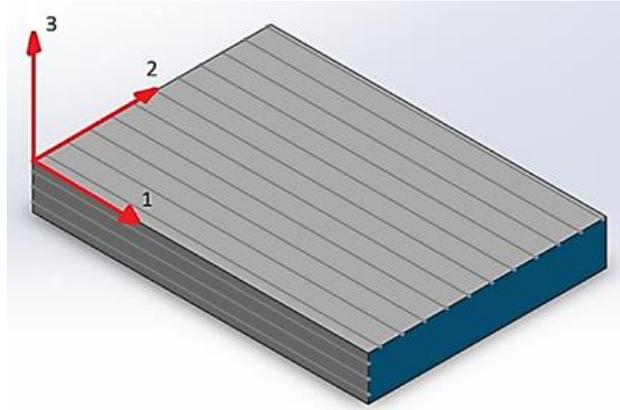
**Tabela 2:** Número de constantes independentes para vários tipos de materiais (SILVA, 2005).

MATERIAL	CONSTANTES NA MATRIZ	
	Número de Constantes Elásticas	Constantes de Engenharia independentes
Anisotrópico, corpo em equilíbrio estático, considerando simetrias de tensão e deformação ( $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ e $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$ )	36	
Anisotrópico com considerações de energia elástica	21	
Ortotrópico geral (possui 3 planos de simetria perpendiculares entre si)	13	
Especialmente ortotrópico (2 planos de simetria paralelos à direção da fibra)	9	$E_1, E_2, E_3, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, G_{12}, G_{13}$ e $G_{23}$
Ortotrópico, transversalmente isotrópico (com plano de isotropia de propriedades mecânicas)	5	$E_1, E_2, G_{23}, \nu_{12}$ e $G_{12}$
Ortotrópico, transversalmente isotrópico, no estado plano de tensão	4	$E_1, E_2, \nu_{12}$ e $G_{12}$
Isotrópico	2	$E, \nu$

A ortotropia esta associada à consideração de 3 planos de simetria mutuamente perpendiculares. O encontro das retas de interseção destes planos compõem os eixos principais de ortotropia 1, 2 e 3 (figura 15). Na prática, este é um artifício matemático para se reduzir o número de constantes elásticas independentes, conforme mostrado na tabela 1.

Um material é dito transversalmente isotrópico quando um dos planos principais é isotrópico, isto é, todo ponto no plano tem as mesmas propriedades mecânicas em todas as direções. Essa condição é justificada pelo fato da disposição das fibras serem consideradas aleatórias no plano transversal (MOURA et al, 2009). Isso se reflete no plano <23> da figura

15 (em azul). Utilizando-se da hipótese da isotropia transversal da camada, temos definidas as relações das equações:



**Figura 15:** Representação da isotropia transversal no plano <23> .

$$E_3 = E_2; \quad (2.7)$$

$$\nu_{13} = \nu_{12}; \quad (2.8)$$

$$G_{13} = G_{12}; \quad (2.9)$$

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1+\nu_{23})} \quad (2.10)$$

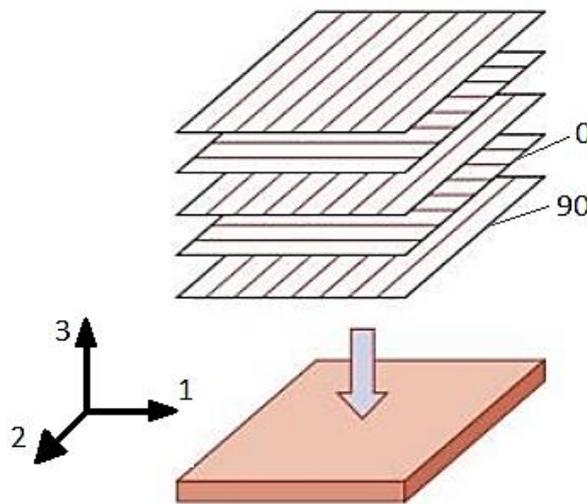
Resumindo, a camada apresenta 5 constantes elásticas independentes e o seu comportamento é mais complexo do que o dos materiais isotrópicos, que possuem apenas 2 constantes elásticas. No entanto, para o estado plano de tensões, o número de constantes elásticas cai para 4. Estas constantes estão definidas nas eq. 2.2; 2.3; 2.4 e 2.5 na seção de micromecânica, acrescida da eq. 2.1:

$$\nu_{21} = \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{E_1} \quad (2.11)$$

## 2.5 Compósitos multidirecionais

Um laminado é constituído por uma sequência de camadas, tendo a possibilidade de mudar a orientação no sentido da espessura. Quando isso ocorre, definimos este compósito como multidirecional. Ao contrário do que ocorre em laminados unidirecionais em que ocorre uma fragilidade na direção perpendicular ao reforço, a versatilidade oriunda das variações na orientação e na sequência de empilhamento tornam os laminados multidirecionais mais aplicáveis as necessidades de projeto.

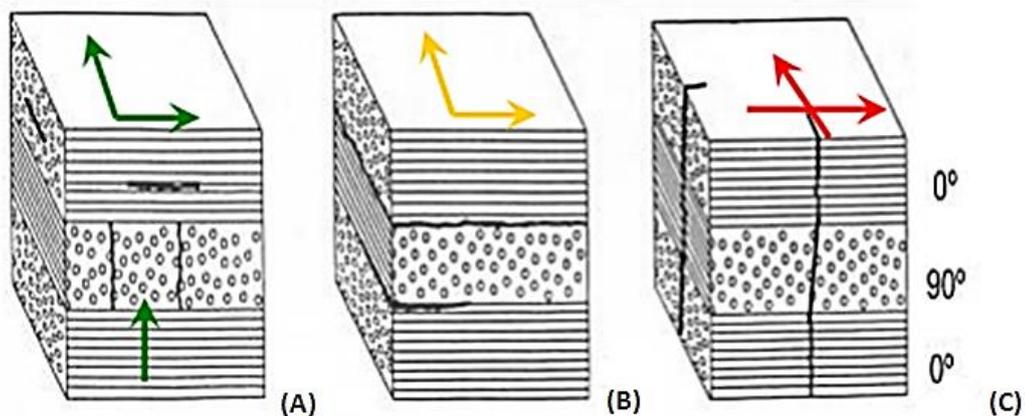
As orientações mais usuais e citadas em diversas normas são  $0^\circ/90^\circ$  e  $+45^\circ/-45^\circ$ . Na figura 16, podemos observar uma sequencia de empilhamento: as camadas orientadas na direção 2 são caracterizadas como  $90^\circ$ , já as camadas orientadas na direção 1 são definidas como  $0^\circ$ .



**Figura 16:** Sequência de empilhamento das camadas de um laminado multidirecional (CALLISTER JUNIOR, 2008).

Pode-se prever o comportamento dos laminados a partir do estudo do comportamento de uma camada, tratada como sólido homogêneo e anisotrópico. Existem modelos que abordam este assunto de forma mais detalhada, como a teoria clássica dos laminados.

É comum ocorrerem diversos tipos de falhas quando um laminado é solicitado em termos de carregamento. A figura 18 ilustra a vista em corte de um laminado  $0^\circ/90^\circ$  e os principais tipos de falha, que se dividem em: simples dentro da camada (intralaminar); separação das camadas do laminado ou delaminação (interlaminar); ou uma falha generalizada em todas as camadas do laminado (fratura translaminar).



**Figura 17:** Tipos de falha: Fratura intralaminar (a); fratura interlaminar (b); fratura translaminar (c) (ALMEIDA, 2010).

## 2.6 Ensaios Mecânicos

As respostas obtidas/dados coletados através de ensaios mecânicos são aplicadas na elaboração de especificações de matéria-prima, pesquisa e desenvolvimento, controle de qualidade, design, e análise estrutural. Dentre os fatores que influenciam de forma direta os ensaios mecânicos em materiais compósitos, destacam-se:

- Material do corpo de prova
- Tipo de preparação do material
- Meio de ensaio
- Alinhamento do sistema
- Encaixe nas garras da máquina
- Velocidade do ensaio
- Tempo de ensaio
- Temperatura

- Vazios existentes na estrutura do material
- Fração volumétrica do reforço

## 2.7 Ensaios Experimentais e Constantes de Engenharia

Conforme comentado na seção 2.4.2 macromecânica da camada, as considerações usadas tem influência direta no número de constantes de Engenharia. Retomando a tabela 1, o caso mais simples depois do isotrópico, ou seja, o que envolve um menor número de constantes elásticas independentes é o ortotrópico, transversalmente isotrópico no estado plano de tensão. A obtenção dos valores dessas 4 constantes serão comentados a seguir.

### 2.7.1 Ensaio de Tração para um laminado genérico:

O objetivo principal deste ensaio, em termos de constantes de engenharia, são obter  $E_1$  e  $\nu_{12}$  (é recomendado o uso de extensômetros ou strain gages neste procedimento). Para o caso de compósitos unidirecionais, pode-se obter  $E_2$  utilizando-se um corpo de prova orientado a  $90^\circ$ , conforme a figura 17 (Sequencia de empilhamento das camadas de um laminado multidirecional).

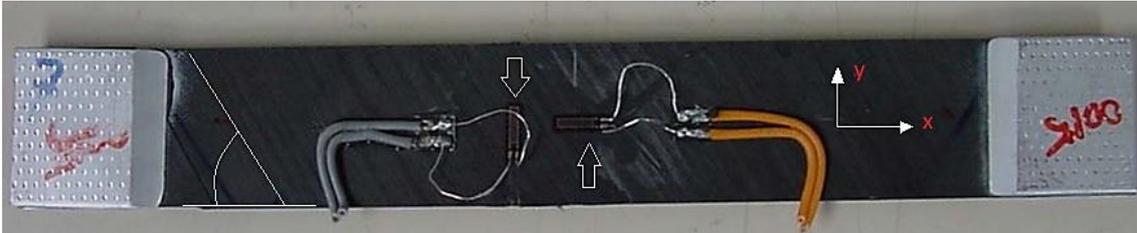
As normas mais utilizadas na literatura para estes tipos de ensaio em materiais compósitos são a ASTM D3039 e ISO 527, verificar os trabalhos: “Análise de uma longarina de avião acrobático em material compósito – Fernando Sampert” e SIQUEIRA (2009) Na seção 3 “Desenvolvimento Experimental” será feita uma breve comparação entre estas normas para justificar a sua escolha.

### 2.7.2 Ensaio de Tração de Laminados $\pm 45^\circ$ :

A medição neste ensaio envolve o posicionamento de extensômetros nas direções longitudinais (x) e transversais (y), conforme a figura 18. As normas utilizadas são a ISO 14129 e ASTM D 3518. Conforme MOURA et al. (2009), deste ensaio se obtém  $G_{12}$ , através das relações:

$$\tau_{12} = \frac{\sigma_x}{2} \quad (2.12)$$

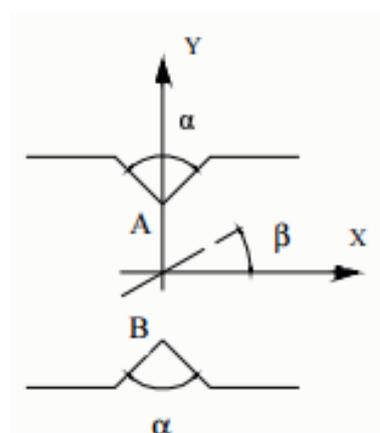
$$\gamma_{12} = \varepsilon_x - \varepsilon_y \quad (2.13)$$



**Figura 18:** Posicionamento dos extensômetros ou strain gages no compósito  $\pm 45^\circ$ .  
Fonte slides extensiometria.

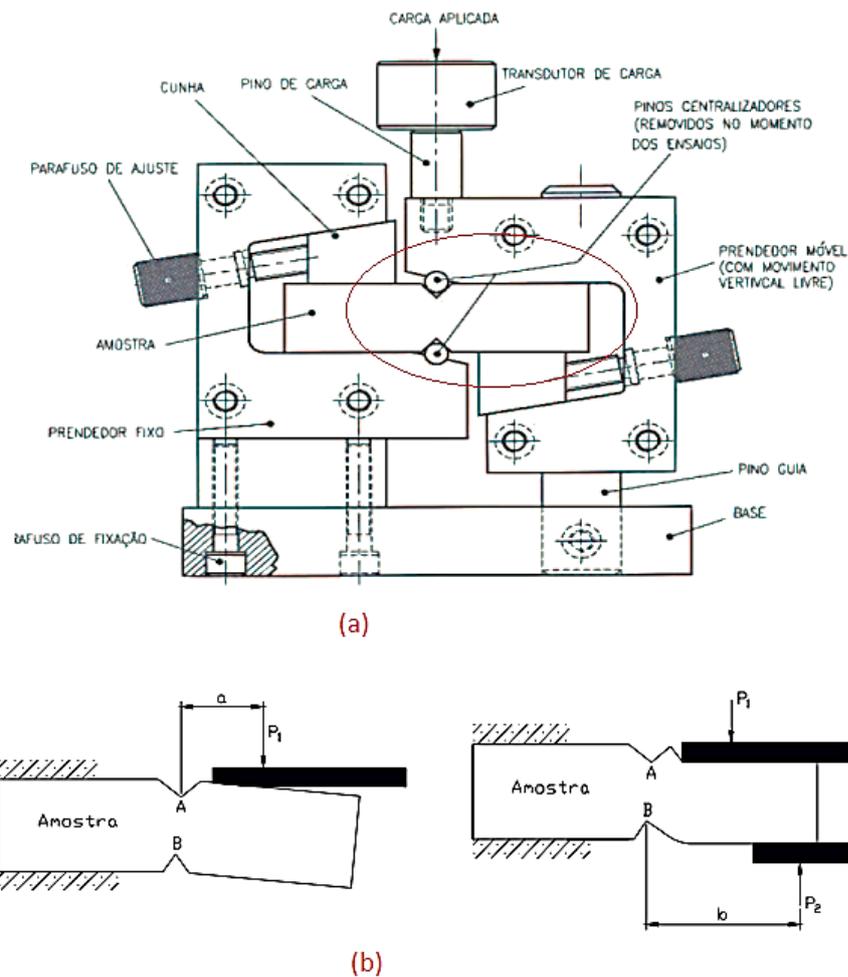
### 2.7.3 Ensaio Iosipescu

Uma das normas alternativas que avalia o módulo de cisalhamento  $G_{12}$ , assim como a resistência ao cisalhamento para compósitos laminados é a ASTM D 5379M-93. Neste tipo de ensaio utiliza-se um corpo de prova com formato retangular, com espessura entre 3 a 4 mm e duplamente entalhado em “v”, conforme ilustrado na figura 20. Devem ser colados extensômetros a  $+45^\circ$  e  $-45^\circ$  em relação ao eixo do CP, conforme o ângulo  $\beta$  da figura abaixo.



**Figura 19:** Posicionamento dos sensores no CP

O corpo de prova funciona como uma viga mono engastada, onde é aplicada uma carga  $P_1$ , ver figura 20. Existe uma tendência à rotação do corpo pela aplicação da carga  $P_1$ , no entanto devido a configuração do dispositivo, é gerada uma reação  $P_2$  que evita esta rotação, figura 20 (b). Portanto, o resultado produzido seria uma translação na seção A-B, conforme verificado no trabalho de SOUZA, 2006.



**Figura 20:** (a) Ensaio segundo a norma ASTM D 5379; (b) detalhamento da carga  $P_1$

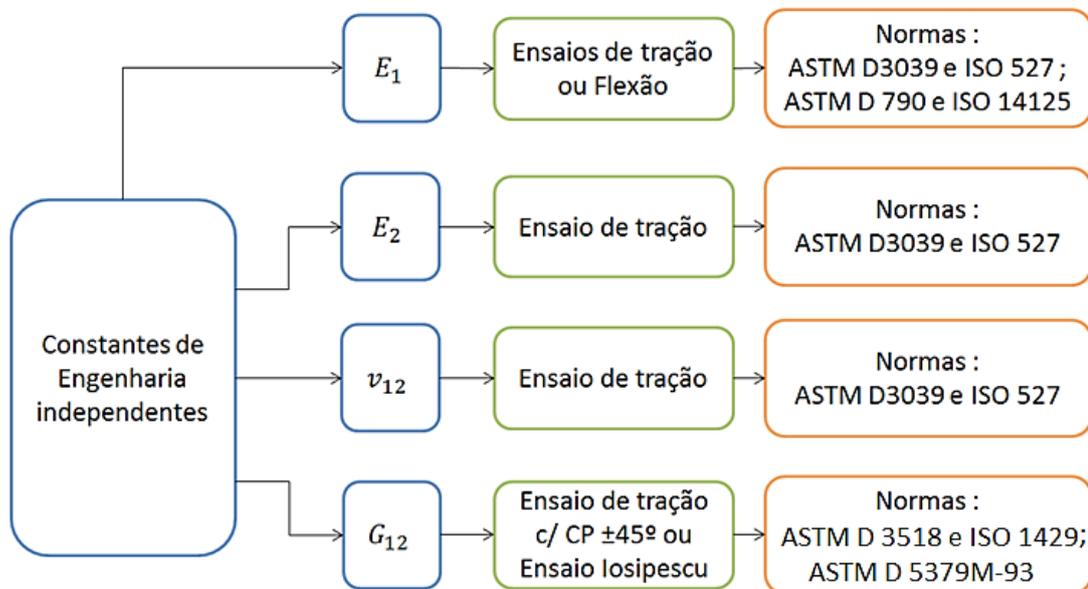
#### 2.7.4 Ensaio de Flexão

A simplicidade dos procedimentos experimentais faz com que os ensaios de flexão sejam amplamente utilizados, principalmente devido aos baixos custos de preparação e instrumentação. O principal objetivo é obter  $E_1$  e a tensão máxima do compósito.

Existem dois tipos de ensaios: flexão de 3 pontos ou de 4 pontos, sendo o primeiro o mais utilizado. No que tange a normalização, as normas mais utilizadas na literatura são a ISO 14125 e ASTM D 790, esta exemplificada conforme MONTEIRO, 1994.

### 2.7.5 Diretrizes experimentais para Constantes de Engenharia

O conteúdo abordado nesta seção pode ser visualizado no fluxograma da figura 21. Estas informações são de suma importância e servirão de diretriz para esta obra, uma vez que são verificadas, para cada constante, quais ensaios e normas são aplicáveis.



**Figura 21:** Diretrizes experimentais para as constantes de engenharia independentes

## Capítulo 3

### 3. Desenvolvimento Experimental

Através das informações citadas na figura 21, esta obra se concentrará em obter a constante elástica independente  $E_1$ , utilizando-se os respectivos ensaios e normas já citadas.

O equipamento utilizado foi uma máquina de ensaios universal Instron (modelo 5966), dotado de uma célula de carga com capacidade de 10KN acoplada a um sistema de aquisição e processamento de dados. O local do ensaio foi o Laboratório de Compósitos e Adesivos do CEFET-RJ, com a temperatura controlada no valor de aproximadamente 25°C.



**Figura 22:** Máquina de ensaios universal Instron modelo 5966.

#### 3.1 Preparações dos corpos de prova

A fabricação dos corpos de prova foi realizada em parceria com o laboratório de Adesão e Aderência da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), no campus de Nova Friburgo. Os corpos de prova foram preparados com a fibra de carbono LT 450-C10C fabricada pela Devold AMT (com as propriedades na tabela 3), aplicando entre cada camada o adesivo Epóxi Pipefix (Polinova S.A., Rio de Janeiro, Brasil). O processo de fabricação utilizado foi a moldação manual, semelhante ao apresentado na figura 7 (a).

**Tabela 3:** Propriedades do Laminado.(DEVOLD® AMT, 2015).

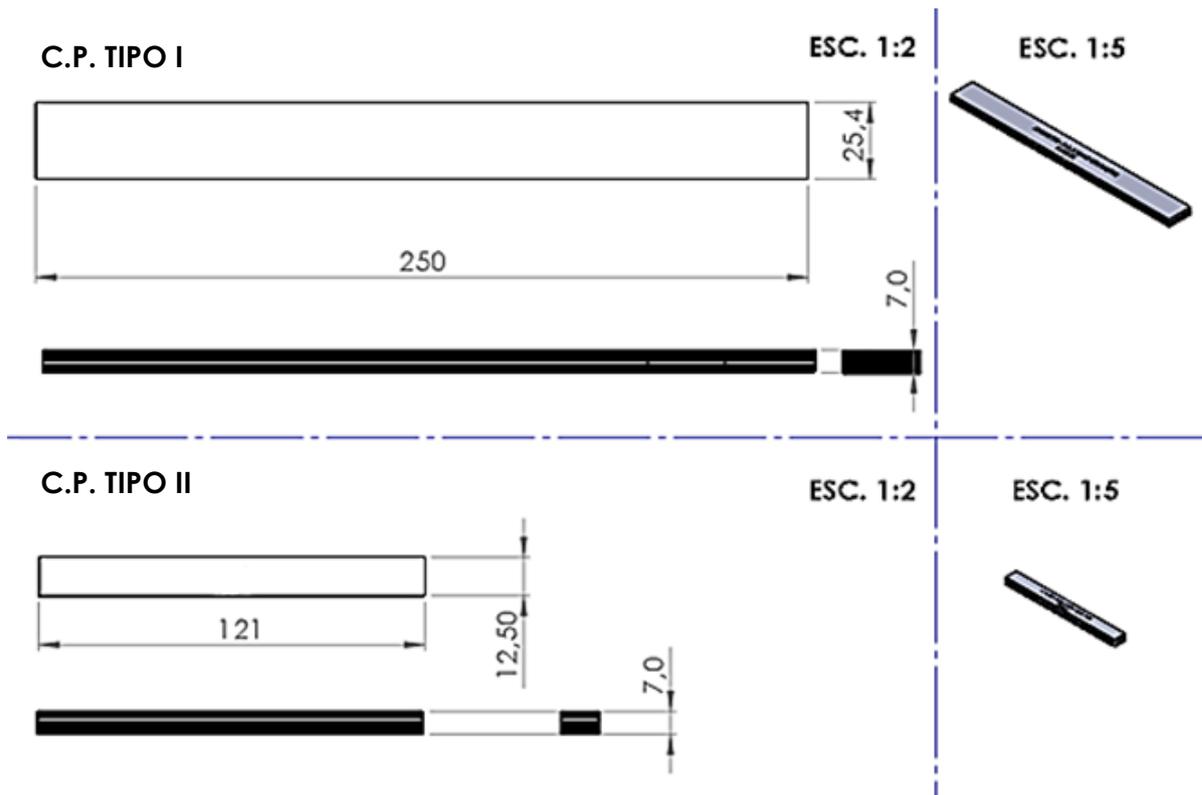
<b>Propriedades do Laminado - LT 450-C10 ( Toray T700S)</b>	
Tensão Máxima à Tração	960 MPa
Módulo de Elasticidade à Tração	65 GPa
Tensão Máxima à Compressão	520 MPa
Módulo de Elasticidade à Compressão	65 GPa

Uma vez que foram utilizados o mesmo adesivo e mesmo processo de fabricação, as características em termos de propriedades mecânica da matriz epóxi utilizadas nesta obra são as mesmas do trabalho de MARQUES (2015).

**Tabela 4:** Propriedades do adesivo (MARQUES, 2015).

<b>Propriedades do Adesivo</b>	
Resistência à Tração	50 MPa
Módulo de Young	2,30 GPa
Coefficiente de Poisson	0,38

Nos corpos de prova foram utilizadas 10 camadas com a sequência de empilhamento em orientações alternadas. Ao final do processo foram gerados compósitos com orientações 0°/ 90° e +45°/-45°, cujas respectivas dimensões podem ser verificadas na figura 23.



**Figura 23:** Geometrias dos corpos de prova

### 3.2 Normas e Ensaio

As normas aplicáveis tanto para os ensaios de flexão quanto para o ensaio de tração, dividem-se superficialmente entre ASTM e ISO. Os seguintes aspectos devem ser observados de modo a avaliar qual norma que se adapta melhor aos corpos de prova:

- As duas normas ISO tem mais flexibilidade em relação a velocidade do ensaio.
- Na norma ISO 527 (ensaio de tração), é obrigatório o uso de reforço para a "mordida" da garra nos corpos de prova, enquanto que na ASTM o uso não é.
- Norma ASTM deixa livre a natureza do material constituinte dos tabs. Já a ISO 527-5 restringe a "tabs" compósitos com orientação de fibras a  $45^\circ (\pm 45^\circ)$ . ASTM Espessura do "tab" é livre/ISO 527- flutua entre 0,5 e 2mm.
- Nas normas ISO e ASTM recomendam o mínimo de 5 testes com corpos de prova (CP's) diferentes para a validação do ensaio.

- Para ambas as normas a instrumentação com strain gages só é usada para ensaio de tração.
- Em toda a bibliografia consultada, as normas mais usadas foram as ASTM D 790 e ASTM D3039.
- Enquanto as normas ISO 527 e ISO 14125 fixam a espessura dos corpos de prova em no máximo 2 mm, a ASTM cria uma parametrização das dimensões, onde pode-se ter mais “liberdade” no dimensionamento das amostras.

Portanto, como os corpos de prova fabricados têm 7,0 mm de espessura e não foi adotado o uso de reforço em fibra de vidro, as normas escolhidas foram a ASTM D 790 e a ASTM D 3039.

### **3.2.1 Ensaio de Tração**

O Ensaio de tração foi realizado posicionando-se o corpo de prova nas garras da máquina de ensaio de forma a fazê-lo sofrer um carregamento axial, com uma variação gradual desta força até uma possível ruptura (ver figura 24).



**Figura 24:** Posicionamento do corpo de prova montado para ensaio de tração.

Neste tipo de ensaio, geram-se diagramas tensão-deformação que são utilizados para determinar o módulo de elasticidade (E), além de outras propriedades mecânicas em vista. O presente trabalho fará referência à norma ASTM D3039, que figura de forma ampla em diversos trabalhos acadêmicos e teses de mestrado, tendo seu teor voltado para o universo dos materiais compósitos em especial a indústria de plásticos e compósitos aeroespaciais.

Dentre os principais fatores com interferência direta no resultado do ensaio, figuram:

- a) **Material e Preparação do C.P.:** Práticas indevidas na fabricação, falta de controle de alinhamento das fibras e danos causados por processos de fabricação são a principal causa na geração de dados inconsistentes/ ensaios mal sucedidos em compósitos.
- b) **“Gripping” (Encaixe):** Altos índices de falha induzidas por encaixe indevido combinados com alta geração de dados inconsistentes são indicadores de problemas no encaixe do corpo de prova.

- c) **Alinhamento do Sistema:** O desalinhamento do sistema de garras gera, durante a aplicação do esforço por parte do cabeçote da máquina, carregamentos de flexão que poderão causar além de falha prematura do corpo de prova, mascarando os resultados, tornando-os incompatíveis. Todas as medidas possíveis deverão ser tomadas de forma a eliminar essas tensões de flexivas.
- d) **Amostragem:** Pelo menos 5 corpos de prova por tipo de ensaio deverão ser realizados para obtenção de dados significativos.
- e) **Geometria:** Os corpos de prova deverão ter seção reta de formato retangular constante. Os demais aspectos geométricos são listados na tabela abaixo:

**Tabela 5:** Requerimentos Geométricos para Ensaio de Tração da norma ASTM D3039.

Parâmetro	Requerimento
<b>Requerimentos do C.P.</b>	
Formato	Seção reta retangular constante
Comprimento Mínimo	Espaço para as garras (gripping) + 2 vezes a largura + gage length
Largura	livre
Tolerância para Largura	$\pm 1\%$ da largura
Espessura	livre
Tolerância para Espessura	$\pm 4\%$ da espessura
Planicidade	Plano ao toque com leve pressão
<b>Requerimentos para o Tab ( se usado):</b>	
Material	livre
Orientação da fibra( para Tabs confeccionados	livre
Espessura do Tab	livre
Variação da Espessura entre Tabs	$\pm 1\%$ da espessura do Tab
Ângulo de chanfro	de 5 a 90° inclusive
Desnível em relação a superfície do C.P.	Quase nulo, de forma a não danificar o C.P.

f) **Uso de Tabs:** O uso não é obrigatório , desde que o carregamento nos C.P's tenha sucesso e que não hajam falhas prematuras como resultado de descontinuidades na estrutura dos mesmos.

g) **Velocidade de Ensaio:** A velocidade padrão (constante), para execução de ensaios de tração é de 2 mm/min ( 0,05 pol/min).

h) **Cálculos:** O ensaio de tração fornece como outputs, pontos que relacionam Força Exercida pelo cabeçote da máquina x Deslocamento ponto-a-ponto. Para obtenção de gráficos do tipo Tensão x deformação, divide-se essa força aplicada pela área transversal de acordo com a equação abaixo proposta pela norma:

$$F^{tu} = \frac{P_{máx}}{A} \quad (3.1)$$

$$\bar{\sigma}_i = \frac{P_i}{A} \quad (3.2)$$

Onde:

$F^{tu}$  = Tensão Última [MPa], psi

$P_{máx}$  = Carregamento máximo antes da falha [N],lbf

$\bar{\sigma}_i$  = Tensão no i-ésimo ponto [MPa], psi

$P_i$  = Carregamento no i-ésimo ponto [N] / lbf

#### **Determinação do Módulo de Elasticidade:**

O módulo de Elasticidade pode ser obtido graficamente através de dois pontos, onde sejam conhecidos os valores para tensão e deformação associados aos mesmos. Em suma, trata-se do coeficiente angular para a reta durante o regime elástico do sistema. Ou seja:

$$E^{chord} = \frac{\Delta\bar{\sigma}}{\Delta\varepsilon} \quad (3.3)$$

Onde:

$E^{chord}$  = Módulo de Elasticidade obtido graficamente [Mpa], psi

$\Delta\bar{\sigma}$  = Variação de tensão entre os 2 pontos considerados

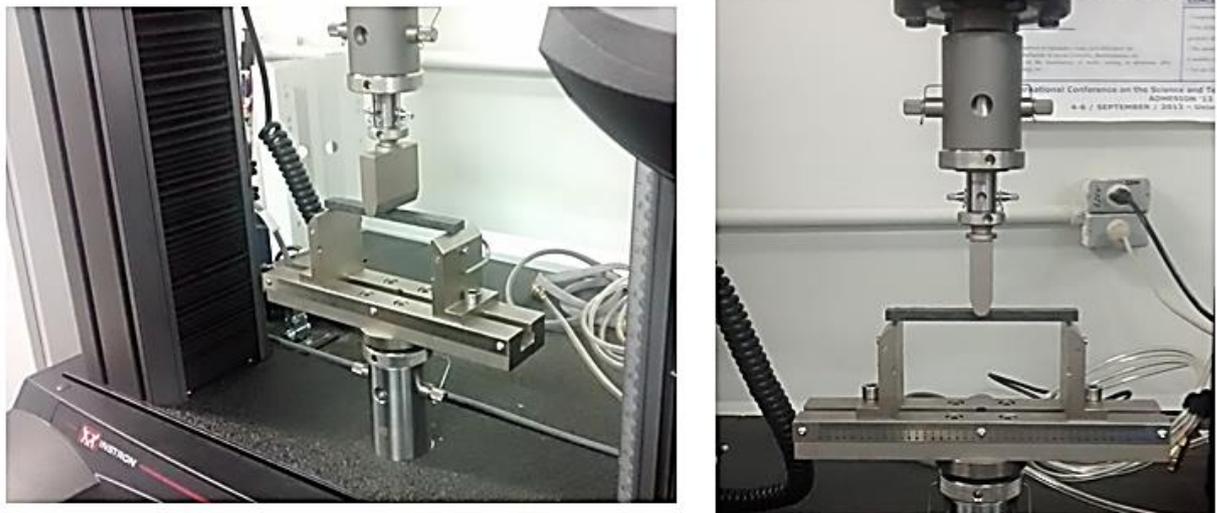
$\Delta\varepsilon$  = Variação da deformação entre os 2 pontos considerados

### 3.2.2 Ensaio de Flexão

Conforme já citado, a norma ASTM D 790 apresenta dois tipos de configurações. O método de ensaio adotado foi o de flexão em 3 pontos, pois a norma recomenda o uso do método de 4 pontos quando não ocorre falha no corpo de prova com a configuração citada anteriormente.

O ensaio consiste em posicionar o corpo de prova de seção transversal retangular em dois apoios e aplicar um carregamento gradualmente crescente no ponto médio destes, através de uma superfície de contato semicilíndrica (ver figura 25). A relação recomendada pela norma entre o espaçamento dos pontos de apoio ( $L$ ) e a espessura ( $h$ ) é descrita na equação 3.4

$$L/h = 16 \quad (3.4)$$



**Figura 25:** Posicionamento do corpo de prova para o ensaio de flexão em três pontos no Laboratório de Compósitos e Adesivos do CEFET/RJ.

O cálculo recomendado pela norma para a tensão de flexão ( $\sigma$ ) na camada mais externa é dado pela equação 3.5. A amostra é solicitada até que ocorra a ruptura ou até uma deformação máxima de 0,05 mm/mm (5.0%), ver figura 26.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.5)$$

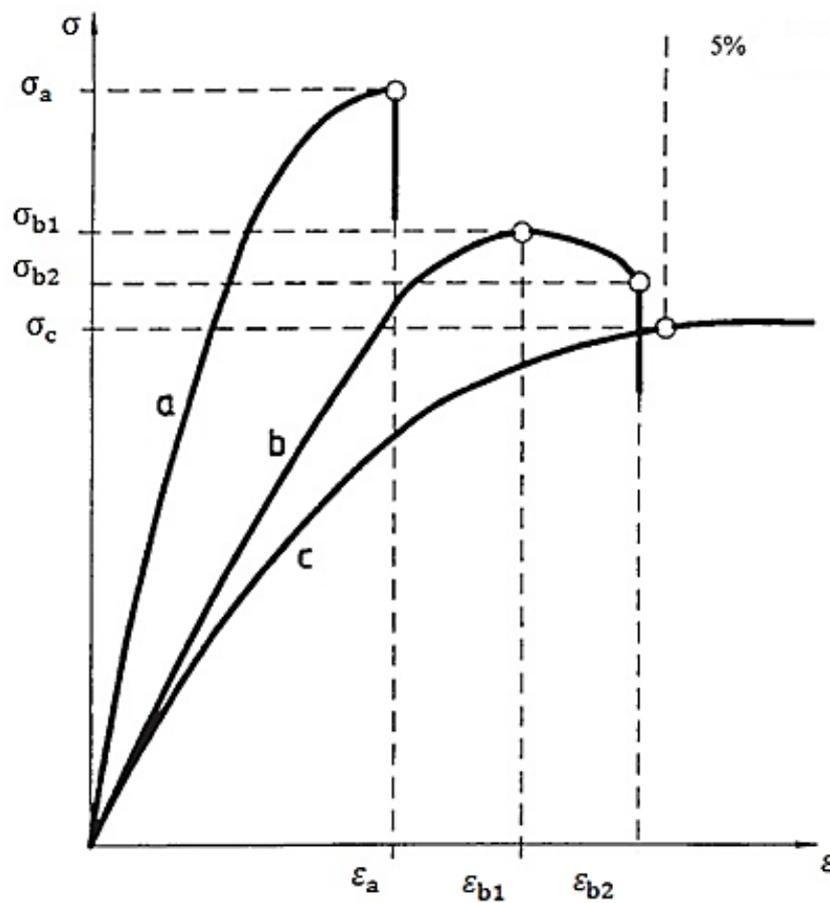
Onde:

P = Carregamento aplicado [N]

L = distancia entre os apoios [mm]

b = largura do corpo de prova [mm]

d = espessura do corpo de prova [mm]



**Figura 26:** Exemplos de gráficos x tensão deformação: (a) rompimento depois do limite de escoamento; (b) escoamento e rompimento antes dos 5%; (c) amostra sem rompimento antes dos 5% de deformação (ASTM D 790, 2003.)

Dentro do regime elástico, com a tensão e a correspondente deformação, pode-se obter o módulo de elasticidade ( $E_1$ ) através da equação 4.19, recomendada pela norma.

$$E_1 = \frac{m L^3}{4bd^3} \quad (3.6)$$

Onde:

m = inclinação da reta tangente ao gráfico Carregamento [N] x Deflexão [mm].

Para a realização dos ensaios, os corpos de prova foram separados em dois grupos: 0°/90° e ± 45°, e foi utilizada a velocidade padrão de 2 mm/min ( 0,05 pol/min). No primeiro tipo foram realizados três ensaios com seus respectivos corpos de prova e até a ruptura (ver figura 32). Já no segundo grupo, foi utilizado inicialmente somente um corpo de prova, em todos os ensaios foram gerados os gráficos de Carregamento [N] x Deflexão [mm].

Os resultados obtidos nos ensaios de flexão representam o trabalho físico realizado pelo cabeçote da máquina no corpo de prova. Dessa forma, existe a necessidade em converter os dados para gráficos de Força [N] x deslocamento [mm] para os valores de tensão [MPa] x deformação [mm/mm]. A norma sugere a equação 3.7 para determinar os valores de deformação.

$$\varepsilon = \frac{6Dd}{L^2} \quad (3.7)$$

Onde:

D = a deflexão no centro do corpo de prova [mm]

Usando as equações eq.3.5 e eq.3.7 e os pontos obtidos dos gráficos de Força [N] x deslocamento [mm] gerados durante os ensaios, foram plotados os gráficos de tensão [MPa] x deformação [%] para todos os ensaios. Uma possível explicação para a norma não tratar da questão do cisalhamento neste caso, seria que a equação 2.0 remete à hipótese da viga longa (comprimento muito maior que a espessura). Estes gráficos serão comentados na seção “Análise dos resultados”.

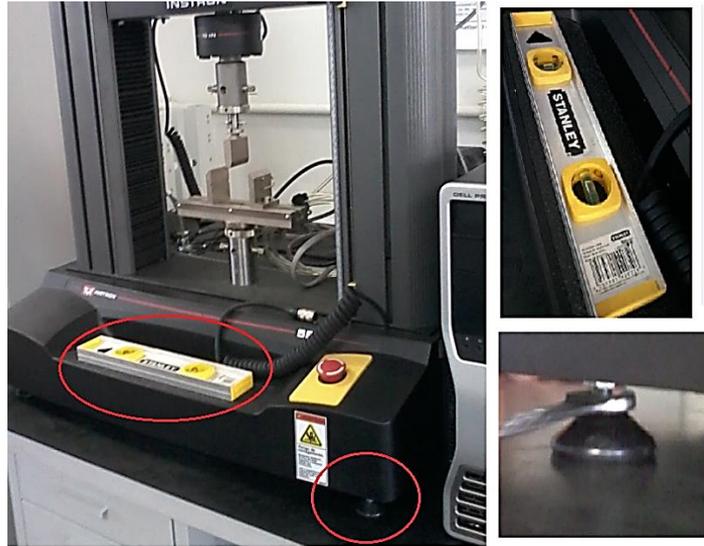
De forma a resumir o que foi ensaiado neste Projeto Final, pode-se consultar a tabela 4, verificando as possíveis variações dos corpos de prova no que diz respeito à numeração, orientação, dimensões e ensaios realizados.

**Tabela 6:** Descrição resumida dos corpos de prova.

<b>Nº do Corpo de prova</b>	<b>Orientação</b>	<b>Dimensões [mm]</b>	<b>Tipo de ensaio</b>
<b>1</b>	0°/90°	121 x 12,5 x 7,0	Flexão
<b>2</b>	0°/90°	121 x 12,5 x 7,0	Flexão
<b>3</b>	0°/90°	121 x 12,5 x 7,0	Flexão
<b>4</b>	± 45°	121 x 12,5 x 7,0	Flexão
<b>5</b>	0°/90°	121 x 12,5 x 7,0	Tração
<b>6</b>	0°/90°	121 x 12,5 x 7,0	Tração
<b>7</b>	0°/90°	250 x 25,4 x 7,0	Flexão
<b>8</b>	± 45°	250 x 25,4 x 7,0	Flexão
<b>9</b>	± 45°	250 x 25,4 x 7,0	Flexão

Tratando-se de atividades em laboratório, é comum existirem imprevistos e algumas dificuldades não planejadas. Dessa forma, ao realizarmos os ensaios deste Projeto Final, nos deparamos com:

- Ajuste de montagem, alinhamento e nivelamento da máquina de ensaio universal, devido à instalação em uma nova mesa de suporte para a máquina, ver figura 27
- Dificuldades operacionais com a utilização da máquina.
- Atraso na rastreabilidade da fibra de carbono junto ao fornecedor e, conseqüentemente, no envio das especificações técnicas do material.
- A restrição dimensional no valor de 7,0 mm na espessura de todo os corpos de prova impactou na efetividade do ensaio de tração.
- Dificuldade de realizar o ensaio de tração sem o uso de “tabs”, ou seja, problemas com a garra ao “morder” corpo de prova.



**Figura 27:** Alinhamento e nivelamento da máquina de ensaio universal, mostrando em detalhes os itens em vermelho.

## Capítulo 4

### 4. Desenvolvimento Analítico

#### 4.1 Aplicações da Lei das Misturas

A equação da lei das misturas (eq. 2.2) pode ser ampliada de uma forma genérica, tendo como base em sua formulação a equação 4.1, segundo (SCARINGI, 2010).

$$P_c = V_f P_f + (1 - V_f) P_m \quad (4.1)$$

Onde:

$P_c$  - Propriedade do compósito

$P_f$  - Propriedade da fibra

$P_m$  - Propriedade da matriz

$V_f$  - Fração volumétrica da fibra

Vale ressaltar que em nível de fração volumétrica, também se tem:

$$V_f + V_m = 1 \quad (4.2)$$

Onde:

$V_f$  - Fração volumétrica da fibra

$V_m$  - Fração volumétrica da matriz

Portanto, é válida a extrapolação da lei das misturas para outras propriedades mecânicas, aplicada à densidade temos a equação 4.3 e aplicada ao coeficiente de Poisson temos a equação 4.4:

$$\rho_c = \rho_f v_f + (1 - v_f) \rho_m \quad (4.3)$$

$$\vartheta_c = \vartheta_f v_f + (1 - v_f) \vartheta_m \quad (4.4)$$

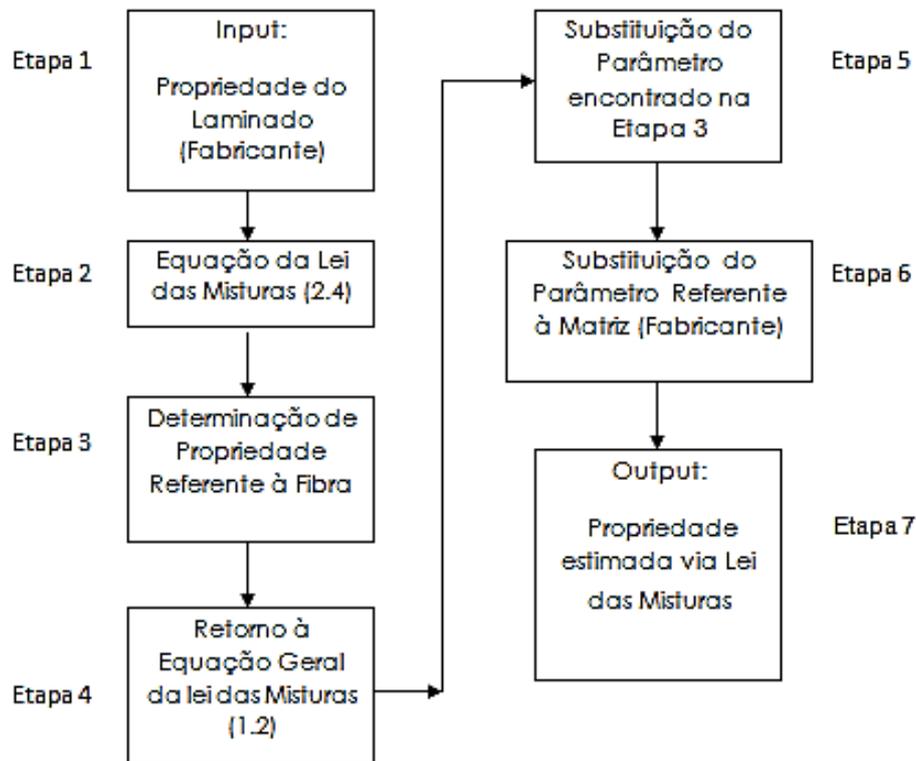
### 4.1.2 Estimando Propriedades Mecânicas via Lei das Misturas

Em muitas situações, as propriedades da fibra na direção longitudinal são uma ou duas ordens de grandeza superiores às da matriz. Tal fenômeno permite caracterizá-la como direção predominante, ou seja, direção onde se encontram as propriedades mecânicas máximas do compósito. Para a direção transversal à fibra, segundo MOURA (2009), o módulo transversal é uma propriedade “dominada” pela matriz, eq.4.5. Logo, é matematicamente razoável dizer que as propriedades mecânicas da fibra nessa direção sobrepõem as da matriz (reforçando o conceito apresentado previamente no qual o papel da fibra nos materiais compósitos é de lidar com as solicitações impostas, enquanto a matriz garante forma, agindo como agente de coesão para as fibras sem contribuir de forma expressiva no comportamento do compósito como resposta aos esforços sofridos).

A partir da Eq. 2.2, considerando que  $E_{f1} \gg E_m$  e o  $V_f$  varia entre 0,5 e 0,65, segundo MOURA (2009), temos:

$$E_1 = V_f E_{f1} \quad (4.5)$$

De forma a estimar as propriedades mecânicas da fibra, a partir das propriedades do laminado e matriz previamente fornecidas pelo fabricante, uma metodologia foi seguida: consiste na obtenção de determinada propriedade mecânica em vista do laminado calculada por meio da equação da lei das misturas. Em um segundo momento, com a consideração feita no texto acima ( $E_{f1} \gg E_m$ ) utiliza-se a eq. 4.5 para determinar a contribuição da fibra na mesma propriedade. O fluxograma da figura 28 na etapa 3 esclarece este processo. Logo, através deste método, foi encontrado o valor de  $E_{f1} = 130$  GPa.



**Figura 28:** Fluxograma de cálculo das propriedades através da lei das misturas.

Aplicando-se o mesmo método para as demais propriedades mecânicas, obtêm-se as propriedades inerentes à fibra, conforme a tabela 7:

**Tabela 7:** Propriedades Mecânicas da Fibra Estimadas via Lei das Misturas

<b>Propriedades da Fibra - LT 450-C10 ( Via Lei das Misturas)</b>	
Módulo de Young à Tração	130 GPa
Tensão Máxima à Tração	1920 MPa
Módulo de Young à Compressão	130 GPa
Tensão Máxima à Compressão	1040 MPa

Por fim, retorna-se à equação 2.2 substituindo o parâmetro referente à fibra encontrado previamente ( $E_{f1}$ ), juntamente com as propriedades da matriz (tabela 3), obtendo como “output” as propriedades mecânicas do laminado estimadas via a lei das misturas (etapas 4, 5, 6 e 7 da figura 28). As propriedades finais com as contribuições da fibra e da matriz podem ser vistas na tabela 8.

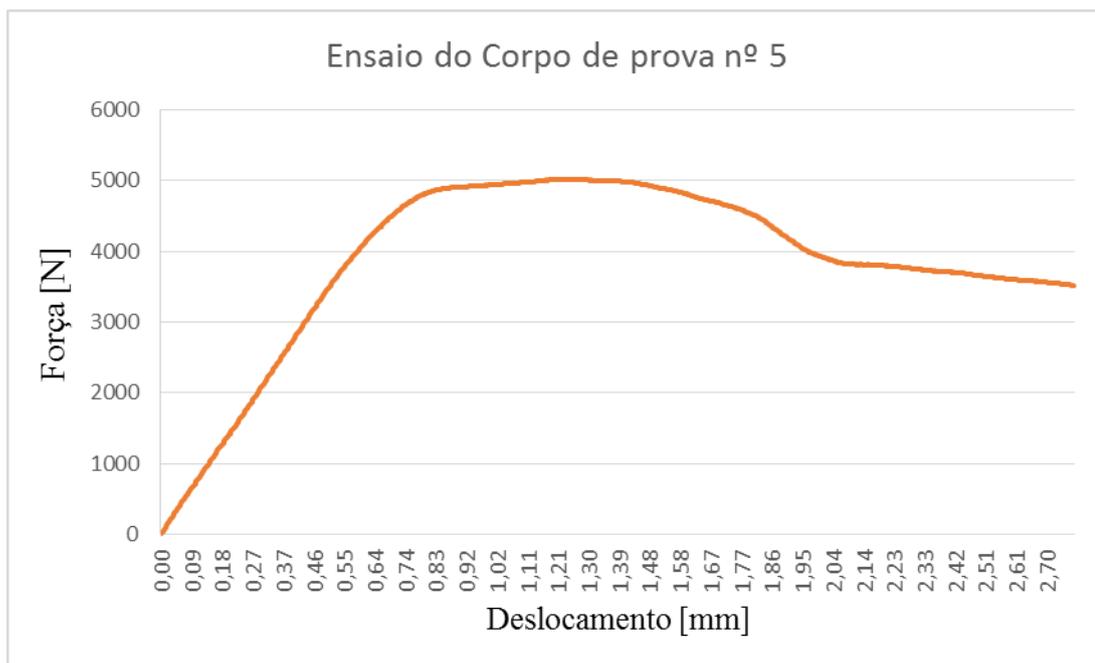
**Tabela 8:** Propriedades do Laminado estimadas via lei das misturas

<b>Propriedades do Laminado - LT 450-C10 (Via Lei das Misturas)</b>	
Tensão Máxima à Tração	985 MPa
Módulo de Elasticidade à Tração	66,15 GPa
Tensão Máxima à Compressão	545 MPa
Módulo de Elasticidade à Compressão	66,15GPa

## Capítulo 5

### 5. Análise dos resultados

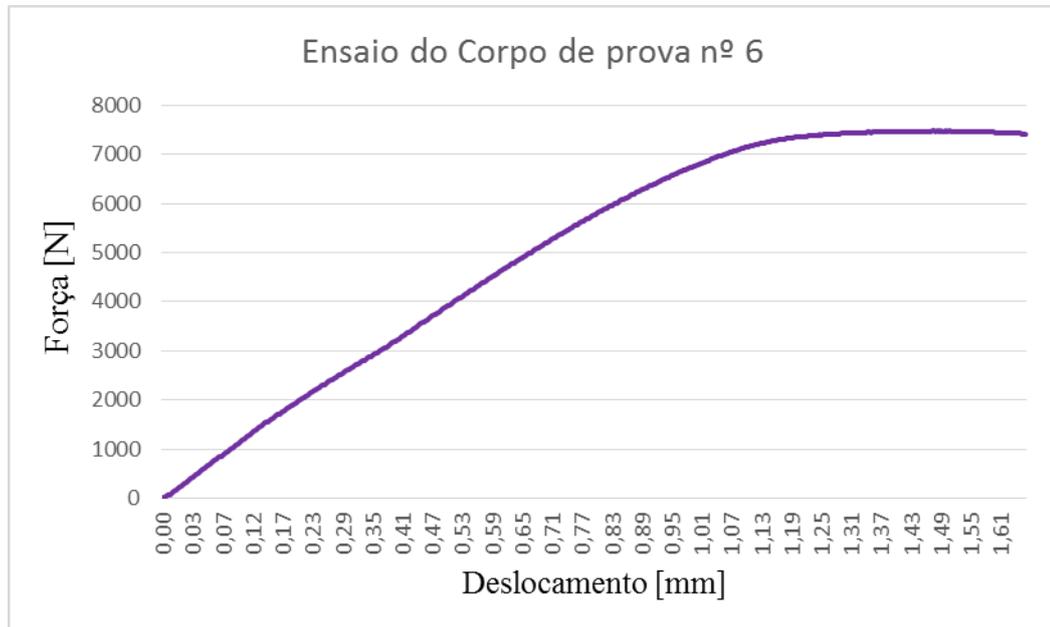
Os primeiros resultados a serem abordados serão referentes aos ensaios de tração. Conforme a norma supracitada, este ensaio é classificado como bem sucedido quando ocorre a ruptura do corpo-de-prova. No experimento realizado no corpo de prova nº 5, após determinado nível de carregamento (aproximadamente 5000 N), o corpo começou a se desprender das garras, evidenciando a necessidade para este ensaio dos “tabs” adesivos, conforme mostra a Figura 29.



**Figura 29:** Gráfico Força [N] x deslocamento [mm] do corpo de prova nº5 para o ensaio de tração.

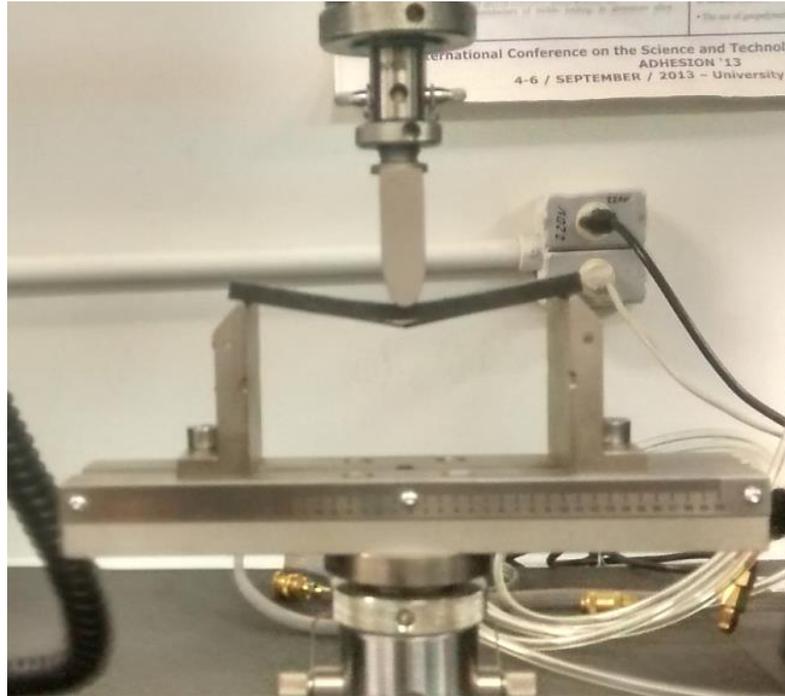
Outro problema surgiu durante o corpo de prova nº6, a ordem de grandeza dos esforços necessários para rompimento do corpo-de-prova ultrapassariam os limites fornecidos pela célula de carga do equipamento (10KN). Ao atingir o limite de carregamento pré-definido de 7500N o ensaio foi suspenso. Portanto, não foi possível validar os ensaios de

tração dos corpos n°5 e 6 com o equipamento disponível no laboratório de Compósitos e Adesivos.



**Figura 30:** Gráfico Força [N] x deslocamento [mm] do corpo de prova n°6 para o ensaio de tração.

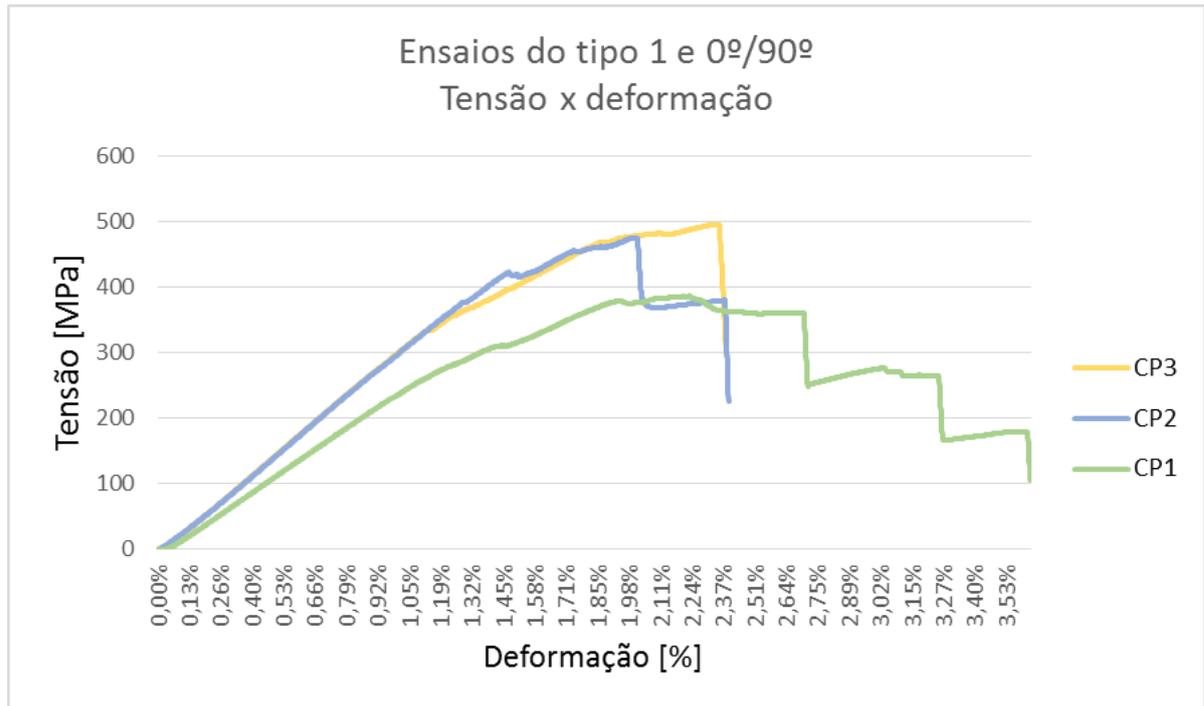
Em relação aos ensaios de flexão, foram utilizados os mesmos espaçamentos nos corpos de prova de números 1, 2, 3 e 4, no valor de 110mm. Nos laminados do tipo 0°/90°, todos os corpos de prova alcançaram as tensões de ruptura, a figura 31 ilustra este processo para o corpo de prova n°2.



**Figura 31:** Solicitação do corpo de prova nº2 até a ruptura do mesmo.

Os valores das constantes usadas nas equações 4.19 e 4.20 foram:  $L = 120$  mm;  $b = 12,5$  mm ;  $d = 7,0$  mm. Logo, de posse dos gráficos Força [N] x deslocamento [mm] gerados pela aquisição de dados da máquina e das equações citadas, foi possível plotar os gráficos de Tensão [MPa] x deformação [%] para os laminados.

A figura 32 trata dos compósitos do tipo  $0^\circ/90^\circ$ , tal que o corpo de prova número 1 esta em verde, enquanto que os números 2 e 3 estão em azul e amarelo respectivamente. Nos casos dos C.P's 1 e 2 , pode-se perceber uma sequencias de falhas nas sucessivas camadas, ou seja, houve a ruptura camada por camada, começando das mais externas até a mais internas.



**Figura 32:** Gráfico Tensão x deformação para os corpos de prova do tipo 0°/90°.

No entanto, este processo é muito complexo e envolve vários tipos de falhas, desde a ruptura da fibra de carbono até falhas entre as camadas. Ao analisarmos os tipos de falhas ocorridas nos compósitos que sofreram ruptura durante o ensaio de flexão, ou seja, nos corpos de prova orientados 0°/90°(ver figura 33), verificou-se a ocorrência de ruptura da camada mais externa, ruptura generalizada da fibra e ruptura interlaminar, conforme os parâmetros da norma representados na figura 34.

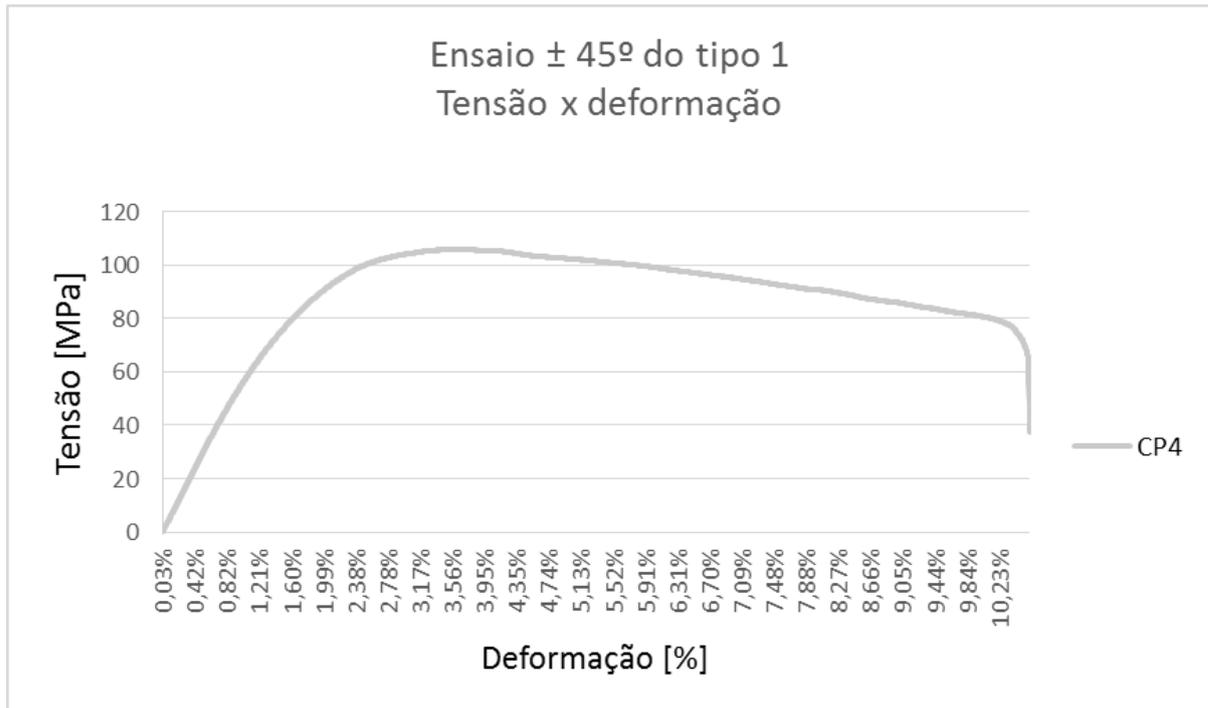


**Figura 33:** Região de falhas no compósito orientado a  $0^{\circ}/90^{\circ}$



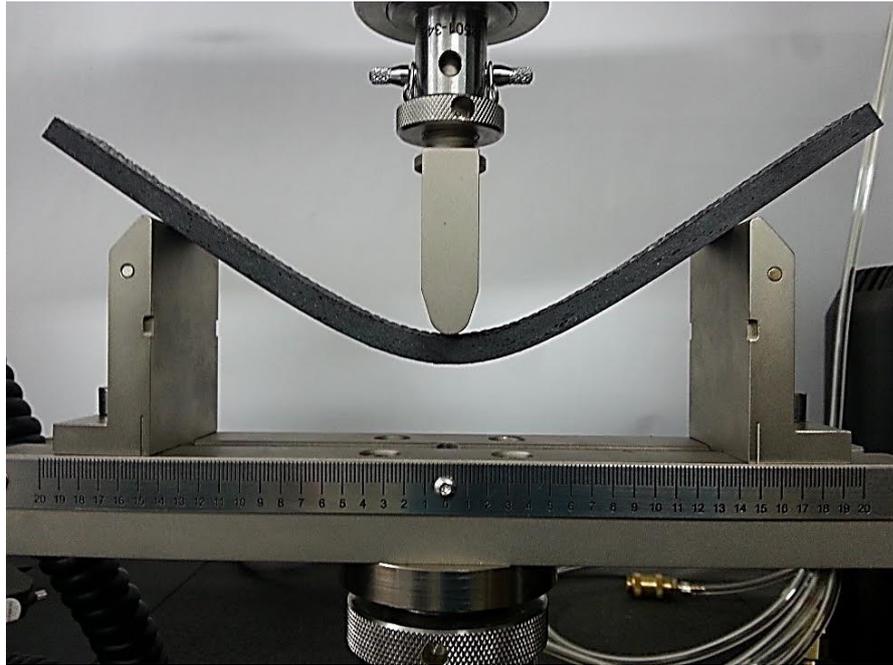
**Figura 34:** Modos de falha em ensaios de flexão de 3 pontos (ISO 14125, 2011)

O procedimento de geração dos gráficos Tensão [MPa] x deformação [%] utilizado no corpo de prova de número 4 foi análogo ao dos anteriores. No entanto, ocorreu uma perda de contato em relação aos apoios na faixa de 9% a 11% da figura 35. No entanto, isso não invalida o ensaio de acordo com a norma ASTM D790, conforme comentado na seção 3.2.2.



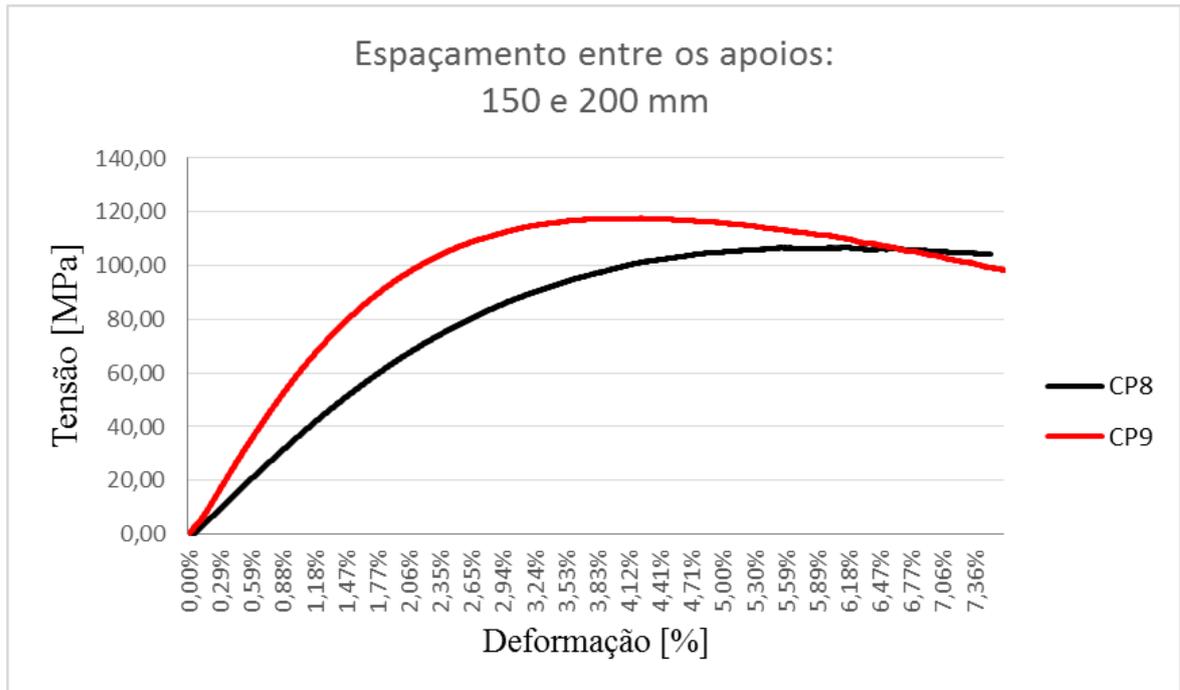
**Figura 35:** Gráfico tensão deformação para o corpo de prova nº4 orientado à  $\pm 45^\circ$ .

Para alcançar níveis maiores de tensões e tentar provocar uma ruptura, foram usados novos corpos de prova com maior comprimento, para evitar a perda de contato com os apoios. Também foi usado um aumento do espaçamento entre os apoios para favorecer um crescimento do valor de momento fletor, e consequentemente da tensão de flexão. Portanto, foram realizados novos ensaios usando os corpos de prova nº 8 e 9 do tipo  $\pm 45^\circ$  e espaçamentos de 150 e 200 mm, respectivamente.



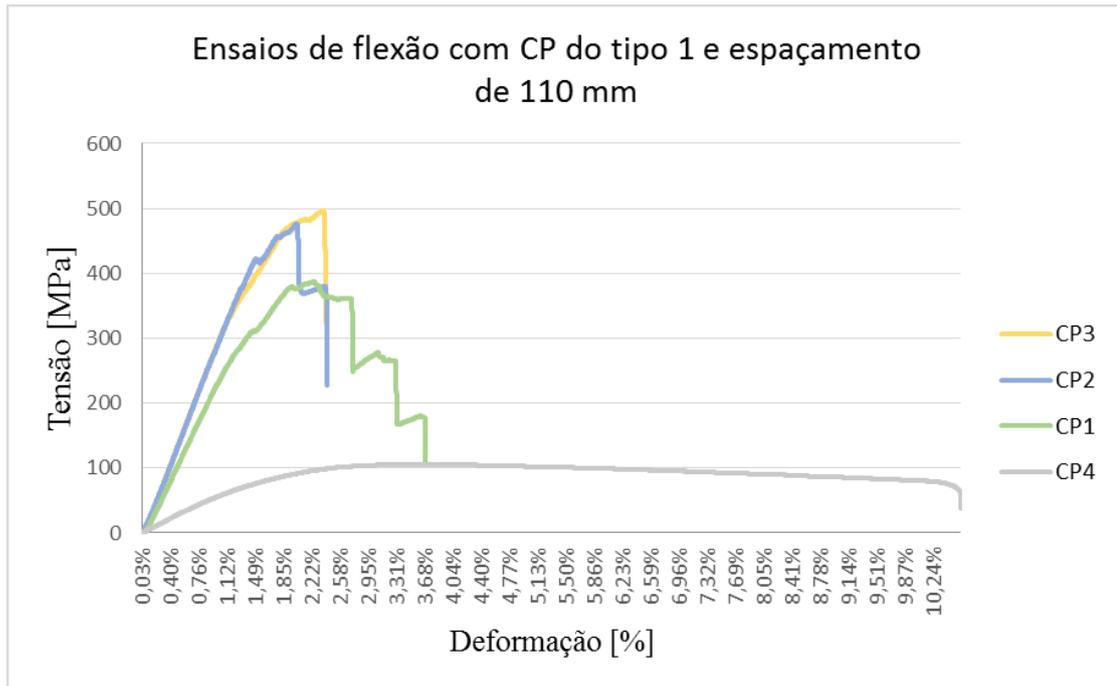
**Figura 36:** Ensaio de flexão no corpos de prova de  $\pm 45^\circ$  com espaçamento de 150 mm.

Os corpos de prova do tipo 2 e orientados à  $\pm 45^\circ$  foram representados na figura 36, aonde é possível ver o ensaio de flexão. No gráfico tensão [MPa] x deformação [%] corpo de prova número 8 esta na cor preta, enquanto que o número 9 esta em vermelho, conforme a figura 37. De fato, percebe-se que o aumento do espaçamento entre os apoios provocou um ganho no nível de tensões, aonde o corpo de prova número 9 (com maior espaçamento) teve maiores tensões. Apesar do aumento do carregamento, não ocorreu a ruptura dos corpos de prova.

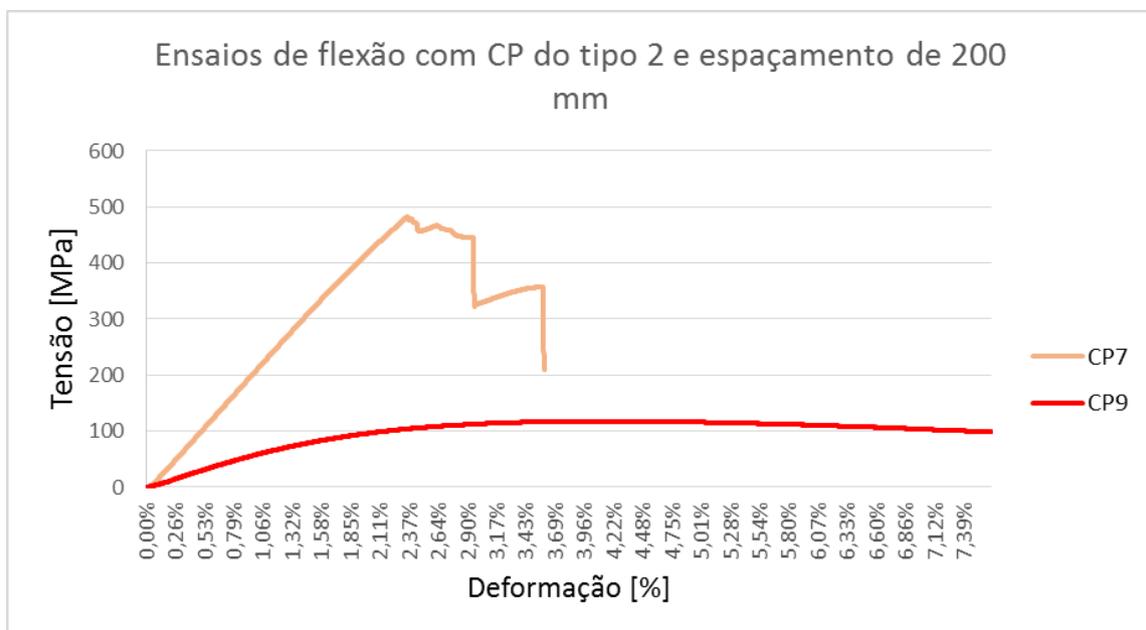


**Figura 37:** Gráfico Tensão x deformação para os corpos de prova do tipo  $\pm 45^\circ$ .

De uma forma geral, ao analisar os gráficos de tensão [MPa] x deformação [%] dos corpos de prova dos ensaios de flexão realizados, é notável que a influência da orientação da fibra é muito significativa. Para melhor visualização deste parâmetro, os gráficos foram agrupados conforme o tipo de corpo de prova e o valor do espaçamento utilizado (figuras 38 e 39).

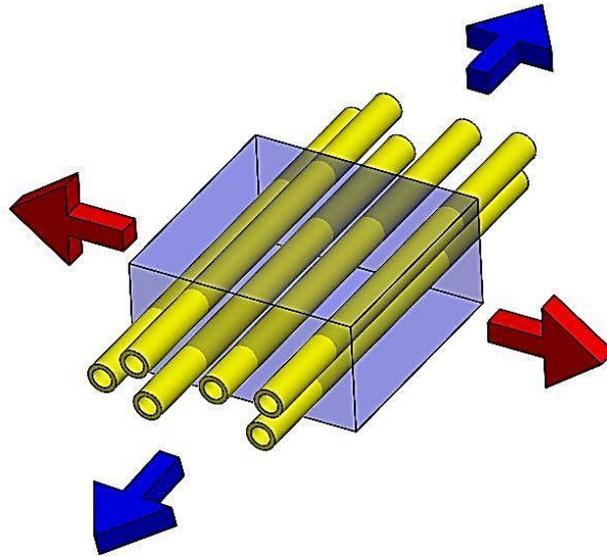


**Figura 38:** Gráficos de tensão [MPa] x deformação [%] para flexão dos corpos de prova do tipo 1 e espaçamento de 110 mm.



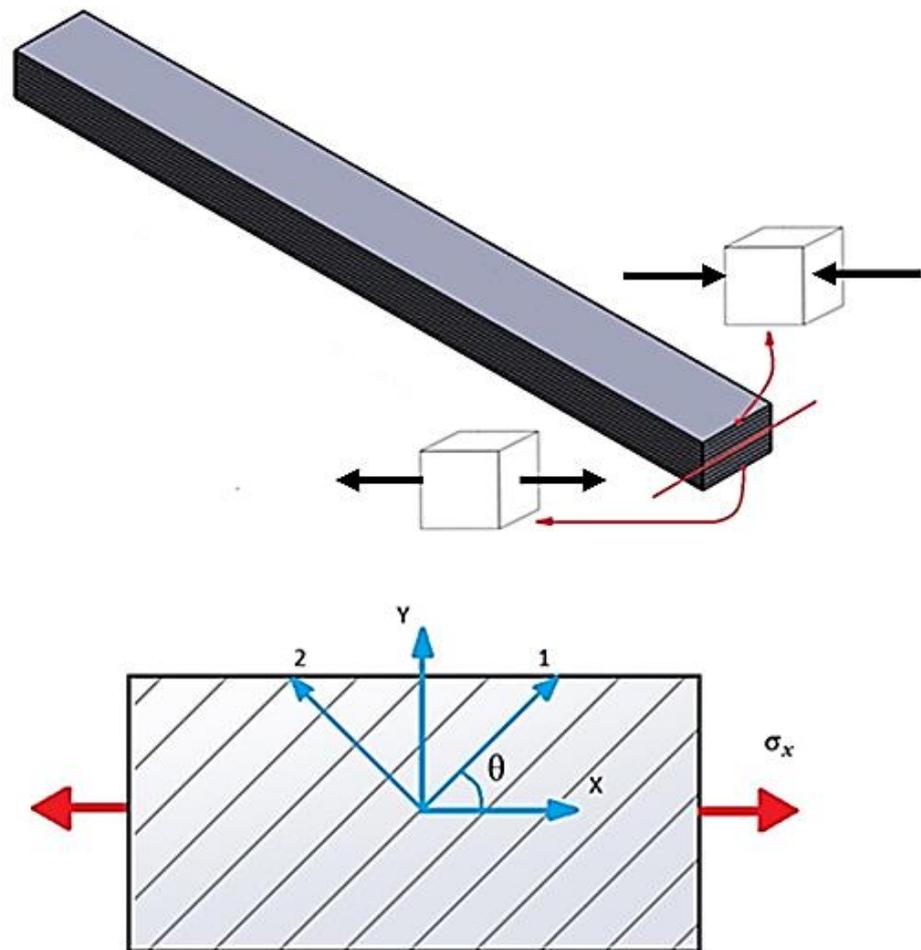
**Figura 39:** Gráficos de tensão [MPa] x deformação [%] para flexão dos corpos de prova do tipo 2 e espaçamento de 200 mm.

Os compósitos do tipo  $0^\circ/90^\circ$  obtiveram os maiores valores de Módulo de Elasticidade e alcançaram maiores níveis de tensões. Isso pode ser explicado pelo fato de nesta configuração o compósito apresentar a maior quantidade de fibras alinhadas com a direção do carregamento, onde a fibra tem maiores propriedades mecânicas (ver direção das setas azuis da figura 40).



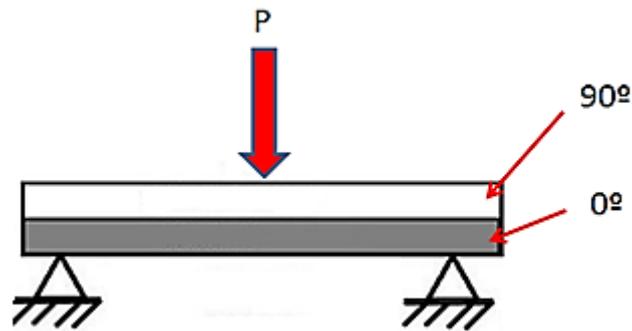
**Figura 40:** Representação dos Esforços nos sentidos longitudinal e transversal à fibra pelas setas azuis e vermelhas, respectivamente (SCARINGI, 2010).

Quando a direção da fibra não é paralela à direção do carregamento, existe a necessidade de uma transformação dos referenciais, representado na figura 41 que trata da exemplificação do corpo de prova submetido à flexão. À medida que  $\theta$  aumenta, o compósito se aproxima da condição de menor resistência mecânica das fibras, ou seja, orientação a  $90^\circ$ . Dessa forma, os laminados orientados à  $\pm 45^\circ$  sofrem uma redução em termos de valores das propriedades devido ao aumento de  $\theta$ .



**Figura 41:** Simplificação de um corpo de prova carregado em flexão, demonstrando os elementos trativos, compressivos e a transformação de referências do eixo ortotrópico em função de  $\theta$ .

No que tange a ductilidade, os corpos de prova orientados a  $0^\circ/90^\circ$  apresentaram menores valores de deformação. Isso acontece devido à diferença de rigidez entre as camadas, onde as orientadas a  $0^\circ$  tem maior rigidez do que as orientadas  $90^\circ$  ver figura 42. Dessa forma, estes elementos mais rígidos contribuem evitando as deformações de flexão da camada anterior.



**Figura 42:** Modelo simplificado com identificação das camadas no experimento.

Ao aplicar a equação 4.19, foram obtidos os módulos de elasticidades para cada ensaio (conforme o respectivo valor de “m” do anexo C), estes dados foram separados conforme a orientação da fibra, ver tabela 9. Para uma comparação mais abrangente, também foram comparados os valores de tensão máxima.

**Tabela 9:** Valores experimentais das propriedades mecânicas.

	Valores experimentais							Média 0°/90°	Desvio Padrão ( $\sigma$ )
	CP. 1	CP. 2	CP. 3	CP. 4	CP. 9	CP. 8			
$E_1$ [Gpa]	27,85	31,56	31,95	5,55	13,13	22,86	30,45	2,26	
Tensão Máxima [MPa]	386,6	476	496,2	105,9	539	119	452,94	14,26	
	Orientação 0°/90°			Orientação ±45°			Resultados		

Ao aplicar-se a lei das misturas, puderam-se quantificar algumas propriedades mecânicas do compósito. Dessa forma, foi possível prever valores teóricos para as propriedades em tração (ver tabela 8), visto que o respectivo ensaio experimental se mostrou inviável, a lei das misturas se mostrou uma importante ferramenta na obtenção de parâmetros que poderão ser base de comparação para futuros trabalhos.

## Capítulo 6

### 6. Conclusão

O objetivo principal deste Projeto Final foi o estudo experimental e análise do comportamento mecânico de materiais compósitos, visando à obtenção das propriedades mecânicas, bem como as constantes de engenharia possíveis.

Em relação aos resultados obtidos no ensaio de tração não foi possível realizar a instrumentação prevista na norma ASTM D3039 para obtenção das constantes  $E_2$  e  $\nu_{12}$ . Outro fator de relevância foi a comprovação de que a utilização de reforços (“tabs”) sugeridos pela norma se faz necessária para o sucesso deste ensaio. A aplicação da Lei das Misturas se fez necessária de formar à auferir algumas das propriedades mecânicas à tração. Logo, foram realizados com sucesso pleno somente os ensaios de flexão, visando a obtenção dos gráficos de tensão x deformação e da constante  $E_1$  em cada tipo de corpo de prova.

Ao serem analisados os compósitos multidirecionais propostos pode-se perceber uma variação significativa em seu comportamento em função da orientação, com um forte fator de influência do processo de fabricação em suas propriedades mecânicas, devido à definição das frações volumétricas envolvidas. Os compósitos do tipo  $0^\circ/90^\circ$  obtiveram os maiores valores de Módulo de Elasticidade e alcançaram maiores níveis de tensões, enquanto que os orientados à  $\pm 45^\circ$  apresentaram maiores valores de deformação. Tal comportamento foi mantido com variação de geometria e "spans" dos respectivos corpos de prova.

## Capítulo 7

### 7. Sugestão de Futuros Trabalhos

Com a experiência adquirida durante a realização deste projeto, principalmente no que diz respeito aos ensaios experimentais, pode-se sugerir alguns pontos para melhorias sejam feitas:

- Novo estudo de dimensionamento para a fabricação de corpos de prova para ensaios de tração, dentro do limite de operação da máquina universal utilizada (10KN) e atendendo a norma ASTM D3039.
- Fabricar dois tipos de corpos de prova: com a utilização de “tabs” (reforços), conforme a norma ASTM D3039, e outros sem este recurso. Desta forma, pode-se comparar a efetividade da aplicação deste tipo reforço no ensaio de tração.
- Após a realização de um ensaio de tração bem sucedido, realizar a instrumentação sugerida na norma aplicável para obter as constantes  $E_2$  e  $\nu_{12}$ .
- Realizar o estudo das normas ISO 14129 e ASTM D 3518 para obter a constante  $G_{12}$ .
- Investigar o comportamento apresentado dos corpos de prova via ensaios mais específicos para avaliar o cisalhamento interlaminar.
- Realizar um estudo de viabilidade para produzir o corpo de prova em compósito dentro do Laboratório de Compósitos e Adesivos do CEFET-RJ.

## Referências Bibliográficas

ALMEIDA, Euripedes Guilherme Paphael de. **Inspeção termográfica de danos por impacto em laminados compósitos sólidos de matriz polimérica fortalecida com fibras de carbono**. 2010. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos Instituto de Física de São Carlos Instituto de Química de São Carlos, São Carlos, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 790**: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. 3 ed. United States, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3039**: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. United States, 2000.

ANGÉLICO, Ricardo Afonso. **Avaliação de modelos de falhas progressivas para estruturas em material compósito**. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

BOTELHO, Edson C.; REZENDE, Mirabel C.. Caracterização mecânica de compósitos de poliamida/fibra de carbono via ensaios de cisalhamento interlaminar e de mecânica da fratura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 12, n. 3, p.153-163, 2002.

BRITISH STANDARD. **BS EN ISO 527-5**: Plastics - Determination of tensile properties. Uk, 2009. 20 p.

BRITISH STANDARD. **BS EN ISO 14125**: Fibre-reinforced plastic composites - Determination of flexural properties. Uk, 2011. 26 p.

CAETANO, Mario J. L.. **Importância Relativa dos Materiais**. 2010. Disponível em: <[http://ctborracha.com/?page\\_id=442](http://ctborracha.com/?page_id=442)>. Acesso em: 11 nov. 2014.

CALLISTER JUNIOR, William D.. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 7. ed. Brasil: Guanabara, 2008.

DESIGN INSITE (Denmark). **Composite materials processes**. Disponível em: <<http://www.designinsite.dk/htmsider/inspproc.htm>>. Acesso em: 05 mar. 2015.

FORMULA 1 (Estados Unidos). **Inside the US F1 Team factory**. 2015. Disponível em: <<http://origin.lb.formula1.com/gallery/other/2010/430.html>>. Acesso em: 10 nov. 2014.

GUAMÁ, Fernando F. M. C. de. **Análise estrutural de cilindros revestidos de compósitos para armazenamento de GNV**. 2012. 106 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

HIBBELER, Russel C.. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. Brasil: Prentice Hall Brasil, 2010.

MARQUES, Francisco Adson. **Análise experimental de reparos de compósitos**. 2015. 41 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Cefet/RJ, Rio de Janeiro, 2015.

MONTEIRO, Estevão Freire Elisabeth E. C.; CYRINO, Julio C. R.. Propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno com fibra de vidro. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, p.25-32, jul. 94.

MOURA, Marcelo F. S. F. de et al. **Materiais compósitos: Materiais, fabrico e comportamento mecânico**. 2. ed. Porto: Publindústria, 2009. 382 p. Resistência dos Materiais, R.C. Hibbeler.

NATIONAL INSTRUMENTS BRASIL (São Paulo). **Injeção de plástico**. 2014. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3130/en/>>. Acesso em: 22 out. 2014.

PINHEIRO, David José Gonçalves. **Análise Estática e dinâmica de painéis corrugados construídos em materiais compósitos**. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2010.

PINHO, Silvestre Taveira. **Crítérios de rotura em Materiais Compósitos**. 2005. Disponível em: <<http://paginas.fe.up.pt/~stpinho/teaching/feup/y0506/mscaula1.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2014.

SAMPERT, Fernando. **Análise de uma longarina de avião acrobático em material compósito**. 2012. 28 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SCARINGI, Denis. **Comportamento em flexão a quatro pontos de tubos compósitos produzidos pela técnica de enrolamento filamental**. 2010. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SILVA, Nelson Marques da. **Obtenção e avaliação mecano dinâmica de compósitos, ortotrópicos e anisotrópicos com matriz polimérica reforçada com fibras de carbono ou poliaramida**. 2005. 236 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2005.

SIQUEIRA, Eder José. **Estudos dos Critérios de falha em compósitos pps/fibras de carbono utilizando elementos finitos**. 2009. 183 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

SIQUEIRA, Eder José et al. Estudo dos critérios de falhas em flexão em compósitos PPS/Fibras de carbono utilizando elementos finitos. **Cadernos Unifoa**, Volta Redonda, p.11-17, dez. 2009. Quadimestral.

SOUZA, Emerson Bonafé. **Resistência ao Cisalhamento Iosipescu do Compósito Laminado Reforçado com Tecido de Fibras de Vidro/Epóxi**. 2006. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

STRATUS (São José dos Campos). **Processo de Pultrusão**. 2015. Disponível em: <[http://www.stratusfrp.com/index.php?option=com\\_content&view=frontpage&Itemid=1](http://www.stratusfrp.com/index.php?option=com_content&view=frontpage&Itemid=1)>. Acesso em: 20 jan. 2015. [<http://www.stratusfrp.com>].

ZANATTA, Rodrigo. **Materiais compósitos na aviação**: os materiais que prometem reduzir o peso e o consumo das aeronaves modernas. 2012. Disponível em: <<http://www.aviacao.org/article/materiais-compositos/3/>>. Acesso em: 20 dez. 2014.

ZARICHTA, Cristian. **Projeto de um trêm de pouso do tipo "wittman" em lâmina de material compósito**. 2005. 28 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, 2 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

## ANEXO A: Propriedades do Fabricante referentes à Fibra de Carbono

### 1. PRODUCT NAME

LT 450-C10

### 2. COLOUR CODE

-

### 3. TECHNICAL INFORMATION

DEVOLD®AMT Multiaxial reinforcement is multicompatible with most resin systems.  
Fibre content around 60% is easily obtained with ordinary hand lay-up.

### 4. FABRIC SPECIFICATIONS

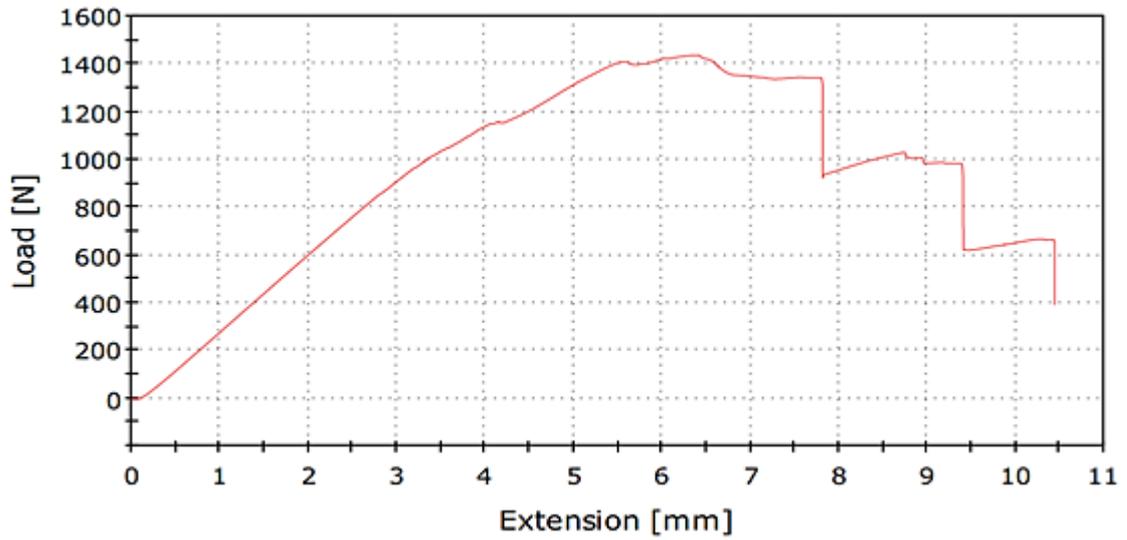
Layer orientation, [degree]	0°	+45°	90°	-45°	Knit yarn	Total
Layer Weight, [g/m <sup>2</sup> ]	209		209		6	424 ±3%
Material	Toray T700S		Toray T700S			

### 5. TYPICAL LAMINATE PROPERTIES

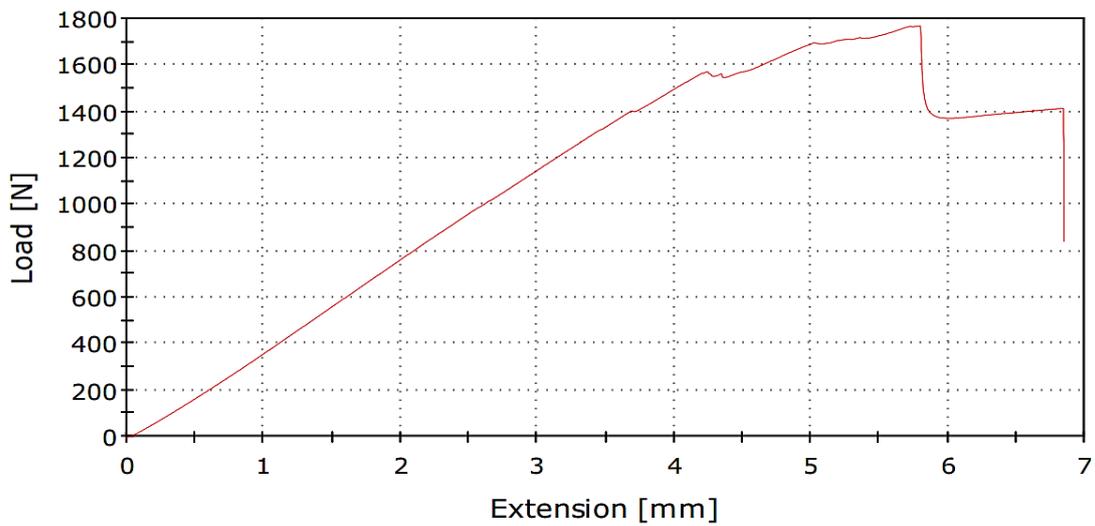
Matrix type <sup>1</sup>	Fibre weight fraction	Fibre volum fraction	Layer thickness
Vinylester type	60 [%]	50 [%]	0,47 [mm]

Mechanical properties		0°	+45°	90°	-45°
Tensile modulus	[GPa]	65		65	
Tensile strength	[MPa]	960		960	
Compressive modulus	[GPa]	65		65	
Compressive strength	[MPa]	520		520	
Shear strength, interlam.	[MPa]				
Shear strength, inplane	[MPa]				
Elongation at break (tension)	[%]	1,5		1,5	

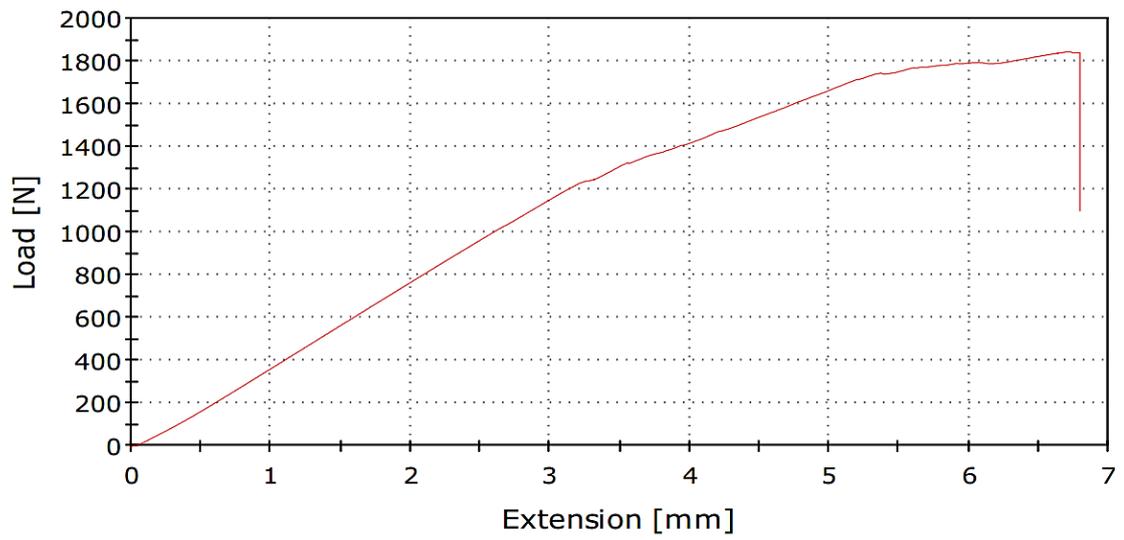
**APÊNDICE I:** Gráficos plotados diretamente do sistema de aquisição de dados da máquina universal de ensaios Instron.



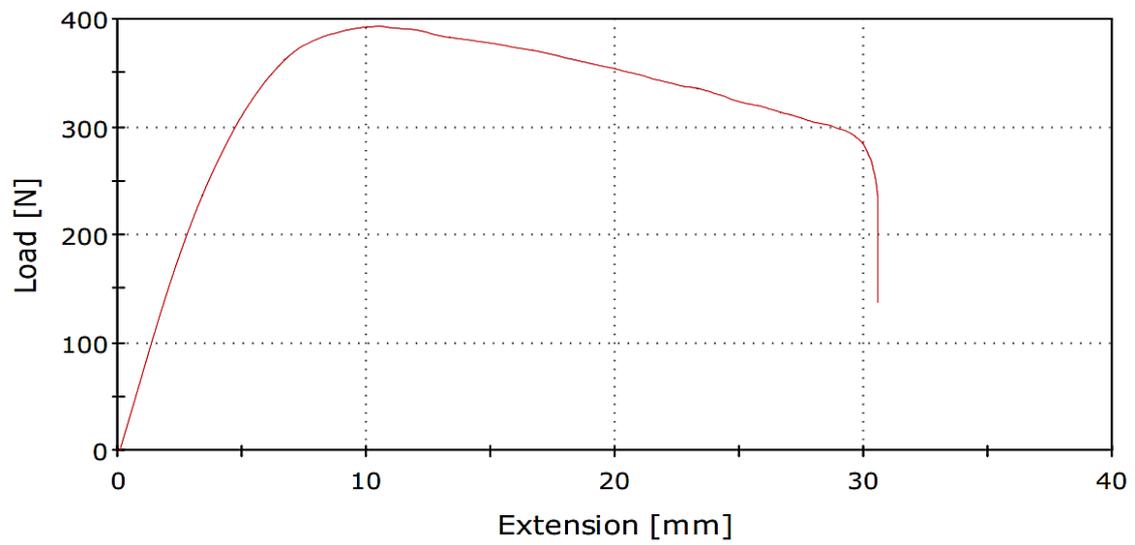
Curva Força [N] x Deflexão [mm] do corpo de prova 1



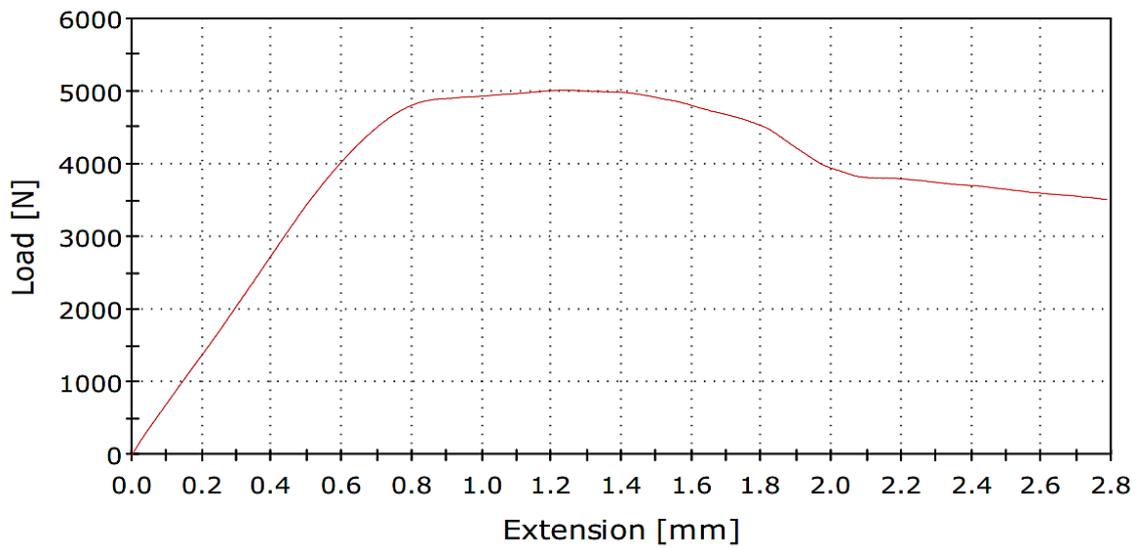
Curva Força [N] x Deflexão [mm] do corpo de prova 2



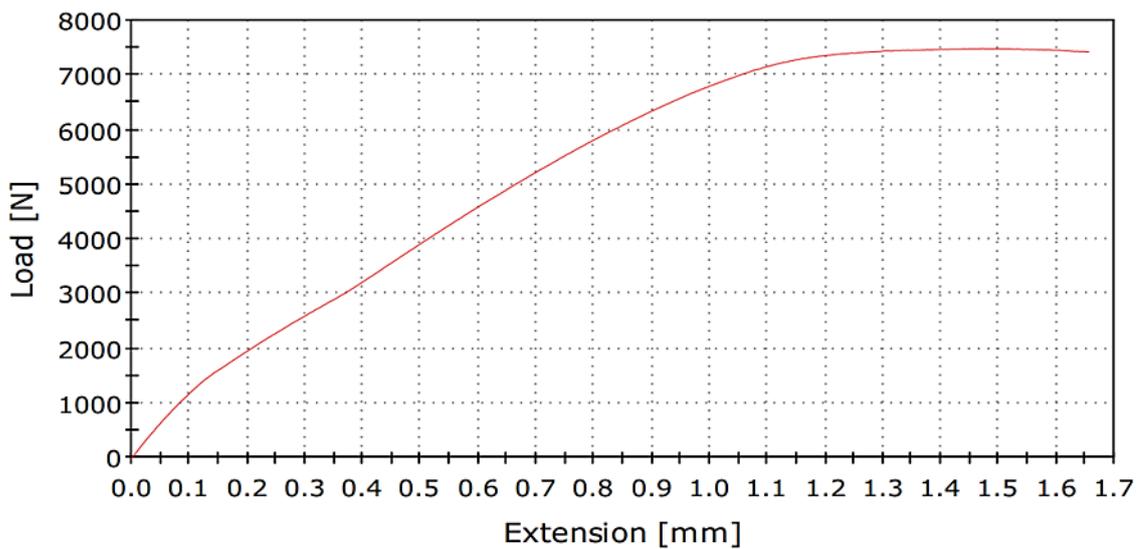
Curva Força [N] x Deflexão [mm] do corpo de prova 3



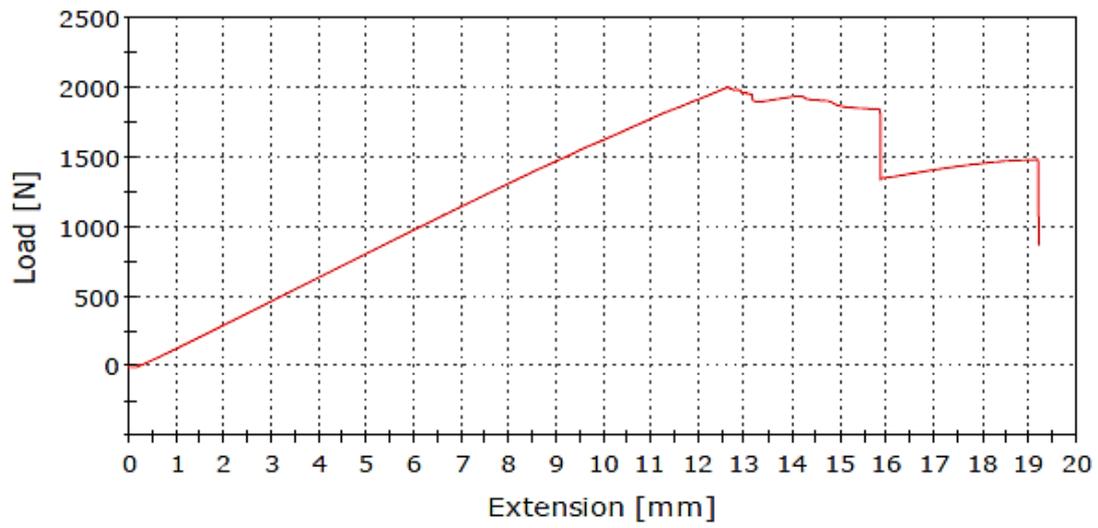
Curva Força [N] x Deflexão [mm] do corpo de prova 4



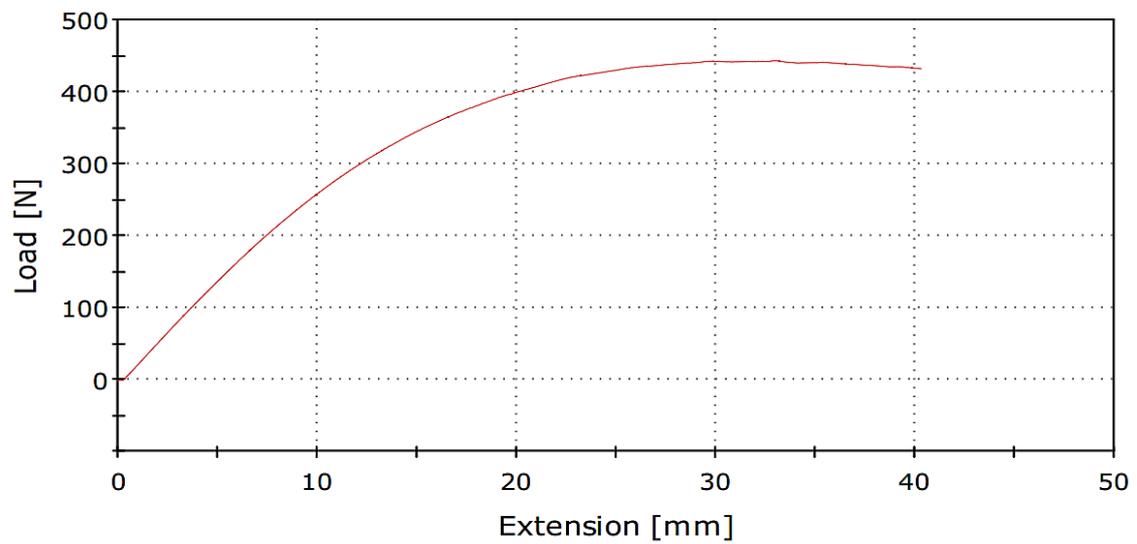
Curva Força [N] x Deflexão [mm] do corpo de prova 5



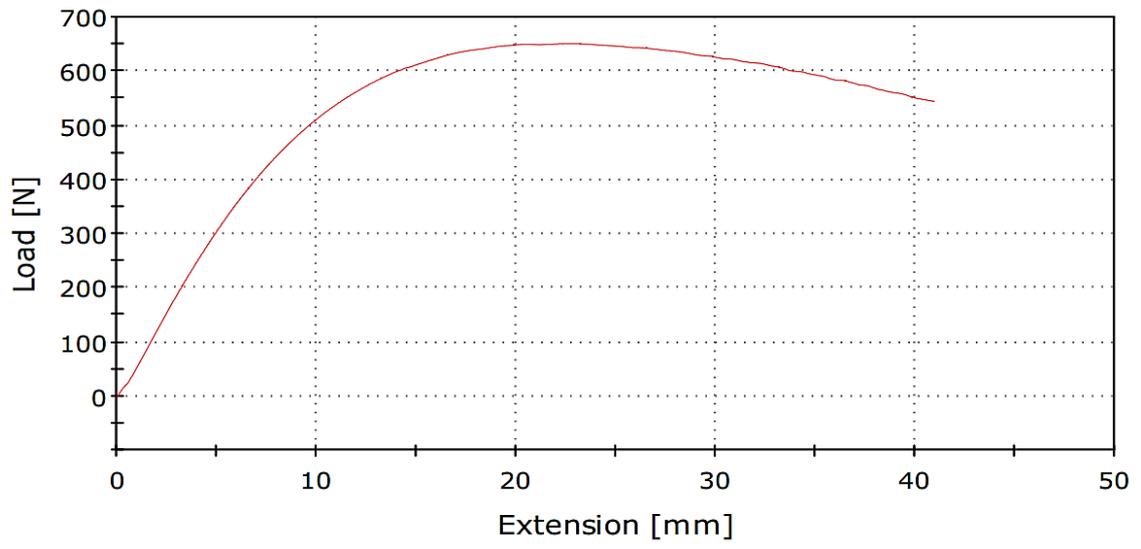
Curva Força [N] x Deflexão [mm] do corpo de prova 6



Curva Força [N] x Deflexão [mm] do corpo de prova 7



Curva Força [N] x Deflexão [mm] do corpo de prova 8

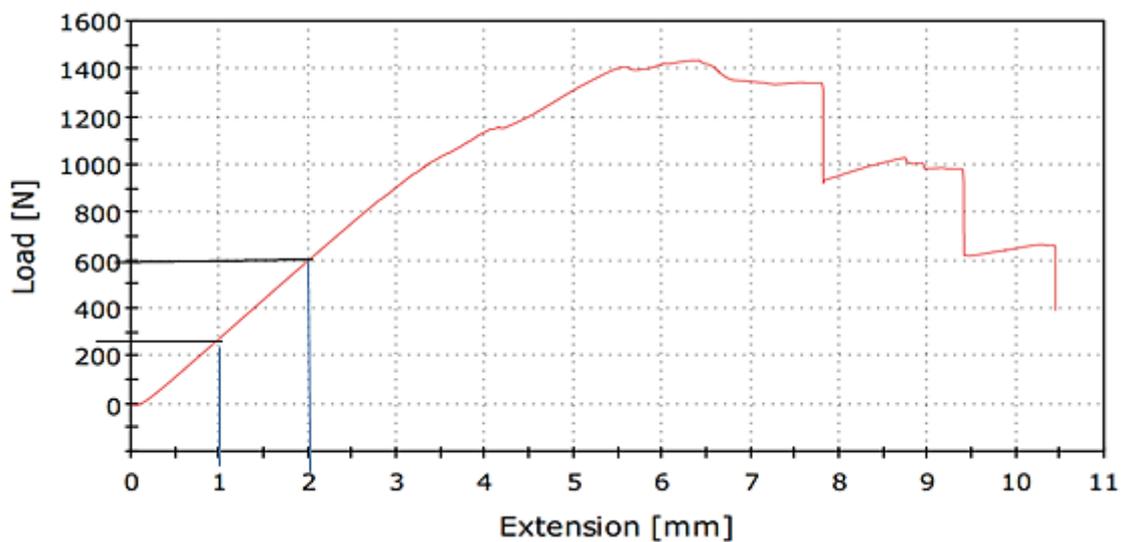


Curva Força [N] x Deflexão [mm] do corpo de prova 9

**APÊNDICE II:** Memória de Cálculo para o coeficiente angular (m) Gráficos Força[N] x Deslocamento [mm] Gerados pela Máquina de Ensaio

Conforme metodologia de cálculo proposta pela norma no capítulo 2 desta obra, de modo a obter-se o módulo de elasticidade, se fez necessário o cálculo da inclinação das retas (coeficiente angular) a seguir:

**Ensaio C.P. 01**

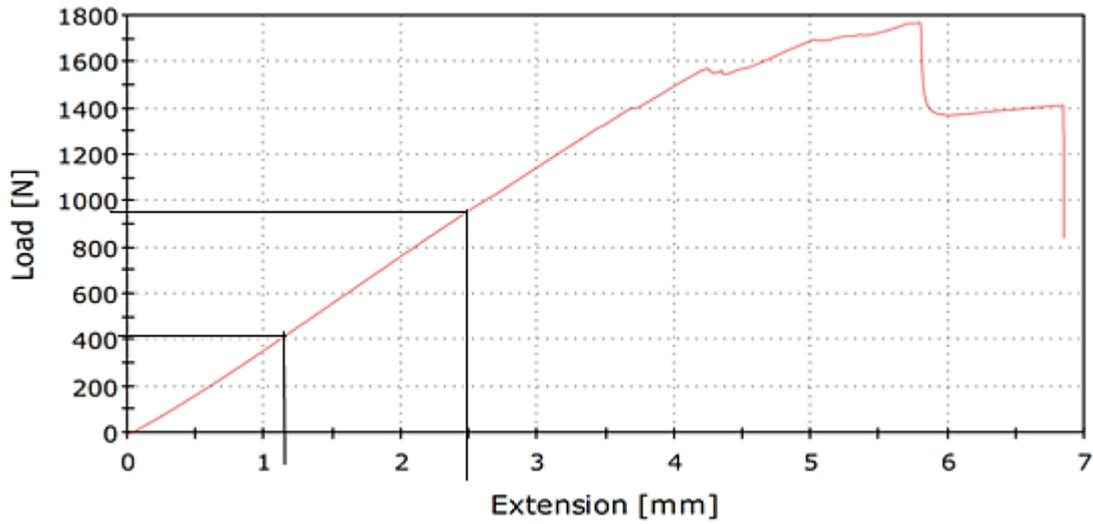


Trecho utilizado para cálculo do coeficiente angular no C.P. 1 (m1)

Intervalo de valores utilizados e resultados do C.P. 1

F[N]	Ext [mm]	dy	dx	m1=(dy/dx)
600,0000	2,0000	340,0000	1,0000	340,0000
260,0000	1,0000			

### Ensaio C.P. 02

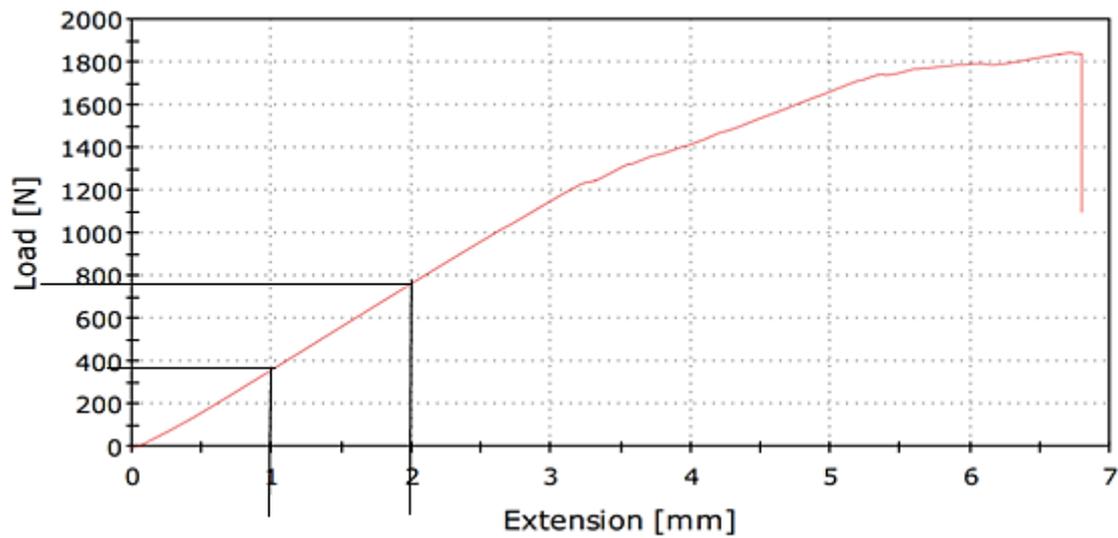


Trecho utilizado para cálculo do coeficiente angular do C.P. 2 (m2)

Intervalo de valores utilizados e resultados para o ensaio do C.P. 2

F[N]	Ext [mm]	dy	dx	$m_1=(dy/dx)$
950,0000	2,5000	550,0000	1,4275	385,2890
400,0000	1,0725			

### Ensaio C.P. 03

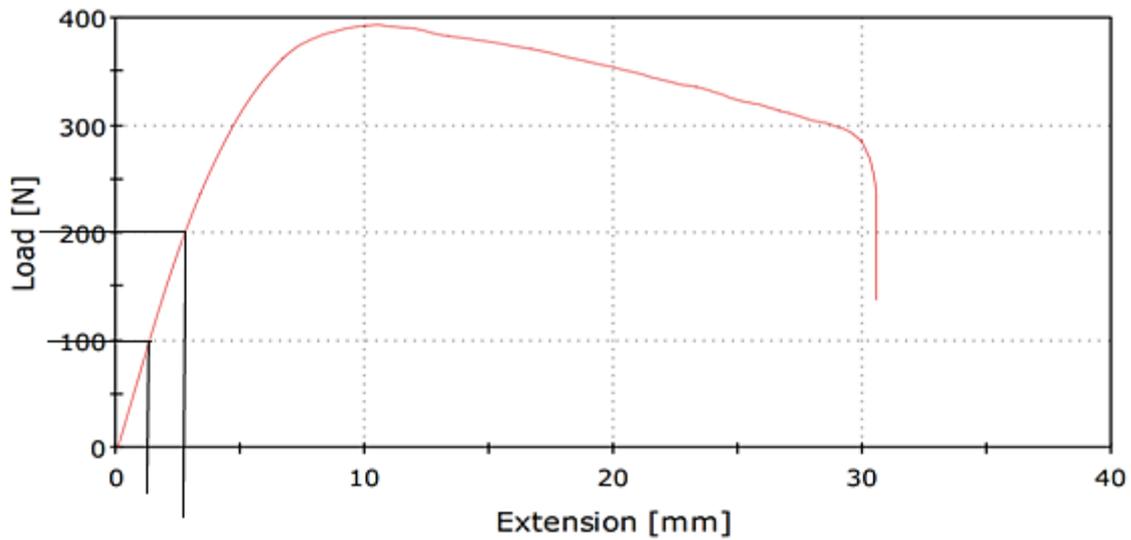


Trecho utilizado para cálculo do coeficiente angular do C.P. .3 (m3)

Intervalo de valores utilizados e resultados do C.P. 3

F[N]	Ext [mm]	dy	dx	$m1=(dy/dx)$
760,0000	2,0000	390,0000	1,0000	390,0000
370,0000	1,0000			

#### Ensaio C.P. 04

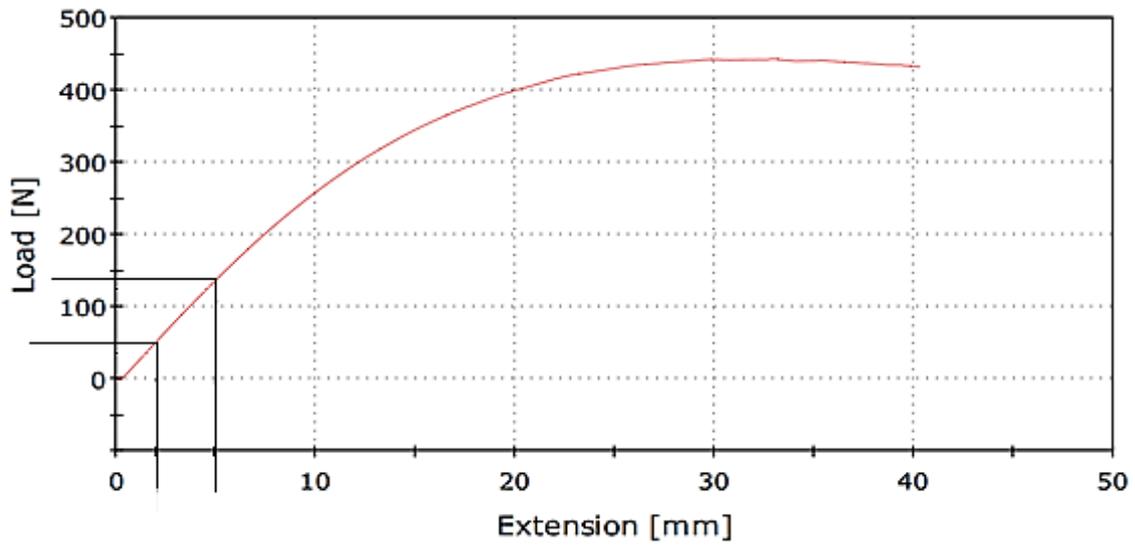


Trecho utilizado para cálculo do coeficiente angular do C.P. 4 ( $m4$ )

Intervalo de valores utilizados e resultados do C.P. 4

F[N]	Ext [mm]	dy	dx	$m4=(dy/dx)$
200,0000	2,6000	100,0000	1,4750	67,7966
100,0000	1,1250			

### Ensaio C.P. 08

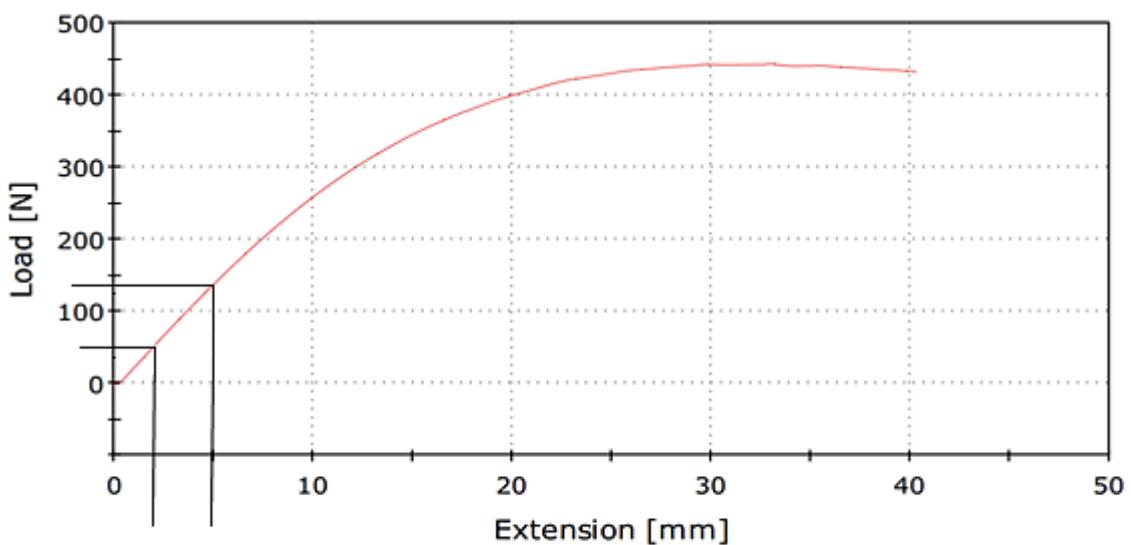


Trecho utilizado para cálculo do coeficiente angular do C.P. 8 (m8)

Intervalo de valores utilizados e resultados para o C.P. 8

F[N]	Ext [mm]	dy	dx	m8=(dy/dx)
140,0000	5,0000	90,0000	2,6000	34,6154
50,0000	2,4000			

### Ensaio C.P. 09



Trecho utilizado para cálculo do coeficiente angular do C.P. 9 (m9)

Intervalo de valores utilizados e resultados para o C.P. 9

F[N]	Ext [mm]	dy	dx	m9=(dy/dx)
200,0000	3,0000	100,0000	0,7000	142,8571
100,0000	2,3000			