

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Curso de Engenharia de Materiais



Trabalho de Conclusão de Curso

**INFLUÊNCIA DO BALANCEAMENTO E SIMETRIA NAS
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE UM COMPÓSITO DE FIBRA DE
CARBONO E MATRIZ EPÓXI**

Henrique Martins de Paula

Pelotas, 2019.

Henrique Martins de Paula

**INFLUÊNCIA DO BALANCEAMENTO E SIMETRIA NAS
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE UM COMPÓSITO DE FIBRA DE
CARBONO E MATRIZ EPÓXI**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia de Materiais da Universidade
Federal de Pelotas, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em Engenharia de
Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Amanda Dantas Oliveira

Pelotas, 2019.

Henrique Martins de Paula

**INFLUÊNCIA DO BALANCEAMENTO E SIMETRIA NAS CARACTERÍSTICAS
MECÂNICAS DE UM COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO E MATRIZ EPÓXI**

Defesa do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 12/07/2019

Banca examinadora:

.....
Prof. Dr. Amanda Dantas de Oliveira (Orientadora)

Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos

.....
M.e Guilherme Kurz Maron

Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Pelotas

.....
Mariane Bosenbecker

Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Pelotas

Dedico este trabalho à minha família, que durante todos esses anos mostrou imprescindível suporte direcionado à minha formação acadêmica. Em especial, meus pais Mônica e Júlio, que aguardaram veementemente por esse momento. Dedico também à minha namorada Sheila, que sempre se mostrou uma luz à qual eu posso contar para guiar-me nos momentos de escuridão.

Agradecimentos

Diversas pessoas influenciaram este trabalho de forma direta e indireta, nada mais apropriado do que mostrar apreciação aos mesmos neste momento.

Por se disponibilizar prontamente para fazer com que eu pudesse realizar os ensaios de flexão, eu agradeço imensamente ao professor Dr. Nestor Cezar Heck (UFRGS) e ao aluno Jefferson de Souza Zeferino, que prontamente realizou os ensaios de flexão.

Agradeço também aos amigos que fiz em Pelotas durante esses anos, tanto no ambiente universitário quanto fora dele.

Gostaria de agradecer também às pessoas envolvidas nos trâmites acadêmicos, as quais se mostraram seres humanos especiais, que merecem reconhecimento; agradeço à professora Dra. Amanda Dantas de Oliveira e também à Ana Lucia de Quadros Meireles, por mostrarem que se importam de verdade com o aprendizado e bem estar dos alunos.

Por último, gostaria de agradecer à minha família e namorada por estarem sempre presentes e acreditarem em mim, mesmo em momentos de autodesconfiança eles foram imprescindíveis para que eu pudesse continuar a andar em frente.

Resumo

PAULA, Henrique Martins de. **Influência do balanceamento e simetria nas características mecânicas de um compósito de fibra de carbono e matriz epóxi**. 2019. 43f. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Curso de Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Os compósitos laminados vêm sendo estudados por apresentarem características como baixo peso e elevada resistência mecânica, podendo também serem produzidos com várias configurações, como por camadas e sanduíches. O presente trabalho deu ênfase ao estudo das propriedades de compósitos laminados, mais especificamente da fibra de carbono com resina epóxi, abordando tópicos como caracterização mecânica, matriz, reforços e cargas. Visou-se criar dois regimes diferentes de orientação e empilhamento das fibras, um simétrico balanceado e um assimétrico desbalanceado, cada um com o mesmo número de camadas orientadas em cada direção, mesma porcentagem de resina e mesmo material, porém um seguindo todas os parâmetros de simetria e balanceamento, enquanto o outro os infringindo. Como previsto, os corpos simétricos balanceados se mostraram superiores em todas vias de análise obtidas através do ensaio de flexão de 3 pontos, o qual foi realizado de acordo com a norma ASTM D 790.

Palavras-chave: fibra de carbono; simetria; compósitos; ensaio de flexão.

Abstract

PAULA, Henrique Martins de. **Influence of the balance and symmetry on the flexural characteristics of a composite of carbon fiber and epoxy matrix**. 2019. 43 sheets. Course Completion Work - Technological Development Center, Materials Engineering Course. Federal University of Pelotas, Pelotas.

The laminated composites have been studied because they have characteristics such as low weight and high mechanical resistance, and can be produced in various configurations, such as layers and sandwiches. The present work emphasized the study of the properties of laminated composites, more specifically of carbon fiber and epoxy resin, addressing topics such as mechanical characterization, matrix, reinforcements and loads. The aim was to create two different regimes of orientation and stacking of the fibers, one symmetrical balanced and one unbalanced asymmetric, each with the same number of layers oriented in each direction, same percentage of resin and same material, but one following all the parameters of symmetry and balancing, while the other infringes them. As predicted, the balanced symmetrical bodies were shown to be superior in all analysis routes obtained through the 3-point flexural test, which was performed according to ASTM D 790.

Key-words: carbon fiber; symmetry; composites; flexural test.

Lista de Figuras

Figura 1: Proposta de classificação hierárquica dos materiais compósitos.....	15
Figura 2: Gama de variação da densidade dos diferentes tipos de materiais.....	16
Figura 3: Esquema representativos das abordagens micromecânica e macromecânica.....	18
Figura 4: Detalhamento da célula elementar.....	18
Figura 5: Classificação de materiais compósitos segundo o reforço.....	22
Figura 6: Curva tensão-deformação, comparação entre as propriedades da fibra, matriz e compósito. (a) fibra frágil e matriz dúctil, (b) compósito.....	23
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.).....	24
Figura 8: Processo de moldagem manual.....	25
Figura 9: Representação básica do processo típico de compressão de material compósito laminado.....	26
Figura 10: Sequência de empilhamento das camadas de um laminado multidirecional simétrico.....	27
Figura 11: Vista cortada de diferentes tipos de laminados. Típico laminado angulado (a), simétrico desbalanceado (b), assimétrico balanceado (c) e simétrico balanceado (d).....	28
Figura 12: Distribuições de tensões no ensaio de flexão de 3 pontos.....	29
Figura 13: Dimensões dos corpos de prova.....	31
Figura 14: Equipamento universal de ensaios EMIC23/5D da UFRGS.....	33
Figura 15: Curva tensão deformação dos corpos de prova.....	34
Figura 16: Módulo de Elasticidade dos corpos de prova assimétricos.....	35
Figura 17: Módulo de Elasticidade dos corpos de prova simétricos.....	35
Figura 18: Carga no limite de escoamento dos corpos de prova assimétricos.....	36
Figura 19: Carga no limite de escoamento dos corpos de prova simétricos.....	36
Figura 20: Tensão de flexão no limite de escoamento dos corpos de prova assimétricos.....	37

Figura 21: Tensão de flexão no limite de escoamento dos corpos de prova simétricos.....	37
Figura 22: Carga na ruptura dos corpos de prova assimétricos.....	38
Figura 23: Carga na ruptura dos corpos de prova simétricos.....	38
Figura 24: Tensão de flexão na ruptura dos corpos de prova assimétricos.....	39
Figura 25: Tensão de flexão na ruptura dos corpos de prova simétricos.....	39
Figura 26: Tempo de ruptura dos corpos de prova assimétricos.....	40
Figura 27: Tempo de ruptura dos corpos de prova simétricos.....	40

Lista de Tabelas

Tabela 1	Propriedades do Laminado.	30
Tabela 2	Propriedades do adesivo	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CP	Corpo de Prova
E1	Módulo de Elasticidade Longitudinal
E2	Módulo Transversal de elasticidade
EF	Módulo de Fibra
EM	Módulo de Matriz
GF	Módulo de Cisalhamento
G12	Cisalhamento Longitudinal
G23	Cisalhamento Transversal
ISO	Organização Internacional de Normalização
V12	Coeficiente de Poisson Principal
VF	Fração Volumétrica
VM	Porcentagem do Volume da Matriz
WF	Fração Mássica

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVOS.....	13
2.1 OBJETIVO GERAL.....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	14
3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	14
3.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS.....	16
3.3 CARACTERÍSTICAS DO LAMINADO REFORÇADO POR FIBRAS DE CARBONO.....	17
3.4 MICROMECAÂNICA LAMINAR.....	19
3.5 MACROMECAÂNICA LAMINAR.....	20
3.6 MATRIZ.....	21
3.7 REFORÇO OU CARGA.....	21
3.8 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO.....	23
3.8.1 Moldagem manual e por compressão.....	25
3.9 COMPÓSITOS MULTIDIRECIONAIS.....	26
3.10 ENSAIOS MECÂNICOS.....	28
3.10.1 Ensaio de flexão.....	29
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
4.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	30
4.2 NORMAS E ENSAIOS.....	31
4.2.1 Ensaios de Flexão.....	32
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
6 CONCLUSÃO.....	41
REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos vêm se destacando em diversas aplicações se comparado aos demais tipos de materiais. Amplamente aplicados nas áreas da aviação, estruturas espaciais, automotiva, petroquímica e em esportes de performance, os compósitos laminados suprem as propriedades mecânicas necessárias. Durante anos os compósitos laminados vêm sendo estudados pelo seu baixo peso e elevada resistência mecânica. Compósitos podem ser produzidos com várias configurações, como intra-camadas e sanduíches (PAMAR, 2015). Os compósitos são uma subclasse de materiais anisotrópicos que são classificados como ortotrópicos. Materiais ortotrópicos têm propriedades diferentes em três direções perpendiculares entre si. Portanto, as propriedades mecânicas ortotrópicas são uma função orientação.

A matriz mais utilizada para materiais compósitos é a polimérica. Por dois motivos: 1. Em geral, as propriedades mecânicas dos polímeros são inadequadas para várias aplicações. As suas resistências são muito inferiores se comparadas com as de metais e cerâmicos. Isto significa que existe um grande benefício potencial usando o processo de reforço em materiais poliméricos e; 2. O processamento de compósitos poliméricos não requer a utilização de altas pressões e de altas temperaturas. A classificação divide as matrizes poliméricas em termorrígidas, termoplásticas e elastômeros sendo todas importantes para compósitos (MATTHEWS; RAWLINGS, 1994).

Com estes aspectos em vista este trabalho tem por objetivo avaliar e comparar compósitos laminados com matriz polimérica orientados simétrica e assimetricamente, definindo a composição com melhores propriedades. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM D790.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um *lay-up* condizente com as definições de simetria e balanceamento de corpos anisotrópicos e um segundo *lay-up*, que por sua vez infringe estes padrões. A fim de definir o módulo de elasticidade longitudinal (E_1) e outras propriedades mecânicas obtidas e compará-las.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Criação de um *lay-up* de simetria balanceado;
- Criação de um *lay-up* de assimetria desbalanceado;
- Estabelecer parâmetros de comparação;
- Através dos ensaios de flexão, aplicar os parâmetros de comparação;
- Verificar se há variação comportamental entre o regime simétrico balanceado e o assimétrico desbalanceado.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os compósitos são materiais que apresentam estrutura constituída por uma mescla de duas ou mais fases não solúveis entre si. Um destas fases é chamada de reforço e a outra de matriz. Diversos são os tipos de materiais compósitos que podem ser empregados em estruturas para a engenharia de construção (CARNEIRO, 2004; TEIXEIRA, 2007). Em contraste com ligas metálicas, cada material mantém as suas propriedades químicas, físicas e mecânicas. Materiais compósitos apresentam alta resistência e rigidez, combinadas com baixa densidade, quando comparadas com outros materiais mais comumente utilizados, permitindo uma redução de peso na parte final. Cada componente tem várias funções relevantes e estas dependem das aplicações pretendidas para o material compósito (RAUCH, SUTTON & MCCREIGHT, 1968). A Figura 1 apresenta uma proposta de classificação de materiais compósitos elaborada por Levy e Pardini (2006). A maioria dos compósitos é desenvolvida visando à melhoria das propriedades mecânicas, como rigidez, resistência e tenacidade, sendo às vezes explorada em conjunto com outras propriedades, como resistência às condições ambientais e em altas temperaturas.

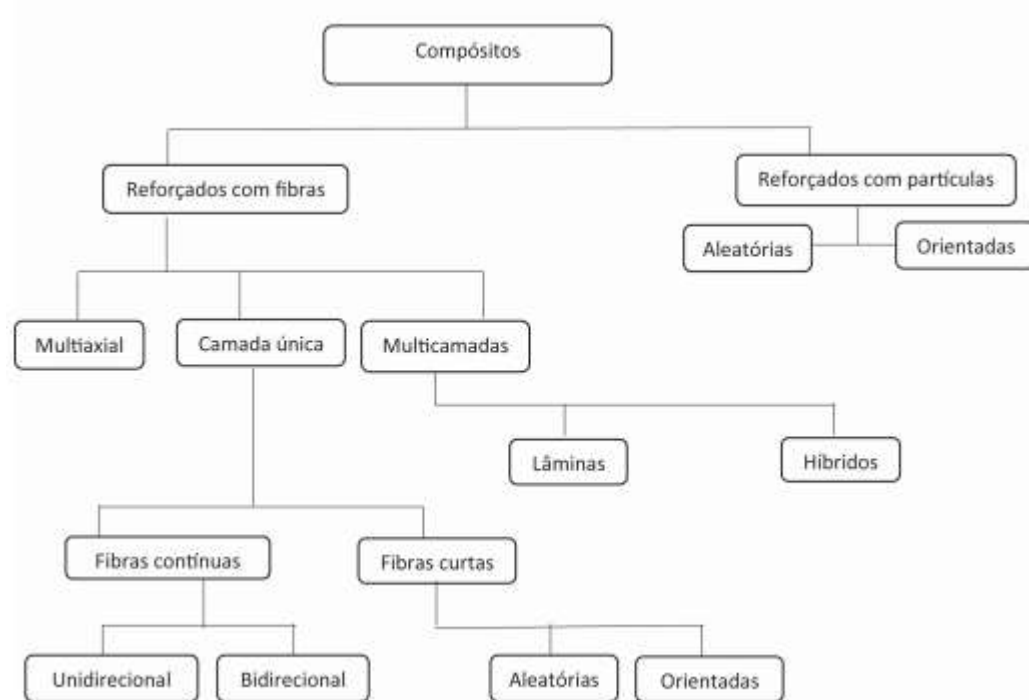


Figura 1: Proposta de classificação hierárquica dos materiais compósitos. **Fonte:** (LEVY; PADINI, 2006)

A fabricação e as propriedades dos compósitos são fortemente influenciadas pelas proporções e propriedades da matriz e do reforço. As proporções podem ser expressas através da fração mássica (WF), que é relevante para a fabricação, ou através da fração volumétrica (VF), que é comumente utilizada nos cálculos do teor de fibras (MATTHEWS; RAWLINGS, 1994).

Os compósitos estruturais laminados, que são a ênfase deste trabalho, são obtidos através do empilhamento de folhas de fibras contínuas em diferentes orientações para obter a força e rigidez desejadas, apresentando normalmente suas melhores propriedades com volumes de fibra de 60 a 70 por cento (MOURA, 2009). Fibras produzem compostos de alta resistência devido ao seu pequeno diâmetro; eles contêm muito menos defeitos, que são normalmente defeitos superficiais, em comparação com o material produzido através de particulados (VENTURA, 2009). Aliás, fibras de alta resistência com menor diâmetro têm maior flexibilidade e são

mais propícias a fabricação em processos como tecer ou conformar um molde. Fibras típicas do mercado atual incluem vidro, aramida e carbono.

3.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS

Os compósitos apresentam muitas vantagens, incluindo o peso mais leve (se comparados aos metais principalmente), a capacidade de adaptar o *lay-up* para uma ótima resistência e rigidez, elevada resistência à fadiga, boa resistência à corrosão e, com boa prática de design, reduz os custos de montagem pela capacidade de criação de peças complexas (CALLISTER, 2008).

Desvantagens de compósitos incluem os altos custos de material e fabricação; suscetível a efeitos de temperatura e umidade, baixa resistência na direção contrária ao plano, onde a matriz carrega a carga primária, suscetibilidade a danos por impacto e de laminações ou separações por camadas; e maior dificuldade em reparos em comparação com estruturas metálicas (CALLISTER, 2008).

A figura abaixo mostra a gama de variação de densidades dos diversos tipos de materiais.

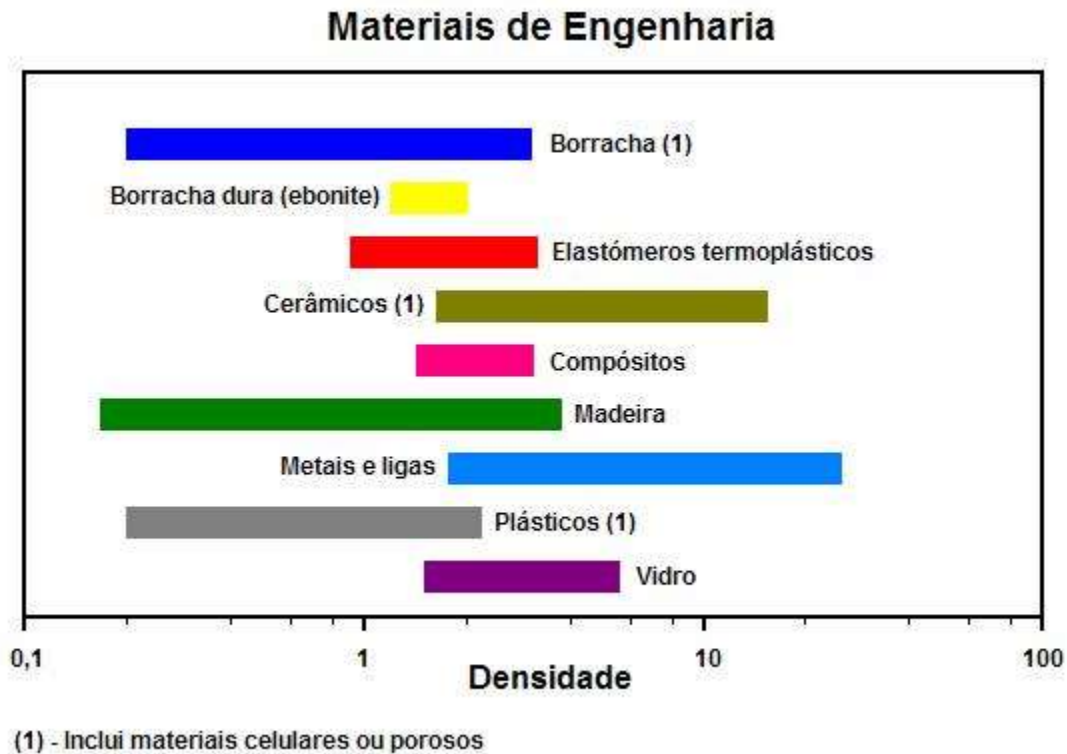


Figura 2: Gama de variação da densidade dos diferentes tipos de materiais. **Fonte:** (CAETANO, 2019).

3.3 CARACTERÍSTICAS DO LAMINADO REFORÇADO POR FIBRAS DE CARBONO

Compósitos reforçados com fibra de carbono são geralmente processados usando polímeros termofixos, especialmente resinas epóxi. Compósitos laminados poliméricos apresentam alta relação resistência/peso e rigidez/peso quando comparados com materiais metálicos, como vimos na Figura 2. No entanto, esses compósitos laminados podem ser suscetíveis a dano devido ao empilhamento de camadas com interfaces com pouca interação entre elas.

Quando um *lay-up* apresenta todas as camadas empilhadas na mesma orientação, o *lay-up* é chamado de lâmina. Quando as camadas são empilhadas em vários ângulos, o *lay-up* é chamado de laminado. Compósitos de fibra contínua são normalmente materiais laminados em que camadas individuais, são orientadas em direções que irão melhorar a força na direção da carga sofrida. As lâminas

unidirecionais orientadas em 0° , por exemplo, são extremamente resistentes e rígidas na direção 0° . No entanto, elas são muito fracas na direção de 90° , pois a carga deve ser transportada através da matriz polimérica, que é muito mais fraca (ADAMS, 2003).

Ainda segundo Adams (2003), as propriedades mecânicas de um material compósito podem ser avaliadas sob dois pontos de vista distintos: a micromecânica e a macromecânica. A micromecânica trata-se de uma análise da interação entre constituintes em um nível microscópico, através da qual a partir das propriedades dos constituintes estima-se as propriedades de uma lâmina. Já a macromecânica analisa um material compósito em escala macroscópica, inserindo a configuração do arranjo de lâminas na determinação do comportamento mecânico do material.

Uma visão resumida de cada abordagem será dada a seguir, objetivando identificar os principais fatores que caracterizam mecanicamente o material. O esquema apresentado na Figura 3 ilustra ambas.

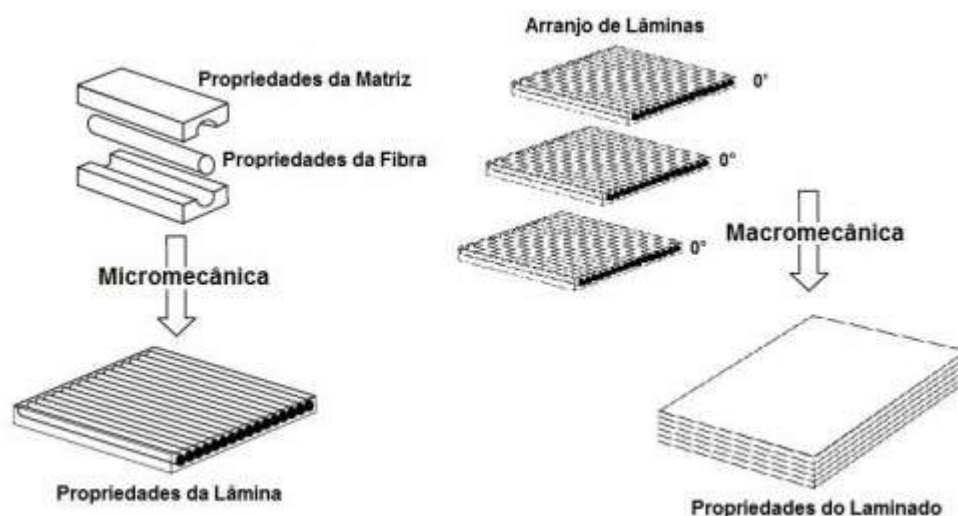


Figura 3: Esquema representativo das abordagens micromecânica e macromecânica. **Fonte:** (ADAMS, 2003)

Uma célula elementar é composta por uma seção de fibras envolta por duas camadas de matriz. Os números 1 e 2 representam as direções 0° (paralela) e 90° (transversal), respectivamente (COSTA, 2011).

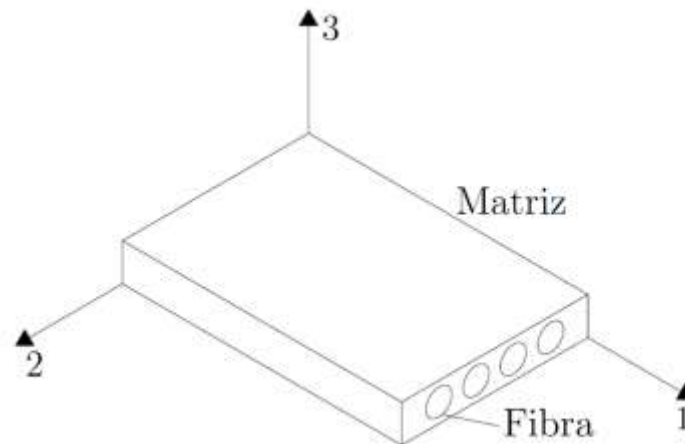


Figura 4: Detalhamento da célula elementar. (COSTA, 2011)

3.4 MICROMECAÂNICA LAMINAR

Quando uma lâmina de fibra contínua unidirecional ou um laminado sofre carga em uma direção paralela às suas fibras (0°), o módulo de elasticidade longitudinal E_1 pode ser estimado a partir de suas propriedades constituintes usando o que é conhecida como a regra das misturas:

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \text{ (Eq 1.1)}$$

Onde: E_f é o módulo de fibra, V_f é a porcentagem do volume de fibra, E_m é o módulo de matriz e V_m é a porcentagem do volume da matriz.

A resistência à tração longitudinal σ_1 também pode ser estimada pela regra das misturas através da equação:

$$\sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \text{ (Eq 1.2)}$$

Onde: σ_f e σ_m são as maiores forças de fibra e matriz, respectivamente.

Como as propriedades da fibra dominam as porcentagens de volume práticas, os valores da matriz podem muitas vezes serem ignorados; assim sendo:

$$E1 \approx E_f V_f \text{ (Eq 1.3)}$$

$$\sigma_1 \approx \sigma V_f \text{ (Eq 1.4)}$$

Quando as cargas são paralelas às fibras (0°), o conjunto é muito mais forte e mais duro do que quando as cargas são transversais (90°) à direção da fibra. Ocorre uma diminuição dramática na força e rigidez resultante de apenas alguns graus de desalinhamento de 0° , enfatizando o alinhamento minucioso das mesmas. Quando a lâmina é carregada na transversal (90°), as fibras e a matriz apresentam um comportamento em série, com ambas carregando a mesma carga (GALLI, 2016).

O módulo transversal de elasticidade $E2$ (na direção transversal) é dado como:

$$1 / E2 = V_f / E_f + V_m / E_m \text{ (Eq. 1.5)}$$

Outra regra da lei de mistura para propriedades da lâmina inclui o coeficiente de Poisson (ν_{12}), que mede a deformação transversal em relação à direção longitudinal de aplicação da carga de um material; e o módulo de cisalhamento (G_{12}) (MENDES, 2006).

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \text{ (Eq 1.6)}$$

$$1 / G_{12} = V_f / G_f + V_m / G_m \text{ (Eq. 1,7)}$$

Estas expressões são um pouco menos úteis que as anteriores, porque os valores para Coeficiente de Poisson (ν_f) e o módulo de cisalhamento (G_f) das fibras geralmente não estão prontamente disponíveis.

O processo de fabricação deve visar uma maximização de V_f , uma vez que este caracteriza as propriedades mecânicas protagonistas do compósito.

Justificando a preferência de fibras contínuas para aplicações estruturais em relação às fibras curtas, que normalmente mostram frações volumétricas de 20%, que se mostram baixas se comparadas os 65% encontrados nas fibras contínuas (MOURA, 2009).

3.5 MACROMECAÂNICA LAMINAR

A macromecânica é a análise das interações tensão-deformação da lâmina unidirecional de compósitos com fibra contínua. Tais compósitos possuem normalmente estrutura laminada, ou seja, são constituídos por várias camadas, com orientação individual, na qual as fibras estão todas alinhadas na mesma direção (ADAMS, 2003).

Cada camada tem uma grande quantidade de fibras, por este motivo, o mais apropriado determiná-lo como um sólido para caracterizar o seu comportamento mecânico, caracterizando assim a macromecânica laminar. Com a tendência à anisotropia, as relações de tensões e deformações podem ser representadas na forma de matriz (BARBOSA, 2010).

Em materiais isotrópicos caracteriza-se o comportamento mecânico por meio de duas constantes independentes, sendo elas, o módulo de elasticidade e de cisalhamento, já os materiais transversalmente isotrópicos, vide uma lâmina de compósito, podem ser expressos por meio de constantes como o módulo de elasticidade longitudinal (E_1), módulo de elasticidade transversal (E_2), o coeficiente de Poisson principal (ν_{12}), o módulo de cisalhamento longitudinal (G_{12}) e o módulo de cisalhamento transversal (G_{23}) (GALLI, 2016).

3.6 MATRIZ

A fase contínua do compósito é a matriz, que pode ser um polímero, metal ou cerâmica (BARBERO, 2011). Polímeros apresentam baixa força e rigidez, os metais têm força e rigidez intermediárias, mas alta ductilidade, a cerâmica tem alta resistência e rigidez, porém é frágil. A matriz (fase contínua) executa várias funções

críticas, incluindo a manutenção das fibras na orientação e espaçamento adequados e protegendo-as da abrasão e do meio ambiente (CALLISTER, 2008).

Cargas de tensão longitudinal e compressão são transportadas pelas fibras, a matriz exerce o papel de distribuir as cargas entre as fibras em forma de tensão, além disso, estabiliza as fibras e as impede de mover-se na compressão. A matriz é também a principal transportadora de carga para cisalhamento interlaminar e de tensão transversal (90°).

3.7 REFORÇO OU CARGA

A fase de reforço fornece a força e rigidez. Na maior parte dos casos, o reforço é mais duro, mais forte e mais rígido que a matriz. O reforço é geralmente uma fibra ou um particulado. Compósitos particulados têm dimensões que são aproximadamente iguais em todas as direções. Eles podem ser esféricos, em plaquetas ou qualquer outra geometria regular ou irregular. Compósitos particulados tendem a ser muito mais fracos e menos rígidos do que os compostos de fibra contínua, porém os particulados são normalmente muito menos caros. Compósitos reforçados com partículas geralmente contêm menos reforço (até 40 a 50 por cento de volume) se comparados aos reforçados por fibras contínuas (apresentam de 60 a 70 por cento de volume), devido a dificuldades de processamento e fragilidade (CALLISTER, 2008).

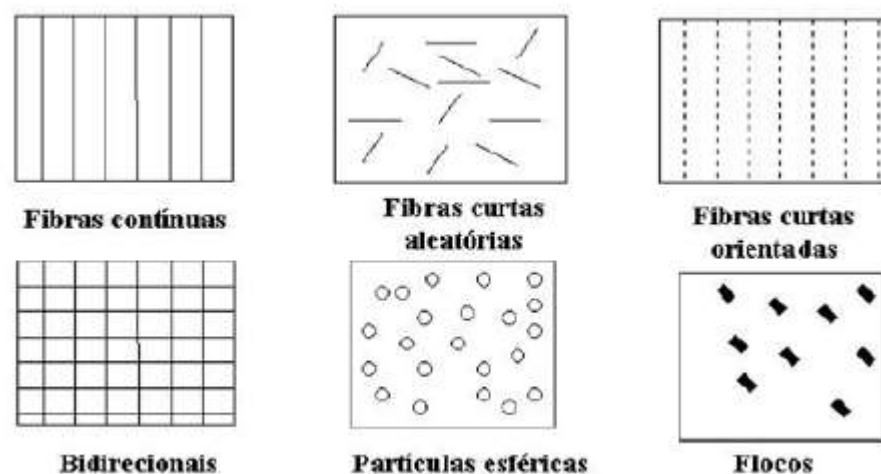


Figura 5: Classificação de materiais compósitos segundo o reforço. **Fonte:** (VENTURA, 2009).

Uma fibra tem um comprimento muito maior que seu diâmetro. A relação comprimento / diâmetro (l / d) é conhecida como proporção e pode variar muito. Fibras contínuas apresentam proporções longas, enquanto fibras descontínuas têm proporções curtas. Compósitos de fibra contínua normalmente têm orientação preferencial, enquanto fibras descontínuas geralmente têm uma orientação aleatória. Exemplos de reforços contínuos incluem unidirecional, malha bidirecional e enrolamento helicoidal, enquanto exemplos de reforços descontínuos são fibras cortadas e fibras de orientação aleatória (CALLISTER, 2008). Abaixo podemos ver a curva tensão x deformação de fibra, matriz e a combinação de ambos, representada em razão da sua tensão e deformação, que indica a fibra mais frágil e a matriz mais dúctil, o compósito é representado pela combinação destas propriedades.

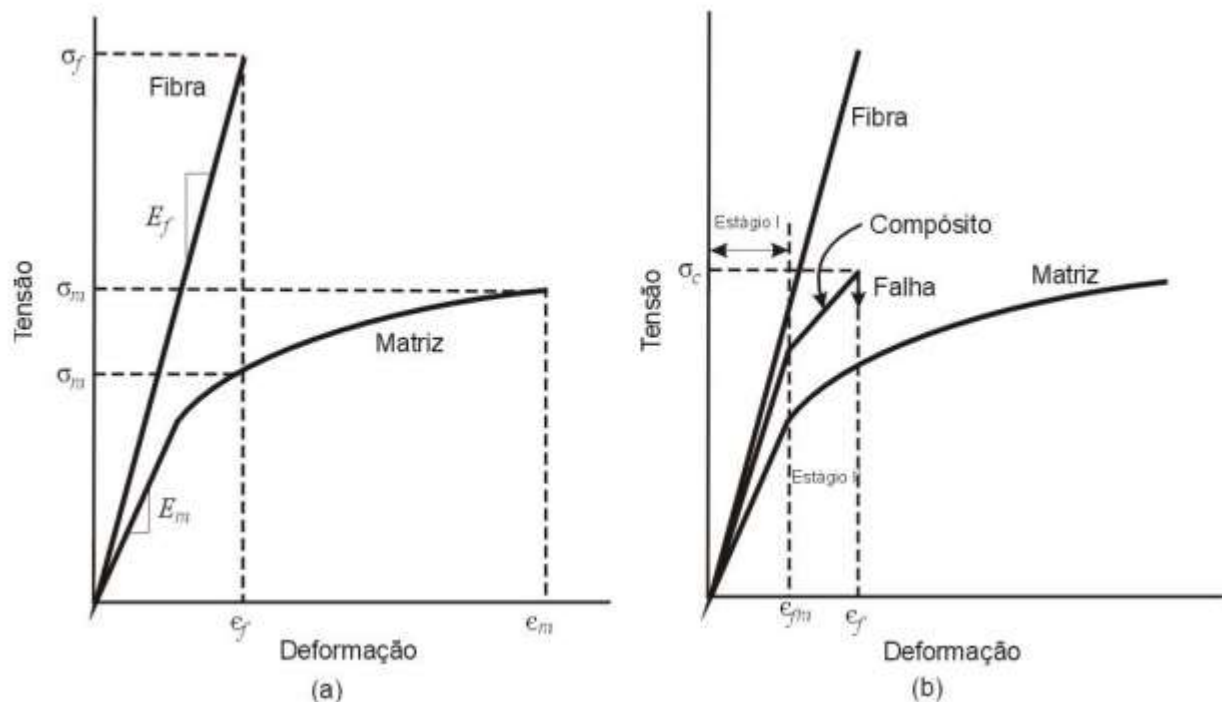


Figura 6: Curva tensão-deformação, comparação entre as propriedades da fibra, matriz e compósito. (a) fibra frágil e matriz dúctil, (b) compósito. **Fonte:** (CALLISTER, 2002 p.365).

3.8 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Matrizes poliméricas são utilizadas grande parte em função de sua boa ductilidade e fácil moldagem (SILVA, 2011). A maior vantagem da utilização de matrizes poliméricas é a facilidade de processamento e alta produtividade (VENKATESHWARAN; ELAYAPERUMAL, 2012a).

As resinas epóxi são bastante usadas estruturalmente ou como adesivo, pela sua facilidade de manuseio, apresenta resistências química e térmica atrativas, além disso apresentam elevada resistência e módulo de elasticidade (NASCIMENTO, 2009).

O material compósito apresenta uma fase chamada matriz e uma carga dispersa que, normalmente, age como reforço. A matriz une as fibras, mantendo o arranjo geométrico e às mantendo das intempéries do ambiente, é esta fase contínua que suporta e protege o reforço. Esta também atua na transferência de tensões impostas em direção ao reforço. A fase dispersa está distribuída na matriz, geralmente é mais rígida e resistente do que a fase contínua, por isso atua como reforço à matriz polimérica. Os reforços podem ser classificados como materiais particulados, lamelares, ou como fibras (contínuas ou descontínuas) (NETO, 2006).

O reforço em carbono pode ser visto sob a forma de tecidos, que são caracterizados pela orientação e disposição das fibras, e podem ser classificados como unidirecionais ou entrelaçados. A trama do *roving* representado na figura 7 (a) serve para 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, figura (c). Os tipos mais comuns estão descritos conforme a figura 7, letras (d), (e), (f) (MOURA, 2009).

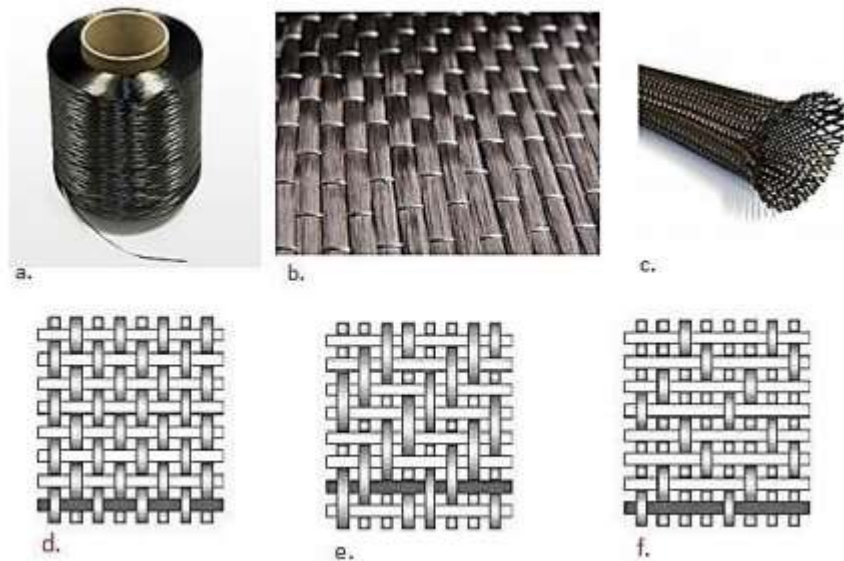


Figura 7: Formas de fibras: roving (a.), fibra unidirecional (b.), entrançados ou “Braids”(c.) e fibras perpendiculares entre si: “plane wave” (d.), “twill weave”(e.) e “satin weave”(f.) **Fonte:** (MOURA, 2009).

3.8.1 Moldagem Manual e por Compressão

O método de fabricação manual caracteriza-se pelo empilhamento e a impregnação de sucessivas camadas em um molde aberto. Cada camada de reforço é impregnada com resina e compactada. As principais vantagens deste método são a simplicidade, reduzidos investimentos iniciais e poucas restrições de geometria, como desvantagens podemos citar o baixo controle da incidência de bolhas e acabamento inferior ao autoclave por exemplo. Há possibilidade de ser feita a frio, quando ocorre o pré-aquecimento do molde é dita a fabricação por compressão a quente (UAWONGSUWAN; INOYA; HAMADA, 2016).

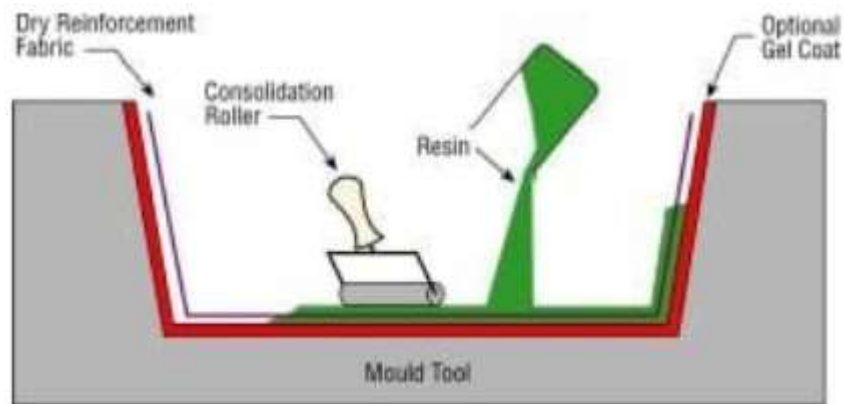


Figura 8: Processo de moldagem manual. **Fonte:** (NETCOMPOSITES, 2019).

A moldagem por compressão está entre as mais antigas técnicas de processamento de materiais. Para plásticos, foi um dos primeiros métodos industriais e também é conhecido como moldagem combinada de matrizes. Na combinação com fibras, o processo básico consiste em aquecer o compósito em lâmina, sob forte pressão, dentro de uma cavidade de molde fechada até que a resina cure através da reação química das cadeias poliméricas de reticulação. Sob pressão, a resina flui, assumindo a forma da cavidade do molde e penetrando as fibras, depois endurece com o formato desejado. Uma vez suficientemente endurecida e forte, a peça é removida do molde. A reação de cura continua enquanto a peça resfria até a temperatura ambiente (TATARA, 2017).

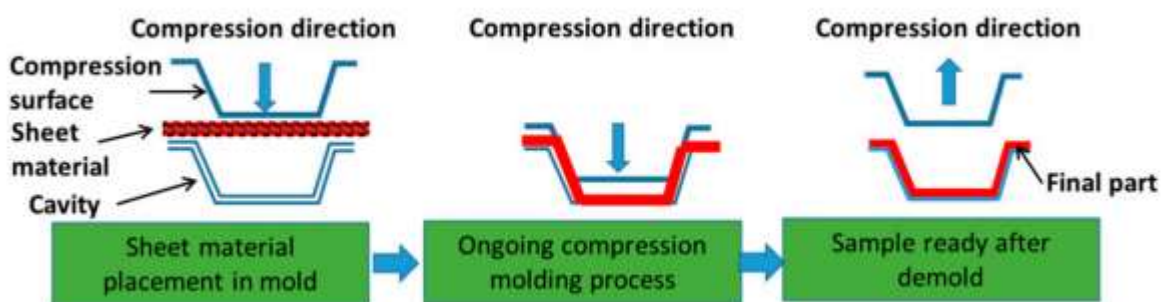


Figura 9: Representação básica do processo típico de compressão de material compósito laminado. **Fonte:** (NAKAO; INOYA; HAMADA, 2016).

3.9 COMPÓSITOS MULTIDIRECIONAIS

Um material compósito laminado consiste em várias camadas, cada uma composta por uma matriz e fibras. O design do compósito multidirecional começa com a seleção do número de camadas e suas orientações. Uma vez o número de camadas e orientações da camada são definidas, uma sequência de empilhamento é determinada.

Geralmente, as propriedades estruturais dos compósitos laminados bem como a rigidez, força e estabilidade dimensional dependem desta sequência de empilhamento. Cada propriedade apresenta relações diferentes com cada sequência específica de empilhamento, a escolha da sequência de empilhamento adequada para aplicação particular pode implicar em uma escolha, onde organiza-se as orientações com fim suprir adequadamente as demandas de cargas em cada direção específica (PARDINI, 2002).

Cada lâmina pode ser distinguida pela sua posição no laminado e orientação da fibra em relação ao eixo de referência. O ângulo da camada representa cada lâmina e um sinal de barra separa-o de outras camadas. As orientações mais comuns e citadas em normas e na literatura são $0^\circ/90^\circ$ e $+45^\circ/-45^\circ$.

Uma sequência de empilhamento laminado deve ser simétrica em relação ao plano médio para evitar o acoplamento de flexão de extensão. Para obter um laminado devidamente simétrico e balanceado, as propriedades geométricas e de material devem ser simétricas em relação ao plano médio, como podemos ver na figura 10 (KUMARAN, 2018).

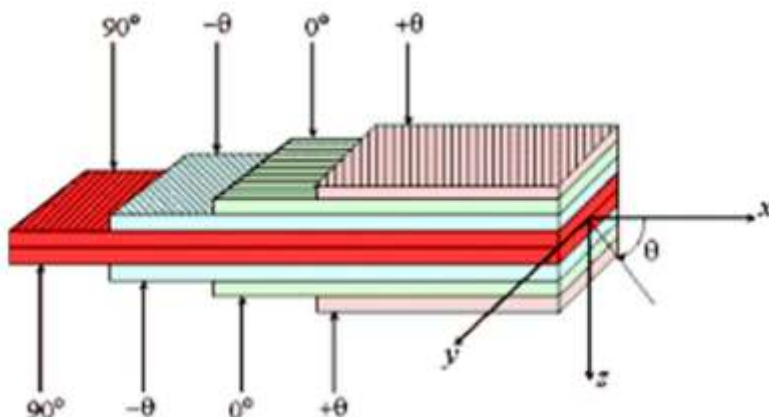


Figura 10: Sequência de empilhamento das camadas de um laminado multidirecional simétrico.
Fonte: (KUMARAN, 2018).

Uma sequência de empilhamento laminado deve ser balanceada para evitar o acoplamento de tensões de cisalhamento. Neste contexto, balanceado significa que as camadas de ângulo (aqueles em qualquer ângulo de orientação é diferente de 0° ou 90°) devem ocorrer apenas em pares. Por exemplo, para laminados $0 / \pm 45/90$, qualquer dobra de $+45^\circ$ deve ser acompanhada uma camada de -45° . (CARLONI, PALAZZO, PASQUINO, 2006). Na figura 11, está representada a diferença entre os diferentes regimes de orientação.

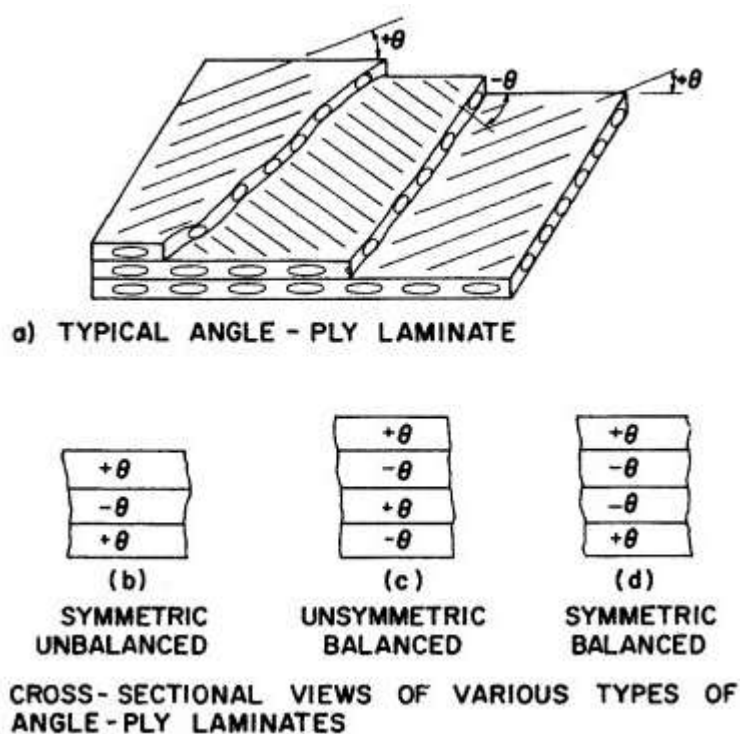


Figura 11: Vista cortada de diferentes tipos de laminados. Típico laminado angulado (a), simétrico desbalanceado (b), assimétrico balanceado (c) e simétrico balanceado (d). **Fonte:** (KUMARAN, 2018).

3.10 ENSAIOS MECÂNICOS

As informações coletadas por meio de ensaios mecânicos são aplicadas no desenvolvimento de especificações de matéria-prima, pesquisa, desenvolvimento, controle de qualidade, design, e análise estrutural. Alguns fatores fundamentais que influenciam de forma direta os ensaios mecânicos em materiais compósitos e podem ser caracterizados através de diferentes métodos.

Para definir propriedades elásticas e de resistência através de tração, as normas mais comuns são: ASTM D3039/ ISO 527/ BS 2782/ CRAG 300-302, porém requerem a colagem de 'end tabs' os quais devem resistir a cargas superiores a 30 Mpa (PINHO; CAMANHO, 2005).

3.10.1 Ensaio de Flexão

Os ensaios de flexão são amplamente utilizados, especialmente por conta dos baixos custos de preparação e instrumentação. O principal objetivo do ensaio de flexão é obter E_1 e a tensão máxima do compósito. Se divide em dois modos, flexão de 3 pontos ou de 4 pontos, sendo o primeiro o mais utilizado. As normas mais utilizadas na literatura são a ISO 14125 e ASTM D 790 (MONTEIRO, 1994).

Durante o ensaio de flexão as fibras superiores são comprimidas e as inferiores tracionadas. A tensão é proporcional à distância da linha neutra, conforme ilustra a figura 12.

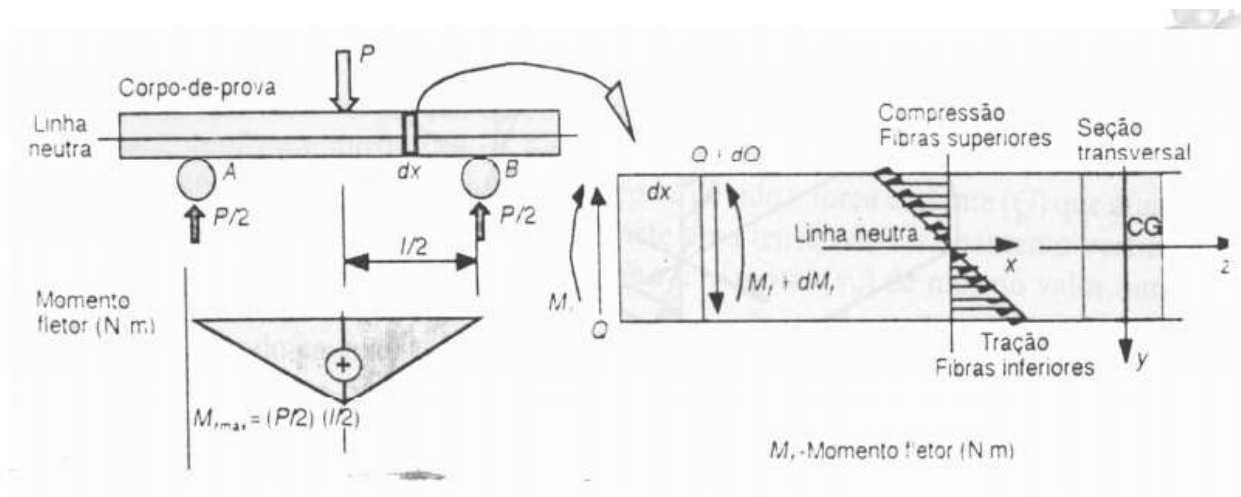


Figura 12: Distribuições de tensões no ensaio de flexão de 3 pontos. **Fonte:** (RUCHER, 2018).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A preparação dos corpos de prova foi realizada no laboratório de graduação do Curso de Engenharia de Materiais da UFPEL. Os corpos de prova foram preparados com a fibra de carbono Toray T700S fabricada pela DEVOLD® (as propriedades informadas pelo fabricante estão apresentadas na Tabela 1. Foi aplicado entre cada camada o adesivo Epóxi Corel (Corel Comércio de Resinas Ltda, Porto Alegre, Brasil). As propriedades da resina Epóxi estão apresentadas na Tabela 2. O processo de fabricação utilizado foi o *lay-up* (Molgadem Manual).

Propriedades do Laminado - LT 450-C10 (Toray T700S)	
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

Tabela 1: Propriedades do Laminado. **Fonte:** (DEVOLD® AMT, 2015).

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

Tabela 2: Propriedades do adesivo. **Fonte:** (Corel Comércio de Resinas Ltda, Porto Alegre, Brasil).

Foram utilizadas 15 camadas em cada corpo de prova, com dois padrões, um simétrico balanceado e um assimétrico desbalanceado. Nas respectivas orientações:

Simétrico balanceado: $[90^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/90^\circ]$

Assimétrico desbalanceado: $[-45^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$

Ao determinar o *lay-up* assimétrico desbalanceado, os parâmetros de balanceamento e os parâmetros de simetria foram quebrados, balanceado significa que as camadas anguladas devem ocorrer apenas em pares espelhados. Ao quebrar o balanceamento gera-se um laminado com divergência no número de ângulos positivos e negativos para cada lado do plano de referência. Além disso, no regime assimétrico, não há simetria das camadas em relação ao plano de referência, nem um espelhamento nas orientações com relação ao plano de referência, o que resulta em um sistema de concentração de tensões.

Os corpos de prova foram produzidos seguindo a norma ASTM D790, com as seguintes dimensões:

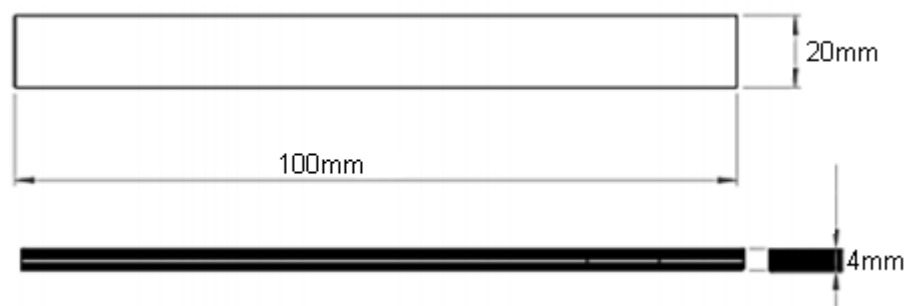


Figura 13: Dimensões dos corpos de prova. **Fonte:** Autoria Própria.

4.2 NORMAS E ENSAIOS

ASTM e ISO são os principais padrões normativos disponíveis para o ensaio desejado. Algumas particularidades foram consideradas em cada um deles para que pudesse ser escolhido o mais adequado para as condições encontradas. A norma ISO apresenta mais flexibilidade em relação a velocidade do ensaio. Na bibliografia consultada, a norma mais usada foi a ASTM D 790. Enquanto a norma ISO 14125 fixa a espessura dos corpos de prova em no máximo 2 mm, a ASTM permite uma parametrização das dimensões, resultando em mais liberdade dimensional.

Considerando as constatações apresentadas, pelo motivo dos corpos de prova fabricados terem 4,0 mm de espessura, a norma escolhida foi a ASTM D 790.

4.2.1 Ensaio de Flexão

A norma ASTM D 790 pode ser executada através de uma configuração de 3 pontos ou de 4 pontos. A norma só recomenda o uso do método de 4 pontos somente quando não ocorre falha no corpo de prova com 3 pontos, logo, foi optado pelo uso de 3 pontos. No ensaio, o corpo de prova de seção transversal retangular é posicionado em dois apoios, para então sofrer um carregamento gradualmente crescente no seu ponto médio através de uma superfície de contato semicilíndrica. Foi utilizada a velocidade padrão de 2 mm/min. A norma recomenda que o espaçamento dos pontos de apoio e a espessura sigam a seguinte equação:

$$L / h = 16 \quad (4.1)$$

Onde: L representa o espaçamento dos pontos de apoio e h é a espessura do corpo de prova

Obtém-se o módulo de elasticidade ($E1$) através da equação 4.2 recomendada pela norma citada.

$$E1 = m L^3 / 4bd^3 \quad (4.2)$$

Onde: m = inclinação da reta tangente ao gráfico Carregamento [N] x Deflexão [mm]. L é a distância entre os apoios [mm], b é a largura do corpo de prova [mm] e d corresponde à espessura do corpo de prova [mm].

O equipamento utilizado foi a EMIC23/5D (Figura 14). O local do ensaio foi o Laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRGS, em Porto Alegre – RS. A temperatura de ensaio foi de 27°C e umidade de 65%. A partir dos cálculos de espaçamento dos apoios citados previamente, obteve-se um espaçamento representado por $L/4=16$ resultando em $L=64$ mm.



Figura 14: Equipamento universal de ensaios EMIC23/5D da UFRGS. **Fonte:** (CALEGARI, 2018).

Os resultados obtidos nos ensaios de flexão representam os valores de carga no limite de escoamento (inclinação zero) [N], tensão de flexão no limite de escoamento (inclinação zero) [MPa], carga na ruptura [N], tensão de flexão na ruptura [MPa] e tempo de ruptura [s].

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos ensaios de flexão representam os valores de módulo de elasticidade ($E1$) [MPa], carga no limite de escoamento (inclinação zero) [N], tensão de flexão no limite de escoamento (inclinação zero) [MPa], carga na ruptura [N], tensão de flexão na ruptura [MPa] e tempo de ruptura [s]. A partir destes parâmetros, pode-se olhar de forma direcionada a cada regime de orientação (Assimétrico Desbalanceado e Simétrico Balanceado) e analisar o seu comportamento. Um dos corpos de prova do regime assimétrico desbalanceado sofreu um escorregamento entre os pontos de apoio durante o ensaio e seus valores foram desconsiderados. Todos os corpos de prova de ambos regimes sofreram o limite de escoamento na faixa de 1% de deformação, como podemos ver a seguir na curva tensão x deformação apresentada na Figura 15.

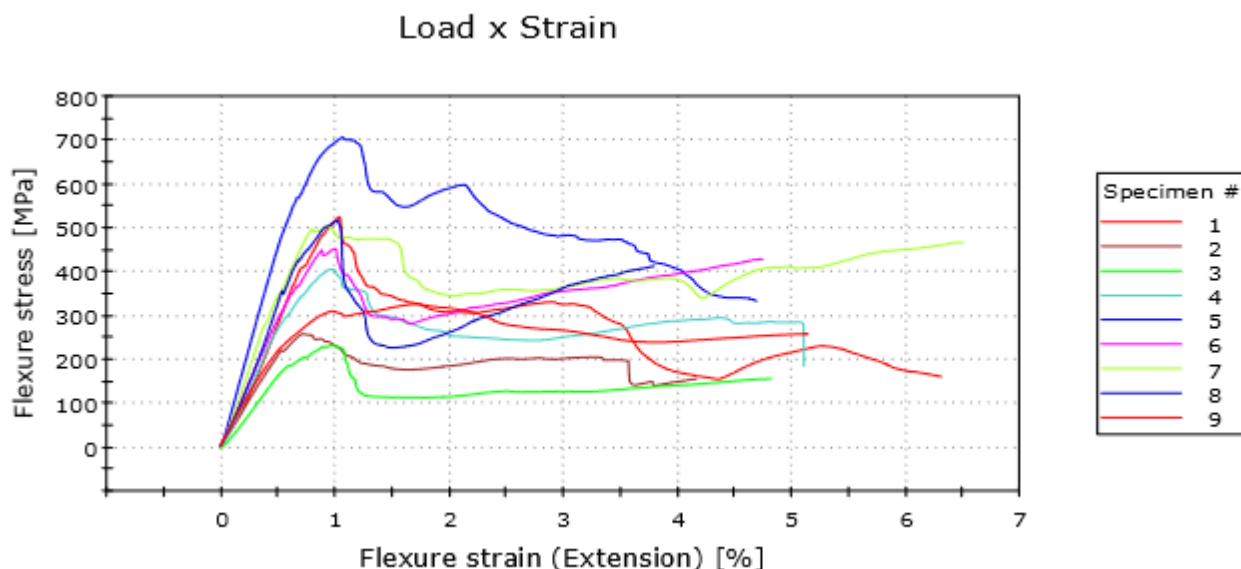


Figura 15: Curva tensão deformação dos corpos de prova. **Fonte:** Autoria Própria

Observando as inclinações das curvas de tensão x deformação, constata-se que os corpos de prova simétricos balanceados possuem um regime de fratura mais frágil enquanto que os assimétricos desbalanceados apresentam um regime mais

dúctil. O regime dúctil apresenta inclinação mais tênue da curva de tensão se comparada à do regime frágil.

Quanto ao módulo de elasticidade (E_1), obteve-se os seguintes dados dos diferentes regimes:

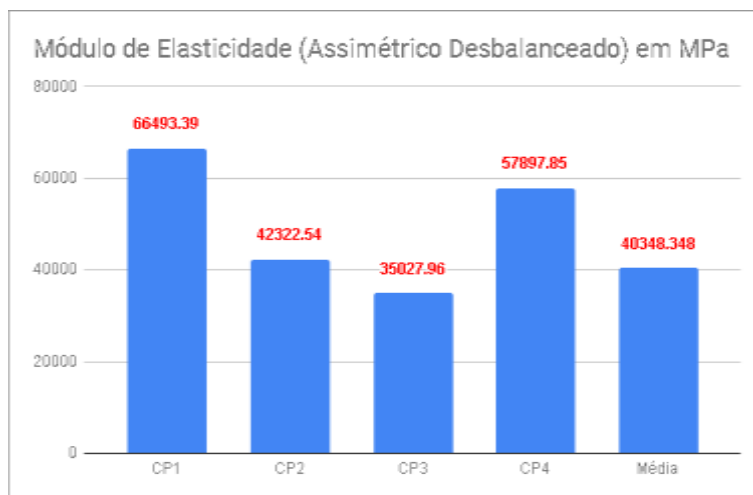


Figura 16: Módulo de Elasticidade dos corpos de prova assimétricos. **Fonte:** Autoria Própria

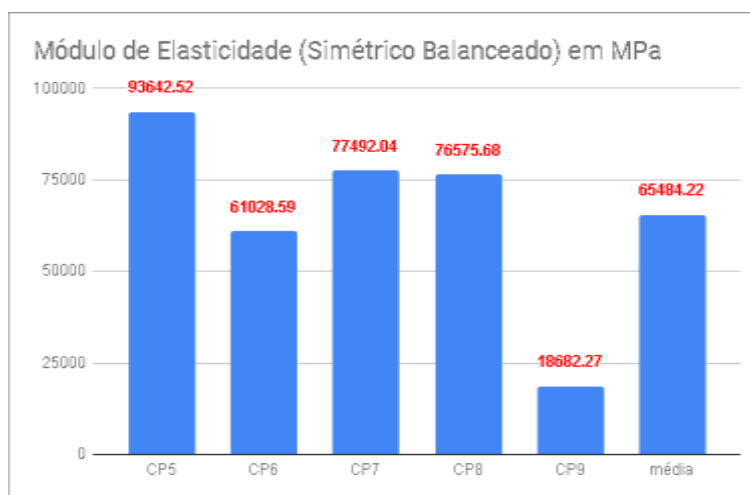


Figura 17: Módulo de Elasticidade dos corpos de prova simétricos. **Fonte:** Autoria Própria

É possível observar que o valor de E_1 no CP9 apresenta um valor muito menor se comparado aos seus semelhantes, considerando o que foi mencionado na seção de micromecânica laminar, onde $E_1 = E_f V_f + E_m V_m$ (Eq 1.1) os únicos valores que são variáveis são de correlação entre V_f e V_m , levando à acreditar que

neste específico CP não houve uma impregnação adequada entre camadas, gerando a discrepância.

Apesar da variação negativa causada pelo CP9 o regime simétrico balanceado apresentou uma média de E1 1,62x superior ao assimétrico desbalanceado. O regime simétrico acabou se mostrando então 62% mais rígido do que o regime assimétrico.

Os resultados de carga no limite de escoamento são apresentados nas Figuras 18 e 19.

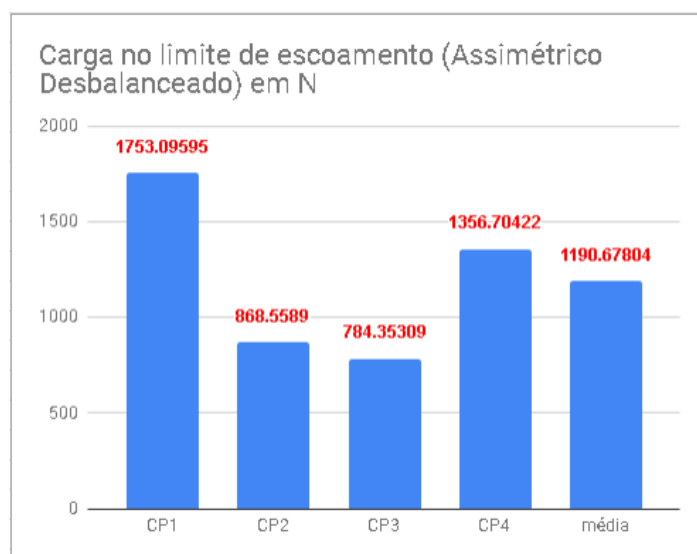


Figura 18: Carga no limite de escoamento dos corpos de prova assimétricos. **Fonte:** Autoria Própria

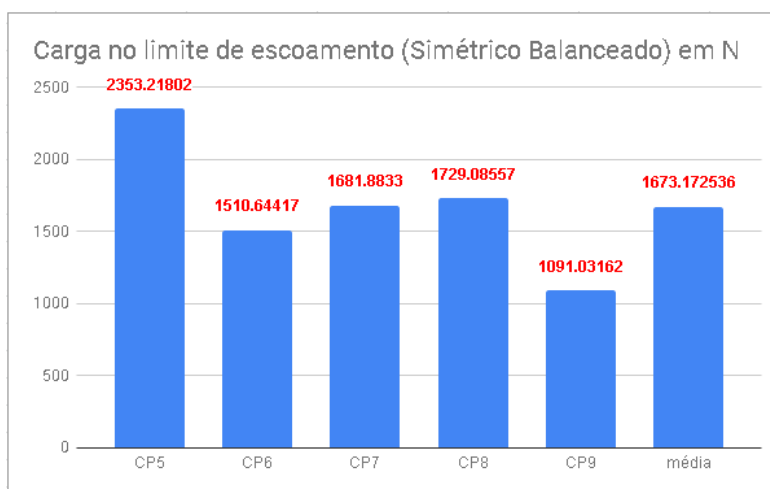


Figura 19: Carga no limite de escoamento dos corpos de prova simétricos. **Fonte:** Autoria Própria

Os valores médios de carga no limite de escoamento do regime simétrico balanceado se mostraram 40,52% maiores se comparados aos do assimétrico desbalanceado. Qualificando neste caso, os corpos de prova do regime simétrico à suportar uma carga 1,4x maior do que os corpos assimétricos antes de atingir o limite de escoamento elástico.

Já com relação à tensão de flexão no limite de escoamento, que é o produto de carregamentos transversais em uma dada seção suportada, seu pico enfatiza o final do regime de deformação elástica da estrutura, os resultados estão apresentados nas Figuras 20 e 21.



Figura 20: Tensão de flexão no limite de escoamento dos corpos de prova assimétricos. **Fonte:** Autoria Própria

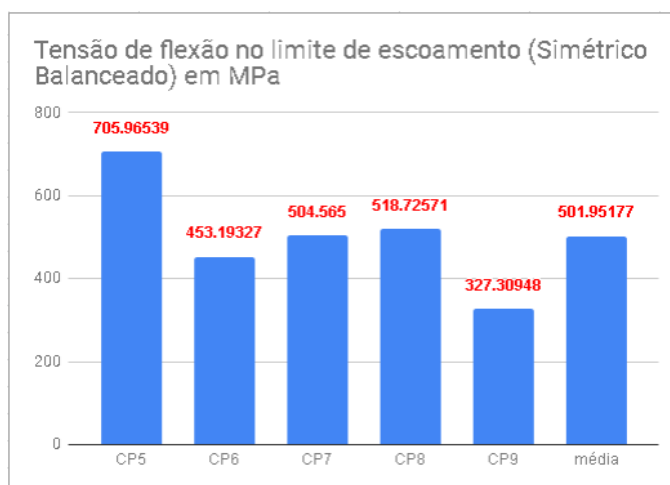


Figura 21: Tensão de flexão no limite de escoamento dos corpos de prova simétricos. **Fonte:** Autoria Própria

Como esperado, os corpos simétricos balanceados mostraram suportar uma maior tensão de flexão no limite de escoamento. Se comparados com o regime assimétrico desbalanceado, apresentaram uma tensão de flexão no limite de escoamento média 40,5% maior. Confirmando a incapacidade de um regime desordenado de distribuir as tensões efetivamente ao longo e entre os planos.

Após sofrer a deformação elástica inicial, o corpo de prova ainda passa por uma deformação plástica a qual sustenta a carga aplicada até que haja uma ruptura da estrutura.

Nas Figuras 22 e 23 mostram os dados referentes à carga na ruptura.

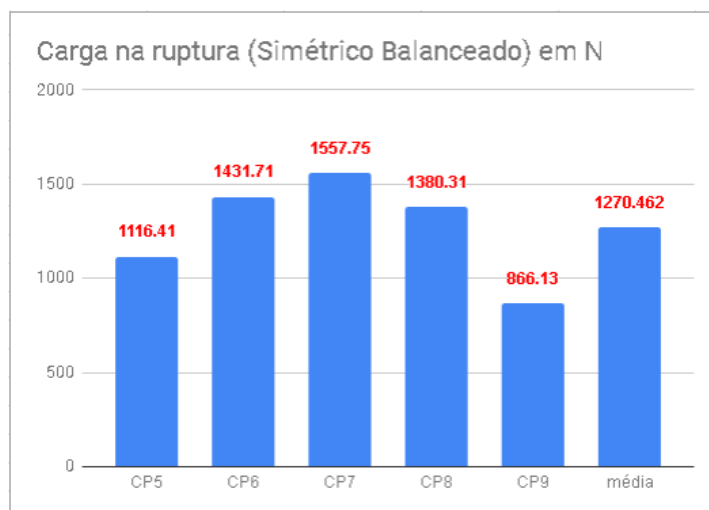


Figura 22: Carga na ruptura dos corpos de prova assimétricos. **Fonte:** Autoria Própria

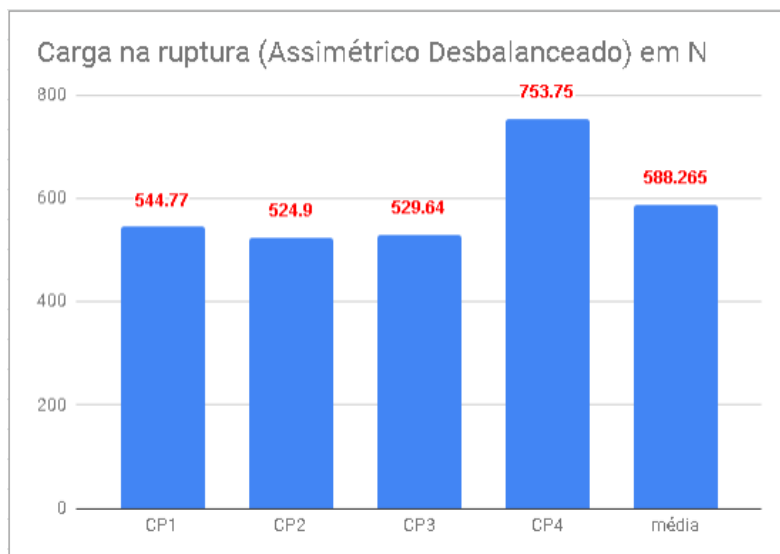


Figura 23: Carga na ruptura dos corpos de prova simétricos. **Fonte:** Autoria Própria

O regime simétrico balanceado mostrou uma capacidade média de suportar 2,15x mais carga no momento da ruptura do que o simétrico desbalanceado.

A tensão de flexão na ruptura inicial pode ser abordada da mesma maneira do que a carga no momento de o limite de escoamento, mas por sua vez utilizando da tensão de flexão na ruptura como parâmetro na obtenção da variação média das tensões de flexão entre o início e o final da deformação plástica da estrutura.

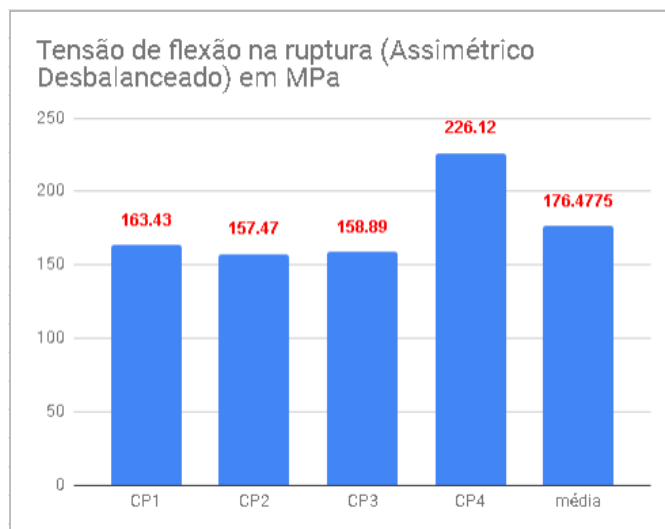


Figura 24: Tensão de flexão na ruptura dos corpos de prova assimétricos. **Fonte:** Autoria Própria

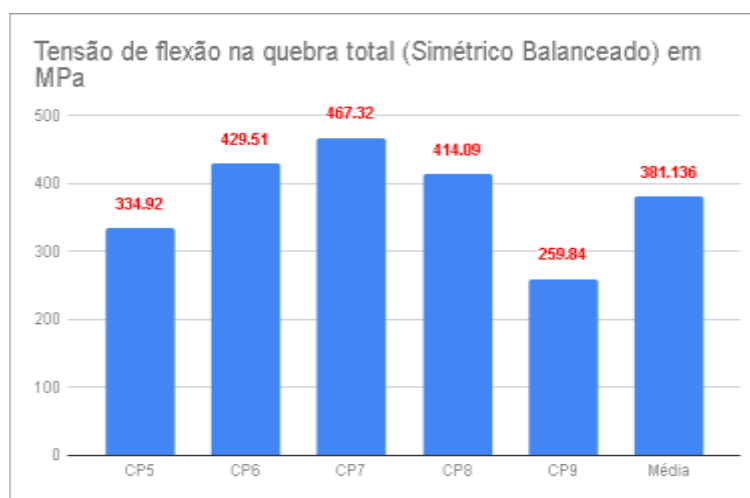


Figura 25: Tensão de flexão na ruptura dos corpos de prova simétricos. **Fonte:** Autoria Própria

No momento da ruptura, em média, os corpos de prova simétricos e balanceados apresentaram uma capacidade de distribuir tensões 2,16x maior do que os do regime oposto.

O tempo de quebra (Figuras 26 e 27) não apresentou nenhuma divergência que se destaque, as médias dos tempos de quebra foram bem parecidas (260,926 segundos e 254,5148 segundos), os tempos máximos e mínimos individuais dos CPs também não apresentaram grandes discrepâncias, o que demonstra uniformidade estrutural dos corpos de prova.

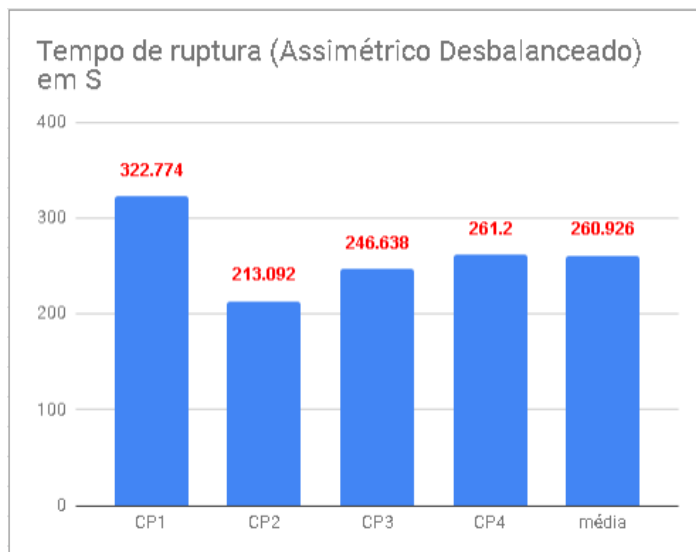


Figura 26: Tempo de ruptura dos corpos de prova assimétricos. **Fonte:** Autoria Própria

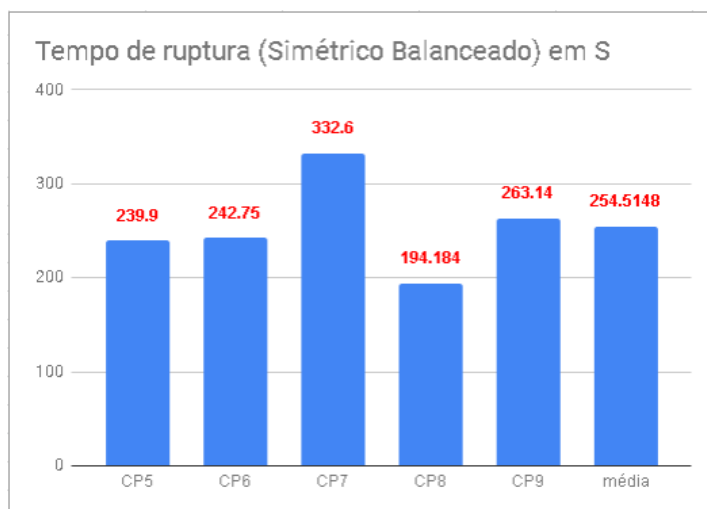


Figura 27: Tempo de ruptura dos corpos de prova simétricos **Fonte:** Autoria Própria

6. CONCLUSÃO

Após análise dos resultados, constatou-se que o material compósito de matriz epóxi reforçado por fibras de carbono ordenadas de maneira simétrica e balanceada, apresenta propriedades mecânicas superiores a um compósito dos mesmos materiais, com as mesmas dimensões, mas constituído por um lay-up assimétrico e desbalanceado.

Em média, o regime simétrico se mostrou 62% mais rígido do que o regime assimétrico. O regime simétrico balanceado apresentou limite de escoamento médio 40,5% maior. No momento da ruptura, em média, os corpos de prova simétricos e balanceados apresentaram uma capacidade de distribuir tensões 2,16x maior do que os do regime oposto e suportar 2,15x mais carga.

O estudo confirmou a expectativa de que para utilização em engenharia onde propriedades mecânicas são essenciais, os compósitos de fibra de carbono simétricos e balanceados se mostram superiores em relação aos compósitos de fibra de carbono assimétricos e desbalanceados em todos os aspectos analisados neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS D., CARLSSON L. et al. **Experimental Characterization of Advanced Composite Materials** 3 ed. CRC Presss, 2003.

BARBOZA D.F. **Estudo Numérico do Comportamento em Flexão de Tubos Fabricados em Material Compósito através da Técnica de Enrolamento Filamentar**, Dissertação de M.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

BRITO, Amilton. Mecânica de fabricação: conceitos, elementos e processos. **2015**. Disponível em: <http://mecanicafabricar.blogspot.com/2015/10/extrusao-plastica.html>. Acesso em: Maio de 2019.

CALLISTER, W. D., Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. 7ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CARLONE, G.S. PALAZZO, R. PASQUINO, **Mathematical and Computer Modelling** V. 44, Issues 7–8, October 2006, P. 701-709 Pultrusion manufacturing process development by computational modelling and methods Author links open overlay panel.

CHAPTER 3. **Design of hybrid laminated composites**, anna university, CHENNAI - 600 025, p. 27-30.

DIRECT FIBER FEEDING INJECTION MOLDING OF CARBON FIBER REINFORCED POLYCARBONATE COMPOSITES **Putinun Uawongsuwan**, Hiroyuki Inoya and Hiroyuki Hamada, Department of Advanced Fibro-Science, Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585, Japan.

MATHUROSEMONTRI; SUCHALINEE; UAWONGSUWAN. (2016). **The Effect of Processing Parameter on Mechanical Properties of Short Glass Fiber Reinforced Polyoxymethylene Composite by Direct Fiber Feeding Injection Molding Process**. Energy Procedia. 89. p. 255-263.

MENDES, Paulo J B. **O Coeficiente de Poisson**. 2003. Disponível em: http://figaro.fis.uc.pt/PJBM/ensino/ano_2006_7/aulas/Bloco_05Elasticidade_Poisson.pdf. Acesso em: Junho de 2019.

NETCOMPOSITES. **Wet/Hand Lay-up**. 2019. Disponível em: <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/manufacturing/wethand-lay-up/>. Acesso em: Junho de 2019.

PAMAR, J. DHANRAJ, et al. **Experimental Investigation of Bi Directional Carbon Fiber Composite**. Materials Today: Proceedings 2.4 (2015): p. 3008-3016.

PARDINI, L; GONÇALVES, Adriano. (2009). **Processamento de compósitos termoestruturais de carbono reforçado com fibras de carbono**. Journal of Aerospace Technology and Management. 1. p. 231-241. 2009.

PARDINI, Luiz. **Preformas multi -direcionais para compósitos termoestruturais**. 2002. Disponível em: https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2002/arqs_pdf/pdf_200/tc210-004.pdf. Acesso em: Junho de 2019.

PINHO, Silvestre; CAMANHO, Pedro. **Ensaio mecânicos em materiais compósitos**. 2005. Disponível em: https://web.fe.up.pt/~stpinho/teaching/feup/y0506/aula3_handouts.pdf. Acesso em: Junho de 2019.

ROBERT, A.Tatara **Applied Plastics Engineering Handbook** (Second Edition), 2017, Pages 291-320.

RUCHERTt, Cassius. **Ensaio Mecânicos dos Ensaio dos Materiais Flexão, Fluência e Fadiga**. 2018. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/241289/mod_resource/content/1/Aula%208%20Ensaio%20Flexao_Fluencia_Fadiga.pdf. Acesso em: Junho de 2019.

STANDARD, A. S. T. M. **Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials**. ASTM D3039/D 3039M (1995)

VENTURA, Ana Mafalda F.M.. **Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas**. C.Tecn. Mat., Lisboa , v. 21, n. 3-4, p. 10-19, jul. 2009 . Disponível em: http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0870-83122009000200003&lng=pt&nrm=iso. Acesso em Abril de 2019.

YUYANG Song , UMESH Gandhi, TAKESHI Sekito, UDAY K. Vaidya, JIM HSU, Anthony Yang; TIM Osswald. **A Novel CAE Method for Compression Molding Simulation of Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastic Composite Sheet Materials**. 2008