



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MATHEUS THOMAS DE OLIVEIRA BRITO

**INFLUÊNCIA DA HIBRIDIZAÇÃO NA CAMADA *versus* HIBRIDIZAÇÃO NO
LAMINDADO EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS
DE CARBONO E FIBRAS DE ARAMIDA À $\pm 45^\circ$ NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS**

CARAÚBAS-RN

2022

MATHEUS THOMAS DE OLIVEIRA BRITO

**INFLUÊNCIA DA HIBRIDIZAÇÃO NA CAMADA *versus* HIBRIDIZAÇÃO NO
LAMINDADO EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS
DE CARBONO E FIBRAS DE ARAMIDA À $\pm 45^\circ$ NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Engenheiro Mecânico.

Orientadora: Ana Claudia de Melo Caldas
Batista, Profa. Dra.

CARAÚBAS-RN

2022

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

B862i Brito, Matheus Thomas de Oliveira.
INFLUÊNCIA DA HIBRIDIZAÇÃO NA CAMADA versus
HIBRIDIZAÇÃO NO LAMINDADO EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS
REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO E FIBRAS DE
ARAMIDA À $\pm 45^\circ$ NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS / Matheus
Thomas de Oliveira Brito. - 2022.
71 f. : il.

Orientadora: Ana Claudia de Melo Caldas
Batista.

Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2022.

1. Hibridização. 2. Compósito. 3. Carbono. 4.
Aramida. 5. Propriedades mecânicas. I. Batista,
Ana Claudia de Melo Caldas, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MATHEUS THOMAS DE OLIVEIRA BRITO

**INFLUÊNCIA DA HIBRIDIZAÇÃO NA CAMADA *versus* HIBRIDIZAÇÃO NO
LAMINADO EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS
DE CARBONO E FIBRAS DE ARAMIDA À $\pm 45^\circ$ NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Engenharia Mecânica.

Defendida em: 08/06/2022.

BANCA EXAMINADORA

ANA CLAUDIA DE MELO CALDAS
BATISTA: [REDACTED]

Assinado de forma digital por ANA
CLAUDIA DE MELO CALDAS
BATISTA: [REDACTED]
Dados: 2022.06.21 11:04:49 -03'00'

Ana Claudia de Melo Caldas Batista, Prof. Dra.

Presidente

Rudson de Souza
Lima

Assinado de forma digital por
Rudson de Souza Lima
Dados: 2022.06.20 15:52:54 -03'00'

Rudson de Souza Lima, Prof. Dr.

Membro Examinador

WENDELL ALBANO [REDACTED]

Assinado digitalmente por WENDELL ALBANO [REDACTED]
DN: CN=WENDELL ALBANO, [REDACTED] OU=UFERSA -
*Universidade Federal Rural do Semi-Árido, O=ICPEdu,
*C=BR
Razão: Eu sou o autor deste documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2022.06.21 08:38:07-03'00'
Formato: PDF-Reader Versão: 1.2.2

Wendel Albano, Prof. Dr.

Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à Deus, por sempre me dá forças pra continuar lutando pelos meus objetivos mesmo com todas as dificuldades da vida.

Agradeço à toda minha família, que sempre estão comigo, em especial meus pais, Alzira Maria de Lourdes Neta e Clezimar de Brito Leite, amo vocês mais que tudo.

Agradeço à minha Orientadora Ana Claudia de Melo Caldas Batista, que está pronta pra ajudar em todos os momentos, se tornando, durante a jornada, uma amiga. Sendo sempre uma grande profissional.

Agradeço à Banca Examinadora, Rudson de Souza Lima e Wendel Albano pela disponibilidade para avaliação deste trabalho e pela experiência professor/aluno durante o curso.

Agradeço aos companheiros e componentes do Grupo de Pesquisa em Compósitos (GPeC), Paulo Nascimento e Moisés Medeiros, que sempre ajudou um ao outro em situações adversas.

Agradeço a minha namorada, Carla Vitória Felizardo Nascimento que em todos os momentos está comigo, independente de tudo, me apoiando. Sempre presente em todos os momentos. Amo você!

Agradeço também aos meus amigos que ajudaram no desenvolvimento desse trabalho, sendo direta ou indiretamente. Principalmente, Cassio Lannyergo Pascoal de Oliveira Costa, Israel Jonathan Menezes Praxedes, Mateus Praxedes de Freitas, que estiveram presentes durante a difícil caminhada.

Agradeço, por fim, ao corpo técnico da universidade, em especial Samir Adson Ferreira de Sena, técnico de laboratório da mecânica, que sempre esteve disponível para ajuda.

Agradeço a todos de coração!

RESUMO

Foco dos estudos atuais na área de compósitos, os tecidos híbridos vêm apresentando elevada utilização para as mais diversas aplicações mecânicas. Por esse motivo, é necessário um estudo das características mecânicas dos compósitos poliméricos híbridos, comparando com os compósitos confeccionados pelas mesmas fibras sem hibridização. Este trabalho busca verificar a influência da hibridização em quatro laminados compósitos, híbridos e não-híbridos, que utilizam três tipos de tecidos (carbono, aramida e híbrido carbono/aramida), modificando as suas disposições. Os laminados foram confeccionados através do processo de laminação manual (*Hand Lay-up*) e a matriz utilizada foi a resina epóxi. Os corpos de prova foram cortados com orientação das fibras $\pm 45^\circ$, com objetivo de conhecer o comportamento mecânico e qual influência causada nas propriedades do material pela angulação das fibras. Para fim de comparações foram feitos ensaios de tração uniaxial com base na norma ASTM D3039 (2014) e ensaios de densidade baseando-se na norma de densidade volumétrica ASTM D792 (2008) em todos os compósitos. As alterações ocorridas nas propriedades dos corpos de prova foram analisadas e comparadas entre si, como a resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação. Os resultados mostraram que os compósitos que passaram por hibridização, conferiram resultados melhores que o compósito apenas de aramida, como um aumento no módulo de elasticidade e resistência à tração. Dos laminados confeccionados, o compósito híbrido que apresentou melhor desempenho foi o reforçado com tecido híbrido (carbono/aramida).

Palavras-chave: Hibridização. Compósito. Carbono. Aramida. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Focus of current studies in the area of composites, hybrid fabrics have been showing high utilization for the most diverse mechanical applications. For this reason, it is necessary to study the mechanical characteristics of polymeric composites reinforced with hybrid fabrics, and compare them with composites made by the same fibers without hybridization. This work aims to verify the influence of hybridization on four composite laminates, hybrids and non-hybrids, which use three types of fabrics (carbon, aramid and carbon/aramid hybrid), modifying its disposition. The laminates were made through the manual lamination process (Hand Lay-up) and the matrix used was epoxy resin. The specimens were cut with the orientation of the fibers $\pm 45^\circ$, in order to know the mechanical behavior and the influence caused on the properties of the material by the angulation of the fibers. For comparison purposes, uniaxial tensile tests were performed based on ASTM D3039 (2014) standard and density tests based on the volumetric density standard ASTM D792 (2008) in all composites. The changes occurred in the properties of the specimens were analyzed and compared to each other, such as tensile strength, modulus of elasticity and deformation. The results showed that the composites that underwent hybridization gave better results than the only aramid composite, such as an increase in modulus of elasticity and tensile strength. Out of the laminated products made, the hybrid composite that presented the best performance was the hybrid in the fabric itself (carbon/aramid).

Keywords: Hybridization. Composite. Carbon. Aramid. Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de compósitos e seus reforços.	17
Figura 2. Configurações dos reforços fibrosos.	21
Figura 3. Variações das fibras de carbono no mercado.	23
Figura 4. Variações das fibras de aramida no mercado.	24
Figura 5. Formas de hibridização.	27
Figura 6. Ilustração da laminação manual.	28
Figura 7. Processo de <i>hand lay-up</i> de placas de apoio.	29
Figura 8. Modos de fraturas dos compósitos submetidos à tração.	29
Figura 9. Resumo dos procedimentos experimentais.	31
Figura 10. Tecidos utilizados para confecção dos corpos de prova.	32
Figura 11. Rolo utilizado para laminação.	33
Figura 12. Molde de porcelanato utilizado.	34
Figura 13. Resumo do processo de laminação das placas.	35
Figura 14. Marcações de corte na placa de aramida.	35
Figura 15. Disco de corte utilizado.	36
Figura 16. Lixadeira utilizada.	36
Figura 17. Dimensões CPs para o ensaio de tração uniaxial.	37
Figura 18. Corpos de prova (a) $C_C^{45^\circ}$; (b) $C_A^{45^\circ}$; (c) $C_{CA}^{45^\circ}$; (d) $C_{TH}^{45^\circ}$	38
Figura 19. Máquina de ensaio universal EMIC.	39
Figura 20. CPs para ensaio de densidade (a) $C_C^{45^\circ}$; (b) $C_A^{45^\circ}$; (c) $C_{CA}^{45^\circ}$; (d) $C_{TH}^{45^\circ}$	41
Figura 21. CPs colocados na estufa.	41
Figura 22. CPs no dessecador de vidro.	42
Figura 23. CP imerso no béquer com água destilada.	42
Figura 24. (a) corpo de prova na máquina de tração; (b) corpo de prova após início do fraturamento; (c) corpo de prova fraturado totalmente.	47
Figura 25. Fraturas nos corpos de prova de $C_C^{45^\circ}$	49
Figura 26. Corpos de prova válidos $C_A^{45^\circ}$	51
Figura 27. Corpos de prova válidos $C_{CA}^{45^\circ}$	56
Figura 28. Corpos de prova válidos $C_{TH}^{45^\circ}$	58

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. (a) Tensão x deformação para os CPs de $C_C^{45^\circ}$; (b) tensão x deformação na região linear elástica para os CPs de $C_C^{45^\circ}$	46
Gráfico 2. (a) Tensão x deformação para os CPs de $C_A^{45^\circ}$; (b) tensão x deformação na região linear elástica para os CPs de $C_A^{45^\circ}$	50
Gráfico 3. (a) Comparativo da tensão média, (b) módulo de elasticidade e (c) deformação média do carbono e aramida.	53
Gráfico 4. (a) Tensão x deformação para os CPs $C_{CA}^{45^\circ}$; (b) tensão x deformação na região linear elástica para os CPs de $C_{CA}^{45^\circ}$	54
Gráfico 5. (a) Tensão x deformação para os CPs de $C_{TH}^{45^\circ}$; (b) tensão x deformação na região linear elástica para os CPs de $C_{TH}^{45^\circ}$	57
Gráfico 6. Tensão x Deformação na região linear para os CPs de todo os compósitos fabricados.	59
Gráfico 7. Comparativo do módulo de elasticidade para todos os CPs válidos.	60
Gráfico 8. Comparativo da tensão para todos os CPs válidos.	62
Gráfico 9. Comparativo da deformação para todos os CPs válidos.	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Características das fibras de carbono.	22
Quadro 2. Vantagens e desvantagens das fibras de carbono.....	23
Quadro 3. Vantagens e desvantagens das fibras de aramida.....	25
Quadro 4. Código e definição das formas de falha.	30
Quadro 5. Nomenclatura dos compósitos fabricados.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades da matriz epóxi.....	19
Tabela 2. Propriedades dos tipos de carbono.	22
Tabela 3. Propriedades dos tipos de aramida.	25
Tabela 4. Resultados colhidos do ensaio de densidade.	44
Tabela 5. Valores médios das propriedades mecânicas dos CPs - $C_C^{45^\circ}$	48
Tabela 6. Valores médios das propriedades mecânicas dos CPs - $C_A^{45^\circ}$	52
Tabela 7. Valores médios das propriedades mecânicas dos CPs - $C_{CA}^{45^\circ}$	55
Tabela 8. Valores médios das propriedades mecânicas dos CPs - $C_{TH}^{45^\circ}$	57
Tabela 9. Diferença percentual do módulo de elasticidade de $C_A^{45^\circ} \times C_{CA}^{45^\circ} \times C_{TH}^{45^\circ} \times C_C^{45^\circ}$..	63
Tabela 10. Diferença percentual de tensão de ruptura de $C_C^{45^\circ} \times C_A^{45^\circ} \times C_{CA}^{45^\circ} \times C_{TH}^{45^\circ}$	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1	DEFINIÇÃO DOS COMPÓSITOS	17
3.2	MATRIZES POLIMÉRICAS	18
3.3	FIBRAS SINTÉTICAS	19
3.3.1	Fibras de Carbono	21
3.3.2	Fibras de Aramida	24
3.4	COMPÓSITOS HÍBRIDOS	26
3.5	PROCESSO DE LAMINAÇÃO MANUAL (<i>HAND LAY-UP</i>)	27
3.6	TIPOS DE FRATURAS NOS COMPÓSITOS	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1	CONFECÇÃO DAS PLACAS	31
4.1.1	Preparação dos laminados	33
4.2	LAMINAÇÃO DOS COMPÓSITOS	33
4.2.1	Preparação dos corpos de provas	36
4.3	ENSAIO DE TRAÇÃO NOS CPs	39
4.4	ENSAIO DE DENSIDADE NOS CORPOS DE PROVA	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1	ENSAIO DE DENSIDADE	44
5.2	ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL PARA OS CPs $C_C^{45^\circ}$	45
5.3	ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL PARA OS CPs DE $C_A^{45^\circ}$	49
5.3.1	Comparativo do compósito de aramida e compósito de carbono	52
5.4	ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL PARA OS CPs $C_{CA}^{45^\circ}$	54
5.5	ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL PARA OS CPs DE $C_{TH}^{45^\circ}$	56
5.6	COMPARAÇÃO ENTRE OS DISTINTOS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS	59
6	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1 INTRODUÇÃO

Desde a década de 60 que os materiais compósitos poliméricos reforçados por fibras vêm possuindo crescimento potencial devido às grandes demandas de indústrias diversas, como a aeroespacial, automotiva, construção civil, esportiva e ortopédica (FERREIRA, 2017).

Pereira (2016) comentou que a utilização desses materiais compósitos nas mais diversas áreas se dá pelo fato do elevado desempenho mecânico que tais materiais possuem quando são comparados com materiais mais usados tradicionalmente.

O crescimento da utilização dos materiais compósitos, por causa da sua ótima adaptabilidade, atrelado ao fato de que a área da ciência e engenharia de materiais permanece em constante evolução, torna sempre necessária a criação de novos materiais para acompanhar este progresso, como por exemplo a criação dos compósitos híbridos.

Para Levy Neto e Pardini (2016) e Groover (2010), os materiais compósitos são a junção ou combinação de dois elementos com propriedades físicas e químicas diferentes e, quando estes são combinados, resulta em um novo material possuindo propriedades superiores aos componentes individuais.

Já os chamados compósitos híbridos apresentam no seu corpo três ou mais materiais diferentes e o seu surgimento aumentou ainda mais a versatilidade dos compósitos, pois existe a possibilidade da variação (ou criação) de novas propriedades mecânicas, afirmou Soares (2020), assentindo com Rodrigues (2018).

Os materiais de compósitos poliméricos mais utilizados nas indústrias no geral são os compostos por fibras sintéticas, que são as fibras de vidro, carbono e aramida (PEREIRA, 2016), sendo as duas últimas focos deste trabalho.

A fibra de carbono é uma das mais utilizadas pelas suas ótimas propriedades mecânicas e térmicas, em contrapartida, possui um custo elevado (BATISTA, 2017), por esse motivo busca-se outras alternativas para um melhor custo-benefício em certas aplicações, como um compósito híbrido de fibras de carbono com fibras de aramida, esta, que possui um custo menor quando comparada com a fibra anterior.

A aramida é comercializada de várias formas, esse tipo de fibra apresenta uma alta resistência ao impacto e uma rigidez elevada, possui também uma cor amarelada e uma difícil manipulação (FONSECA, 2011).

As fibras no geral são comumente utilizadas como agentes de reforço e nos compósitos a orientação das fibras podem modificar totalmente as propriedades mecânicas dos materiais, possibilitando o aumento ou decréscimo da resistência à tração de acordo com a sua disposição.

As propriedades do material estudado podem ser mudadas significativamente apenas com as disposições e orientações das fibras presentes no compósito, sendo de extrema importância a consideração como os reforços estão arranjos.

No presente trabalho, será realizado um estudo comparativo entre os compósitos híbridos e não-híbridos produzidos com orientação da fibra de 45°, afim de destacar a viabilidade da hibridização.

Os compósitos testados possuem hibridização distintas, um utilizando a hibridização no laminado, chamado de intercamadas (cada camada é composto por um tecido constituído de uma única fibra, porém em cada camada a fibra é diferente) e o outro a hibridização na camada, conhecido como intracamadas (em cada camada será utilizado um tecido híbrido com a fibra de carbono no urdume e a fibra de aramida na trama, ou seja, em cada camada irá conter as duas fibras). Os outros dois compósitos serão confeccionados, um constituído totalmente de fibras de aramida e outro de carbono, respectivamente, para realização de um comparativo com os compósitos híbridos.

Segundo Batista (2017), os compósitos poliméricos estão sendo cada vez mais aplicados em diversas áreas e com aplicações diversas. Ou seja, muitos materiais compósitos estão sendo produzidos para diferentes funções, possuindo características próprias.

Nos dias de hoje, vários materiais compósitos estão sendo criados, estudados e comparados, possuindo diversos tipos de tecidos e disposições distintas entre eles, já que uma pequena mudança de ordem ou direção entre as camadas pode modificar totalmente alguma propriedade do compósito.

Visto isso, o estudo feito neste trabalho busca a produção de quatro compósitos, sendo não-híbridos e híbridos, com a mesclagem na forma de hibridização. Assim, os compósitos fabricados serão postos em comparação para verificar quais apresentam os melhores custo-benefício, testando também a efetividade dos mesmos de acordo com suas características. Desse modo, as diferenças dos compósitos não-híbridos para os híbridos são aferidas para a verificação de viabilidade dos mesmos.

Para as comparações dos resultados obtidos serem feitas, os materiais passarão pelo ensaio de tração uniaxial, seguindo base a norma técnica ASTM D3039 (2014) e ensaio de densidade, na norma ASTM D792 (2008).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Produzir, ensaiar e estudar propriedades mecânicas de um compósito polimérico híbrido reforçado na direção $\pm 45^\circ$ com tecido de fibra de carbono e/ou tecido de fibra de aramida, com o intuito de analisar e comparar os efeitos causados de acordo com a mudança e disposições dos tecidos e fibras, alternando-as de várias maneiras nas placas a serem confeccionadas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Produzir quatro laminados compósitos poliméricos (resina epóxi) mesclando tecido de fibra de carbono e tecido de fibra de aramida (híbridos e não-híbridos) e comparar seus resultados, sendo 1 laminado com 4 camadas de fibra de aramida, 1 laminado com 4 camadas de fibra de carbono, 1 laminado com 2 camadas de fibra de carbono externas e 2 camadas de fibra de aramida internas e 1 laminado com 4 camadas de tecido híbrido carbono/aramida;
- Por meio do ensaio de tração uniaxial, testar a utilização dos compósitos criados, adotando a Norma ASTM D 3039 (2014) - Testagem de Tração para Materiais Compósitos;
- Determinar as densidades dos novos materiais confeccionados baseando-se nos parâmetros da norma ASTM D 792 (2008);
- Analisar as densidades descobertas dos distintos compósitos e comparar com outros trabalhos;
- Comparar as propriedades dos compósitos de tecido de fibra de aramida com os compósitos híbridos confeccionados, verificando as modificações a partir da adição de carbono para hibridização;
- Verificar quais efeitos foram causados nas propriedades mecânicas pela angulação de $\pm 45^\circ$ nos corpos de prova confeccionados, comparando com outros trabalhos na área;
- Estudar o comportamento dos conjuntos de corpos de prova no gráfico tensão x deformação, relacionando suas propriedades.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 DEFINIÇÃO DOS COMPÓSITOS

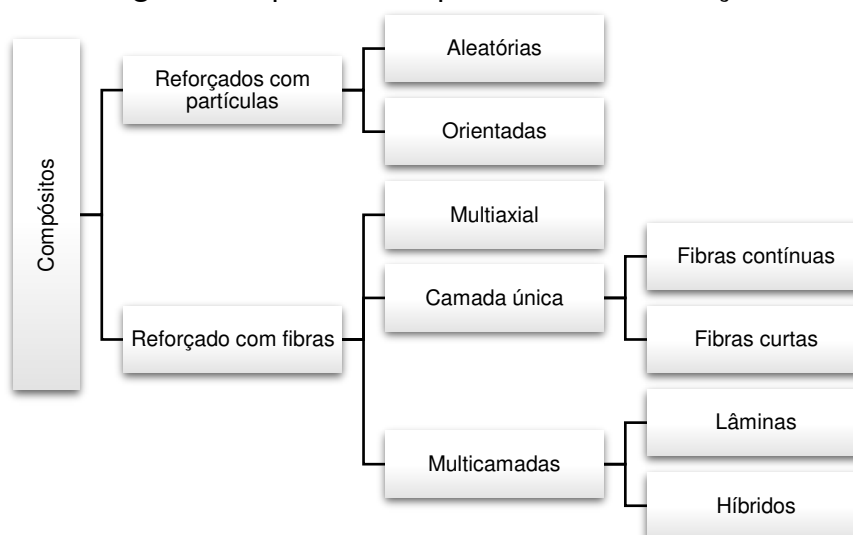
Um material compósito, para Ventura (2009), se resume em um material composto pela união de duas ou mais fases diferentes, chamadas de matriz e reforço, sendo o objetivo principal a melhoria das propriedades e desempenhos do novo material quando comparado aos elementos individuais.

Um compósito, para Tan (1994), é a junção de um componente que possui propriedades inferiores, chamado de matriz e outro que possui propriedades como alta resistência e rigidez, ou seja, melhores, denominados como reforço, tendo como finalidade a melhoria das características dos componentes particulares.

A norma ASTM D3878 (2007) de terminologia padrão para materiais compósitos define esse tipo de material como sendo a ligação de dois ou mais materiais insolúveis e com propriedades distintas dos elementos de origem separados.

Os materiais compósitos possuem diversas ramificações para a definição de seus tipos, cada autor define essa divisão de acordo com seu entendimento. De maneira simples e resumida, os compósitos estão divididos de acordo com a Figura 1.

Figura 1. Tipos de compósitos e seus reforços.



Fonte: Adaptado de Neto e Pardini (2006).

Um aspecto que deve ser totalmente considerado na criação de um material compósito é a adesão fibra-matriz, que pode modificar de maneira significativa as propriedades finais do material (TIMARCO e MORELLI, 2016).

3.2 MATRIZES POLIMÉRICAS

De acordo com Silva (2013), a matriz tem como principal função manter a integridade estrutural do compósito no qual faz parte e, o material desta necessita ter algumas propriedades mecânicas gerais, como a resistência ao impacto, ductilidade, tenacidade, resistência à tração, ao corte, baixa condutividade térmica e resistência a temperaturas elevadas. Além de propriedades específicas, como boa adesão às fibras, resistência aos ambientes agressivos quimicamente, cura rápida e possuir também um baixo custo (SILVA, 2013).

Para Paula (2011), as principais funções das matrizes do tipo polimérica são a deformação que elas conseguem obter, repassando as tensões para os elementos de reforço e, cumpre o papel de preservar os reforços dos impactos do meio ambiente.

A matriz polimérica tem a capacidade de resistência à compressão, absorve algumas deformações e suporta fibras, partículas ou folhas como reforço, permitindo a utilização de dois ou mais tipos.

As resinas normalmente usadas como matriz são as poliméricas, que são classificadas como termoplásticas e termorrígidas (termofixas), dando destaque para a última citada.

Conforme Galli (2016), as matrizes poliméricas termofixas possuem, entre as cadeias poliméricas, ligações químicas covalentes (mais fortes) que são formadas durante a cura e, por isso, ao serem aquecidas e rompidas, tornam-se irreversíveis, não possuindo propriedades de fundir-se, diferente das termoplásticas.

As principais vantagens do uso das matrizes termofixas é a facilidade de adição de reforços na matriz, pois apresentam, antes do processo de cura completo, viscosidades inferiores às termoplásticas (DOS SANTOS, 2006).

A resina epóxi (uma das mais utilizados no mercado), possui um processo de cura à temperatura ambiente, respeitando o tempo de formação das ligações citadas. O processo de cura, chamado de polimerização, é iniciado após a adição de um catalisador (ou endurecedor) na resina.

Para Altidis (2013) as resinas epóxis possuem uma baixa viscosidade no estado líquido e por isso um fácil manuseio, é comumente utilizada na indústria como adesivo, componente de moldagem e em compósitos para aplicações

diversas. Ainda, para a autora, a grande diversidade de formas de como utilizar essa resina se deve às variadas formas possíveis e que admitem diversas modalidades de uso, tanto em relação ao processo, quanto ao desempenho individual.

As resinas epóxis são extremamente compatíveis e comumente empregadas nos compósitos, até mesmo os que necessitam de alto desempenho, como nas indústrias aeronáutica e automobilística, podendo ser utilizadas com todas as fibras e partículas disponíveis (MANO, 1991) e suas propriedades estão expostas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades da matriz epóxi.

Propriedades	Epóxi
Massa específica (g/cm ³)	1,1 – 1,4
Resistência à tração (MPa)	35 – 90
Módulo de Young (GPa)	2,1 – 6
Deformação na ruptura (%)	1
Coefficiente de dilatação (10 ⁻⁶ /°C)	55 – 110

Fonte: Adaptado de Soares (2020).

Para a escolha de uma matriz, é necessária a análise de características específicas para as aplicações desejadas, como as propriedades físicas mecânicas e técnicas, o procedimento de fabricação e o custo (MULINARI, 2009), além da adesão fibra-matriz, considerando a fibra que será utilizada, esta, que será o reforço, melhorando significativamente as propriedades do material após adição (NETO, 2016).

Segundo Neto (2016), as aplicações e formas de fabricações das matrizes poliméricas crescem cada vez mais no mercado, indo de técnicas simples e manual (como o processo *Hand Lay-up* usado nesse trabalho que será detalhado posteriormente), até processos mais complexos, produzindo quantidades variadas de peças.

3.3 FIBRAS SINTÉTICAS

Para Souza (2017) em concordância com Mallick (1988), as fibras são o elemento principal que permite a transferência de carga durante o material, com isso, as fibras devem estar agrupadas com a matriz de maneira correta, de acordo

com a aderência fibra-matriz e, caso isso não aconteça, perderão a sua funcionalidade mais importante.

A utilização das fibras sintéticas nos reforços dos polímeros tornou-se uma técnica amplamente empregada nas áreas industriais buscando a obtenção de materiais com melhores desempenhos mecânicos que os mais comuns.

Os compósitos reforçados por fibras sintéticas, as mais usualmente utilizadas são a fibra de vidro, fibra de carbono e fibra de aramida, sendo o foco principal desse trabalho as duas últimas citadas, são conhecidos como compósitos de alto desempenho.

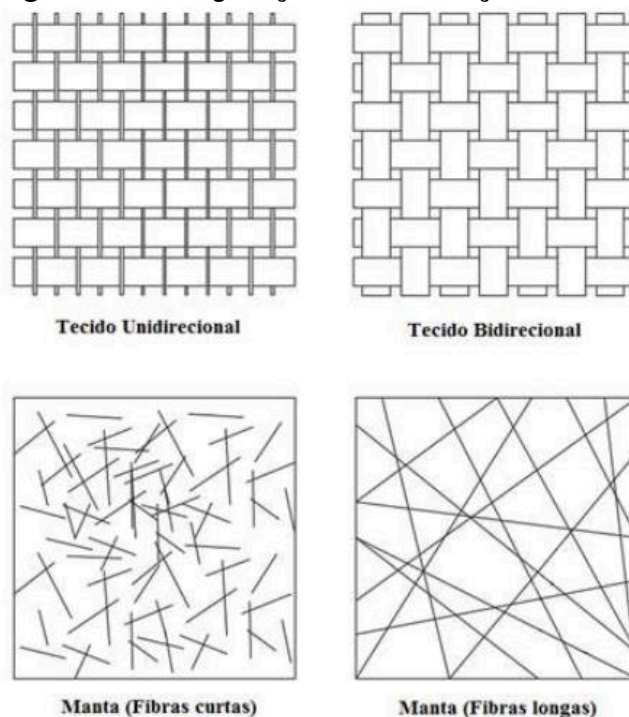
Soares (2020) comenta que, como as matrizes poliméricas são menos resistentes e rígidas que as fibras, as suas propriedades são influenciadas diretamente pelas fibras reforçadas, tendo influência pelo comprimento, composição, forma, orientação das fibras e fração volumétrica de cada constituinte (matriz e reforço), em relação às solicitações mecânicas que são feitas.

Como citado, a fibra influencia nas propriedades do compósito, sendo uma das principais características a ser analisada a força de ligação entre a matriz e a fibra que a reforça, ou seja, compósitos com essa força de ligação baixa terão tendência maior a falha quando expostos a tensões relativamente baixas.

Normalmente utilizadas nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, as fibras de carbono e aramida, foco do trabalho, possuem características como elevadas resistências mecânicas, baixas densidades, porém com um valor de mercado mais alto (MENDONÇA, 2005), quando comparadas com as fibras de vidro.

Os reforços fibrosos são divididos em duas classes, as fibras curtas e fibras longas, com essas possuindo outras duas subdivisões, as alinhadas e aleatórias, as organizadas aleatoriamente são popularmente conhecidas como as mantas, já as fibras alinhadas apresentam formas de tecidos uniaxial, biaxial e triaxial (SOUZA, 2017). A Figura 2 ilustra as disposições e direções de algumas das fibras citadas anteriormente.

Figura 2. Configurações dos reforços fibrosos.



Fonte: Souza (2017).

3.3.1 Fibras de Carbono

As fibras de carbono detêm ótimas propriedades mecânicas, térmicas e químicas, possuindo um elevado custo no mercado e, com isso, materiais alternativos estão sendo explorados ou até mesmo a combinação de outras fibras com preço menor que as de carbono.

Soares (2020) cita aplicações comuns das fibras de carbono, entre as comentadas são a aplicabilidade em satélites, submarinos, aeronaves, comboios de alta velocidade, automóveis, entre outros. Ainda segundo o autor, esse tipo de fibra é utilizado normalmente quando se busca um aumento de rigidez e resistência de compósitos nas aplicações que necessitam do controle elevado do peso.

Por apresentar relação de compressão relativamente baixa comparando com a de tração, as fibras de carbono são mais utilizadas geralmente para solicitações de tração do que para cargas flexivas e compressivas (BATISTA, 2017).

Propriedades como resistência a fadiga, características de amortecimento de vibrações, estabilidade dimensional, condutividade térmica e elétricas ótimas e, são quimicamente inertes (exceto na oxidação), também são destaques nas qualidades desse tipo de fibra (SOARES, 2020). Ainda segundo o autor suas desvantagens

giram em torno de serem frágeis, baixa resistência ao impacto, à compressão e um elevado custo de mercado.

As fibras de carbono são classificadas em baixo, médio e alto módulo de elasticidade, suas características, tipos, propriedades e utilização estão dispostas no Quadro 1 e Tabela 2.

Quadro 1. Características das fibras de carbono.

Classes das fibras de carbono	Baixo módulo (<60 GPa)	Médio módulo	Alto módulo (>200GPa)
Tipo	Rayon e Piche isotrópico	PAN	PAN e Piche Mesofase
Características	Propriedades mecânicas baixas, que não modificam. Caso de tratamento térmico, resistência à tração aumenta.	Possuem alta qualidade, quando inclusas otimizam a eficiência, aumenta a resistência, módulo e boa manipulação.	Propriedades superiores às rayon, ótimas resistência à tração, módulo de elasticidade.
Uso	Enchimento em plástico, aumentar resistência de concretos.	Concretos, indústria aeronáutica, automóveis.	As PAN utilizadas em pesquisas na eletroanalítica. Também na indústria de automóveis.

Fonte: Adaptado de Carvalho *et al.*, (1999) *apud* Batista (2017).

Tabela 2. Propriedades dos tipos de carbono.

Propriedades	PAN	Pitch	Rayon
Tensão de ruptura (MPa)	3450 - 6400	1900 - 3600	758 - 821
Extensão após ruptura (%)	0,5 – 2,1	0,4 – 0,5	-
Módulo de Young (GPa)	228 - 586	379 - 883	35 - 42

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2018) *apud* Soares (2020).

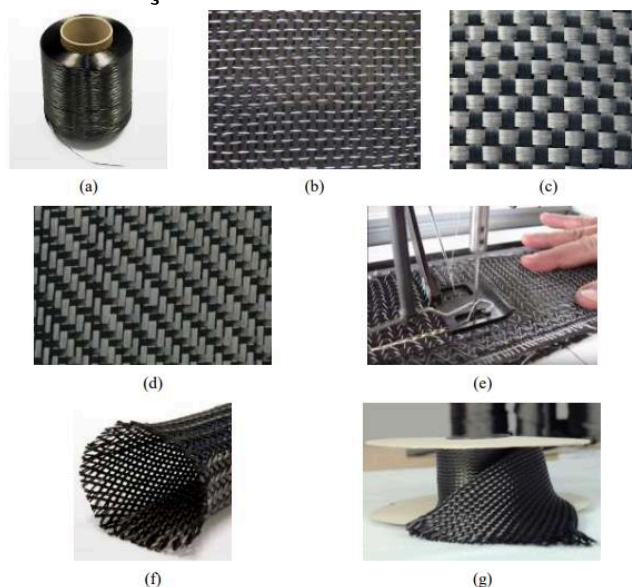
De forma resumida, as vantagens e desvantagens das fibras de carbono estão expostas no Quadro 2.

Quadro 2. Vantagens e desvantagens das fibras de carbono.

Vantagens	Desvantagens
• Inerte à ambientes quimicamente agressivos (com excessão aos oxidantes); • Suporta altas temperaturas mantendo suas propriedades; • Características de amortecimento estrutural; • Baixa massa específica; • Coeficiente de dilatação térmica é baixo;	• Resistência ao impacto menor; • Condutibilidade térmica alta; • Fratura ocorre de maneira frágil; • Possui um elevado custo; • Deformação antes da fratura é baixa; • Resistência a compressão é baixa.

Fonte: Adaptado de Medeiros (2016).

No mercado, as fibras de carbono podem ser encontradas de diversas maneiras diferentes, variando a sua forma ou disposição, como mostrado na Figura 3, sendo (a) Fibras em *roving*. (b) Tecido unidirecional. (c) Tecido bidirecional. (d) Tecido sarja 2x2. (e) Tecidos multiaxiais acoplados. (f) e (g) forma em *Braided*.

Figura 3. Variações das fibras de carbono no mercado.

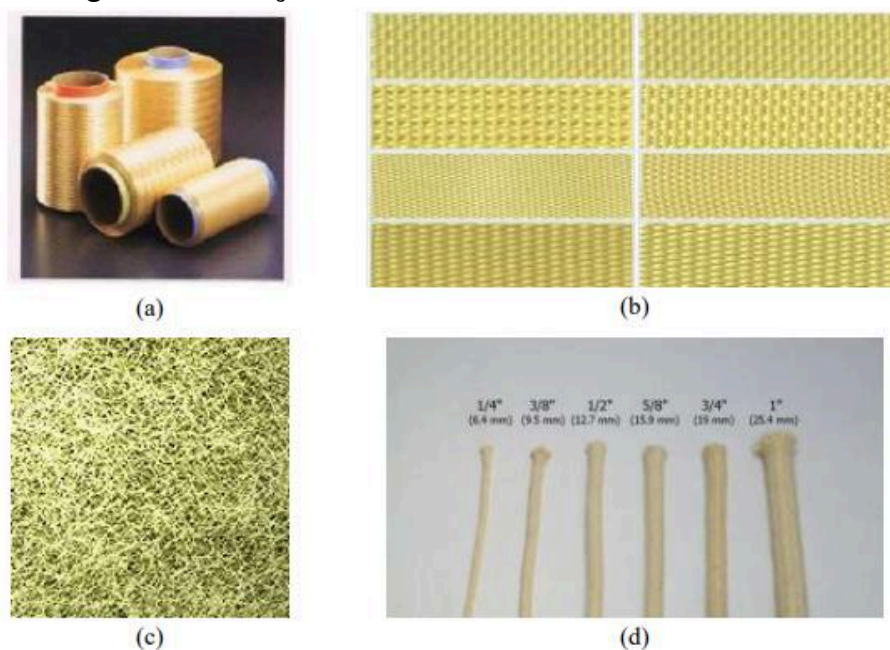
Fonte: Batista (2017).

3.3.2 Fibras de Aramida

As fibras de aramida são compostos orgânicos sintéticos que, quimicamente são chamados de polipara-fenileno tereftalamida, possuindo uma cor amarelada, com uma difícil manipulação, as fibras de aramida possuem características como a alta rigidez, resistência ao impacto e ao manchamento e, quando postas em certos materiais, aumentam suas propriedades mecânicas, como por exemplos próteses reforçadas com essa fibra (FONSECA, 2011).

Outras denominações como fibra de poliamida aromática, Kevlar, Novex, Teijinconex, Tcnora e Twaron (cada uma dessas com seu fabricante específico) denominam as fibras de aramida, que são encontradas no mercado de diversas formas, como (a) *roving*, (b) tecidos com variações na direção dos fios, (c) manta de aramida e (d) tipos de *Braided* com diâmetros diferentes (BATISTA, 2017), como mostra a Figura 4.

Figura 4. Variações das fibras de aramida no mercado.



Fonte: Batista (2017).

As fibras de aramida são bastante utilizadas em aplicações estruturais que necessitam de um alto desempenho, já que as cadeias moleculares unidimensionais que a compõem fazem obter uma resistência e rigidez elevadas, devido às ligações covalentes, consideradas fortes, ao longo da cadeia (MEDEIROS, 2016), porém possuem como desvantagem a baixa resistência à compressão (SILVA, 2019).

A utilização das fibras de aramida é diversa, pois possuem boas características mecânicas como boa tenacidade, resistência ao impacto, à fadiga e fluência, inerte a solventes e produtos químicos, possuindo também uma flexibilidade e ductilidade, são empregadas em produtos balísticos (devido a sua elevada resistência ao impacto), artigos esportivos, revestimentos e compósitos poliméricos (CALLISTER, 2012).

As fibras de aramida possuem algumas classificações, os valores médios das propriedades mecânicas de alguns dos seus tipos, as vantagens e desvantagens de utilização estão dispostas na Tabela 3 e Quadro 3, respectivamente.

Tabela 3. Propriedades dos tipos de aramida.

Propriedades	Kevlar 29	Kevlar 49	Kevlar 149
Tensão de ruptura (MPa)	3600	4000	3400
Extensão após ruptura (%)	4	2,8	2
Módulo de Young (GPa)	83	131	186

Fonte: Soares (2020).

Quadro 3. Vantagens e desvantagens das fibras de aramida.

Vantagens	Desvantagens
• Resistência ao impacto elevada; • Boa estabilidade térmica e resistência elétrica; • Possui resistência ao calor e fogo; • Baixa massa específica; • Resistência elevada à tração; • Quimicamente resistente a solventes orgânicos, combustíveis e lubrificantes.	• Resistência à compressão baixa; • Sensível à radiação UV; • Resistência à umidade menor que nas fibras de carbono; • Aderência baixa nas matrizes termoplásticas; • O corte é difícil após a fabricação.

Fonte: Adaptado DONG and SUN (2009) e GAY (1991) *apud* Medeiros (2016).

Como visto pelas Tabelas 2 e 3, as tensões de ruptura das fibras de algumas fibras de aramida são semelhantes a algumas fibras de carbono, o módulo de Young

(elasticidade) e a massa específica são inferiores, já nos casos de resistência à tração, as fibras de carbono possuem valores maiores no geral, porém, existem exceções onde as fibras aramídicas possuem uma maior grandeza, isso depende da fibra de carbono que está sendo analisada. As fibras de aramida possuem uma elevada tenacidade, propriedade característica e essencial da mesma e, por isso, são utilizadas em áreas/materiais que sejam expostas a eventuais impactos.

3.4 COMPÓSITOS HÍBRIDOS

De acordo com a norma ASTM D3878 (2007), um compósito híbrido é um compósito que possui dois tipos diferentes de matriz ou reforço na sua composição, possuindo propriedades físicas e/ou mecânicas distintas, assim como sua forma e composição química. Os materiais compósitos poliméricos utilizando tecidos como reforços, para Medeiros (2016) está cada vez ganhando mais espaço e aplicações, devido ao seu alto desempenho mecânico, versatilidade e adaptabilidade para situações necessárias.

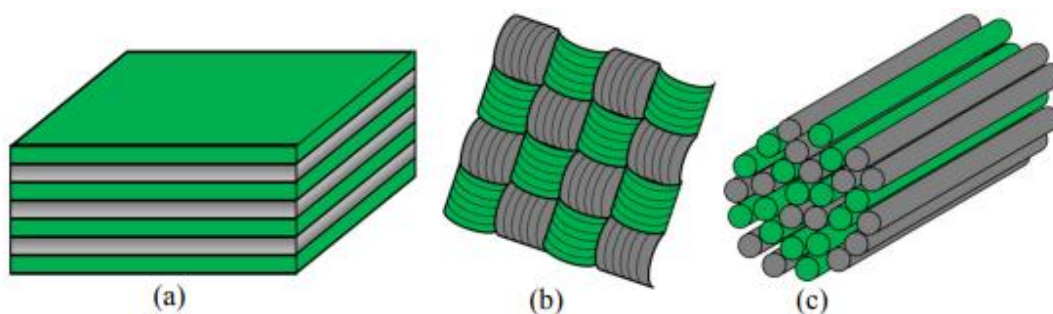
A definição de compósito híbrido é um composto que no seu corpo possui a junção de dois ou mais tipos de reforços, tendo a possibilidade de ser mais de um tipo de partícula ou fibra no reforço (com geometria bem definida), essa composição busca uma aplicação ainda mais eficiente na engenharia (MATTHEWS e RAWLINGS, 1994). As propriedades mecânicas do compósito variam com base nos componentes em seu corpo, sendo modificado de acordo como são empilhados (MOHAN, *et al.*, 2006), configurados e direcionados nas fases.

A escolha do material que irá compor o segundo reforço do compósito deve levar em conta obviamente, as características buscadas, porém dando destaque necessário para os gastos após a peça final, esta que mesmo diminuindo um pouco das suas propriedades em comparação ao compósito mais caro (feito totalmente de um mesmo material), continuará desempenhando sua função de maneira correta e com um custo menor, esse é um dos objetivos do compósito híbrido (DANTAS, 2012 *apud* SILVA, 2019).

Segundo SWOLFS *et al.* (2014) os materiais compósitos híbridos são classificados com base em como é feita a hibridização no seu corpo, os reforços são dispostos na matriz desejada (ou uma matriz que contém diferentes materiais em sua composição), aumentando e diversificando as propriedades do material final.

Conforme os autores, os compósitos híbridos são divididos em três grandes grupos: os (a) híbridos intercamadas, onde os reforços diferentes são colocados em distintas camadas do composto, (b) híbridos intra camadas, em que cada tecido/manta possui dois ou mais tipos de fibras entrelaçadas e (c) hibridização de fibras, como o nome já diz, é feita nas próprias fibras, existindo a combinação de materiais diferentes nas chamadas fibra-fibra, todas mostradas na Figura 5.

Figura 5. Formas de hibridização.



Fonte: Swolfs *et al.* (2014).

Outra definição de tecido híbrido é a de Souza (2017), o qual comenta que a hibridização é a combinação de duas ou mais fibras (por exemplo fibra de vidro, carbono ou aramida) que busca a combinação de melhores propriedades mecânicas, menor peso, tem como o objetivo principal a formação de um novo material com maiores vantagens que seus constituintes e buscando uma redução de custos, pois um dos elementos de reforço possui um preço menor que o outro.

3.5 PROCESSO DE LAMINAÇÃO MANUAL (*HAND LAY-UP*)

O processo de laminação manual é um processo de baixo custo pois não necessita de grandes gastos com equipamentos (ABMACO, 2009), precisando apenas de equipamentos pequenos como um molde, desmoldante, rolo para laminação, pequenos depósitos para resina, etc.

Esse processo é o mais econômico, não necessitando de alto investimento e uma mão de obra especializada, é utilizado para pequenas produções, ocorrendo geralmente à temperatura ambiente e, em contrapartida pode apresentar um maior aparecimento de defeitos como bolhas de ar e acabamento liso somente em uma face (MEDEIROS, 2016).

Para Daltro (2011) o *Hand Lay-up* é um processo simples, de baixa produção de materiais, que no seu reforço pode conter fibras contínuas, curtas, mantas e/ou tecidos, colocados manualmente em um molde preparado previamente. O preparo citado do molde é a limpeza e a aplicação de um desmoldante, para que o produto final apresente uniformidade e bom acabamento superficial e, assim, começando a aplicação da matriz (resina) e seus reforços (fibras) (AL-QURESHI, 2010 *apud* JUNIOR, 2016).

O autor Medeiros (2016) explica, de maneira resumida, o passo a passo de uma laminação manual: consiste na colocação das mantas ou tecidos de fibras sobre a superfície do molde e após a aplicação da resina utilizando rolos com configurações distintas, com o intuito de impregnar a resina no tecido de reforço, auxiliar a compactação das fibras e eliminar as possíveis bolhas de ar formadas. Sendo esse processo repetido camada por camada até a configuração final desejada do produto. Por fim, ao final da polimerização da resina (processo de cura), desmolda-se a placa para os acabamentos finais, como corte, lixamento e marcação dos corpos de prova.

A Figura 6 ilustra o processo de laminação manual (*Hand Lay-up*) de modo transparente, já a Figura 7 é o próprio processo sendo feito para a criação de uma placa de manta de fibra de vidro utilizada nesse estudo para apoio dos corpos de prova (tabs) na máquina de testagem de tração para que não ocorra o deslocamento do CP ou fratura fora da área válida (galgo).

Figura 6. Ilustração da laminação manual.



Fonte: Adaptado de Skyfilabs (2015).

Figura 7. Processo de *hand lay-up* de placas de apoio.

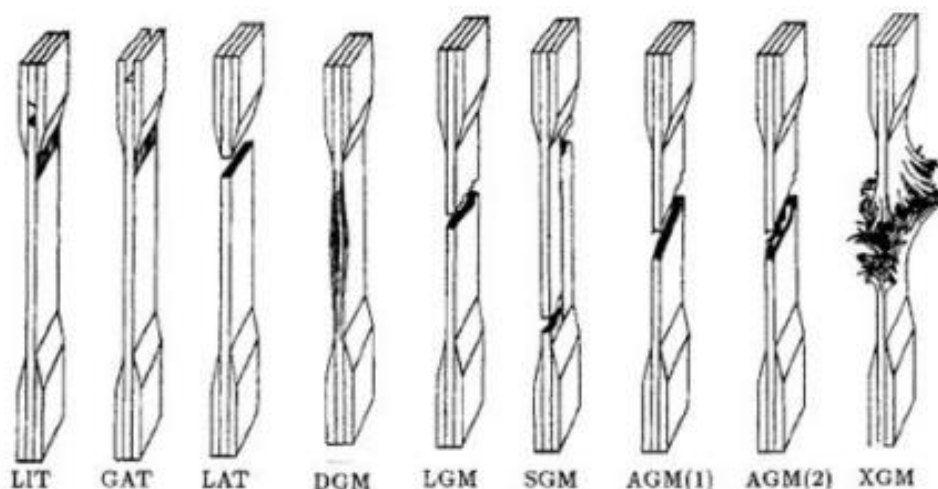


Fonte: Autoria própria.

3.6 TIPOS DE FRATURAS NOS COMPÓSITOS

A norma ASTM D 3039 (2014) define as fraturas por códigos e detalha as características principais e formas que os compósitos podem fraturar quando submetidos à testes de tração. Ressalta-se que, as falhas similares as do tipo LIT e GAT nos corpos de prova, mostradas na Figura 8, são rupturas que provavelmente acontecem fora do galgo (comprimento útil), ou seja, não serão considerados válidos, sendo assim, apenas os corpos de prova que apresentam as fraturas no seu comprimento útil serão levados em consideração nos resultados.

Figura 8. Modos de fraturas dos compósitos submetidos à tração.



Fonte: Adaptado de ASTM D3039 (2014).

O Quadro 4 define o código de cada fratura de forma normativa e expõe a sua característica principal (onde e como acontece).

Quadro 4. Código e definição das formas de falha.

CÓDIGO (SIGLA)	DEFINIÇÃO NORMATIVA DO CÓDIGO	DEFINIÇÃO DO CÓDIGO
LIT	<i>Lateral – inside - top</i>	Lateral e dentro da lingueta da garra superior
GAT	<i>Grip/Tab – at grip/tab - top</i>	Desaderência da lingueta na garra superior.
LAT	<i>Lateral – at grip - top</i>	Lateral e na base da lingueta da garra superior
DGM	<i>Edge delamination – gage - middle</i>	Delaminação na borda do corpo de prova, no meio do galgo
LGM	<i>Lateral – gage - middle</i>	Lateral e no meio do galgo
SGM	<i>Longitudinal splitting – gage - middle</i>	No meio do galgo com fendas longitudinais
AGM	<i>Angled – gage - middle</i>	Angular e no meio do galgo
XGM	<i>Explosive – gage- middle</i>	Explosiva e no meio do galgo

Fonte: Adaptado de ASTM D 3039 (2014).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Basicamente, as etapas do processo estão dispostas na Figura 9.

Figura 9. Resumo dos procedimentos experimentais.



Fonte: Autoria própria.

Para a criação dos materiais compósitos existem vários métodos de produção, um dos mais conhecidos e utilizado nesse trabalho é o antes exposto, processo de laminação manual (*Hand Lay-up*).

Após a confecção das placas, as mesmas passam por processos para marcar os corpos de prova (CPs) estes, que possuirão uma angulação de 45° em relação ao tecido, os cortes (que se baseiam na norma de testes de tração) o lixamento (para um acabamento final dos corpos de prova) e, por fim, o experimento de tração uniaxial dos CPs.

O experimento de tração terá como base a norma ASTM D 3039 (2014) – Método de teste de padrão para propriedades de tração de materiais compostos de matriz polimérica, buscando a amostragem e comparação de propriedades mecânicas dos compósitos diversos criados através das análises de gráficos, tabelas etc.

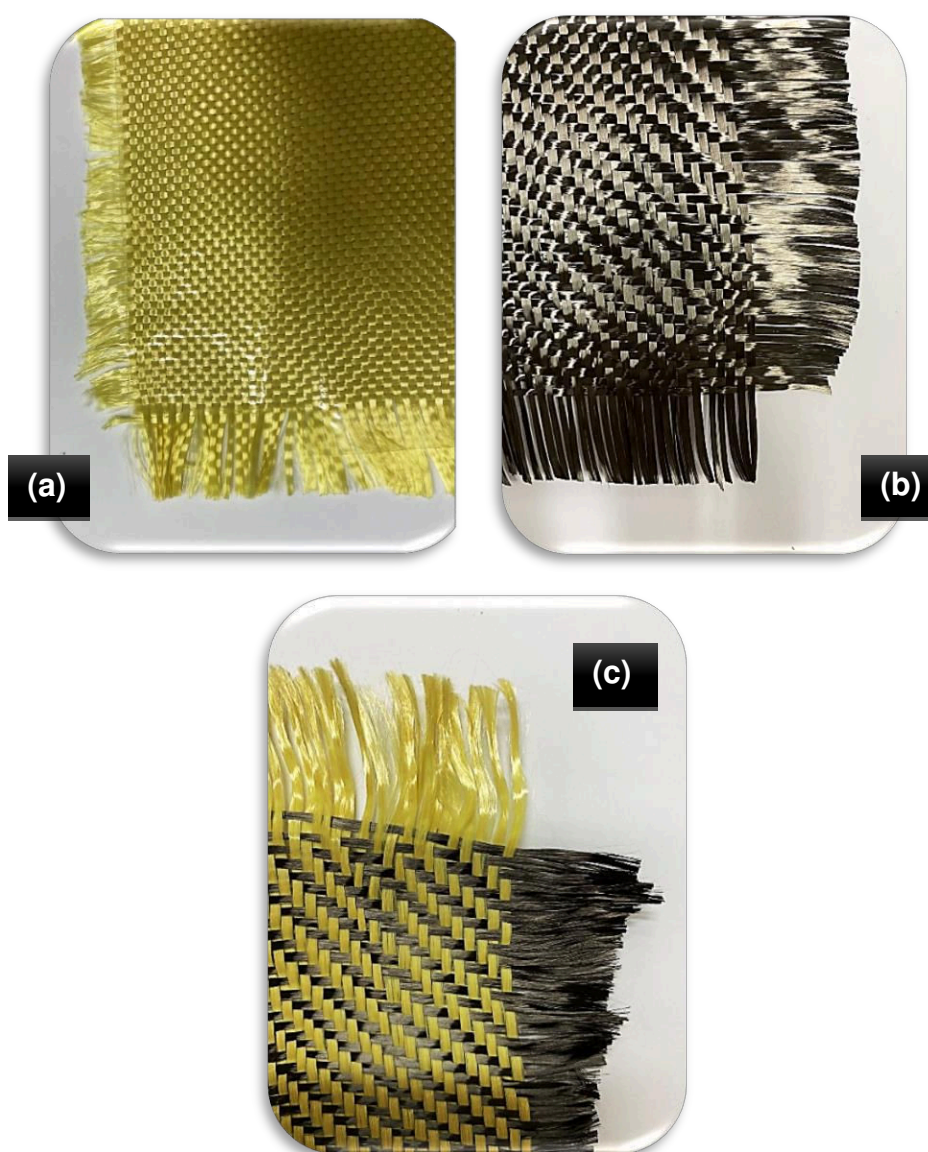
Já o ensaio de densidade seguirá a norma ASTM D 792 (2008) – Método de teste padrão para densidade e gravidade específica (densidade relativa) de plásticos por deslocamento, que buscará a comparação das características obtidas de cada corpo de prova, também através de análises gráficas, tabelas, entre outros.

4.1 CONFECÇÃO DAS PLACAS

Para a confecção das placas de compósitos foi utilizada, para a matriz a resina epóxi CQ 2001 que possui peso específico de 1,16 g/cm³ e um endurecedor CQ 3154 que desencadeia e acelera o processo de cura da mesma, estes, que são agitados em um recipiente para a aplicação da mistura no molde. Foi utilizado um molde cerâmico, que deve ser limpo e seco, foi colocado um papel filme no molde (com objetivo de melhorar a desmoldagem, isolando o material).

Todos os tecidos foram fabricados pelo mesmo *roving*, sendo a fibra de aramida a Twaron D2200 (a), caracterizada por ter um alto módulo e com densidade de $1,45 \text{ g/cm}^3$, a fibra de carbono Teijin, denominada por HTS40 – E13 3K 200tex (b) possui uma densidade de $1,76 \text{ g/cm}^3$ e é de módulo médio. Já o tecido híbrido de carbono/aramida (c) foi confeccionado com as mesmas fibras citadas anteriormente, sendo a fibra de carbono perpendicular à de aramida. Os três tipos de tecido utilizados no trabalho estão na Figura 10.

Figura 10. Tecidos utilizados para confecção dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

4.1.1 Preparação dos laminados

Foram utilizados três tipos de tecidos (ver Figura 10) para os reforços das quatro placas de compósitos feitas, variando a sua disposição e/ou componente. A fibra de aramida, fibra de carbono, e um tecido propriamente híbrido de aramida e carbono.

As quatro placas de matriz polimérica (resina epóxi) fabricadas possuem, como dito, modificações no seu reforço (que apresentará 4 camadas), são elas:

- Laminado 1: Possuirá quatro camadas de tecido constituído de fibra de aramida;
- Laminado 2: Possuirá quatro camadas de tecido constituído de fibra de carbono;
- Laminado 3: Possuirá quatro camadas - sendo 2 camadas de tecido constituído de fibra de carbono externas e 2 camadas de tecido constituído de fibra de aramida internas; e
- Laminado 4: Possuirá quatro camadas constituídas de um tecido híbrido com a fibra de carbono e aramida, sendo a fibra de carbono no sentido do urdume e a fibra de aramida na trama.

4.2 LAMINAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Logo que se mistura a resina com o endurecedor, inicia-se o processo de cura da mesma, necessitando o início da laminação. Para o início do *Hand Lay-up* uma parte da resina é despejada na superfície do molde, sendo espalhada com o auxílio de um rolo de laminação para uma diminuição de bolhas e melhor distribuição da resina no molde (Figura 11).

Figura 11. Rolo utilizado para laminação.



Fonte: Autoria própria.

Todas as placas foram produzidas em moldes de porcelanato semelhantes ao da Figura 12. Foi colocado o filme plástico embaixo e em cima do laminado para que garantisse a desmoldagem de maneira simples da placa.

Figura 12. Molde de porcelanato utilizado.



Fonte: Autoria própria.

Aplica-se a primeira camada de resina epóxi e em seguida foi colocada a primeira camada de reforço, que nesse caso, foi a de fibra de aramida, logo após, mais uma camada de resina, sempre espalhando bem com a utilização dos rolos. Outras três camadas foram feitas da mesma maneira, totalizando 4 camadas de fibra de aramida (laminado 1).

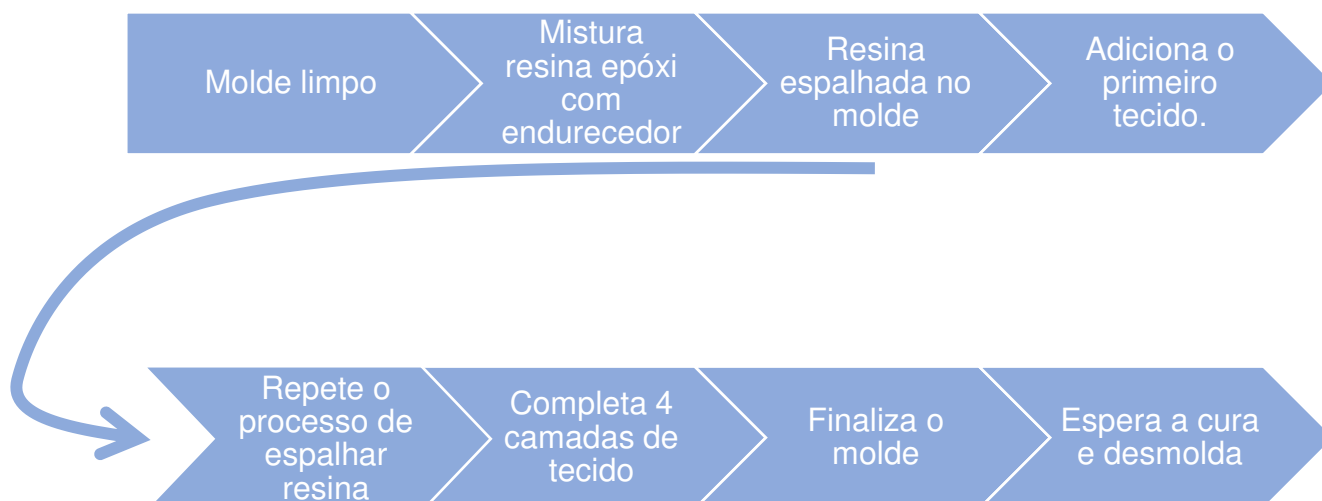
Para a fabricação dos outros três laminados foram feitos processos semelhantes, modificando apenas as fibras que os compõem, portanto, a primeira que foram as 4 camadas de fibra de aramida, foi substituída por 4 camadas de fibra de carbono (laminado 2), e 4 camadas de um tecido híbrido aramida e carbono na própria manta (laminado 4).

A única pequena diferença na fabricação do laminado 3, feito por duas camadas do tecido com fibras de carbono e duas camadas do tecido com fibras de aramida, é que se coloca primeiro um tecido de carbono e, após isso, dois tecidos de aramida no meio, por fim, mais uma camada de tecido de carbono, totalizando quatro camadas, sendo as duas de carbono externas e as duas de aramida internas.

Foi colocado o filme desmoldante em cima do laminado para isolá-lo de impurezas do ambiente. Os moldes com as placas laminadas foram deixados abertos por 24 horas, tempo necessário para o processo de cura total da resina.

Após esse tempo, as placas foram desmoldadas e preparadas para a etapa de corte. A Figura 13 resume o passo a passo de todo o processo.

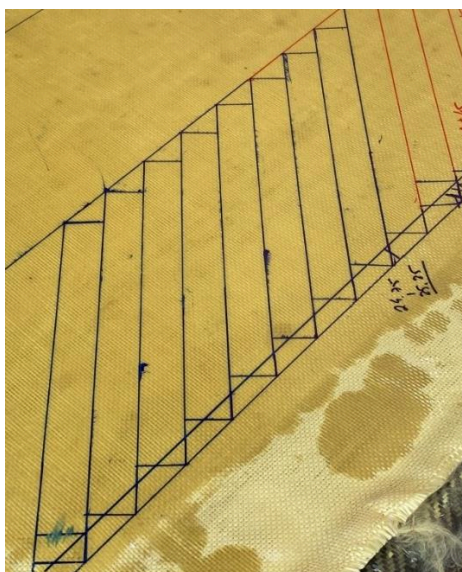
Figura 13. Resumo do processo de laminação das placas.



Fonte: Autoria própria.

Após os desmoldes das placas, as mesmas passaram pelo processo de marcação para o corte, para isso, foram marcadas com a angulação desejada para estudo de 45°, como mostra a Figura 14.

Figura 14. Marcações de corte na placa de aramida.



Fonte: Autoria própria.

Nas outras três placas foram feitas as mesmas marcações de 45° para os cortes dos corpos de prova (CPs).

4.2.1 Preparação dos corpos de provas

Foram cortados em média 10 corpos de prova de cada placa feita, totalizando 40. Os cortes foram feitos em todas as placas antes marcadas em uma esmerilhadeira angular da Wesco de 60 Hz, nas dimensões próximas às desejadas e, o disco utilizado para o corte das placas foi o de corte para metais MPA EM 12413 (Figura 15), buscando um corte mais refinado nas extremidades dos corpos de prova.

Figura 15. Disco de corte utilizado.



Fonte: Autoria própria.

Após a etapas dos cortes, todos os CPs foram lixados para garantir um bom acabamento superficial (utilizando lixas d'água de diversas granulações) para dimensões que seguem a norma ASTM D 3039 (2014) - Método de Teste Padrão para Propriedades de Tração de Materiais Compostos de Matriz. A lixas utilizadas para lixar alguns CPs possuíam granulação de 60 até 1200 e outra parte foi lixada em uma lixadeira Schulz de 3 polegadas – SFPC 20 (corrupio) adaptada com lixas, visto na Figura 16.

Figura 16. Lixadeira utilizada.

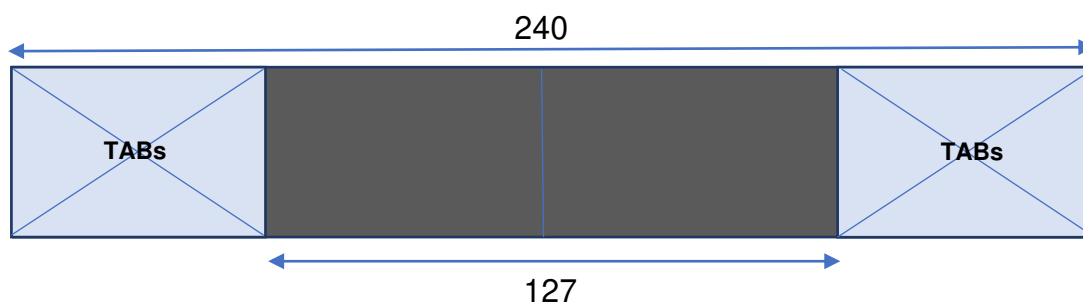


Fonte: Autoria própria.

A especificação da norma comentada é entre 24,75 e 25,25 mm para largura, já para o comprimento é de 240 mm e que possua um comprimento útil (chamado de galgo) de 127 mm. As espessuras dos CPs não foram controladas. As dimensões ditas podem ser identificadas na Figura 17.

A obtenção da largura média foi feita através de medições aleatórias do valor da largura retiradas no galgo de cada corpo de prova.

Figura 17. Dimensões CPs para o ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Autoria própria.

O Quadro 5 explica de maneira detalhada as siglas/nomenclaturas recebidas pelos corpos de prova, adotadas por convenção e para uma melhor compreensão.

Quadro 5. Nomenclatura dos compósitos fabricados.

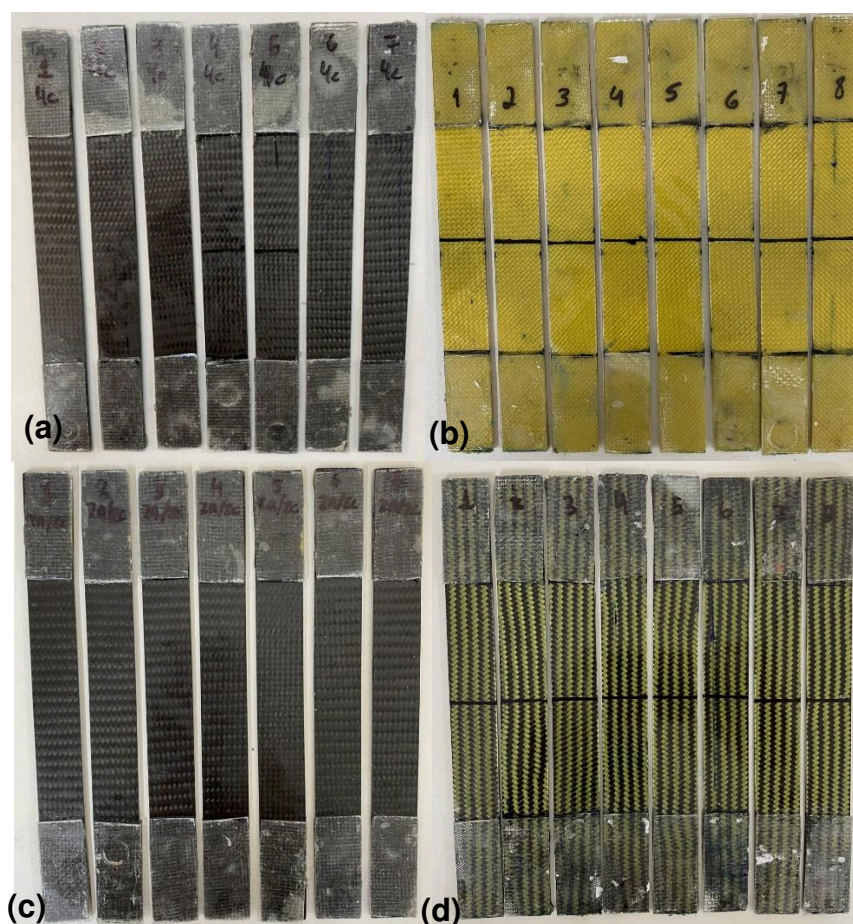
Especificação	Descrição
$C_A^{45^\circ}$	Corpo de prova do compósito constituído de resina epóxi e 4 camadas de tecido de aramida, cortados com angulação da fibra de $\pm 45^\circ$.
$C_C^{45^\circ}$	Corpo de prova do compósito constituído de resina epóxi e 4 camadas de tecido de carbono, cortados com angulação da fibra de $\pm 45^\circ$.
$C_{CA}^{45^\circ}$	Corpo de prova do compósito híbrido no laminado constituído de resina epóxi, com 2 camadas de tecido de carbono externas e 2 camadas de tecido de aramida internas, cortados com angulação da fibra de $\pm 45^\circ$.
$C_{TH}^{45^\circ}$	Corpo de prova do compósito híbrido no tecido constituído de resina epóxi, com 4 camadas de tecido híbrido de carbono/aramida, cortados com angulação da fibra de $\pm 45^\circ$.

Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova já marcados estão vistos na Figura 18, mostrando todos os corpos de prova confeccionados de cada compósito, ressaltando que os CPs de $C_C^{45^\circ}$ (a) e $C_{CA}^{45^\circ}$ (c) são semelhantes apenas externamente, já que o $C_{CA}^{45^\circ}$ possui dois tecidos de aramida internos.

Os tabs são feitos das placas de apoio (constituídas de tecido de fibra de vidro) e foram colados com o intuito de proteger o corpo de prova, evitando uma fratura na garra da máquina fixada no CP (LEITE, 2009), ou seja, fora do comprimento útil.

Figura 18. Corpos de prova (a) $C_C^{45^\circ}$; (b) $C_A^{45^\circ}$; (c) $C_{CA}^{45^\circ}$; (d) $C_{TH}^{45^\circ}$.



Fonte: Autoria própria.

Os testes de tração foram aplicados nos corpos de prova e destes, foram selecionados, após o ensaio, apenas as cinco amostras de cada conjunto/compósito que apresentaram fratura válida (dentro do galgo), totalizando vinte corpos de prova válidos.

4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO NOS CPs

Baseados na norma ASTM D 3039 (2014), como citado anteriormente, os ensaios de tração nos corpos de prova foram realizados no Laboratório de caracterização do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Mossoró/RN na máquina de ensaio universal DL-10000, a célula de carga utilizada foi de 30KN, da EMIC (Figura 19). A velocidade utilizada para os testes foi de 5 mm/min.

Figura 19. Máquina de ensaio universal EMIC.



Fonte: Autoria própria.

A máquina fornece valores de força em Newtons, sendo necessário calcular a tensão equivalente em cada corpo de prova, utilizando a Equação 1.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Sendo:

A força F (N) dada pela máquina;

A área A (mm²) de seção transversal, obtida anteriormente através das medições das dimensões de cada corpo de prova;

Utilizando a Equação 2, calcula-se o módulo de elasticidade, em MPa, considerando uma tensão de 50% (aproximadamente) da tensão final de carga de início de dano encontrada.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

Onde:

σ é a variação de tensão (MPa) calculada pela Equação 1 e;

ε é a deformação, calculada pela Equação 3.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

Sabe-se que L_0 é o comprimento do galgo, ou seja, 127 mm, e ΔL (mm) é a deformação fornecida pela máquina após o ensaio.

A comparação de ganho (ou perda) em percentual de um dado de alguma propriedade em relação a outra mostrada nos resultados, foi calculada através da Equação 4.

$$P = \frac{P_f - P_i}{P_i} \cdot 100 \quad (4)$$

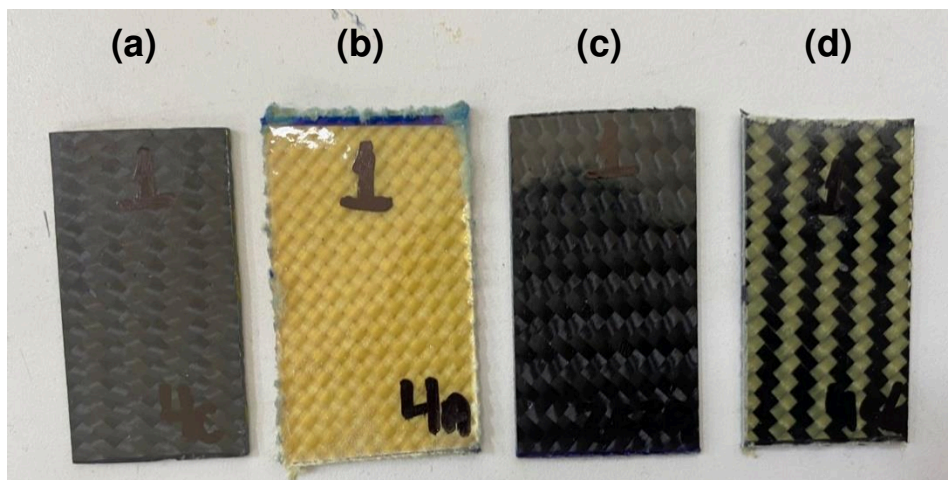
Sabendo que P é a porcentagem da propriedade que está sendo avaliada/desejada, como por exemplo a tensão última, deformação ou módulo de elasticidade, P_f e P_i o valor final e inicial, respectivamente, da propriedade estudada. Os desvios padrões necessários foram calculados no aplicativo *Excel* a partir da função “DESVPAD”.

4.4 ENSAIO DE DENSIDADE NOS CORPOS DE PROVA

Os testes de densidade foram realizados no Laboratório de Metalografia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus Caraúbas – RN, sendo aproveitado um corpo de prova das mesmas placas fabricadas. Os ensaios seguiram a norma ASTM D 792 (2008) – Métodos de teste padrão para Densidade e Gravidade Específica (Densidade Relativa) de Plásticos por deslocamento, que informa que o peso ideal para o corpo de prova estudado deve ser de 1 a 50 gramas (g). Dito isso, foram cortadas 5 amostras de cada conjunto de CPs com massa maior que 1g cada.

A Figura 20 mostra um corpo de prova de cada compósito utilizado no ensaio de densidade.

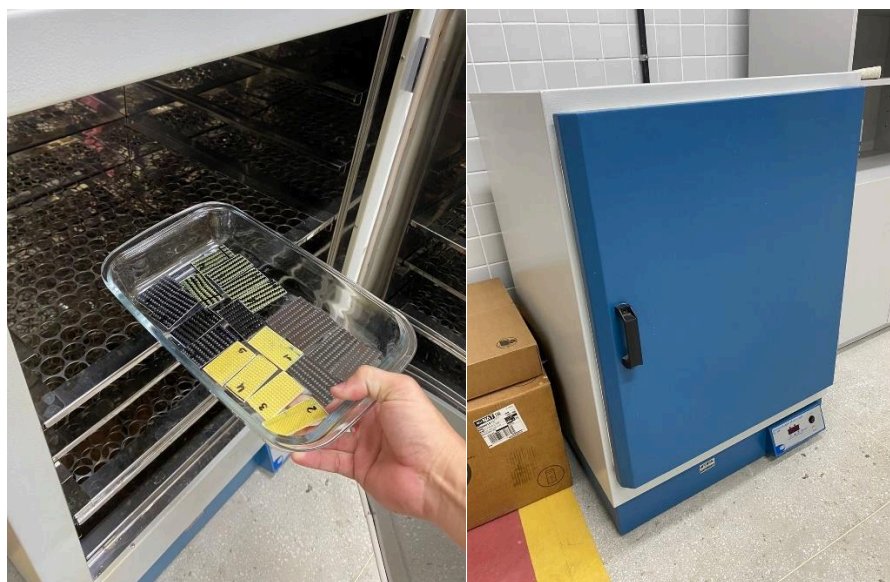
Figura 20. CPs para ensaio de densidade (a) $C_C^{45^\circ}$; (b) $C_A^{45^\circ}$; (c) $C_{CA}^{45^\circ}$ (d) $C_{TH}^{45^\circ}$



Fonte: O autor.

Antes do início do ensaio de densidade, foi necessária a retirada da umidade dos corpos de prova, para que ela não influencie nos resultados finais. Para isso, colocou-se os CPs em um recipiente, levados a estufa (Figura 21) com temperatura controlada de 100°C por cerca de uma hora.

Figura 21. CPs colocados na estufa.



Fonte: O autor.

Em seguida, as amostras foram retiradas da estufa e postas por mais uma hora no dessecador de vidro para esfriar e finalizar a retirada da umidade (ver Figura 22).

Figura 22. CPs no dessecador de vidro.



Fonte: O autor.

Finalizada a secagem, a massa dos CPs secos, em gramas, foi medida utilizando uma balança de precisão SHIMADZU AUY220. Mediu-se também a massa do afundador imerso em um béquer com água destilada, dados estes utilizados para o cálculo da densidade.

Por fim, cada amostra é pesada submersa no béquer junto ao afundador, visto na Figura 23.

Figura 23. CP imerso no béquer com água destilada.



Fonte: Autoria própria.

Com isso, a densidade de cada corpo de prova foi calculada através da Equação 5.

$$\rho = \frac{a \cdot \eta}{(a + w - b)} \quad (5)$$

Sendo que:

- ρ é a densidade volumétrica, dada em g/cm³;
- η é a densidade da água na temperatura de ensaio (23° C), 0,9975 g/cm³;
- w é a massa do afundador parcialmente imerso em água, dado em g;
- b é a massa da amostra imersa com o afundador em água, dado em g.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após os ensaios realizados de densidade e tração uniaxial, os gráficos de Tensão x Deformação foi traçado para cada conjunto de corpo de prova, tornando possível a análise e comparação da influência da hibridização, da angulação proposta ($\pm 45^\circ$) e sua viabilidade, verificando as mudanças nas propriedades mecânicas dos materiais.

Com o ensaio foi possível a obtenção das propriedades mecânicas de resistência última a tração, deformação e módulo de elasticidade (calculado na região elástica do material, antes do início da “estricção”, considerando 50% dos valores das propriedades em cada corpo de prova).

Todas as características e códigos de fraturas foram estabelecidas com base na norma ASTM D 3039 (2014) – Método de Teste de Padrão para Propriedades de Tração de Materiais Compostos de Matriz Polimérica, comparando os resultados dos respectivos corpos de prova de cada conjunto com a Figura 8 e Quadro 4.

Os resultados e explicações dos ensaios realizados estão dispostos através de gráficos, tabelas e comparações a seguir:

5.1 ENSAIO DE DENSIDADE

O ensaio de densidade foi feito, baseando-se na norma ASTM D 792 (2008) e os resultados obtidos estão expostos na Tabela 4. Todos os valores de densidade apresentados foram baixos quando comparados aos aços fundidos, por exemplo, que possuem densidade média de $7,50 \text{ g/cm}^3$, com isso os materiais podem ser utilizados em aplicações que necessitem de elementos leves.

Tabela 4. Resultados colhidos do ensaio de densidade.

Compósito	Densidade (g/cm^3)	Desvio Padrão
$C_C^{45^\circ}$	1,34	$\pm 0,01$
$C_A^{45^\circ}$	1,22	$\pm 0,01$
$C_{CA}^{45^\circ}$	1,28	$\pm 0,01$
$C_{TH}^{45^\circ}$	1,28	$\pm 0,01$

Fonte: O autor.

Nota-se que a densidade média dos CPs de $C_C^{45^\circ}$ foi a maior obtida, de $1,34 \text{ g/cm}^3$ e a menor densidade foi a do compósito com quatro camadas de aramida,

com valores de 1,22 g/cm³, resultado que é conveniente, já que o tecido de carbono é mais denso que o de aramida. Sendo a fibra de aramida com densidade de 1,45 g/cm³ e a fibra de carbono de 1,76 g/cm³, visto anteriormente.

Para os compósitos híbridos, as densidades encontradas foram os mesmos valores, de 1,28 g/cm³ ambos, ressaltando que, como o carbono possui uma densidade maior e a aramida uma densidade menor, ao hibridizar os compósitos, obtém-se grandezas entre os valores médios de densidades dos seus respectivos elementos. Os valores encontrados para a densidade dos compósitos híbridos ($C_{CA}^{45^\circ}$ e $C_{TH}^{45^\circ}$) foi a média dos valores da densidade dos elementos isolados (carbono e aramida).

Vale perceber que, como o tecido híbrido ($C_{TH}^{45^\circ}$) é confeccionado pelas mesmas fibras utilizadas nos outros compósitos, com a sua densidade média seguindo o mesmo padrão do $C_{CA}^{45^\circ}$, valendo 1,28 g/cm³, não possuindo diferença, no sentido de densidade volumétrica, entre os compósitos híbridos, seja híbrido no laminado ($C_{CA}^{45^\circ}$) ou no tecido ($C_{TH}^{45^\circ}$).

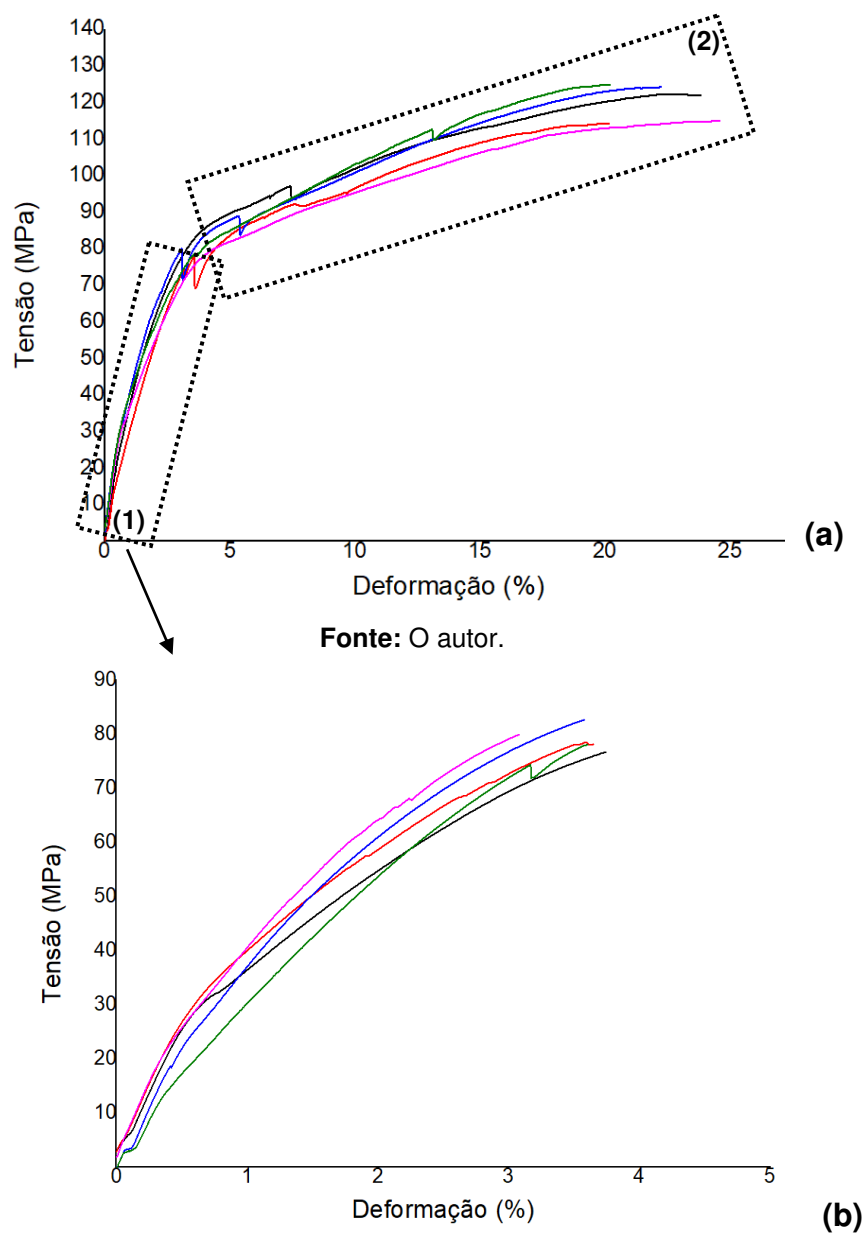
Os desvios padrões conferidos pelo ensaio de densidade foram valores baixos e iguais, apresentando assim valores médios próximos em todos os CPs de densidade utilizados no teste.

Os resultados de Batista (2017) para ensaios de densidade em laminados feitos através do processo de fabricação *Hand Lay-up* e matriz de resina epóxi, com 10 camadas de tecido híbrido carbono/aramida foi de 1,29 g/cm³ $\pm$ 0,01.

5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL PARA OS CPs $C_C^{45^\circ}$.

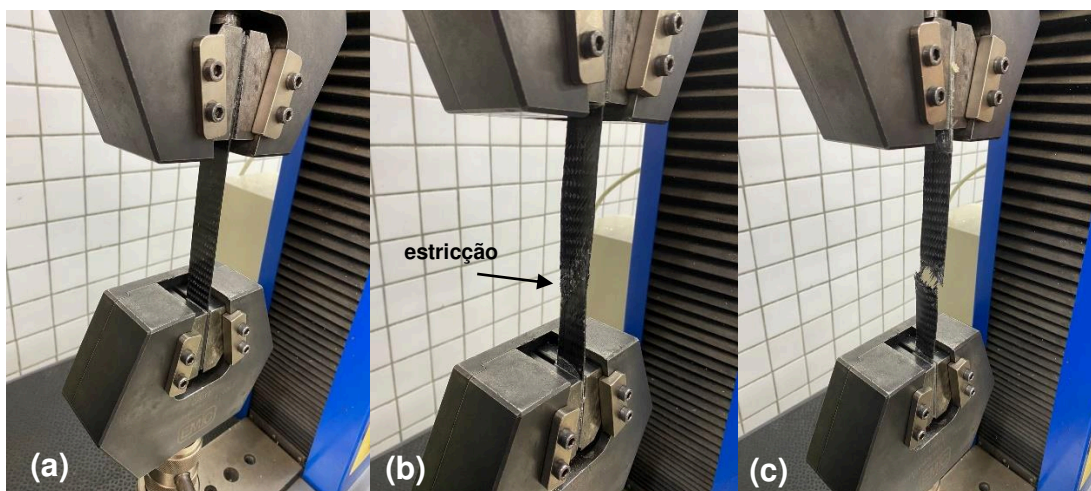
O Gráfico 1 mostra o desempenho dos cinco CPs válidos selecionados de $C_C^{45^\circ}$ para análise. No início do Gráfico 1 foi observado um comportamento predominantemente linear elástico entre a tensão e deformação, sendo percebido no Gráfico 1 (a), este comportamento pode ser melhor visualizado no Gráfico 1 (b), ou seja, foi realizada uma ampliação apenas na região linear elástica (onde se observa o comportamento predominantemente de tração).

Gráfico 1. (a) Tensão x deformação para os CPs de $C_C^{45^\circ}$; (b) tensão x deformação na região linear elástica para os CPs de $C_C^{45^\circ}$.



Na Figura 24, pode-se verificar um corpo de prova em algumas fases no ensaio de tração, podendo perceber a formação de estricção (b) (fenômeno comum nos CPs de 45°) no meio do galgo.

Figura 24. (a) corpo de prova na máquina de tração; (b) corpo de prova após início do fraturamento; (c) corpo de prova fraturado totalmente.



Fonte: Autoria própria

Percebe-se que o fenômeno de estricção na Figura 24 (b) está relacionado com a mudança na angulação da curva do Gráfico 1, logo que inicia o processo de empescoamento do corpo de prova, a curva começa a mudar de angulação, entrando na região não-linear (2) até chegar à fratura final (c).

Os mesmos comportamentos nos compósitos com angulação de $\pm 45^\circ$ foram percebidos por Batista (2017), onde apresentam uma região de características que possuem um comportamento predominantemente à tração (1) e uma região com predominância do cisalhamento (2), possuindo deformação elevada com perda de carga que irá suportar.

Para Bergmann *et al.* (2015) esse comportamento é explicado pelo efeito de cisalhamento de característica da matriz, que dá início após a aparição de microfissuras que permitem que as mechas de fibras girem para a direção de carregamento aplicado, causando uma reorientação das fibras e, consequentemente uma deformação mais elevada.

É importante deixar claro que, os valores de tensão, deformação e módulo de elasticidade estudados, foram considerados levando em conta apenas a região linear elástica do material, visto que a partir dessa região, o material já teve início ao dano e deformação permanente (ouviam-se barulhos de trincas na matriz a cada solicitação de carga) e com isso a falha (trinca) tenderá sempre a crescer. Para projetos mecânicos, os valores de tensão utilizados são anteriores à deformação

plástica, logo utiliza-se os valores dispostos no Gráfico 1 (b), que contém propriedades elásticas (antes da falha).

Utilizando os valores obtidos pelo gráfico da região linear elástica (valores recomendados para se utilizar em projetos), calcula-se a média da tensão, deformação e consequentemente o módulo de elasticidade (para 50% da tensão da região elástica). A Tabela 5 contém a deformação total e a tensão de ruptura que os CPs suportaram. Destaca-se que apesar de não serem utilizadas em projetos elas são importantes, pois a fratura final do material só ocorre após atingir esse valor.

Tabela 5. Valores médios das propriedades mecânicas dos CPs - $C_c^{45^\circ}$.

Propriedades mecânicas	Valores médios	Desvio padrão
Deformação de projeto (%)	3,52	0,23
Deformação total (%)	22,20	1,81
Tensão de projeto (MPa)	79,14	2,02
Tensão de ruptura (MPa)	120,03	4,61
Módulo de Elasticidade (GPa)	3,62	0,44

Fonte: O autor.

Após ensaios de tração em um compósito de carbono com orientação da fibra de 45° sem descontinuidade no corpo de prova, Souza (2017) obteve resultados médios de resistência última, em MPa de 61,09, com uma dispersão (desvio padrão) de 9,122, os valores de deformação média (em %) presentes nos CPs foram entre 4 e 5%.

Como visto na Tabela 5, os valores médios para a deformação (%), tensão última (MPa) e módulo de elasticidade (GPa) foram de 3,52, 79,14 e 3,62, respectivamente, possuindo desvios padrões relativamente baixos, demonstrando uma homogeneidade no material.

Os valores obtidos após os testes de tração no compósito de carbono estão condizentes com os trabalhos encontrados na literatura, como o de Souza (2017).

A Figura 25 mostra alguns dos tipos de fratura presentes nos corpos de prova do conjunto.

Figura 25. Fraturas nos corpos de prova de $C_C^{45^\circ}$.



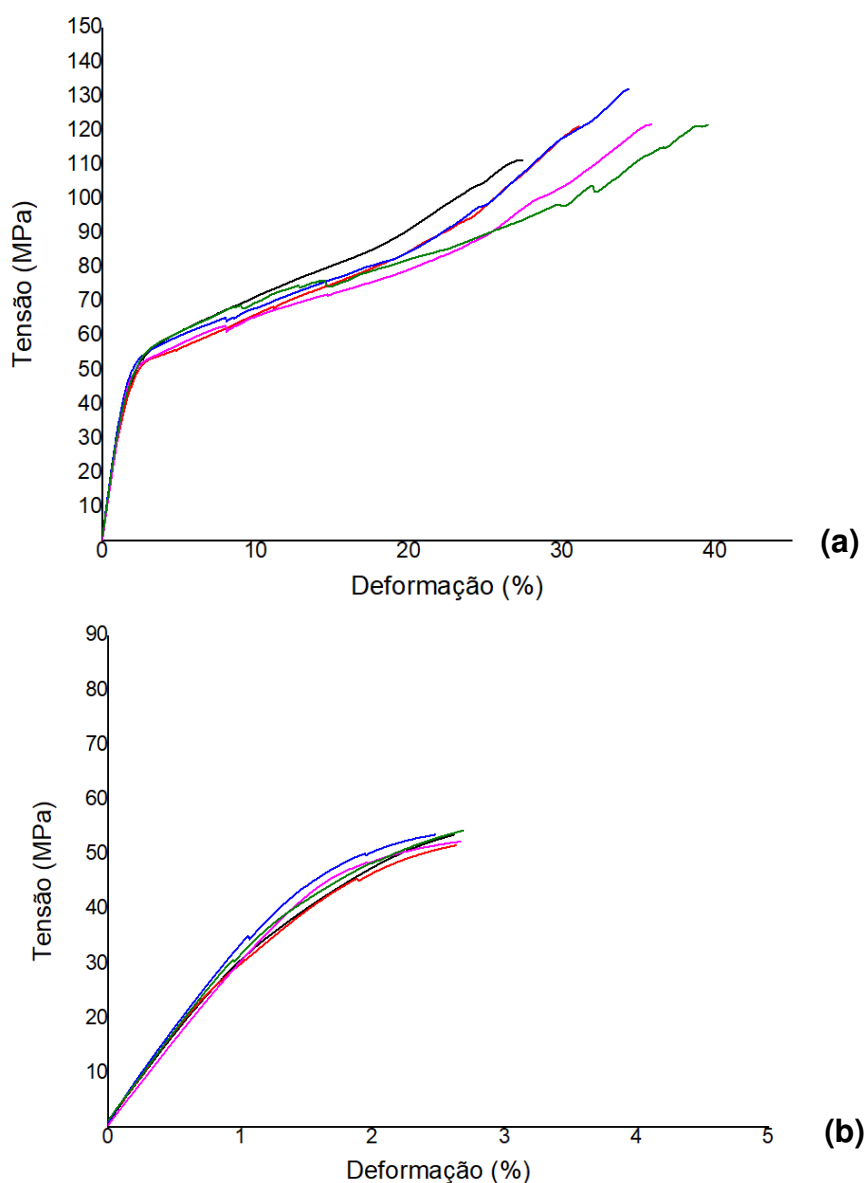
Fonte: O autor.

Percebe-se que o corpo de prova 2 apresentou fratura LGM (lateral e no meio do galgo), os CPs 4, 5 e 7 possuíram fraturas do tipo AGM (angular e no meio do galgo). O corpo de prova 1 não chegou a fraturar totalmente pois foi retirado antes da ruptura final, porém pode-se perceber que o mesmo já está bastante danificado e o comportamento nos gráficos é semelhante aos outros CPs.

5.3 ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL PARA OS CPs DE $C_A^{45^\circ}$

O Gráfico 2 mostra o desempenho dos 5 CPs selecionados de aramida (4 camadas).

Gráfico 2. (a) Tensão x deformação para os CPs de $C_A^{45^\circ}$; (b) tensão x deformação na região linear elástica para os CPs de $C_A^{45^\circ}$



Fonte: O autor.

Como esperado, os compósitos apresentaram uma região de comportamento com predominância a tração (região elástica, antes do início do dano e deformação permanente) e, após as primeiras falhas, uma região com predominância ao cisalhamento, possuindo uma deformação bem elevada para uma carga menor, ouvia-se trincas a tensões próximas a 50 MPa.

Citado anteriormente, os valores obtidos das propriedades dos materiais dispostos na Tabela 6 foram levando em consideração a região elástica do compósito (Gráfico 2 (b)) e o comportamento total, já que após a aparição das

primeiras trincas os materiais apresentam riscos maiores de falha. O Gráfico 2 (b) demonstra uma ampliação na região estudada neste trabalho, que é a de comportamento predominantemente à tração, ou seja, a região elástica, antes das primeiras falhas aparecerem.

A Figura 26 mostra algumas fraturas macroscópicas presente nos corpos de prova do conjunto estudado.

Figura 26. Corpos de prova válidos $C_A^{45^\circ}$.



Fonte: O autor.

De acordo com a norma ASTM 3039 (2014), as fraturas apresentadas pelos corpos de prova de número 1 e 4 foram de características semelhantes a LAT (lateral na base da lingueta da garra superior), apresentando fratura no limite do comprimento útil. A fratura dos corpos de prova 3, 6 e 7 assemelham-se com a lateral e no meio do galgo (AGM, angular e no meio do galgo).

A Tabela 6 deixa claro os valores médios dos CPs selecionados obtidos de deformação (%), tensão última (MPa) e módulo de elasticidade (GPa):

Tabela 6. Valores médios das propriedades mecânicas dos CPs - $C_A^{45^\circ}$.

Propriedades mecânicas	Valores médios	Desvio padrão
Deformação de projeto (%)	2,61	0,07
Deformação total (%)	33,66	4,12
Tensão de projeto (MPa)	53,07	0,97
Tensão de ruptura (MPa)	121,56	6,55
Módulo de Elasticidade (GPa)	3,24	0,13

Fonte: O autor.

O trabalho de Targino (2018) que utilizou um tecido híbrido de aramida e vidro com 4 camadas a 45° e espessura aproximada de 2,65 mm obteve resultados de 20,45%, 78,06 MPa e 2,20 GPa, para, respectivamente, deformação de ruptura, tensão última a tração antes do início de dano e módulo de elasticidade.

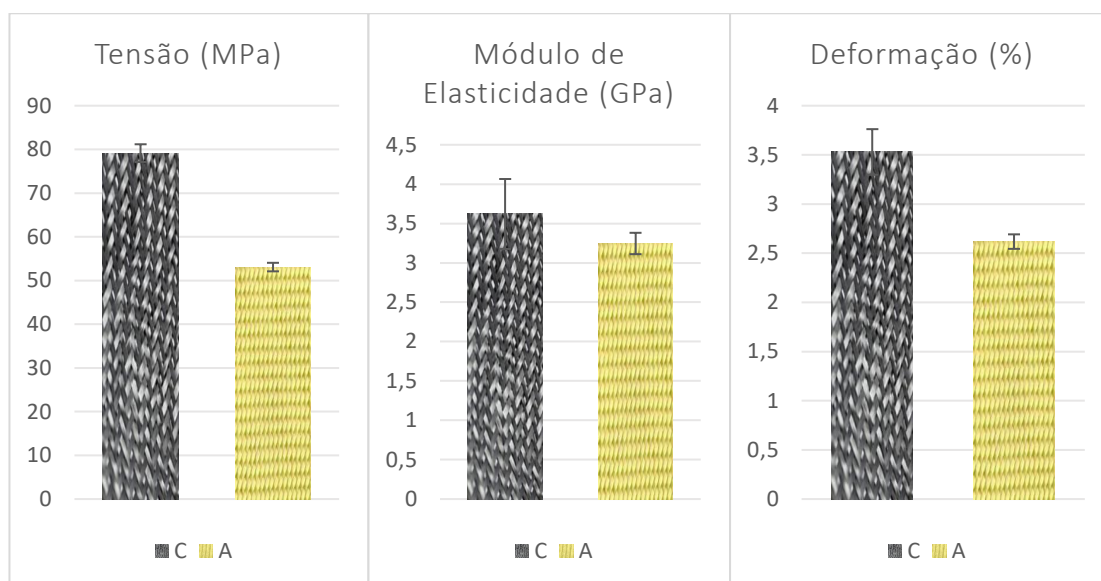
Na Tabela 6, podemos perceber resultados com desvios padrões (dispersões) bem próximas, podendo ser explicada pela homogeneidade da placa. Esta homogeneidade pode ser explicada novamente pela semelhança nas curvas dos corpos de prova composto de aramida, visto no Gráfico 2

Foram obtidos valores para tensão de ruptura e deformação de 53,07 MPa e 2,61%, respectivamente. Já para o módulo de elasticidade, em GPa, os valores médios foram de 3,24. Vale lembrar que a espessura média dos corpos de prova de aramida foi de 1,60 mm, menor que a utilizada por Targino (2018) em seus ensaios. A diferença na espessura, assim como a presença de fibra de vidro provavelmente foram as causas das disparidades nas propriedades citadas dos CPs.

5.3.1 Comparativo do compósito de aramida e compósito de carbono

O Gráfico 3 (a), (b), (c) mostram o comparativo das propriedades entre as principais fibras utilizadas para hibridização dos materiais compósitos utilizados neste trabalho, relacionando a tensão última a ruptura (na região elástica estudada), o módulo de elasticidade e a deformação da fibra de aramida e carbono.

Gráfico 3. (a) Comparativo da tensão média, (b) módulo de elasticidade e (c) deformação média do carbono e aramida.



Fonte: O autor.

Percebe-se que, a tensão última à tração média do compósito confeccionado de fibras de carbono (79,14 MPa) é 49,12% maior que o do compósito de fibras de aramida (53,07 MPa), tal fenômeno se dá ao fato de que o carbono apresenta, geralmente, um maior desempenho mecânico à tração que a aramida.

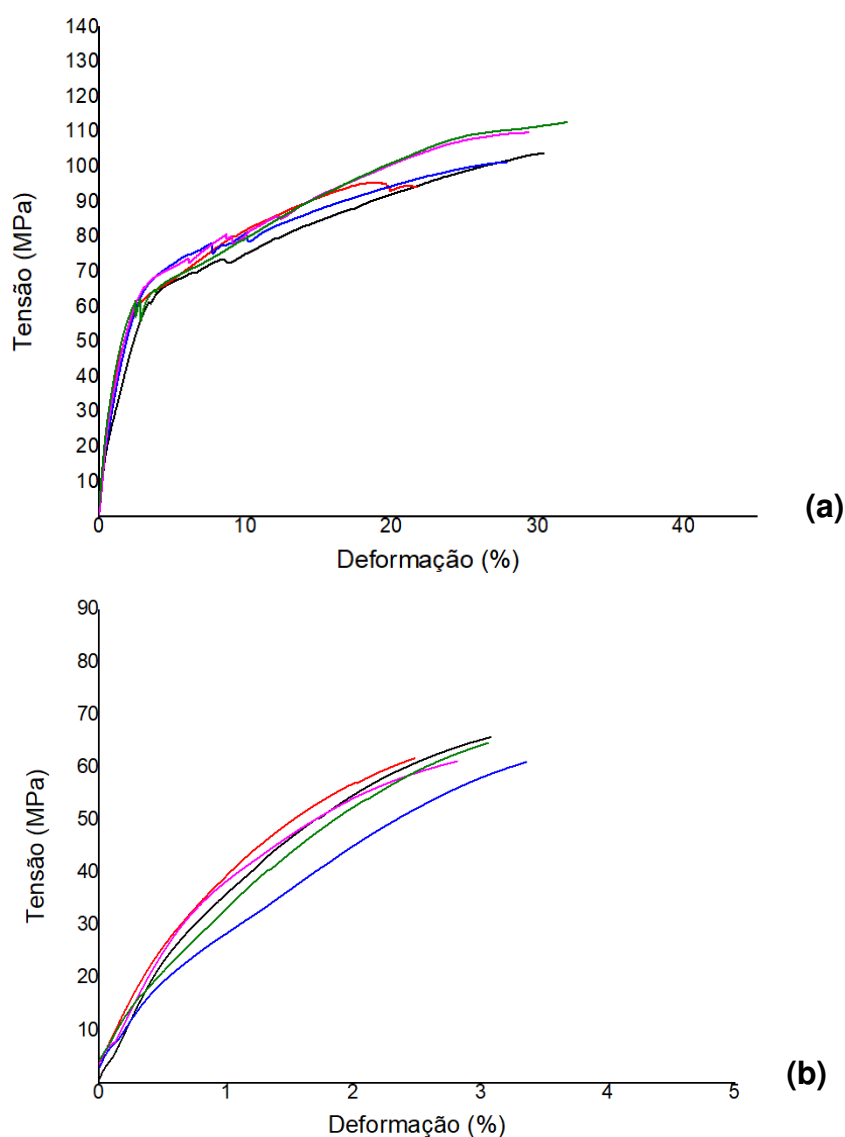
No que diz respeito ao módulo de elasticidade, a aramida apresentou um valor menor que o do carbono de 11,72%, fenômeno natural, já que é comum que o carbono expresse um módulo maior pelo seu alto desempenho, a pequena diferença se dá possivelmente pelo fato de a aramida utilizada ser de alto módulo e a fibra de carbono ser de módulo intermediário e as fibras estarem orientadas a 45° e não a 0/90°.

Os CPs de $C_C^{45^\circ}$ demonstraram altas porcentagens de deformação nos testes à tração, que obtiveram valores médios 3,52%, enquanto os corpos de prova de $C_A^{45^\circ}$ evidenciaram uma deformação média de 2,61%, valor comum para esse tipo de material, que apresenta boas taxas de deformação. As altas deformações do carbono podem ser explicadas pelo material não possuir boas características quando não é tracionado a 45° no sentido da fibra.

5.4 ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL PARA OS CPs $C_{CA}^{45^\circ}$.

O Gráfico 4 mostra o desempenho dos 5 CPs válidos $C_{CA}^{45^\circ}$, para toda tensão x deformação durante o ensaio até a fratura final (a) e apenas na região linear (b).

Gráfico 4. (a) Tensão x deformação para os CPs $C_{CA}^{45^\circ}$; (b) tensão x deformação na região linear elástica para os CPs de $C_{CA}^{45^\circ}$.



Fonte: O autor.

O comportamento, mais uma vez, foi como esperado, apresentando uma região linear e outra não linear. Tal fenômeno já foi explicado e citado nos tópicos anteriores. A Tabela 7 indica os valores médios das propriedades mecânicas estudadas dos mesmos CPs.

Tabela 7. Valores médios das propriedades mecânicas dos CPs - $C_{CA}^{45^\circ}$.

Propriedades mecânicas	Valores médios	Desvio padrão
Deformação de projeto (%)	3,68	0,78
Deformação total (%)	31,25	6,39
Tensão de projeto (MPa)	64,90	3,55
Tensão de ruptura (MPa)	110,95	13,42
Módulo de Elasticidade (GPa)	3,70	0,66

Fonte: O autor.

Ao comparar os valores do compósito híbrido $C_{CA}^{45^\circ}$ com o laminado feito exclusivamente de 4 camadas de carbono, vê-se um aumento de 2,20% no módulo de elasticidade, valores bem próximos, mostrando que a hibridização não fez com que o material tenha perdido propriedade. Ou seja, módulo aumentou um valor mínimo com a hibridização do compósito. Os valores de tensão de projeto para o $C_{CA}^{45^\circ}$ foram de aproximadamente 21,94% MPa menores que os CPs de carbono (79,14 MPa). Já os valores para as deformações, em %, foram próximos, sendo a deformação do $C_C^{45^\circ}$ de 3,52% e o do $C_{CA}^{45^\circ}$ de 3,68%, consideradas iguais levando em conta os desvios padrões.

A comparação com o compósito de quatro camadas de aramida é semelhante, sendo o módulo de elasticidade do $C_{CA}^{45^\circ}$ 14,19% maior. Os valores de tensão de projeto para o $C_{CA}^{45^\circ}$ foi de 22,29% maior que o de $C_A^{45^\circ}$, indicando que a adição de duas camadas de carbono ajudou no aumento da resistência à tração. Por fim, a deformação em porcentagem do $C_A^{45^\circ}$ apresentou valores menores que o CP híbrido, diminuição cerca de 29,07%.

A Figura 27 mostra a fratura de alguns dos corpos de prova válidos nesse conjunto.

Figura 27. Corpos de prova válidos $C_{CA}^{45^\circ}$.

Direção do carregamento de tração



Fonte: O autor.

As fraturas macroscópicas em todos os corpos de prova desse conjunto se assemelham com a angular e no meio do galgo (AGM), possuindo em todos eles o fenômeno de estricção, comum nos corpos de prova com angulação de 45° .

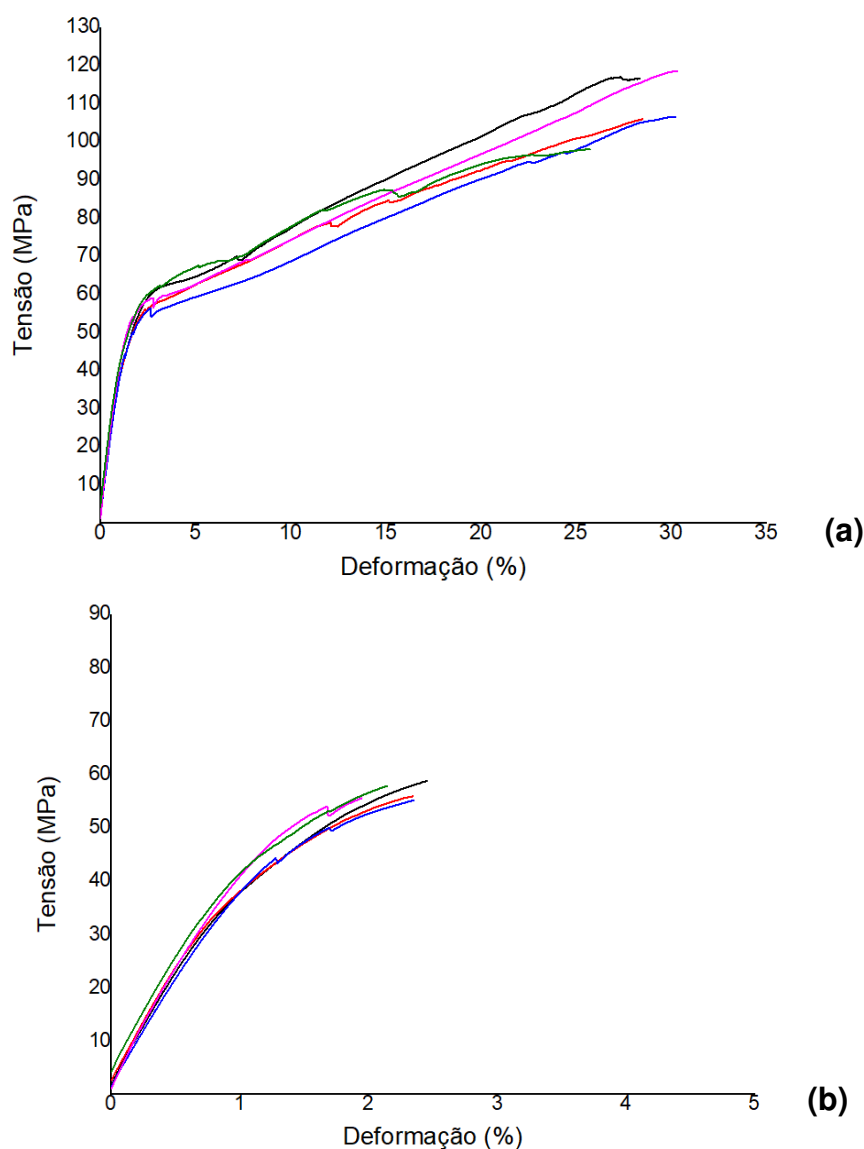
O trabalho de Targino (2018), em que estudou a influência nas propriedades de hibridização de aramida e vidro, também apresentou falhas nos CPs com estricção e fratura AGM, verificando nos corpos de prova com angulação de 45° um perfil predominantemente não-linear, com alto índice de deformação que é resultado do cisalhamento sofrido. Ainda no estudo de Targino (2018), percebeu-se a diminuição da tensão última à tração e no módulo de elasticidade dos compósitos de 45° quando comparados aos de $0^\circ/90^\circ$, já para valores de deformação (em %), foram de 66,75% maior que no compósito de $0^\circ/90^\circ$.

5.5 ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL PARA OS CPs DE $C_{TH}^{45^\circ}$.

O Gráfico 5 expõe os resultados da Tensão x Deformação do ensaio de tração uniaxial para o $C_{TH}^{45^\circ}$, percebe-se, novamente, o comportamento dividido em dois estágios, o linear elástico (visto no (b)) e total (a) no decorrer da tensão deformação, característica geral desse tipo de amostra.

A Tabela 8 mostra os valores médios obtidos após testes de tração, das propriedades mecânicas estudadas no conjunto destes CPs.

Gráfico 5. (a) Tensão x deformação para os CPs de $C_{TH}^{45^\circ}$; (b) tensão x deformação na região linear elástica para os CPs de $C_{TH}^{45^\circ}$.



Fonte: O autor.

Tabela 8. Valores médios das propriedades mecânicas dos CPs - $C_{TH}^{45^\circ}$.

Propriedades mecânicas	Valores médios	Desvio padrão
Deformação de projeto (%)	2,24	0,23
Deformação total (%)	28,61	1,65
Tensão de projeto (MPa)	56,63	1,40
Tensão de ruptura (MPa)	109,17	7,63
Módulo de Elasticidade (GPa)	4,50	0,25

Fonte: O autor.

A Figura 28 mostra alguns dos CPs válidos do conjunto estudado.

Figura 28. Corpos de prova válidos $C_{TH}^{45^\circ}$.



Fonte: O autor.

Os CPs 4 e 6 apresentaram fraturas semelhantes a LGM (lateral e no meio do galgo), sendo quase próximas a AGM. O restante dos CPs vistos (3, 5 e 8) a ruptura foi de característica AGM, ou seja, angular e no meio do galgo. Essas são falhas comuns encontradas em diversos trabalhos que utilizaram essa angulação.

No trabalho de Batista *et al.* (2017), após os testes de tração uniaxial nos corpos de prova híbrido de carbono e aramida com 10 camadas e angulação de 45° , encontrou-se valores médios de deformação de 12,49%, para a resistência a tração valores de 83,32 MPa, com módulo de elasticidade de 2,74 GPa.

Através da Tabela 8, encontra-se valores de resistência à tração de 56,63 MPa, com uma deformação média de 2,24% e um elevado módulo de elasticidade, atingindo valores de 4,50 GPa, o maior módulo de elasticidade entre os compósitos confeccionados neste trabalho.

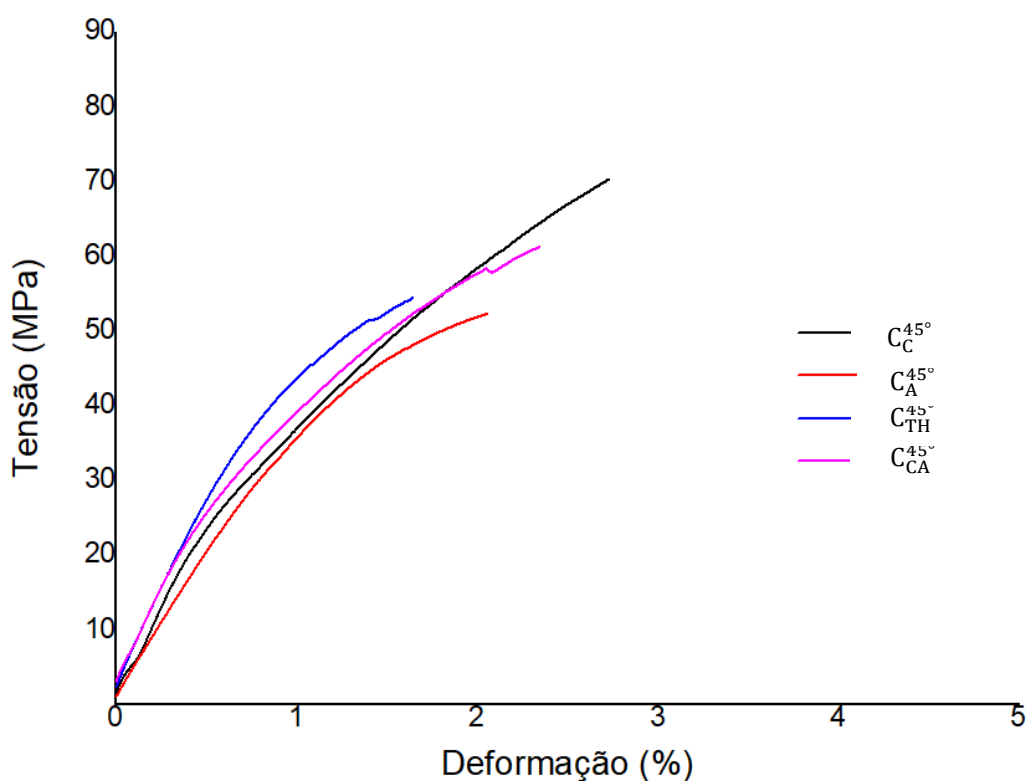
Silva (2019), em seu trabalho, onde analisou a hibridização com 4 camadas de tecidos de mecha híbrida de fibras de vidro e aramida (Kevlar) com tecelagem do tipo sarja e matriz poliéster ortoftálica e angulação de 45° nos CPs, obteve um módulo de elasticidade de 2,20 GPa, tensão de ruptura à tração de 78,06 MPa e deformação de ruptura de 20,45%, com seus respectivos desvios padrões de, 19,23 GPa, 7,28 MPa e 17,99%.

Por fim, mais um trabalho que valida os resultados obtidos é o de Campos (2017) em que usou tecidos com hibridização de carbono (45°) e vidro (-45°) e após testes de tração nos CPs, encontrou uma tensão última à tração de 61,09 MPa ($\pm 9,12$) e módulo de elasticidade de 4,88 ($\pm 0,20$), sendo valores bem próximos (mesmo que com outros materiais) dos encontrados no tecido híbrido de carbono e aramida neste trabalho.

5.6 COMPARAÇÃO ENTRE OS DISTINTOS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS

O Gráfico 6 é o comparativo da Tensão x Deformação das curvas médias na região linear estudada obtidas de todos os CPs válidos que foram analisados anteriormente, comparando-os de maneira conjunta. Os Gráficos (em barra e com seus devidos desvios padrões) 7, 8, 9 exibem as propriedades mecânicas estudadas, destacando cada compósito produzido e enfatizando o seu desempenho divergente dos demais.

Gráfico 6. Tensão x Deformação na região linear para os CPs de todo os compósitos fabricados.



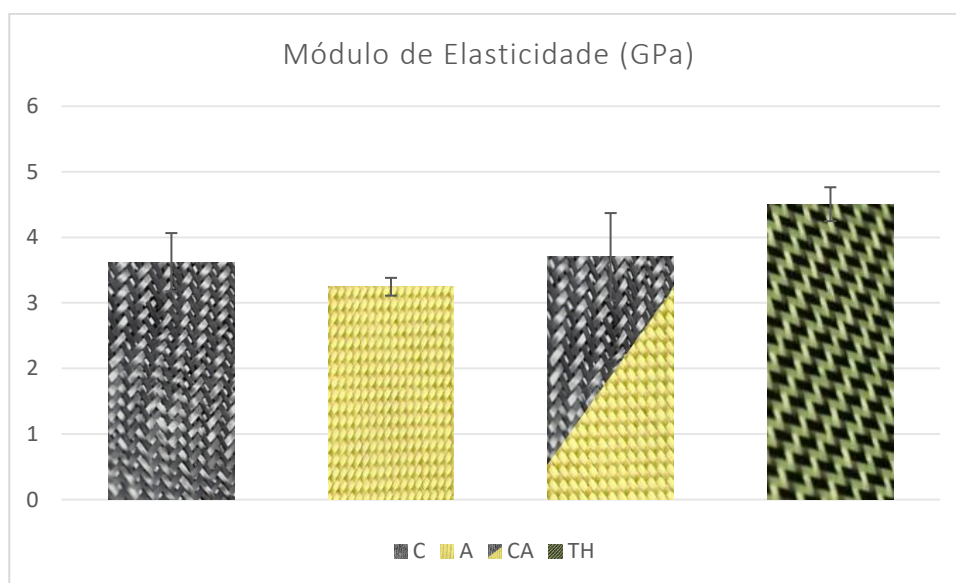
Fonte: O autor.

Explicado anteriormente, os dados do Gráfico 6 nos mostra, novamente, o comportamento predominantemente à tensão, sendo mostrada a região linear do

gráfico (que foi estudada durante todo esse trabalho) e que todos os conjuntos de corpos de prova demonstraram comportamento semelhante, este que é encontrado comumente em trabalhos que utilizam corpos de prova com angulação de 45° , verificando que para a maioria dos compósitos com essa disposição que sejam ensaiados à tração esse formato de curva subdivida uma etapa linear (comportamento elástico) e uma região onde começa a deformação plástica (estricção) devido as fibras buscarem o alinhamento no sentido do carregamento, como afirmaram Batista (2017) e Bergmann *et al.* (2015).

Ainda segundo o gráfico, é perceptível que a curva com maior angulação (que representa o módulo de elasticidade) é a do compósito híbrido $C_{TH}^{45^\circ}$, sendo seguida pelo também compósito híbrido $C_{CA}^{45^\circ}$, verificando que a hibridização dos componentes (carbono e aramida) é válida, já que os dois compósitos híbridos apresentaram o módulo de elasticidade maiores que os materiais individualmente, o que pode ser comprovado no Gráfico 7.

Gráfico 7. Comparativo do módulo de elasticidade para todos os CPs válidos.



Fonte: O autor.

Como visto, o maior módulo de elasticidade é atingido no compósito $C_{TH}^{45^\circ}$, possuindo um valor médio de 4,50 GPa. O desempenho obtido foi maior que o compósito híbrido no laminado, tais comparações já foram vistas anteriormente. O módulo do $C_{TH}^{45^\circ}$ obteve valores melhores até mesmo que o $C_C^{45^\circ}$ (24,30% maior),

consolidando-se assim o melhor desempenho dos compósitos e validando mais uma vez o processo de hibridização.

O menor valor de módulo de elasticidade alcançado foi o do $C_A^{45^\circ}$, o que já era esperado, visto que a tendência, ao incorporar fibras de carbono nos CPs é de aumentar a tensão de ruptura, consequentemente o seu módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade do $C_C^{45^\circ}$ foi de 3,62 GPa, sendo maior que o dos corpos de prova de aramida 11,72% e, idêntico ao compósito $C_{CA}^{45^\circ}$, considerando os desvios padrões e, menor do que $C_{TH}^{45^\circ}$, como já dito. Ou seja, a mistura de carbono e aramida melhorou o módulo de elasticidade, sendo válida a hibridização nesse sentido.

Ao comparar o compósito híbrido ($C_{TH}^{45^\circ}$) com o $C_{CA}^{45^\circ}$, verifica-se que o compósito de tecido híbrido apresenta um módulo de elasticidade maior que o híbrido no laminado, cerca de 21,62% superior. Na propriedade de tensão média, o $C_{CA}^{45^\circ}$ apresenta-se melhor que o $C_{TH}^{45^\circ}$, sendo 14,60% maior. As deformações médias verificadas nos híbridos foram de 2,24% e 3,68%, para $C_{TH}^{45^\circ}$ e $C_{CA}^{45^\circ}$, respectivamente.

No que diz respeito aos desvios padrões dos módulos de acordo com o Gráfico 7, constata-se valores consideravelmente baixos, indo de 0,13 GPa ($C_A^{45^\circ}$), até o compósito híbrido $C_{CA}^{45^\circ}$ com valor de 0,66 GPa, com isso, tal característica não define alguma propriedade única dos materiais, apenas que os corpos de prova obtiveram valores próximos em seus resultados finais, mostrando homogeneidade nas placas confeccionadas.

Ao comparar o módulo de elasticidade dos CPs de aramida com os compósitos híbridos, percebe-se um aumento no módulo de elasticidade, isso acontece devido hibridização (logo, a adição do carbono) e pode ser visto de maneira simplificada na Tabela 9, que mostra a porcentagem de aumento do módulo de elasticidade quando se produz a hibridização do compósito, adicionando carbono junto da aramida, seja ele no laminado ou no próprio tecido.

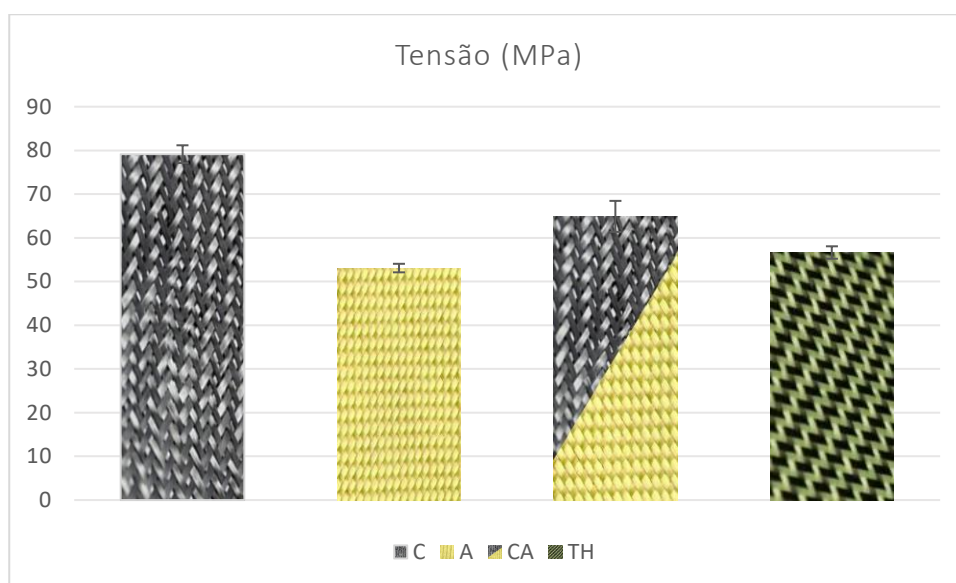
Tabela 9. Diferença percentual do módulo de elasticidade de $C_A^{45^\circ} \times C_{CA}^{45^\circ} \times C_{TH}^{45^\circ} \times C_C^{45^\circ}$.

Propriedade mecânica	Diferença percentual
Módulo de elasticidade (GPa)	$C_{CA}^{45^\circ} > 14,19\% C_A^{45^\circ}$
	$C_{TH}^{45^\circ} > 38,88\% C_A^{45^\circ}$
	$C_C^{45^\circ} > 11,72\% C_A^{45^\circ}$

Fonte: O autor.

O Gráfico 8 mostra que o compósito de maior resistência à tração foi o $C_C^{45^\circ}$, seguindo pelo $C_{CA}^{45^\circ}$, $C_{TH}^{45^\circ}$ e por último $C_A^{45^\circ}$, tais valores demonstrados anteriormente no Gráfico 6.

Gráfico 8. Comparativo da tensão para todos os CPs válidos.



Fonte: O autor.

Quando se analisa o compósito composto por apenas fibras de aramida, percebe-se que, ao fazer a hibridização do mesmo com a inclusão dos carbonos externos (retirando os 2 externos de aramida e formando o $C_{CA}^{45^\circ}$ aumenta-se em 22,29% a tensão de ruptura média do $C_A^{45^\circ}$, indo de 53,07 MPa para 64,90. O fato ocorre pois o carbono é melhor à tração que a aramida, assim, a hibridização para esses corpos de prova sendo postos à testes de tração uniaxial é válida.

O mesmo vale para a hibridização no próprio tecido ($C_{TH}^{45^\circ}$), já que a tensão média da aramida é 53,07 MPa, e a do tecido híbrido aumentou em 6,7% esse valor, sendo de 56,63 MPa.

Os valores de desvio padrão para a tensão média foram todos valores baixos, sendo importante ressaltar que a maior dispersão foi a do $C_{CA}^{45^\circ}$ (3,55 MPa) e a menor a do $C_A^{45^\circ}$ (0,97 MPa).

Os valores apresentados para tensão a ruptura seguem um padrão, a quantidade presente de carbono, ou seja, a maior sendo quando o carbono está presente completamente ($C_C^{45^\circ}$), os compósitos híbridos são valores menores que os de $C_C^{45^\circ}$ porém, ambos, maiores que $C_A^{45^\circ}$, que é onde não há a presença do carbono. Sendo assim, ao adicionar carbono (nesse caso, aos CPs de aramida), os valores de tensão a ruptura têm a tendência a aumentar, já que esse tipo de fibra possui um alto desempenho mecânico à tração.

Analisando o Gráfico 8, percebe-se que a maior tensão à ruptura obtida, como esperado, foi a do $C_C^{45^\circ}$, já que é uma fibra de maior desempenho para trações uniaxiais que as demais, possuindo valores maiores que os outros compósitos testados de acordo com a Tabela 10:

Tabela 10. Diferença percentual de tensão de ruptura de $C_C^{45^\circ} \times C_A^{45^\circ} \times C_{CA}^{45^\circ} \times C_{TH}^{45^\circ}$.

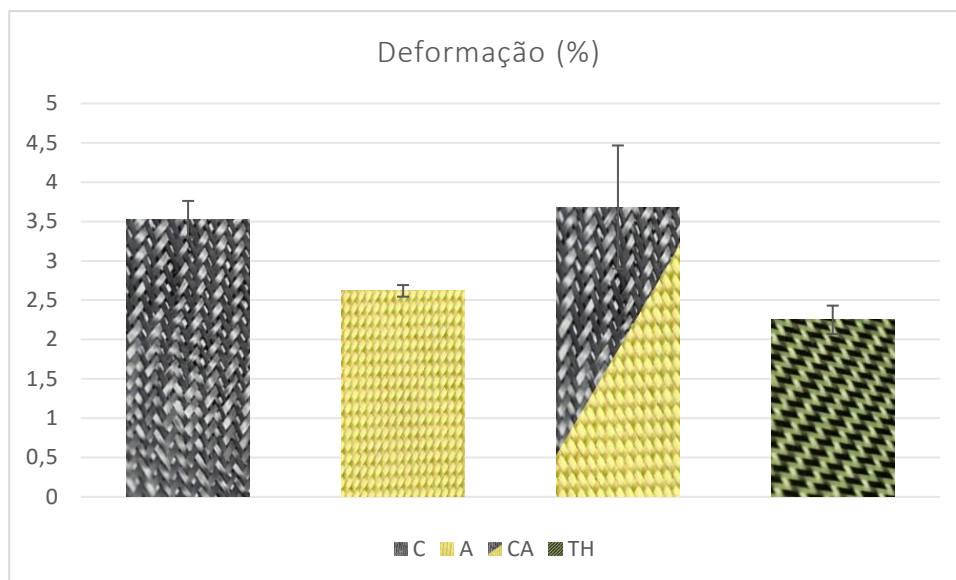
Propriedade mecânica	Diferença percentual
Tensão de ruptura (MPa)	$C_C^{45^\circ} > 49,12\% C_A^{45^\circ}$
	$C_C^{45^\circ} > 21,94\% C_{CA}^{45^\circ}$
	$C_C^{45^\circ} > 39,74\% C_{TH}^{45^\circ}$

Fonte: O autor.

Os CPs híbridos de $C_{TH}^{45^\circ}$ quando comparados à tensão última de ruptura do $C_C^{45^\circ}$ apresentaram valores médios menores (ver Gráfico 8), em contrapartida seu módulo foi maior ($24,30\% > C_C^{45^\circ}$), confirmando a validade da hibridização, já que diminuiu uma propriedade (a tensão última em 39,74%) e aumentou de maneira significativa seu módulo de elasticidade.

A mesma comparação é válida quando se relacionam os compósitos de $C_{CA}^{45^\circ}$ com $C_C^{45^\circ}$, em que o CA^{45° demonstrou melhora no módulo de elasticidade (cerca de 2,20%) e um decréscimo de 17,99% na tensão de ruptura final após a hibridização.

O Gráfico 9 mostra as deformações médias comparadas em cada conjunto de corpos de prova.

Gráfico 9. Comparativo da deformação para todos os CPs válidos.

Fonte: O autor.

Os valores nas deformações (%) do $C_{CA}^{45^\circ}$ foi maior 64,28% do que o $C_{TH}^{45^\circ}$, indicando que a hibridização no laminado tem a tendência de deformar mais do que a hibridização no próprio tecido, já que nesta, as fibras estão mais compactas em sua disposição, consequentemente deformando menos. Outro motivo é a propriedade que a aramida possui de deformar mais que o carbono, sendo assim, ao estar presente em duas camadas internas, pode influenciar de maneira maior na deformação média dos CPs.

Os desvios padrões mostrados para a deformação nos conjuntos de corpos de prova foram valores próximos, possuindo destaque para o menor valor de dispersão nos CPs de $C_A^{45^\circ}$, sendo apenas 0,073%, com um valor médio de deformação de 2,61%. O maior desvio padrão apresentado foi o $C_{CA}^{45^\circ}$.

A maior deformação percentual apresentada foi a do compósito $C_{CA}^{45^\circ}$, com valores de 3,68%, sendo quase idêntica ao compósito propriamente de carbono (3,52%).

O compósito que apresentou a menor deformação média foi o $C_{TH}^{45^\circ}$, mostrando que a hibridização no próprio tecido acarretou numa diminuição na deformação (%), sendo menor 14,17% que o compósito totalmente de aramida.

6 CONCLUSÕES

Após vistos os resultados e comparações feitas após ensaios de tração uniaxial e densidade volumétrica de acordo com as devidas normas, as alterações nas propriedades mecânicas são perceptíveis com as hibridizações sofridas dos materiais deste estudo.

As hibridizações realizadas nos compósitos têm potencial de serem empregadas em aplicações mecânicas, visto que ao hibridizar um compósito de aramida, adicionando carbono no mesmo, aumenta de maneira significativa o seu módulo de elasticidade.

Ao fim deste estudo, os principais resultados e conclusões obtidas foram as seguintes:

- As variações dos tipos de fraturas de todos os CPs (estes, que possuem angulação de $\pm 45^\circ$ na fibra do seu corpo) foram entre AGM e LGM. Alguns corpos de prova do conjunto CF_A , apresentaram fraturas que se assemelham com a LAT;
- Os corpos de prova apresentaram antes da fratura uma região de estricção/empescoçamento, semelhante a fraturas em aços dúcteis;
- Os resultados de densidade indicaram o esperado, em que os compósitos híbridos apresentaram densidade entre os compósitos de elementos únicos;
- A maior densidade média apresentada foi a dos corpos de prova de apenas carbono, com valor de $1,34 \text{ g/cm}^3$, já a menor foi a do conjunto de aramida, de $1,22 \text{ g/cm}^3$;
- Os conjuntos de CPs híbridos ($C_{CA}^{45^\circ}$ e $C_{TH}^{45^\circ}$) exibiram densidades iguais ($1,28 \text{ g/cm}^3$) e foi um valor mediano entre os dados dos conjuntos com apenas um tipo de tecido, já que os dois grupos híbridos foram confeccionados pelas mesmas fibras de carbono e aramida;
- Percebe-se, nos gráficos de tensão x deformação, um comportamento comum para compósitos com $\pm 45^\circ$ de angulação, similar a materiais com alta ductilidade, onde existe uma região predominantemente à tração (região elástica) e em seguida uma região predominantemente ao cisalhamento (região plástica);

- A duas hibridizações, quando comparadas ao $C_A^{45^\circ}$, tiveram valores médios de módulo de elasticidade e tensão à ruptura maiores, indicando que a hibridização do material é válida para um aumento dessas propriedades;
- A resistência à tração dos compósitos híbridos obteve valores melhores que o compósito somente de aramida, o $C_{TH}^{45^\circ}$ foi maior 6,7% e o $C_{CA}^{45^\circ}$ 19,76% superior, já que quando se adiciona carbono nos compósitos, eles aumentam às propriedades de tração dos materiais;
- A resistência à tração dos compósitos híbridos, quando comparados com o compósito especialmente de carbono obtiveram os seguintes resultados: o $C_C^{45^\circ}$ foi maior 39,74% que o $C_{TH}^{45^\circ}$ e superior 21,94% que o $C_{CA}^{45^\circ}$, visto que o carbono possui melhor desempenho à tração que as demais;
- O melhor módulo apresentado dos compósitos foi o $C_{TH}^{45^\circ}$, sendo de 4,50 GPa, maior 38,88% que o $C_A^{45^\circ}$, 21,62% superior ao $C_{CA}^{45^\circ}$ e, maior também que o $C_C^{45^\circ}$ em 24,30%;
- Os valores médios dos desvios padrões foram baixos, mostrando valores únicos próximos aos médios;

No geral, a hibridização, seja ela no laminado ou no tecido, possuiu propriedades melhores que o compósito apenas de aramida, deixando claro que a junção dos materiais se torna viável para aplicações mecânicas que necessitem das características estudadas, já que após hibridizados, os compósitos melhoraram o seu desempenho, ampliando qualidades específicas importantes, como a tensão final à ruptura e o módulo de elasticidade do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABMACO (Associação Brasileira de Materiais Compósitos). **Compósitos 2: Tecnologia e Processos**. [s.l.:s.d.], 2009.

ALTIDIS, Jaqueline Dias. **Propriedades adesivas de compósitos de matriz epóxi reforçado com liga quasicristalina**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB.

ASTM D 3039. **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM D 3878, **Standard Terminology for Composite Materials**, ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, 2007.

ASTM D 792. **Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.

BATISTA, A. C. M. C.; TINÔ, S. R.L.; FONTES, R.S.; NÓBREGA, S.H.S.; AQUINO, E.M.F. Anisotropy and holes in epoxy composite reinforced by carbon/glass and carbon/aramid hybrid fabrics: Experimental and analytical results. **Composites Part B: Engineering**, v. 125, p. 9-18, 2017.

BATISTA, Ana Claudia de Melo Caldas. **Comportamento Mecânico de Compósitos Poliméricos Híbridos: Estudos Experimentais, Analíticos e Numéricos**. 2017, 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.

BERGMANN, T.; HEIMBS, S.; MAIER, M. Mechanical propeties and energy absorption capability of woven fabric composites under $\pm 45^\circ$ off-axis tension. **Composite Structures**. 125, pp. 362-373, 2015.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. 8. ed. 2012. Sérgio Murilo Stamile Soares.

CAMPOS, Virginia Bezerra Oliveira. **Análise de critérios de falha em lâmina reforçada com tecido híbrido de fibra de vidro e carbono**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

DALTRO, Nelson Rios. **Desenvolvimento de um laminado compósito híbrido a base de fibras de vidro/licurí**. 2011. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

DOS SANTOS, Alexandre M.; SYDENSTRICKER, Thais HD; AMICO, Sandro C. **Estudo de compósitos híbridos polipropileno/fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia**. 2006. Tese de Doutorado. Curitiba-Paraná, Universidade Federal do Paraná.

FERREIRA, Bruna Torres. **Compósitos híbridos reforçados com fibras de sisal/vidro e micropartículas de sílica**. 2017. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei, 2017.

FONSECA, Rodrigo Borges. BRANCO, Carolina Assaf. BITENCOURT, Érika Maria Carvalho. NAVES, Lucas Zago. CARLO, Hugo Lemes. KASUYA, Amanda Vessoni Barbosa. FAVARÃO, Isabella Negro. **Próteses reforçadas. Journal of Health Sciences**, v. 13, n. 4, 2011.

GALLI, Cecília Antunes. **Caracterização das propriedades mecânicas de compósitos de matriz de epóxi com fibras de carbono unidirecionais**. Escola Politécnica-UFRJ, 2016.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing**, 4th ed. WILEY, 2010.

JUNIOR, Anselmo Thiesen. **Estudo comparativo de laminados em plástico reforçado com fibra de vidro obtidos através dos processos *spray-up* e *Hand Lay-up***. 2016. 69 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Naval), Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

LEITE, C. G. Fabricação de risers rígidos de materiais compósitos pelo processo de enrolamento filamentar. **Projeto De Formatura Submetido Ao Departamento De Engenharia Metalúrgica E De Materiais**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

LEVY NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais – Ciência e Tecnologia**. Editora Edgard Blucher Ltda. 2006.

LEVY NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais**, 2ª Edição. Editora Edgard Blucher Ltda. 2016.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. Editora Edgard Blucher, São Paulo (1991).

MALLICK, P, K. **Fibre-reinforced composites: materials, manufacturing and design**. New York: Marcel Dekker, 1988.

MATTHEWS, F. L.; RAWLING, R. D. **Composite materials: Engineering and Science**. Londres: Chapman & Hall, 1994. 470 p.

RODRIGUES, M. A. M. **“Furação Orbital de Compósitos Híbridos Aço/CFRP,”** 2018.

MEDEIROS, Roberto José de. **Laminado compósito a base de tecido híbrido: anisotropia, furo concêntrico, fratura mecânica e análise por MEF**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.

MENDONÇA, P. T. R. **Materiais Compostos & Estruturas-Sanduiche-Projeto e Análise**. 1ª edição. São Paulo: Editora Manole Ltda, 2005.

MOHAN, T.P., RAMESH, M. K., VELMURUGAN, R. **Thermal, mechanical and vibration characteristics of epoxy-clay nanocomposites**. Journal Materials Science, 41, pp. 5915-25, 2006.

MULINARI, D. R. **Comportamento térmico, mecânico e morfológico dos compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de celulose do bagaço de cana de açúcar**. 2009, 112 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP.

NETO, Miguel Cabral de Macêdo. **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de palha de aço**. 2016, 74 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.

PAULA, Paula Gomes de. **Formulação e caracterização de compósitos com fibras vegetais e matriz termoplástica**. 2011. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2011.

PEREIRA, Fernando de Azevedo Alves. **Compósitos híbridos reforçados com fibras de pet recicladas e partículas de sílica**. 2016. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei, 2016.

SILVA, Bruno Henrique Alves da. **Comportamento compressivo de compósito polimérico a base de tecido híbrido kevlar/vidro**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SILVA, Karla Carolina Alves da. **Caracterização de compósitos de matriz polimérica com ligas com memória de forma para aplicação em microatuadores**. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

SKYFILABS. **Glass Hybrid Fibres Epoxy Composite Material using Hand Layup Method**. 2015. Disponível em: <<https://www.skyfilabs.com/project-ideas/fabrication-of-glass-hybrid-fiber-epoxy-composite-material-using-hand-layup-mathod>>. Acesso em: 02 abr. 2022.

SOARES, Filipe de Almeida da Silva. **Estudo do compósito híbrido de matriz polimérica reforçado com fibra de Carbono e liga de Níquel-Titânio**. 2020. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, 2020.

SOUZA, Filipi Marques de. **Estudo da descontinuidade geométrica em lâmina de tecido híbrido bidirecional vidro/carbono**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

SWOLFS, Y. L.; GORBATIKH, L.; VERPOEST, I. “**Composites: Part A Tensile behaviour of intralayer hybrid composites of carbon fibre and self-reinforced polypropylene**” Compos. PART A, vol. 59, pp. 78–84, 2014, doi: 10.1016/j.compositesa.2014.01.001.

TAN, S. C. **Stress concentrations in laminated composites**. Lancaster: Technomic; 1994.

TARGINO, T. G. **Estudo do comportamento mecânico em compósito polimérico a base de tecido híbrido**. 2018. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018

TIMARCO, Letícia Ramos; MORELLI, Arnaldo Carlos. **DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS HÍBRIDOS, COMPOSTOS DE FIBRAS DE CARBONO E FIBRAS DE ARAMIDA REFORÇADAS COM RESINA EPÓXI PARTE I**. In: 2º Workshop de Inovação, Pesquisa, Ensino e Extensão. 2016.

VENTURA, Ana Mafalda F. M. **Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas**. Ciência e Tecnologia dos Materiais, Lisboa, Portugal, v. 21, n. 3/4, p.10-19, jul. 2009.