



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

PAULO FRANCISCO DO NASCIMENTO NETO

**AVALIAÇÃO DA HIBRIDIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM
COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO
E/OU ARAMIDA ORIENTADAS EM ÂNGULOS 0/90°**

CARAÚBAS

2022

PAULO FRANCISCO DO NASCIMENTO NETO

**AVALIAÇÃO DA HIBRIDIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM
COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO
E/OU ARAMIDA ORIENTADAS EM ÂNGULOS 0/90°**

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

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.

N469a Neto, Paulo Francisco do Nascimento.
 AVALIAÇÃO DA HIBRIDIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES
 MECÂNICAS EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM
 FIBRAS DE CARBONO E/OU ARAMIDA ORIENTADAS EM
 ÂNGULOS 0/90° / Paulo Francisco do Nascimento
 Neto. - 2022.
 72 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. Tração. 3. Compósitos. 4.
 Resistência. 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) 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.

**AVALIAÇÃO DA HIBRIDIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM
COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO
E/OU ARAMIDA ORIENTADAS EM ÂNGULOS 0/90°**

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

Defendida em: 08/06/2022

BANCA EXAMINADORA

Assinatura dos membros da 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 11:05:52 -03'00'

Prof. Dra. Ana Claudia de Melo Caldas Batista
Presidente

Rudson de Souza Lima

Assinado de forma digital por Rudson de Souza Lima
Dados: 2022.06.20 17:52:11 -03'00'

Prof. Dr. Rudson de Souza Lima
Membro

WENDELL ALBANO:

Assinado digitalmente por WENDELL ALBANO [REDACTED]
DN: CN=WENDELL ALBANO [REDACTED], OU=UFERSA - Universidade Federal
Rural do Semi-Arido, O=ICPEdu, C=BR
Razão: Eu sou o autor deste documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2022.06.21 08:37:10-03'00'
Foxit PDF Reader Versão: 11.2.2

Prof. Dr. Wendel Albano
Membro

À minha tia Tereza Cristina Rodrigues da Silva e a minha avó Maria Rita da Silva das quais sentirei saudades eternamente.

*À toda a minha família e amigos
que estiveram sempre presentes,
que apoiaram e acreditaram em mim.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradecer sempre ao meu bom Deus pelo dom da vida, por me guiar e me manter no caminho do bem e da paz, por me manter forte para superar todos os momentos de dificuldades, e por todo o discernimento para persistir nos meus objetivos de vida.

À minha família, principalmente minha mãe Joana Angélica, e meu padrasto Leonardo Marinho, que não medem esforços para me ajudar e me ver feliz e satisfeito até nas piores situações. Amo muito vocês!

À minha namorada Mytsa Christina, por todo o amor, companheirismo, paciência e auxílio nessa jornada árdua, te amo muito!

À minha orientadora Ana Claudia de Melo Caldas Batista por toda a paciência, por todos os ensinamentos repassados, por toda a amizade construída ao longo da pesquisa e durante toda minha graduação, e principalmente pelo exemplo de profissional ímpar repassado. Você e sua família sempre terão meu carinho.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) e todo seu corpo técnico, em especial ao técnico de laboratório Samir Adson, que também fez parte dessa jornada. Agradeço demais pela oportunidade da realização desse projeto.

Ao técnico de laboratório Fabrício e também ao professor Manoel Quirino, por todo o apoio no momento da realização dos testes.

A todos os amigos e colegas de curso que contribuíram de forma determinante na conclusão deste trabalho, em especial ao meu grupo de pesquisa, Matheus Thomas e Moisés Medeiros, pela convivência no laboratório e na universidade, e também meus amigos Israel Jonathan, Cássio Lannyego, sou muito grato!

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a conclusão deste trabalho, muito obrigado, de coração!

“Não tente se tornar uma pessoa de
sucesso, mas sim uma pessoa de valor.”

Albert Einstein

RESUMO

O cenário dos materiais de engenharia está em constantes mudanças e aprimoramentos, novos materiais se fazem necessários afim de suprir uma demanda cada vez mais específica dos mais diversos segmentos desta área tão rica e abrangente. O aumento do uso dos compósitos se dá pela necessidade de substituição das tradicionais ligas metálicas principalmente pela redução do peso, maiores resistências à fadiga e corrosão, como também a maior facilidade de se obter peças com geometrias complexas. O projeto tem como objetivo geral produzir um material com propriedades aprimoradas, avaliando se a utilização da hibridização na camada e no tecido é vantajosa pela ótica das propriedades mecânicas em compósitos poliméricos reforçados por tecidos híbridos a base de fibras de Carbono/Aramida. Foi constatado que a hibridização no tecido foi bastante vantajosa, destacando-se o compósito polimérico reforçado com 4 camadas de tecido híbrido carbono/aramida quando realizado de ensaio de tração na direção longitudinal da fibra de carbono, obteve um aumento de 45,13% na resistência última e 54,07% no módulo de elasticidade, em relação ao composto com 4 camadas de fibra de aramida. Como também, o compósito polimérico reforçado com 2 camadas de fibra de carbono nas extremidades e 2 camadas de fibra de aramida ao centro, com um ganho de 25,05% no módulo de elasticidade também em relação ao compósito polimérico reforçado com 4 camadas de fibra de aramida.

Palavras-chave: Hibridização. Tração. Compósitos. Resistência.

ABSTRACT

The scenario of engineering materials is constantly changing and improving, new materials are needed in order to meet an increasingly specific demand of the most diverse segments of this rich and comprehensive area. The increased use of composites is due to the need to replace traditional metal alloys mainly by weight reduction, greater resistance to fatigue and corrosion, as well as greater ease of obtaining parts with complex geometries. The overall objective of the project is to produce a material with enhanced properties, evaluating whether the use of hybridization in the layer and tissue is advantageous by optics of the mechanical properties in polymeric composites reinforced by hybrid fabrics based on Carbon/Aramida fibers. It was found that the hybridization in the tissue was quite advantageous, highlighting the polymeric composite reinforced with 4 layers of carbon/aramid hybrid tissue when a tensile test in the longitudinal direction of the carbon fiber, obtained an increase of 45.13% in the last resistance and 54.07% in the modulus of elasticity, in relation to the composition with 4 layers of aramid fiber. As well, the polymeric composite reinforced with 2 layers of carbon fiber at the ends and 2 layers of aramid fiber at the center, with a gain of 25.05% in the modulus of elasticity also compared to the polymeric composite reinforced with 4 layers of aramid fiber.

Keywords: Hybridization. Traction. Composites. Resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fatores de seleção da matriz de um compósito.....	23
Figura 2 – Classificação dos compósitos segundo a fase reforçadora.....	25
Figura 3 – Características da fase dispersa influentes nos materiais compósitos. ...	26
Figura 4 – Orientação e tipos de fibras em compósitos.	28
Figura 5 – Exemplos principais de tecidos bidirecionais em compósitos.	29
Figura 6 – Tipos de ruptura de compósitos submetidos à tração	30
Figura 7 – Processo de fabricação <i>Hand Lay-up</i>	32
Figura 8 – Visão geral dos procedimentos experimentais.....	33
Figura 9 – Porcelanato utilizado como molde	34
Figura 10 – Tecidos utilizados no projeto	35
Figura 11 – Rolo utilizado na laminação das placas.	36
Figura 12 – Passo a passo da fabricação dos laminados.	37
Figura 13 – Direção de corte dos CP's THA e THC	38
Figura 14 – Máquina de corte e disco de corte para metal	39
Figura 15 – Lixadeira adaptada utilizada nos CP's.	39
Figura 16 – Dimensões dos CP's.....	40
Figura 17 - Máquina utilizada para o ensaio de tração	41
Figura 18 – CP's do ensaio de densidade: (a) 4C ; (b) TH ; (c) CAAC ; (d) 4A	42
Figura 19 - CPs utilizados no ensaio de densidade indo para a estufa.....	43
Figura 20 - Amostras do ensaio de densidade no dessecador.	43
Figura 21 - Realização do ensaio de densidade.....	44
Figura 22 – CP's válidos 4C rompidos.....	48
Figura 23 - CP's válidos 4A rompidos	50
Figura 24 - CP's válidos CAAC rompidos.....	54
Figura 25 – Detalhes da fratura dos compósitos CAAC	55
Figura 26 - CP's válidos THA rompidos.....	57
Figura 27 - CP's válidos THC rompidos.....	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs 4C	47
Gráfico 2 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs 4A	49
Gráfico 3 - Gráfico comparativo das tensões 4C x 4A	51
Gráfico 4 - Gráfico comparativo das deformações 4C x 4A	52
Gráfico 5 - Gráfico comparativo dos módulos de elasticidade 4C x 4A	52
Gráfico 6 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs CAAC	53
Gráfico 7 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs THA	56
Gráfico 8 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs THC	58
Gráfico 9 - Gráfico comparativo tensão última para os CPs THC x THA	61
Gráfico 10 - Gráfico comparativo deformação para os CPs THC x THA	61
Gráfico 11 - Gráfico comparativo módulo de elasticidade para os CPs THC x THA	61
Gráfico 12 - Gráfico comparativo tensão última para todos os CPs.	63
Gráfico 13 - Gráfico comparativo deformação para todos os CPs.	64
Gráfico 14 - Gráfico comparativo módulo de elasticidade para todos os CPs	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação e características das matrizes.....	21
Quadro 2 – Comparativo entre propriedades dos termoplásticos e termorrígidos.	22
Quadro 3 – Código e características dos tipos de falhas.....	31
Quadro 4 – Descrição dos corpos de provas estudados.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos compósitos quanto à forma, tamanho e distribuição das fibras.....	26
Tabela 2 - Resultados obtidos com o ensaio de densidade volumétrica.....	45
Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos CPs de 4C	47
Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos CPs de 4A	49
Tabela 5 - Propriedades mecânicas dos CPs de CAAC	53
Tabela 6 - Propriedades mecânicas dos CPs de THA	56
Tabela 7 - Propriedades mecânicas dos CPs de THC	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CP	Corpo de prova
DESVPAD	Desvio padrão
PET	Poli Tereftalato de Etila

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1	OBJETIVOS	17
1.1	Objetivo geral.....	17
1.2	Objetivos específicos	17
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO	19
2.1	Materiais compósitos	19
2.2	Matriz	20
2.2.1	Tipos de matrizes	20
2.3	Reforços e seus tipos.....	24
2.4	Classificação dos compósitos	26
2.4.1	Compósitos fibrosos	27
2.5	Materiais compósitos híbridos.....	29
2.6	Métodos de fratura nos compósitos fibrosos	30
2.7	Processo de laminação (<i>Hand Lay-up</i>)	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	Visão geral da metodologia.....	33
3.2	Especificações dos tecidos e resina usados	34
3.3	Laminação dos compósitos.....	35
3.4	Preparação dos corpos de prova	39
3.5	Ensaio de tração	40
3.6	Ensaio de densidade.....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Ensaio de densidade.....	45
4.2	Ensaio de tração uniaxial	46
4.2.1	Ensaio de tração uniaxial para os CP's 4C	46

4.2.2	Ensaio de tração uniaxial para os CP's 4A.....	48
4.2.3	Comparativo 4C x 4A.....	50
4.2.4	Ensaio de tração uniaxial para os CP's CAAC	52
4.2.5	Ensaio de tração uniaxial para os CP's THA	55
4.2.6	Ensaio de tração uniaxial para os CP's THC	57
4.3	Análise da influência da anisotropia	59
4.4	Comparativos gerais	62
5	CONCLUSÕES.....	66
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

Durante muito tempo a tecnologia dos materiais compósitos foi restritamente aplicada às indústrias aeronáutica e aeroespacial, pois o seu desempenho mecânico específico atende minuciosamente a demanda da área em comparação as ligas convencionais (REZENDE *et al.*, 2000). A exploração das técnicas de manufatura com a mistura de reforços nestes materiais tem impulsionado o uso dos compósitos também em outros setores industriais, como automotivo, esportivo e de construção civil (PEREIRA, 2016).

Materiais com melhores propriedades associado a um menor preço fez com que a engenharia de materiais tivesse grandes avanços com pesquisas, sendo os compósitos poliméricos de fundamental importância para as novas necessidades em todas as áreas da engenharia (SILVA, 2014). Compósitos reforçados com diferentes fibras são muito comuns e utilizados em diversas áreas, por exemplo, na aviação, automobilismo, motociclismo entre outras (SILVA *et al.*, 2020).

Com base nisto, uma possibilidade cada vez mais viável pela popularização para substituição de materiais convencionais (metais e algumas cerâmicas) encontra-se nos compósitos poliméricos reforçados com fibras sintéticas (REZENDE *et al.*, 2000). Dentro de uma classe mais específica, a necessidade de obter materiais com aplicações mais complexas dá uma maior ênfase aos materiais compósitos híbridos, principalmente quando este processo de hibridização mescla diferentes fibras sintéticas (FONTES, 2013).

A necessidade de se conseguir materiais que, atendessem a uma quantidade maior e mais específicos de características em termos de estrutura e propriedades, deu o pontapé inicial a ideia de se unir um ou mais materiais, visando obter com esta prática novos materiais, com propriedades ainda não exibidas por materiais convencionais separados (GOMES, 2015).

A hibridização, técnica que se caracteriza pelo processo de adicionar duas ou mais fibras em uma mistura multifásica, vem sendo analisada há alguns anos, na literatura é possível notar que existem pesquisas que utilizaram tecidos bidirecionais, no entanto, estes utilizaram apenas um único tipo de fibra em cada camada, porém,

compósitos reforçados com tecidos híbridos (hibridização no tecido) são mais escassos (BATISTA, 2017).

O presente trabalho visa analisar e pesquisar a influência da hibridização em compósitos reforçados com fibras de carbono e aramida em diferentes orientações das mesmas, afim de desenvolver novos produtos que visem atender alguma demanda específica que se enquadre nas características encontradas nos resultados finais. Para o laminado de camada híbrida (tecido híbrido), será avaliado as propriedades à tração uniaxial envolvendo a anisotropia, ou seja, diferentes orientações das fibras com relação às direções de aplicação da carga.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo geral

O projeto tem como objetivo geral produzir materiais compósitos poliméricos com propriedades aprimoradas em relação compósitos poliméricos reforçados com tecidos composto com um único tipo de fibra sintética, avaliando se a utilização das hibridizações (no laminado e na camada) é vantajosa pela ótica das propriedades mecânicas em compósitos poliméricos reforçados por tecidos a base de fibras de carbono e aramida com base nos ensaios de tração uniaxial e densidade.

1.2 Objetivos específicos

- Confeccionar quatro laminados compósitos com quatro camadas contendo como matriz a resina epóxi e como reforço os tecidos de fibra sintéticas: tecido de fibra de carbono (4 camadas); tecido de fibra de aramida (4 camadas); tecido híbrido carbono/aramida (4 camadas); e tecido de fibra de carbono (2 camadas externas) com tecido de fibra de aramida (2 camadas internas);
- Realizar ensaios de tração uniaxial (ASTM D3039, 2014) e de densidade (ASTM D792, 2008) em todos os tipos de corpos de prova fabricados;

- Estudar a influência da anisotropia (ensaio de tração uniaxial nas direções 0° e 90° em relação ao urdume – sentido da fibra de carbono) para o laminado compósito híbrido Carbono/Aramida;
- Testar a viabilidade desses compósitos por meio do ensaio de tração uniaxial.
- Produzir comparativo das repostas mecânicas, em termos do diagrama tensão x deformação e diagrama de barras dos compósitos propostos demonstrando a influência da hibridização;

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Materiais compósitos

De acordo com Gomes (2015), os materiais compósitos constituem uma classe de materiais heterogêneos, multifásicos, que podem ou não ser poliméricos, em que as propriedades deste conjunto são intermediárias às de cada componente individualmente, sendo um dos componentes, descontínuo, dá a principal resistência ao esforço, e o outro, contínuo, que é o meio de transferência desse esforço (matriz), onde a aderência de um componente ao outro tem influência dominante sobre as suas características. Ainda segundo o autor, geralmente os compósitos são empregados como materiais de engenharia, formados por elementos de reforço em grau variável de ordenação, distribuídos sobre uma matriz.

A norma ASTM D3878 (2007) define compósito como uma substância que consiste de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, que são combinados para formar um material de engenharia útil, exibindo certas propriedades que não se encontram nos materiais isoladamente

Segundo Bernardi (2003), compósito é definido como um material estrutural composto por dois ou mais constituintes não solúveis entre si, combinados em um nível macroscópico, onde um dos componentes é denominado de reforço, o qual se apresenta geralmente em forma de fibras ou partículas, o outro, é disperso e chamado de matriz, geralmente contínua. Callister (2014) define um compósito como sendo qualquer material multifásico que exiba expressivamente as propriedades das fases constituintes, tal que a resultante seja superior a estas separadas.

Os compósitos são materiais com excelentes propriedades mecânicas, químicas e físicas, quando comparadas com os seus componentes constituintes isoladamente, possibilitando assim combinações diversas que atendem demandas também diversas, sendo isso a chave que desperta o interesse de pesquisadores, principalmente visando o alto custo dos materiais ditos convencionais, além da possibilidade de aproveitamento de seus resíduos (GOMES, 2015).

Formular uma definição que abranja todos os tipos de compósitos é extremamente complexo, devido à grande quantidade de combinações possíveis

entre materiais de diferentes classes conhecidas, como metais, cerâmicas, polímeros e etc.

2.2 Matriz

A matriz em geral é um material contínuo responsável por envolver a fase dispersa (reforço), as propriedades finais de um compósito são dependentes de fatores como a geometria da fase dispersa, distribuição, orientação e também da compatibilidade interfacial entre os constituintes da mistura (NETO *et al.*, 2007). O autor ainda discorre que é necessário que exista uma compatibilidade entre os materiais constituintes, pois os mesmos trabalharão juntos respondendo aos esforços físicos do meio, devido a isso é importante conhecer as propriedades químicas e físicas dos diferentes materiais que foram combinados, assim como as propriedades das interfaces destes.

Fontes (2013) frisa que, a qualidade da interface entre matriz e reforço é um fator de grande importância no desempenho mecânico final do compósito, pois esta característica é responsável pela transferência de carga entre a matriz e o reforço, uma má adesão entre os componentes compromete de forma significativa a qualidade do produto final. Ainda segundo o mesmo, para que ocorra interação entre os componentes de naturezas químicas diferentes e de quaisquer dimensões ou formas, é essencial a existência de uma área de contato comum entre elas, onde quanto maior for essa área, maior a chance de ocorrer entre os dois componentes uma interação de natureza física, química ou físico-química satisfatória.

2.2.1 Tipos de matrizes

Quando se fala sobre compósitos, existem 3 tipos principais de matrizes que se diferem principalmente por sua natureza e características, que são matrizes metálicas, cerâmicas e por fim poliméricas, que é a utilizada no estudo em foco. O Quadro 1 apresenta brevemente estes tipos de matrizes mencionadas, com algumas características principais.

Quadro 1 – Classificação e características das matrizes.

Matriz Polimérica	Matriz Cerâmica	Matriz Metálica
Composta por macromoléculas, podendo ser orgânicas, sintéticas ou naturais. Apresentam boa resistência a compressão e a tração, porém, tem uso limitado em altas temperaturas, pois sua estrutura se degrada.	Compostas por combinações de metais com ametais. Possuem resistência a corrosão, bastantes duras e frágeis. Apresentam características de isolantes térmicos e elétricos. Geralmente utilizados em materiais que estão sujeitos a altas temperaturas.	Compostas de elementos metálicos, com aplicações estruturais excelentes devido sua alta resistência. Deformáveis, possuem resistência a altas temperaturas além de serem ótimos condutores térmicos e elétricos.

Fonte: Callister (2014).

2.2.1.1 Matriz polimérica

Diversos fatores são levados em consideração na escolha da matriz polimérica para confecção de um compósito, como o tipo de aplicação que o mesmo será submetido, o ambiente ao qual o compósito será exposto, assim como o seu custo de mercado (HERTER, 2010). Após o processo de cura, a matriz polimérica adquire propriedades mecânicas e resistência química visando à confecção do material compósito. As resinas mais utilizadas em compósitos são as resinas poliéster, epóxi e vinil éster (ABDOU, *et. al.*, 2015).

Segundo Guimarães (2018), os compósitos de matriz polimérica de alto desempenho geralmente apresentam algumas características em comum, como baixa massa específica associada a altos módulos de elasticidade e resistência a tração, possibilidade de moldagem de peças em formatos complexos, alta resistência a fadiga e a corrosão, as principais desvantagens são o alto custo da matéria prima e a lenta degradação ambiental da matriz.

Dentro da classe de polímero plásticos, é possível subdividi-los em termofixos e termoplásticos, segundo Pessoa (2018) os mesmos são definidos como:

- Termoplásticos são polímeros que possui a capacidade de remodelamento quando sujeitos ao aumento de temperatura e pressão. Ao cessar a influência destes fatores, o material se solidificará de acordo com a forma dada. Caso haja reaplicação de temperatura e pressão, o material novamente poderá ser remodelado, ou seja, o processo de cura deste tipo de polímero é completamente reversível.
- Termofixos são polímeros que diferentemente dos termoplásticos, após aquecimento e sofrer o processo de cura, que é a formação de ligações cruzadas entre cadeias poliméricas, e conseqüentemente não poderão ser remoldados, caso houver novamente aplicação de calor irá degradar o polímero, visto que as ligações intermoleculares e intramoleculares são covalentes, tornando este processamento inicial uma transformação química irreversível, como por exemplo a resina epóxi.

No Quadro 2 pode-se ver uma comparação das propriedades entre os termoplásticos e os termorrígidos.

Quadro 2 – Comparativo entre propriedades dos termoplásticos e termorrígidos.

Termoplásticos	Termorrígidos
Mecanicamente reciclável	Não reciclável mecanicamente
Tempo de armazenamento ilimitado	Tempo de armazenamento limitado
Alta viscosidade quando fundido	Baixa viscosidades quando fundido
Baixa resistência à fluência	Alta resistência a fluência
Baixa estabilidade térmica e dimensional	Alta resistência térmica e dimensional

Fonte: Adaptado de Silva (2014).

Segundo Aquino (2005), a matriz polimérica oferece significativas estatísticas de ductilidade e resistência mecânica, além disso, apresenta uma versatilidade abrangente para diversas aplicações e propriedades.

Para Mulinari (2009), a seleção desse tipo de matriz é baseada em características específicas que são exigidas nas mais diversas aplicações, propriedades físicas, mecânicas, técnicas, procedimento de fabricação e custos.

Neto (2016) discorre que as características de dureza e resistência desse tipo de matriz, são mais baixas comparados com os outros tipos de matrizes (metais e cerâmicas), porém, equilibram-se ao adicionar um reforço, o que eleva o seu valor mecânico. Ainda segundo o autor, pelas várias vantagens apresentadas, a matriz polimérica combinada as várias maneiras de se produzir compósitos crescem exponencialmente, podendo ser usadas técnicas mais avançadas de produção, afim de se conseguir uma linha de produção mais expressiva em comparação aos métodos manuais. A Figura 1, mostra alguns fatores de seleção da matriz de um compósito.

Figura 1 – Fatores de seleção da matriz de um compósito.

Fator de Seleção	Avaliação dos Materiais da Matriz		
	Pobre ←	→ Bom	
Facilidade de Processamento	Cerâmico	Metal	Polímero
Qualidade	Cerâmico	Metal	Polímero
Capacidade de deformação	Cerâmico	Metal	Polímero
Resistência ao Ambiente	Polímero	Metal	Cerâmico
Densidade	Metal	Cerâmico	Polímero
Custo	Metal	Cerâmico	Polímero

Fonte: Branquinho (2017).

Branquinho (2017) compara materiais compósitos de matriz polimérica, cerâmicas e metálicas, e afirma que os polímeros apresentam ponto de fusão, dureza e módulo de elasticidade inferiores, apesar de representarem um dos materiais mais utilizados na matriz. Ainda segundo o mesmo, o aumento do uso destes materiais está relacionado seu custo benefício, ou seja, o quanto de propriedades estes materiais oferecem versus o seu custo de fabrico.

Pelos polímeros possuírem baixa densidade e baixo ponto de fusão, o seu processo produtivo é simplificado, pois não necessitam de elevadas temperaturas e/ou pressões, não necessitando de complexos equipamentos em sua fabricação, minimizando os custos de processo e fabrico de materiais. Tendo como desvantagens ao uso sua baixa estabilidade dimensional, elevado coeficiente de expansão térmica, além de elevada sensibilidade à radiação (BRANQUINHO, 2017).

2.2.1.2 Resinas epóxi

Segundo Nascimento (2009), resinas epóxi são uma das mais importantes classes de polímeros termoestáveis usados, pois mostra alta força de tensão e módulo, fácil processamento, boa resistência química e térmica.

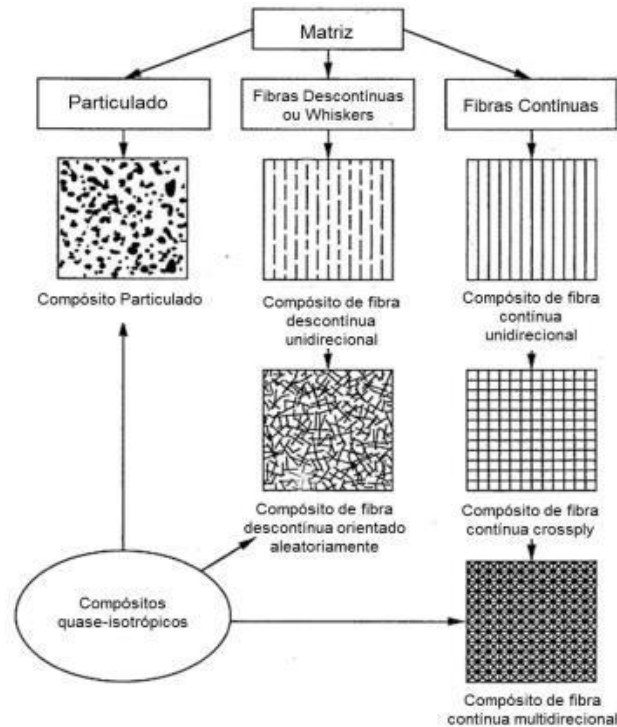
As resinas epóxi são polímeros termofixos, obtidos pela reação da epícloridrina com bisfenol, caracterizados pela presença de um anel de três membros, que consiste de um átomo de oxigênio e dois átomos de carbono (SILVA, *et al.*, 2020). Ainda para o autor, a cura da resina epóxi pode ser realizada tanto à temperatura ambiente quanto a temperaturas mais elevadas (aquecimento da resina), dependendo dos reagentes utilizados no processo ou das propriedades requeridas do produto final.

As resinas epóxi são bastante utilizadas em aplicações estruturais, por possuir boa resistência química e térmica, elevada resistência e módulo de elasticidade, além do fácil manuseio (NUNES, 2013). No estado líquido, estas possuem baixa viscosidade, onde facilita-se o uso, podem ser curadas rapidamente entre uma faixa de temperatura (5° C a 150° C) e quando curadas apresentam ótima resistência a ácidos e reagente cáusticos, se consolidando como umas das melhores opções quando se utilizadas em compósitos fibrosos (SILVA, *et al.*, 2018).

2.3 Reforços e seus tipos

De acordo com Pereira (2016), os materiais compósitos, são classificados em três classes que se diferem pelo reforço: os compósitos particulados ou estruturais, com fibras descontínuas ou Whiskers e as fibras contínuas. Como esquematizado na Figura 2.

Figura 2 – Classificação dos compósitos segundo a fase reforçadora.



Fonte: Branquinho (2017).

De acordo com Branquinho (2017) os compósitos estruturais são de dois tipos, laminares e em estruturas sanduíche. Os laminados são concebidos através do empilhamento de várias camadas impregnadas com resina polimérica, denominadas de lâminas. Este tipo de material apresenta uma diversidade de direções no plano bidimensional aliado a uma resistência elevada.

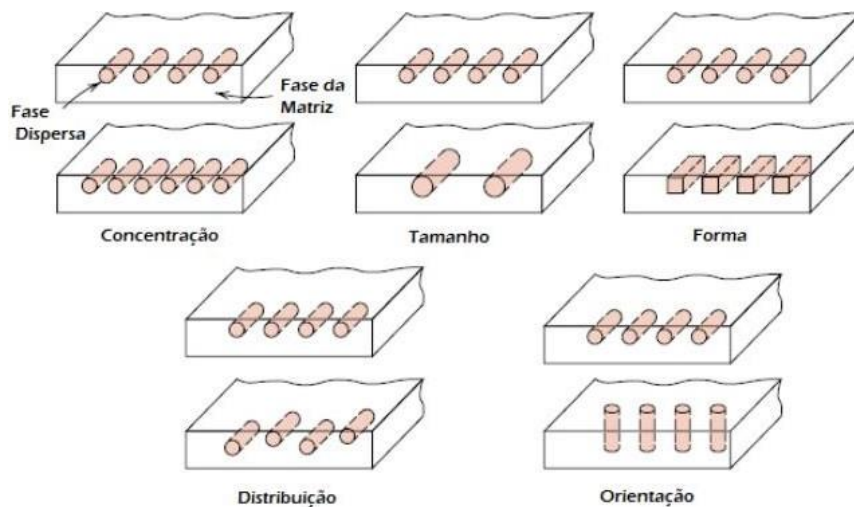
Os materiais compósitos de painéis sanduíches tem objetivo principal suportar as cargas mecânicas a eles submetidas. Características como, tipo de matriz, de reforço, e da ligação destes dois elementos que garante a integridade do conjunto (BRANQUINHO, 2017). Este tipo de material consiste basicamente em duas faces externas mais resistentes que estão separadas por uma camada de material menos denso, que apresenta uma menor rigidez e menor resistência, completa o autor.

Os compósitos com fibras descontínuas contêm pequenas fibras, também chamadas de whiskers como fase de reforço, enquanto que as fibras contínuas são longas e mais eficientes quando se trata de rigidez e resistência, elas podem ser paralelas entre si (unidirecional), possuir angulações umas com as outras (crossply) e por fim, podem variar de orientação e direção (multidirecional) (PEREIRA, 2016).

2.4 Classificação dos compósitos

As propriedades dos materiais compósitos, não dependem somente da sua forma, orientação e distribuição da fase dispersa ou reforço, além disso, também são influenciados pela sua concentração e tamanho das partículas e/ou fibras (FLINN, 1990). Como esquematizado na Figura 3.

Figura 3 – Características da fase dispersa influentes nos materiais compósitos.



Fonte: Flinn, (1990).

Existem inúmeras maneiras de se classificar os materiais compósitos, Hull (1998) classifica os compósitos quanto à sua forma, tamanho e distribuição das fibras, como ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos compósitos quanto à forma, tamanho e distribuição das fibras.

FORMA	TAMANHO	DISTRIBUIÇÃO
Fibras imersas em matrizes	Contínua ou curta	Alinhada ou aleatória
Particulados imersos em matrizes	Indefinido	Aleatória
Estrutura laminar	Indefinido	Ordenada ou aleatória
Híbridos	-	-

Fonte: Adaptada de Hull (1988).

2.4.1 Compósitos fibrosos

Os compósitos fibrosos se caracterizam por fibras aderidas sobre uma matriz, comumente fibras que possuem características específicas, como alto módulo de elasticidade e alta resistência mecânica, onde a qualidade do compósito está intimamente atrelada a uma boa adesão entre fibra-matriz, portanto, tanto a matriz quanto a fibra conservam suas identidades, produzindo juntas um conjunto de propriedades que antes as mesmas não possuíam de forma separada (FONTES, 2013).

As fibras possuem várias distribuições e orientações no compósito, podendo ser aleatório ou não, com comprimento longo ou curto, ainda podendo se apresentar na forma de tecidos, onde os tipos mais comuns são uniaxiais e biaxiais (FONTES, 2013).

Segundo Soares (2019), as principais variáveis materiais da fibra que irão afetar significativamente as propriedades mecânicas de polímeros reforçados por fibras são:

- 1- Tipo de fibra;
- 2- Comprimento médio da fibra;
- 3- Orientação da fibra;
- 4- Interface fibra-polímero;
- 5- Dispersão das fibras;

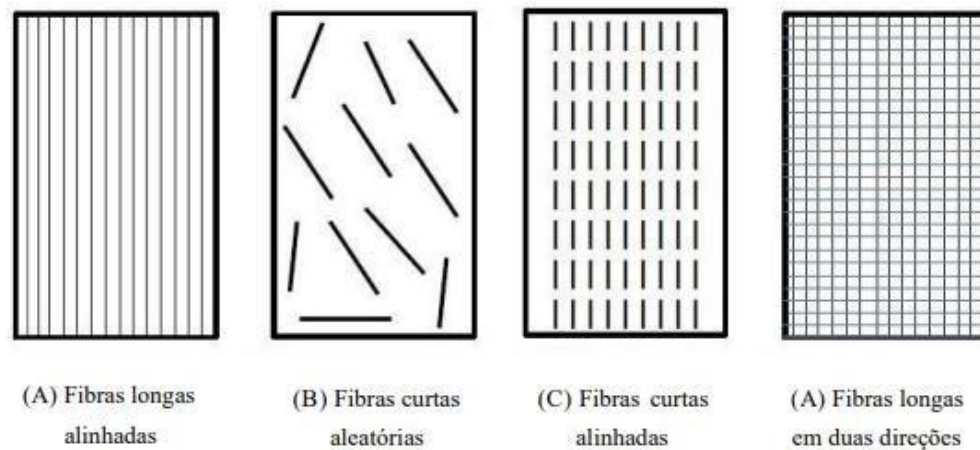
Botelho (2017) define que uma fibra é caracterizada como sendo um corpo flexível que seja macroscopicamente homogêneo, como também possuindo uma alta razão entre o comprimento e a espessura, onde o comprimento é fator determinante na sua eficiência, atendendo a um certo parâmetro crítico, o qual é relacionado com o comprimento e o diâmetro das fibras. As fibras que possuem comprimento menor que o comprimento crítico são denominadas fibras descontínuas ou curtas e as que excedem essa medida são as fibras contínuas ou longas (SOARES, 2019).

Segundo Soares (2019), fibras curtas possuem comprimento longitudinal de até 15 mm e fibras longas possuem comprimento longitudinal maior que 15 mm. As fibras do tipo longa com a configuração alinhada são as que apresentam um melhor reforço para o compósito, analisando mecanicamente. A razão para essa superioridade está

relacionada com a maior capacidade de transferir os esforços da matriz para a fibra, principalmente pelo tamanho maior (SOARES, 2019).

Leão (2012) ilustra os vários tipos de compósitos segundo a orientação e/ou distribuição das fibras de reforço na Figura 4.

Figura 4 – Orientação e tipos de fibras em compósitos.

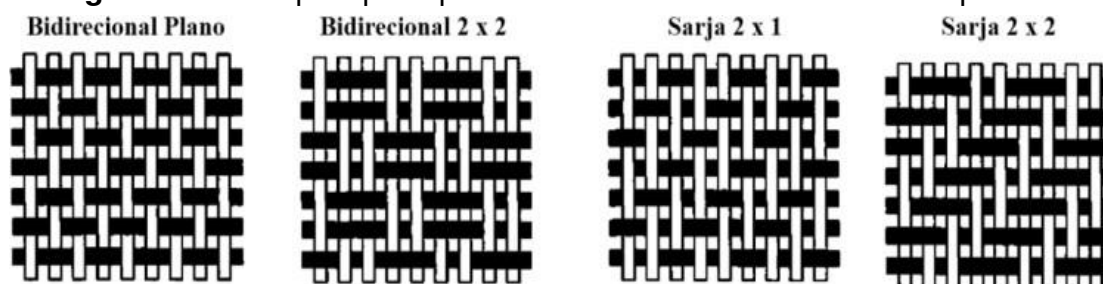


Fonte: Leão (2012).

Além destes tipos de fibras, existem também uma disposição de fibras denominada manta contínua, no qual são submetidas a esforços de tração uniaxial, esta por sua vez, se caracteriza como sendo um produto composto de fios de fibra cortados e distribuídos uniformemente em um modelo padrão, unidos por alguma resina (FELIPPES, 2010).

A direção principal de um tecido plano tem como nome urdume (*warp*) e a direção secundária, que é normalmente transversal ao rolo, tem como nome trama (*till* ou *weft*) (FONTES, 2017). Na Figura 5 é mostrado uma ilustração das principais configurações encontradas em tecidos planos bidirecionais quando se trata de compósitos, vale ressaltar que a forma balanceada é a mais comum encontrada em tecidos bidirecionais planos, nesta forma, a quantidade de fibras nas direções urdume e trama são as mesmas (FONTES, 2017).

Figura 5 – Exemplos principais de tecidos bidirecionais em compósitos.



Fonte: (CHAWLA, 1998).

Os tecidos bidirecionais tipo sarja são caracterizados e identificados pelo seu desenho aparentemente diagonal, esses tecidos são conhecidos como *twill* quando construídos em uma trama 2 x 1 (ou em outra configuração balanceada), onde dois rovings da trama cruzam um feixe do urdume (NASSEH, 2007 *apud* FONTES, 2017). Os tecidos utilizados nesta pesquisa são do tipo Sarja 2x2 (*twill wave*) e bidirecional plano 1x1, também chamado de tela.

2.5 Materiais compósitos híbridos

Materiais compósitos híbridos se caracterizam por apresentarem dois ou mais tipos de reforços diferentes no compósito em geral, o processo de hibridização pode ocorrer tanto no mesmo tecido, possuindo este o urdume de uma fibra e a trama de outra, ou variando uma mecha do urdume de uma fibra e outra mecha de outra fibra, pode ocorrer em mantas de fibras curtas, como também pode ocorrer em relação às camadas do laminado, alternando entre as camadas de um reforço diferente, ou mudando o tipo de material particulado no mesmo (SILVA, 2012).

Ainda segundo Silva (2012), alguns dos fatores como: proteção de um reforço especial, diminuição de custo final do compósito, aprimoramento das propriedades mecânicas em determinada direção de aplicação de esforço, diminuição da taxa de absorção de umidade e entre outros, são fatores que justificam o uso deste tipo de prática em compósitos.

Os materiais compósitos híbridos apresentam em seu conjunto vários tipos de reforços, com combinações de fibras e partículas, mais de um tipo de fibra ou até mesmo mais de um tipo de partícula no mesmo material (OLIVEIRA, 2007). Estes

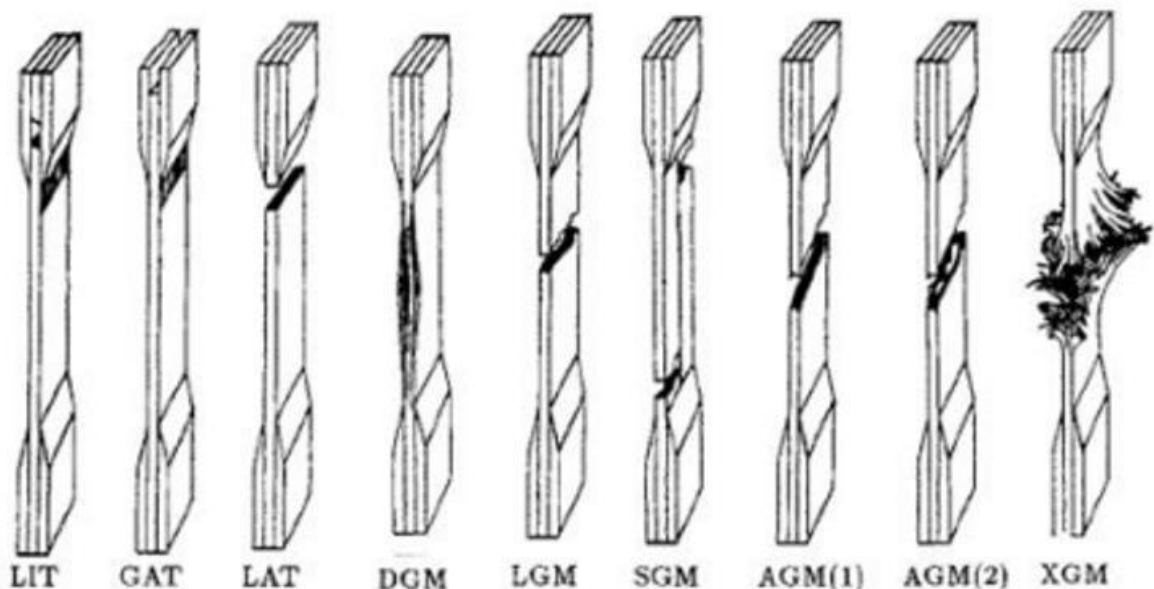
materiais são bem mais comuns atualmente, geralmente em forma de placas com várias camadas (laminados), com vários tipos de fibras misturadas ou não, podendo se apresentar em um única placa ou separadas por camadas distintas. Este tipo de compósito são produzidos para atender as diferentes demandas que suas fibras constituintes são capazes (MATTHEWS, 1994).

Pesquisas revelam que o comportamento dos compósitos híbridos tende a seguir uma média ponderada das propriedades individuais dos seus componentes constituintes, podendo assim haver um balanço mais favoráveis entre as vantagens e desvantagens inerentes aos materiais compósitos em geral (MISHRA, 2003).

2.6 Métodos de fratura nos compósitos fibrosos

As mais diversas formas de ruptura dos compósitos submetidos à tração são ilustradas de forma macroscópica na Figura 6. O Quadro 3 detalha, de acordo com a norma ASTM D 3039 (2014), o número do código e as características de cada uma desses tipos de ruptura.

Figura 6 – Tipos de ruptura de compósitos submetidos à tração.



Fonte: Adaptado ASTM D 3039 (2014).

Quadro 3 – Código e características dos tipos de falhas.

CÓDIGO	NORMATIVA	DEFINIÇÃO
LIT	<i>Lateral – inside - top</i>	Lateral 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 na base da lingueta da garra superior
DGM	<i>Edge delamination – gage - middle</i>	Delaminação na borda do corpo de prova e 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 ASTM D 3039 (2014).

Salienta-se que compósitos com falhas semelhantes as LIT e GAT (ver Figura), não são considerados válidos, tendo em vista que a fratura não ocorreu em seu comprimento útil (galgo) (BATISTA, 2017).

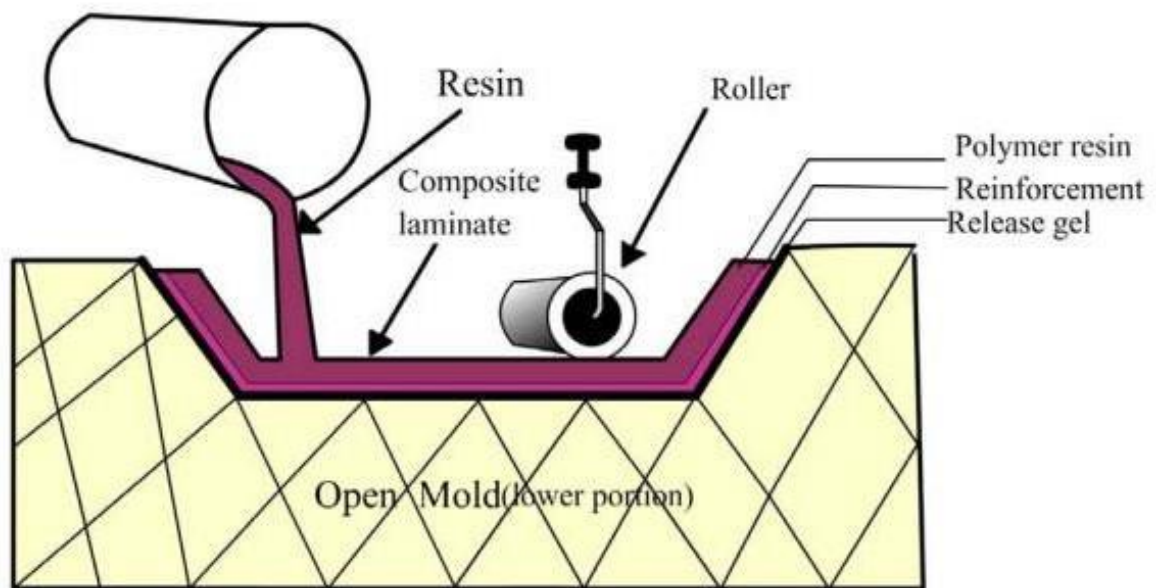
2.7 Processo de laminação (*Hand Lay-up*)

A laminação manual (*Hand Lay-up*) consiste em fabricar os compósitos de forma artesanal, sendo assim, para que os mesmos possam ser feitos deve-se seguir passos comuns a esse método, independente do uso ou não uso de moldes, o agente desmoldante é necessário, pois a utilização do mesmo facilita a retirada do material compósito do local onde foi confeccionado, em seguida deve-se fazer a aplicação da resina (AGUIAR, 2018).

Segundo Leão (2013), o processo de laminação manual, consiste em feltros enrolados, mechas trançadas, mantas e outros tipos de tecidos colocados sobre a matriz (molde) e impregna-se os mesmos com a resina, espalhando sobre toda superfície da manta com o auxílio de um pincel, afim de melhorar a impregnação da manta com a resina, são utilizados rolos com o objetivo de eliminar o maior número de bolhas possíveis, que possam comprometer a integridade física do compósito em

sua fase final, o processo continua com a colocação das camadas até obter-se a espessura desejada ou projetada para a peça, o moldado retirado do molde após a cura completa sem pressão ou calor envolvido. A Figura 7 ilustra esse processo de fabricação.

Figura 7 – Processo de fabricação *Hand Lay-up*.

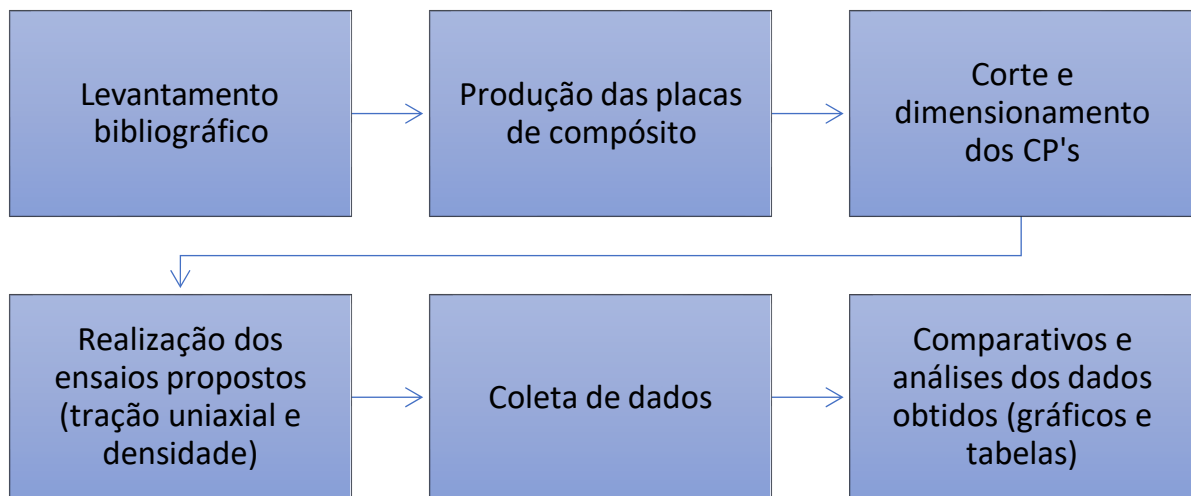


Fonte: <https://www.eppcomposites.com/hand-layup-process.html>.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Buscando a performance máxima dos compósitos produzidos que foram ensaiados, todos os materiais e métodos foram realizados da melhor maneira possível juntamente com a qualidade. Os procedimentos e materiais utilizados foram resumidos na Figura 8, sendo detalhados no decorrer da pesquisa.

Figura 8 – Visão geral dos procedimentos experimentais.



Fonte: Autoria própria.

3.1 Visão geral da metodologia

O processo de produção escolhido para os laminados foi o *Hand Lay-up*, por ser um dos mais simples e fáceis de realizar, além de não necessitar de aparelhagem complexa.

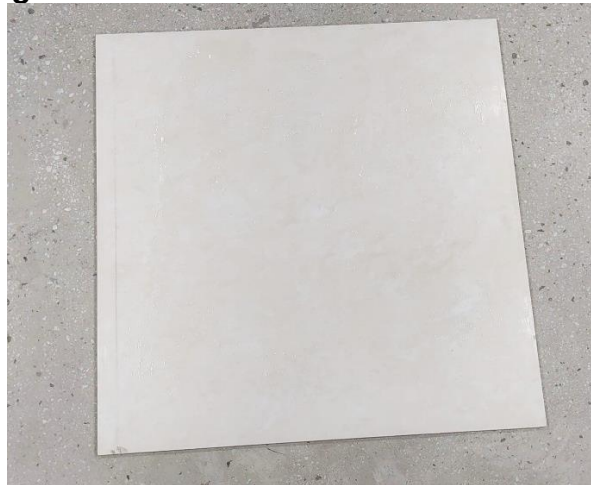
Com todos os materiais escolhidos e separados, deu-se início ao processo de fabricação das placas, logo após as placas prontas, a marcação e retirada dos CP's das mesmas foram realizadas. Foram retirados CP's para os testes de tração uniaxial e de densidade, explicados adiante.

O teste de tração uniaxial será baseado na norma ASTM D 3039 (2014) – Método de teste padrão para propriedades de tração de materiais compostos de matriz polimérica. Após isso, com os dados extraídos, será realizada a comparação das propriedades mecânicas dos compósitos mediante tabelas e gráficos.

Para o ensaio de densidade, a base será a norma ASTM D 792 (2008) – Método de teste padrão para densidade e gravidade específica de plásticos por deslocamento, que tem como objetivo as características de cada CP's submetidos ao fluido, que também terá o auxílio de tabelas e gráficos para resultados e conclusões.

Para o molde onde os laminados foram produzidos foi utilizado uma peça de porcelanato, que também serviu para confecção das placas que foram retirados os TABS (suporte dos CP's para a máquina de tração), é mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Porcelanato utilizado como molde.



Fonte: Autoria própria.

Os reforços utilizados nos compósitos desta pesquisa são fibrosos, especificamente fibras de carbono, aramida e tecidos híbridos de carbono/aramida do tipo Sarja 2x2 e tela 1x1. Os tecidos foram cortados em dimensões de aproximadamente 55 cm de comprimento e 32 de largura.

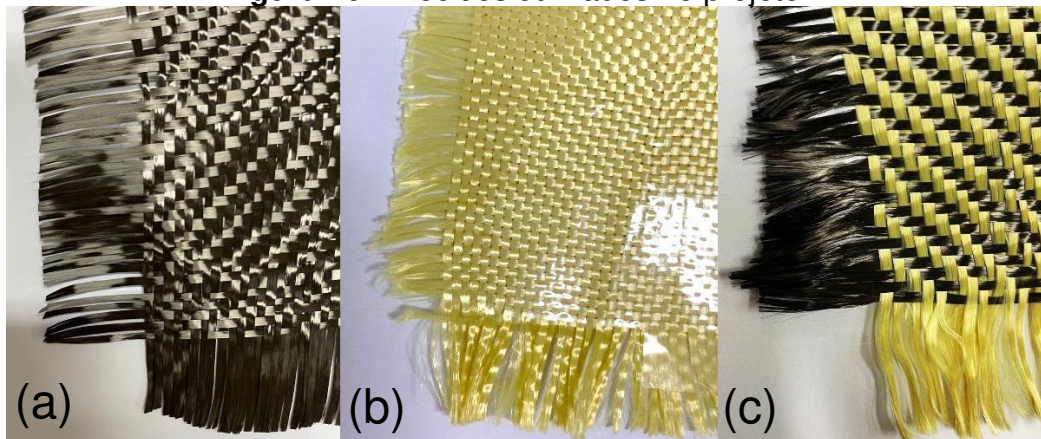
3.2 Especificações dos tecidos e resina usados

Os tecidos usados foram fabricados pelo mesmo roving, com a fibra de carbono da marca Teijin (a), denominada por HTS40 – E13 3K 200tex, possuindo uma densidade de $1,76 \text{ g/cm}^3$, sendo de módulo médio. Já a fibra de aramida sendo a Twaron D2200 (b), caracterizada por ter um alto módulo e com densidade de $1,45 \text{ g/cm}^3$. Por fim, o tecido híbrido de carbono/aramida (c) foi confeccionado com a junção

dos dois tecidos anteriores, sendo a fibra de aramida perpendicular à de carbono. A Figura 10 mostra os três tipos de tecido utilizados no projeto

A resina epóxi utilizada foi a SQ 2001/3154 transparente de alta viscosidade com peso específico de $1,16 \text{ g/cm}^3$. O endurecedor utilizado foi SQ levemente amarelado com peso específico de $1,005 \text{ g/cm}^3$.

Figura 10 – Tecidos utilizados no projeto.



Fonte: Autoria própria.

3.3 Laminação dos compósitos

O primeiro passo para a realização da laminação dos compósitos é a limpeza completa do porcelanato que vai receber o compósito, essa foi feita num primeiro momento com o auxílio de panos umedecidos, com o objetivo de retirar qualquer resquício de sujeira que possa comprometer a integridade final do compósito.

A primeira placa de compósito produzida foi a que possui 4 camadas de fibras de carbono. Misturou-se bem a resina epóxi junto ao catalisador por aproximadamente 1 minuto para garantir uma mistura homogeneia e o total efeito do catalisador na resina.

Com o porcelanato limpo, foi aplicado um plástico filme sobre toda a área de trabalho do mesmo, logo após, despejou-se um pouco de resina em cima do mesmo, e espalhou-se com um rolo para garantir o preenchimento de toda a área delimitada, após isso, foi colocada um dos 4 tecidos de fibra de carbono sobre a mistura, e mais um pouco de resina epóxi, e com o auxílio de outro rolo de metal, tinha o objetivo de retirar do maior número de bolhas e espaços vazios entre a mistura e a fibra.

O processo se repetiu igualmente até que fossem depositadas as 4 camadas de tecido de carbono programadas, como detalhado no processo de laminação (*Hand Lay-up*). Após terminado esse passo, foi colocado um pedaço de papel filme sobre a mistura resina/fibra afim de isolar o material e prevenir o depósito de sujeira ou insetos durante a cura da resina.

Após aproximadamente 24 horas o laminado 1 foi desmoldado e pronto para o corte dos corpos de prova. A Figura 11 mostra o exemplar do rolo utilizado na laminação.

Figura 11 – Rolo utilizado na laminação das placas.



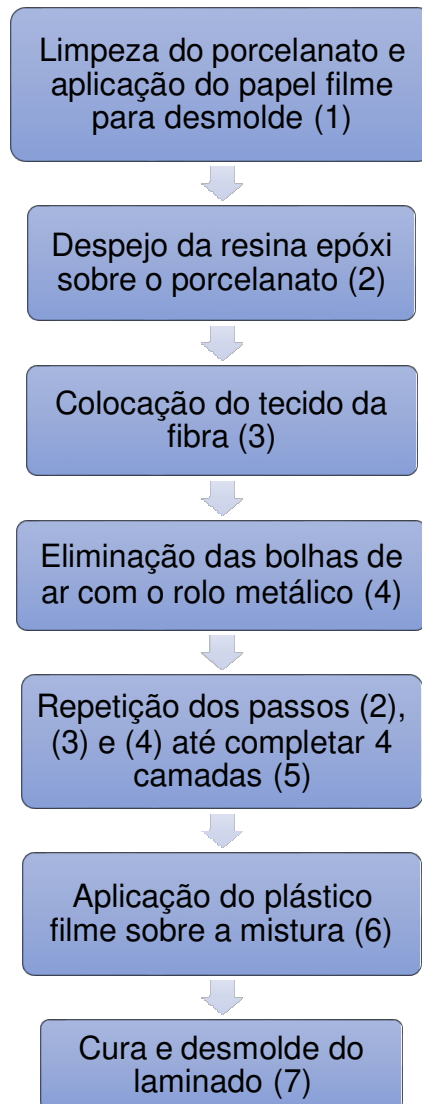
Fonte: Autoria própria.

Para o projeto em questão, foi produzido um total de 4 laminados, todos com o mesmo processo de produção detalhado anteriormente, com uma sutil diferença para o laminado **CAAC**, onde das 4 camadas, 2 de carbono foram colocadas nas extremidades e as 2 de aramida ao centro.

Os outros 3 laminados restantes são, um com 4 camadas de tecido de fibra de aramida, outro com 4 camadas de tecidos de carbono, e por fim um com 4 camadas de tecido híbrido de fibras de carbono/aramida cortados ortogonalmente no sentido das fibras de carbono e o outro cortado no sentido das fibras de aramida.

A Figura 12 a seguir detalha o processo de fabricação de todos os laminados e o Quadro 4 mostra as siglas com suas designações para um melhor entendimento e abreviações futuras.

Figura 12 – Passo a passo da fabricação dos laminados.



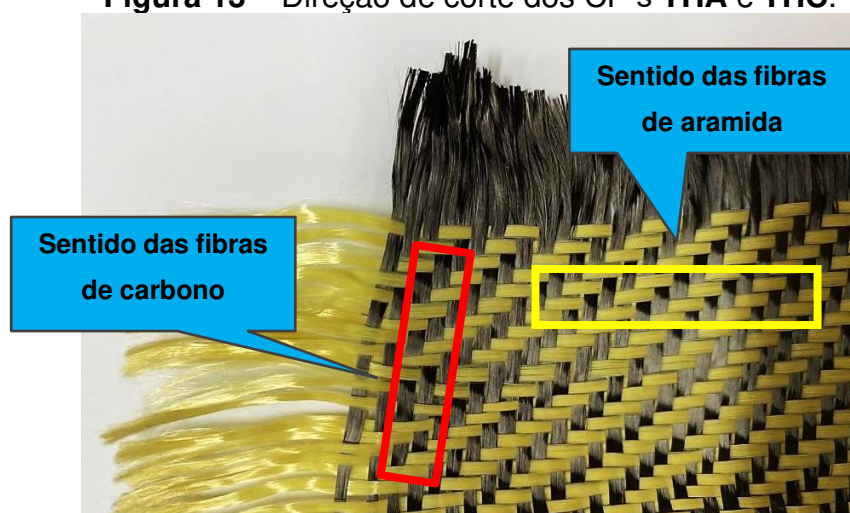
Fonte: Autoria própria.

Quadro 4 – Descrição dos corpos de provas estudados.

Designação do Laminado	Designação do CP	Descrição
4C	4C	Corpo de prova do compósito polimérico reforçado com 4 camadas de tecido sarja 2x2 de fibra de carbono
4A	4A	Corpo de prova do compósito polimérico reforçado com 4 camadas de tecido tela 1x1 de fibra de aramida
CAAC	CAAC	Corpo de prova do compósito polimérico reforçado com 2 camadas de tecido sarja 2x2 da fibra de carbono nas extremidades e 2 camadas de tecido tela 1x1 da fibra de aramida ao centro
TH	THA	Corpo de prova do compósito polimérico com 4 camadas de tecido híbrido carbono/aramida do tipo sarja 2x2 cortados na direção da aramida no sentido de realização do ensaio de tração
	THC	Corpo de prova do compósito polimérico com 4 camadas de tecido híbrido carbono/aramida do tipo sarja 2x2 cortados na direção do carbono no sentido de realização do ensaio de tração

Fonte: Autoria própria.

Vale salientar como foi retirado os CP's de **THA** e **THC** da placa. A Figura 13 mostra como os corpos de prova de ambos foram cortados do laminado **TH**.

Figura 13 – Direção de corte dos CP's THA e THC.

Fonte: Autoria própria.

3.4 Preparação dos corpos de prova

Com todos os laminados prontos, foram cortados 10 CP's de todos os compósitos existentes neste trabalho, totalizando 50 CP's, foram marcados os locais dos CP's com uma caneta permanente, com o auxílio da esmerilhadeira angular da Wesco WS4740 de 60 Hz azul turquesa e o disco de corte para metais MPA EN 12413 (Figura 14) os CP's foram deixados nas dimensões ou próximas as desejadas, onde com o auxílio de uma serra de corte de bancada Schulz de 3 polegadas – SFPC 20 (corrupio) adaptada com lixas (Figura 15) e lixas d'água com lixagem manual, foram ajustadas para as dimensões requeridas pela norma ASTM D 3039 (2014) – Método de Teste Padrão para Propriedades de Tração de Materiais Compostos de Matriz Polimérica.

Figura 14 – Máquina de corte e disco de corte para metal.



Fonte: Autoria própria.

Figura 15 – Lixadeira adaptada utilizada nos CP's.



Fonte: Autoria própria.

A norma ASTM D 3039 (2014) especifica que a largura dos corpos de prova deve atender ao intervalo de 24,75 e 25,25 mm, com um comprimento de 250 mm, porém devido as dimensões da máquina de ensaio utilizada, adotou-se uma dimensão aproximada de 240 mm. O comprimento útil (galgo) utilizado é de 127 mm. As dimensões citadas estão ilustradas na Figura 16.

Figura 16 – Dimensões dos CP's.



Fonte: Autoria própria.

Os ajustes finais de lixamento foram mediante lixas d'águas, para que as dimensões obedecessem às medidas da norma ASTM D 3039 (2014), as lixas possuíam granulação de 100, 200, 400, 600 e 1200.

Foram retiradas 10 medições do galgo, sendo elas 5 de espessura e 5 de largura, em seguida foram retiradas as médias para cada um desses dois segmentos.

3.5 Ensaio de tração

Nos ensaios de tração foi utilizada a máquina de ensaio universal da EMIC do modelo DL-10000 (Figura 17) com a capacidade máxima de 100 kN, porém foi utilizada a célula de carga de 30kN. A velocidade de 2 mm/min foi utilizada como sugerido na norma que foi utilizada para os testes, a ASTM D 3039 (2014) (Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials).

Os ensaios foram todos realizados no Laboratório de Ensaios e Caracterização do curso de Engenharia Mecânica da UFERSA (Campus Mossoró). Todos os CP's foram cortados mediante a máquinas de corte. Para cada conjunto de corpos de prova

usados foram selecionadas cinco amostras válidas, ou seja, que romperam no comprimento útil (galgo).

Após ter obtidos e confeccionados os materiais para estudo, o gráfico Tensão x Deformação para cada conjunto de corpo de prova foi obtido. Vale ressaltar que o módulo de elasticidade foi calculado para 50 % da resistência última à tração de cada corpo de prova, e que todos os desvios padrões foram calculados através da função “DESVPAD” do Excel.

Para os cálculos comparativos foi utilizado o cálculo de diferença percentual mostrado na equação 1:

$$\left(1 - \frac{\text{Maior}}{\text{Menor}}\right) \times 100 \quad (1)$$

Figura 17 - Máquina utilizada para o ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria.

Após os ensaios, a máquina de tração retorna os valores de tempo, força e deformação de todos CP's ensaiados. A partir disso, foi calculado a tensão última a tração (MPa), utilizando a equação 2:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Onde:

- F é a força fornecida pela máquina;
- A é a área de seção transversal do corpo de prova (mm²).

Em seguida foi calculado o módulo de elasticidade (GPa), para 50% da tensão última a tração de cada corpo de prova, para isso foi utilizado a equação 3:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

Onde:

- σ é a variação da tensão (MPa);
- ε é a deformação, obtida através da equação 4;

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (4)$$

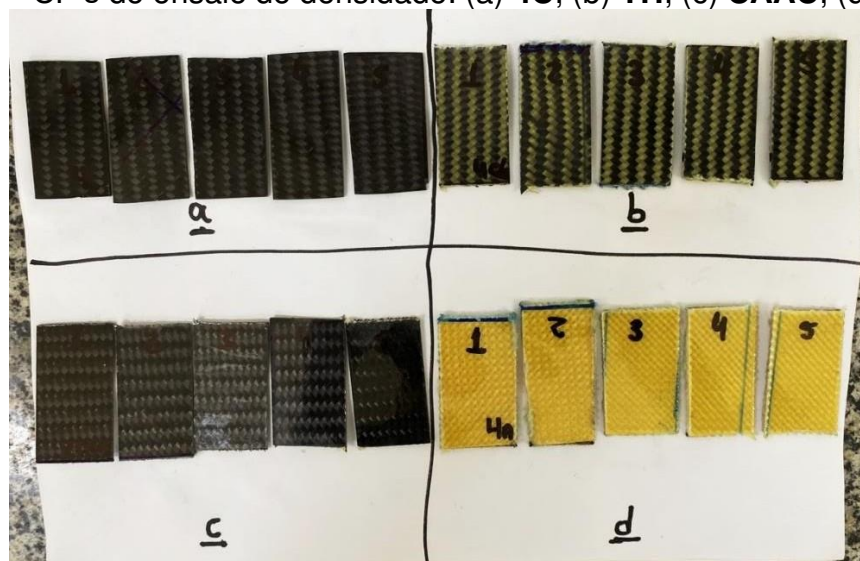
Onde:

- ΔL é o valor da deformação fornecido pela máquina;
- L_o é o valor do comprimento útil do galgo (50 mm).

3.6 Ensaio de densidade

Para o ensaio de densidade volumétrica, a norma ASTM D792 (2008) foi tida como parâmetro, onde também foram usadas cinco amostras de cada placa (como o ensaio de tração), de modo que atenderam as especificações (peso entre 1 e 50 g), após terem sido pesadas. A Figura 18 mostra os corpos de prova que foram submetidos ao ensaio de densidade.

Figura 18 – CP's do ensaio de densidade: (a) **4C**; (b) **TH**; (c) **CAAC**; (d) **4A**.



Fonte: Autoria própria.

Em primeiro lugar, as amostras escolhidas foram submetidas à estufa com temperatura controlada de 100° C, onde permaneceram durante um período de uma hora (Figura 19), em seguida, foram submetidos a outra hora no dessecador para esfriar e não absorver umidade do ambiente (Figura 20).

Este procedimento tem como objetivo justamente eliminar qualquer possível umidade que venha estar presente nos corpos de prova, que poderiam comprometer os resultados, mesmo que mínimos.

Figura 19 - CPs utilizados no ensaio de densidade indo para a estufa.



Fonte: Autoria própria.

Figura 20 - Amostras do ensaio de densidade no dessecador.



Fonte: Autoria própria.

Com o uso do método de teste para plásticos sólidos em água, com corpos de prova de 1 g até 50 g. O cálculo foi realizado utilizando a seguinte equação (5) da norma ASTM D792, (2008):

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

Onde:

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

A Figura 21 demonstra a realização do ensaio.

Figura 21 - Realização do ensaio de densidade.



Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico, após realizados os ensaios de densidade e de tração uniaxial, tornou-se possível coletar os dados para plotar o gráfico Tensão x Deformação de cada conjunto de corpo de prova (válidos), tornando assim possível a análise da influência da hibridização, tanto por camadas, quanto no tecido, verificando as modificações nas suas propriedades mecânicas em ângulos de 0/90° para os compósitos híbridos no tecido especificamente.

Para calcular o módulo de elasticidade, utilizou-se aproximadamente 50% da resistência última à tração de cada corpo de prova.

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

Os resultados obtidos e algumas análises dos mesmos estão expostos a seguir:

4.1 Ensaio de densidade

Após a realização do ensaio de densidade volumétrica, que tem como objetivo, avaliar o comportamento do material submetido ao fluído, foram obtidos os dados demonstrados Tabela 2, onde expõem a densidade média na unidade g/cm³ e os respectivos desvios padrões para cada conjunto de corpo de prova ensaiado.

Tabela 2 - Resultados obtidos com o ensaio de densidade volumétrica.

Compósito	Densidade (g/cm³)	Desvio padrão
4C	1,34	±0,01
4A	1,22	±0,01
CAAC	1,28	±0,01
TH	1,28	±0,01

Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Tabela 1, é possível observar que os CP's que apresentaram o maior valor de densidade foram do compósito com 4 camadas de carbono em sua composição, com exatamente 1,34 g/cm³, seguido pelos dois compósitos híbridos

envolvidos no experimento (**CAAC** e **TH**), com $1,28 \text{ g/cm}^3$ ambos. Por fim, o compósito com menor densidade foi o com 4 camadas de aramida, com exatamente $1,22 \text{ g/cm}^3$.

Este comportamento do compósito híbrido foi satisfatório, visto que a densidade da fibra de carbono usada foi de $1,76 \text{ g/cm}^3$, da fibra de aramida de $1,45 \text{ g/cm}^3$ e $1,11 \text{ g/cm}^3$ da resina epóxi, onde aproximadamente 70% da composição dos CP's são de resina.

Vale ressaltar o baixíssimo e igual desvio padrão de todas os conjuntos ensaiados ($\pm 0,01$), possibilitando assim considerar um valor bem fidedigno do ensaio de densidade.

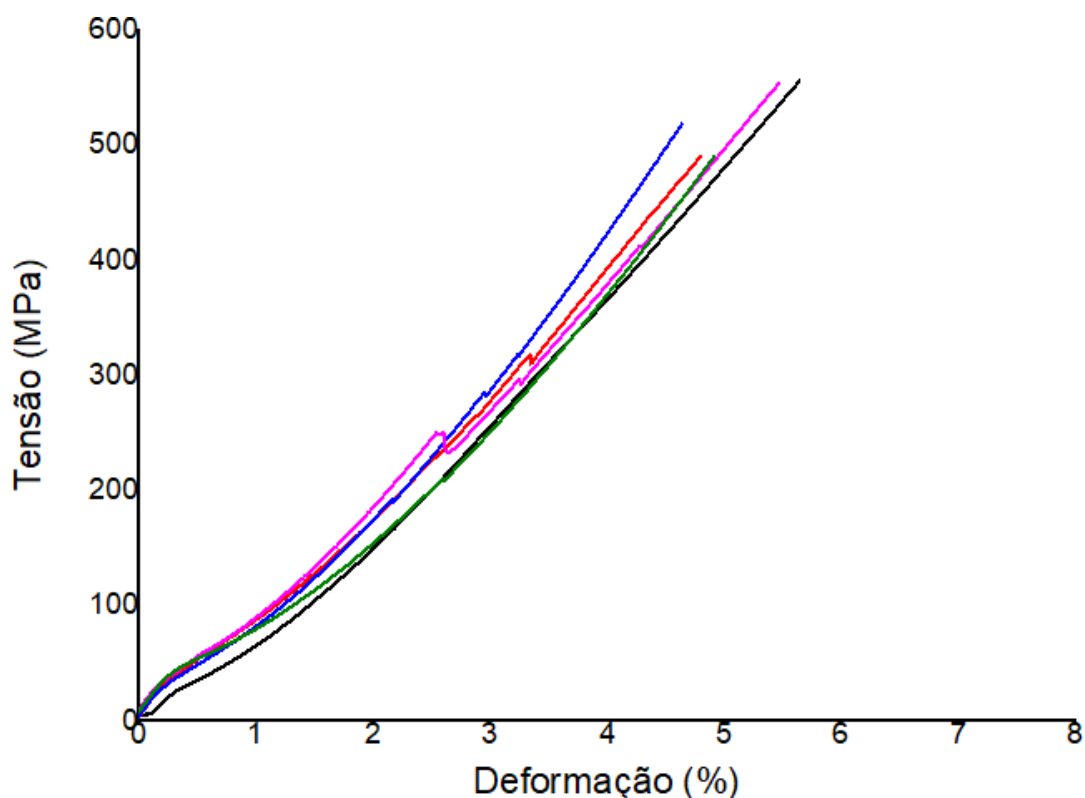
Batista (2017) obteve um valor de $1,29 \text{ g/cm}^3$ e $\pm 0,01$ de desvio padrão, para a densidade volumétrica, com os CP's oriundos de um composto com matriz polimérica (epóxi) com tecido híbrido de carbono e aramida contendo 10 camadas fabricados pelo método *Hand Lay-up*. Tendo em vista que os conjuntos **CAAC** e **TH** obtiveram $1,28 \text{ g/cm}^3$ e $\pm 0,01$, os resultados foram bastante coerentes.

Ambos os valores encontrados para os compósitos híbridos no tecido foram condizentes com a literatura, como por exemplo em Oliveira (2013) que desenvolveu compósitos híbridos carbono/aramida, utilizando fibras de carbono do tipo AS-4 (PAN), fibras de aramida do tipo Kevlar 49 e resina termofixa Derakane 411-350 Ester Vinil Epoxy também com 4 camadas e obteve um valor de densidade volumétrica de $1,27 \text{ g/cm}^3$ para este compósito híbrido específico.

4.2 Ensaio de tração uniaxial

4.2.1 Ensaio de tração uniaxial para os CP's 4C

Neste tópico serão analisados os corpos de prova com 4 camadas de carbono na sua estrutura, onde o Gráfico 1 demonstra os 5 CP's válidos com suas respectivas curvas Tensão x Deformação, a Tabela 3 mostra as principais características mecânicas do compósito e a Figura 22 mostra as rupturas do CP's após a realização do ensaio.

Gráfico 1 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs **4C**.

Fonte: Autoria própria.

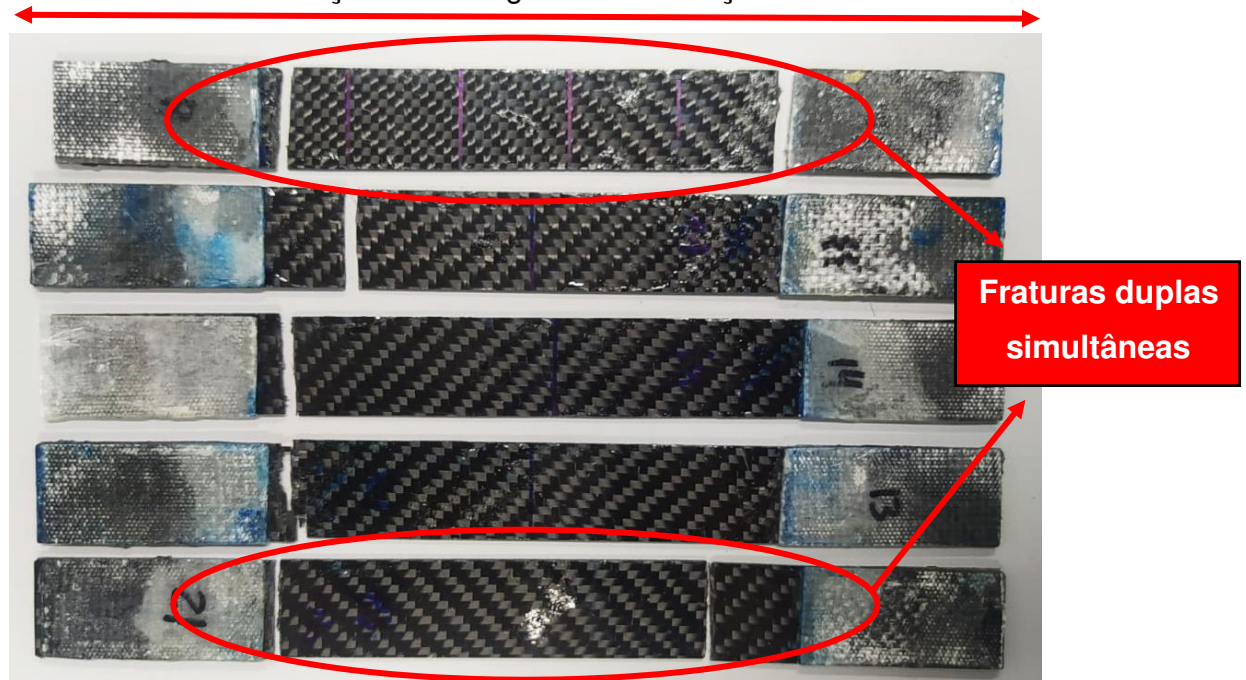
Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos CPs de **4C**.

Propriedade Mecânica	Valor Médio	Desvio Padrão
Tensão Máxima (MPa)	521,44	$\pm 32,32$
Deformação Normal (%)	5,09	$\pm 0,44$
Módulo de Elasticidade (GPa)	8,90	$\pm 0,43$

Fonte: Autoria própria.

Diante dos dados expostos no Gráfico 1 e Tabela 3, é possível observar uma média de 521,44 MPa na tração última, além disto, é notado uma relativa linearidade entre os 5 CP's ensaiados. Também é possível visualizar um módulo de elasticidade bastante satisfatório de 8,90 GPa, com um desvio padrão de $\pm 0,43$ e uma deformação normal de 5,09 % com $\pm 0,44$ de desvio padrão.

Figura 22 – CP's válidos 4C rompidos.
Direção do carregamento de tração



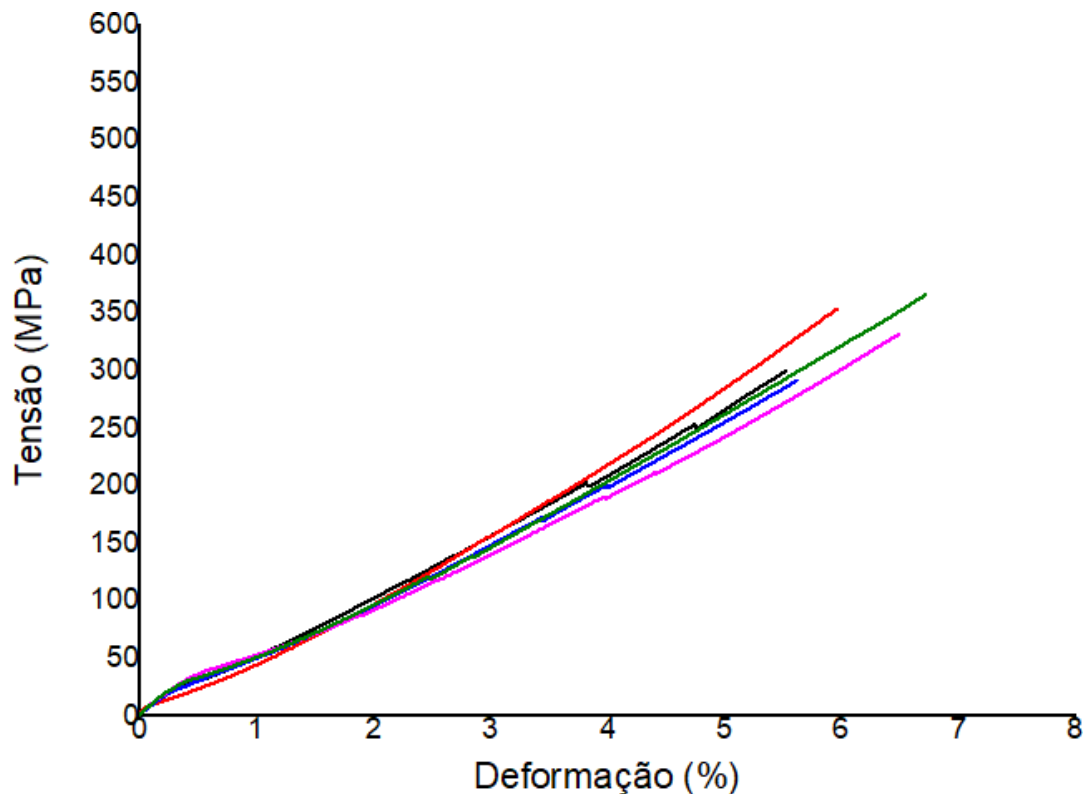
Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 23, é possível observar que todas as fraturas foram do tipo LAT, (lateral na base da lingueta de uma das garras). Esse tipo de fratura é característico de materiais considerados frágeis. Também pela mesma figura é possível perceber que dois CP's romperam em dois lugares do galgo simultaneamente.

Não foi encontrado nada em específico que explique este comportamento (duas fraturas simultâneas), uma das possíveis razões para o acontecido seria a boa homogeneidade dos CP's produzidos, onde a tensão foi distribuída de maneira uniforme por todo o corpo de prova.

4.2.2 Ensaio de tração uniaxial para os CP's 4A

Neste tópico será discutido acerca dos resultados obtidos para o conjunto de CP's do compósito composto por 4 camadas de tecidos de aramida em sua estrutura. O Gráfico 2 mostra os dados de Tensão x Deformação dos 5 CP's válidos, assim como Tabela 4 mostra suas principais características mecânicas e a Figura 23 mostra os mesmo após a realização dos testes rompidos.

Gráfico 2 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs 4A.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos CPs de 4A.

Propriedade Mecânica	Valor Médio	Desvio Padrão
Tensão Máxima (MPa)	328,07	$\pm 32,58$
Deformação Normal (%)	6,06	$\pm 0,53$
Módulo de Elasticidade (GPa)	5,03	$\pm 0,22$

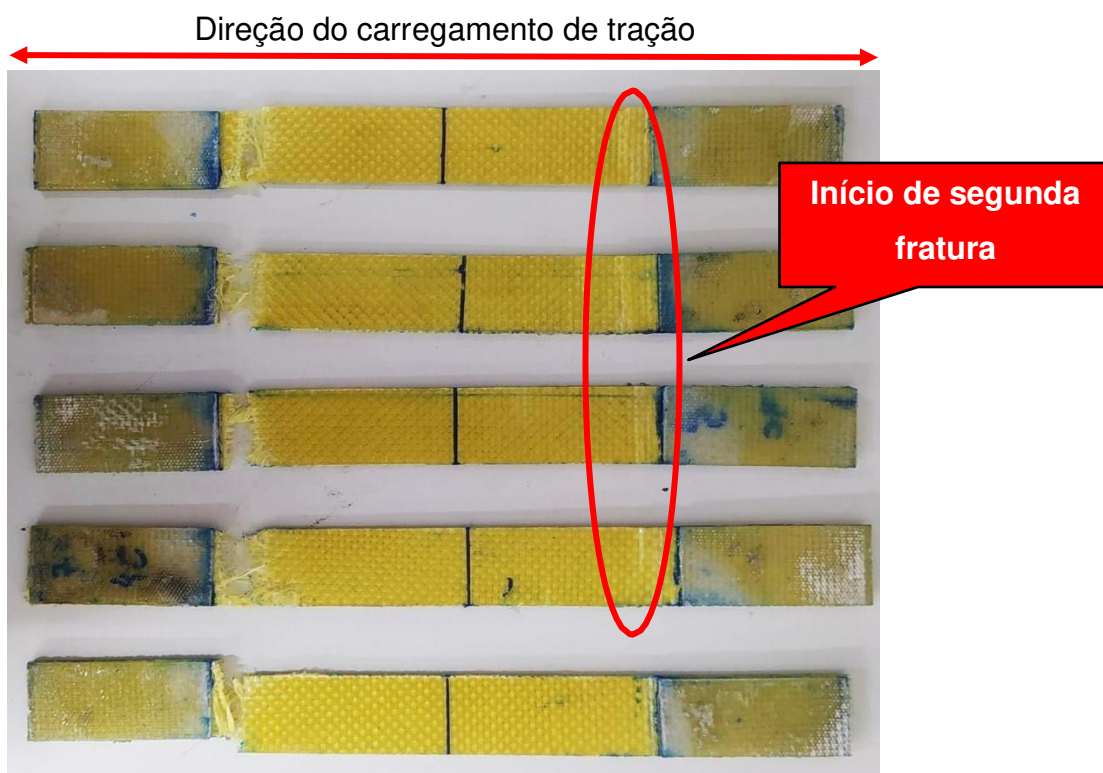
Fonte: Autoria própria.

Para os corpos de prova com 4 camadas de aramida em sua composição, foram obtidos os valores de tensão máxima, deformação normal e módulo de elasticidade de 3,28,07 MPa, 6,06 % e 5,03 respectivamente, com $\pm 32,58$ de desvio padrão para a tensão, $\pm 0,53$ para a deformação e $\pm 0,22$ no módulo de elasticidade

Silva *et al.* (2019) usou o tecido plano de aramida, fornecido pela DuPont®, Kevlar, 440 g/m², como matriz, utilizou a resina epóxi AR260, com endurecedor AH260 (AR/AH 260) e bomba de vácuo para produção de seus compósitos que contaram com 5 camadas da fibra de aramida. Foram obtidos os resultados de 387 MPa no ensaio de tração uniaxial e 15,55 GPa como módulo de elasticidade.

Os bons valores obtidos por Silva *et al.* (2019) são explicados pelos compósitos possuírem um tecido de aramida com alta gramatura, utilização de bomba de vácuo (reduzindo o percentual de resina), o que ocasiona em um aperfeiçoamento do balanceamento resina/fibra na estrutura do compósito, além de uma camada a mais em seus CP's, fatores como estes corroboram para um aprimoramento dos resultados.

Figura 23 - CP's válidos **4A** rompidos.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 23, é possível notar que todas as fraturas foram do tipo LAT, (lateral na base da lingueta de uma das garras). Também pela mesma figura é possível perceber que 4 CP's apresentaram o início de uma segunda fratura na outra extremidade do galgo, como destacado.

Como explicado no tópico anterior, uma das possíveis razões para o acontecido seria a boa homogeneidade dos CP's produzidos, onde a tensão foi distribuída de maneira uniforme por todo o corpo de prova.

4.2.3 Comparativo 4C x 4A

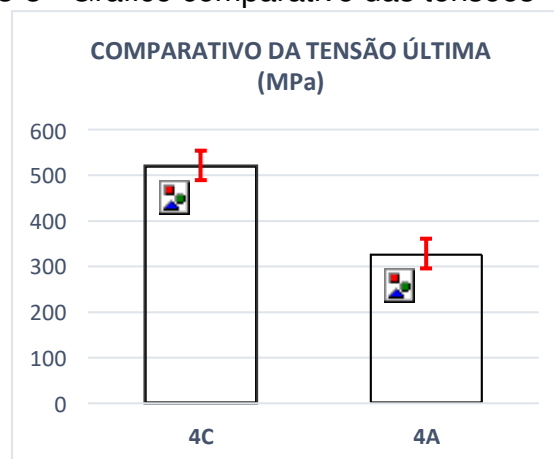
Separando e comparando os dois compósitos em questão, é possível notar que o compósito **4C** obteve um valor de 521,44 MPa de média para a tração última, já o

compósito **4A** alcançou um valor de 328,07 MPa em média, se configurando assim como um valor maior de 58,94% na tensão última à tração do compósito **4C** em relação ao **4A**. Fato este esperado, visto que a fibra de carbono é mais resistente neste tipo de ensaio, devido suas vantagens e características. Os dados em questão são expostos no Gráfico 3.

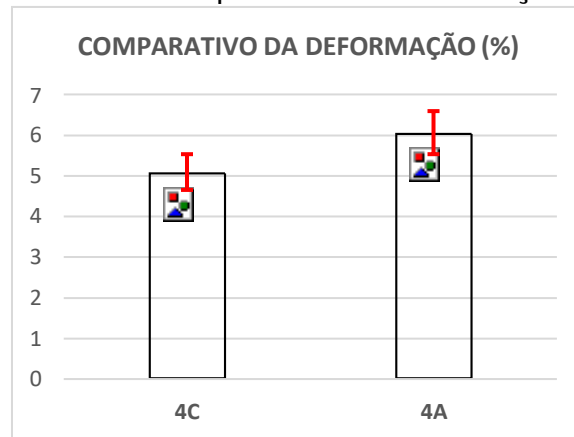
Levando em consideração a deformação normal, o compósito **4A** obteve um valor de 6,06 %, em contra partida, o compósito **4C** apresentou 5,09 %, o que representa um total de 0,97% a mais do compósito **4A** em relação ao compósito **4C**, visto que a fibra aramida contém a característica de se deformar mais antes do rompimento (menor módulo de elasticidade), os valores encontrados para este ponto foram bastante satisfatórios. Os detalhes estão expostos no Gráfico 4.

Já se tratando do módulo de elasticidade, o compósito **4C** após os testes apresentaram como média um valor de 8,90 GPa, já o compósito **4A** obteve 5,03 GPa de média. Levando estes dados em consideração, o compósito **4C** obteve um valor 76,94% maior do que o compósito **4A**, fato este também já esperado. O Gráfico 5 ilustra os dados comentados.

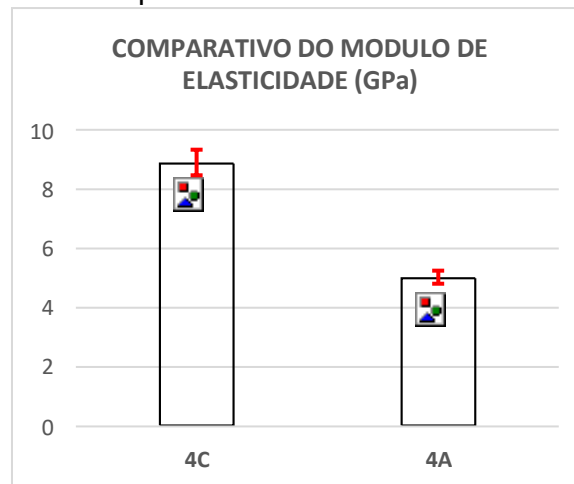
Gráfico 3 - Gráfico comparativo das tensões **4C** x **4A**.



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 4 - Gráfico comparativo das deformações 4C x 4A.

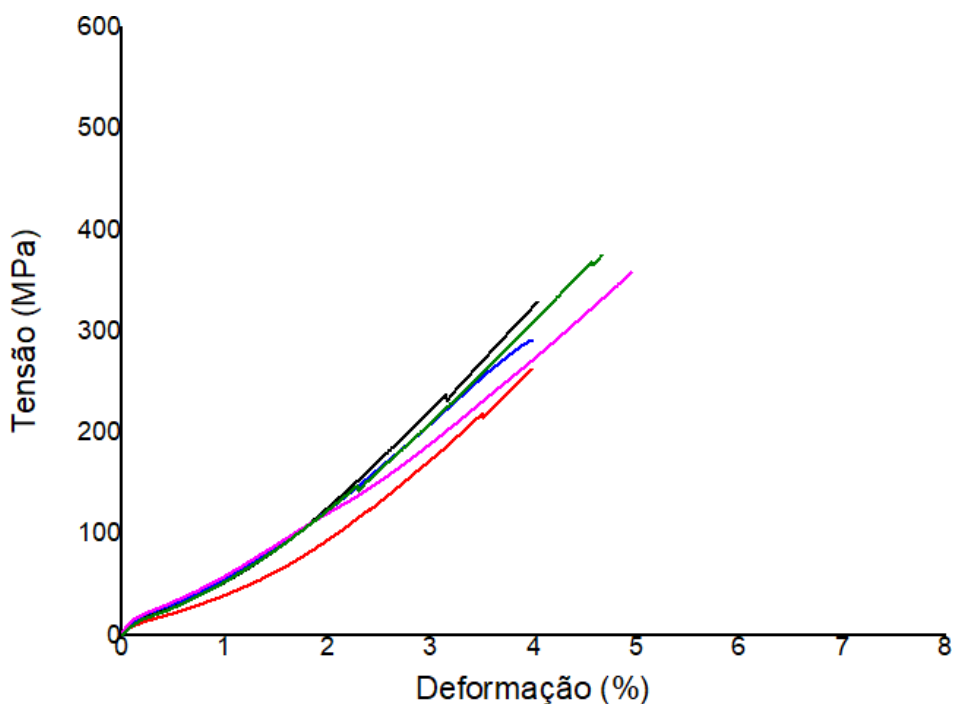
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 5 - Gráfico comparativo dos módulos de elasticidade 4C x 4A.

Fonte: Autoria própria.

4.2.4 Ensaio de tração uniaxial para os CP's CAAC

O Gráfico 6 mostra o desempenho dos 5 CP's válidos para o conjunto de compósito com duas camadas de Carbono nas extremidades e duas camadas de aramida ao centro (**CAAC**), e a Figura 24 mostra os mesmos depois de rompidos, demonstrando além de válidos os seus tipos de fraturas, a Tabela 5 demonstra os valores obtidos para tensão máxima, deformação normal e módulo de elasticidade respectivamente.

Gráfico 6 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs **CAAC**.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas dos CPs de **CAAC**.

Propriedade Mecânica	Valor Médio	Desvio Padrão
Tensão Máxima (MPa)	323,10	$\pm 46,44$
Deformação Normal (%)	4,32	$\pm 0,45$
Módulo de Elasticidade (GPa)	6,29	$\pm 0,63$

Fonte: Autoria própria.

De acordo com o Gráfico 6 e Tabela 5, os CP's de **CAAC** obtiveram uma relativa dispersão entre eles no quesito tensão máxima, fato este visível no desvio padrão apresentado ($\pm 46,44$), com um valor médio de tensão máxima de 323,10 MPa. Para a deformação normal foi obtido 4,32 % de média, com desvio padrão de $\pm 0,45$. Já para o módulo de elasticidade, o valor de médio de 6,29 GPa foi atingido pelos CP's, com $\pm 0,63$ de desvio padrão.

Silva *et al.* (2020) utilizou o tecido RKC165P o qual produz um laminado altamente resistente com 50% de fibras de carbono e 50% de fibras aramidas, com um peso nominal de 165 g/m², a resina e endurecedor AR 260 e AH 260, na proporção de 100 gramas de resina para 26 gramas de endurecedor, compósito com 5 camadas. O mesmo utilizou bomba de vácuo para

a produção de todos os CP's, e montou dois tipos de CP's, um que passou por processo de pós-cura a 80°C por um período de 6 horas e o outro não.

O mesmo obteve médias de 347,34 MPa para os CP's sem pós cura e 338,56 com pós cura para a tensão máxima à tração. Para o módulo foram encontrados 10,30 GPa para os CP's sem pós cura e 15,60 GPa com pós cura.

Os resultados obtidos se justificam por ser usado um tecido que tinha os dois tipos de fibra na direção do carregamento, pela utilização da bomba de vácuo (redução do percentual de resina) e pelo processo de pós cura pelo qual os CP's foram submetidos.

Figura 24 - CP's válidos **CAAC** rompidos.

Direção do carregamento de tração



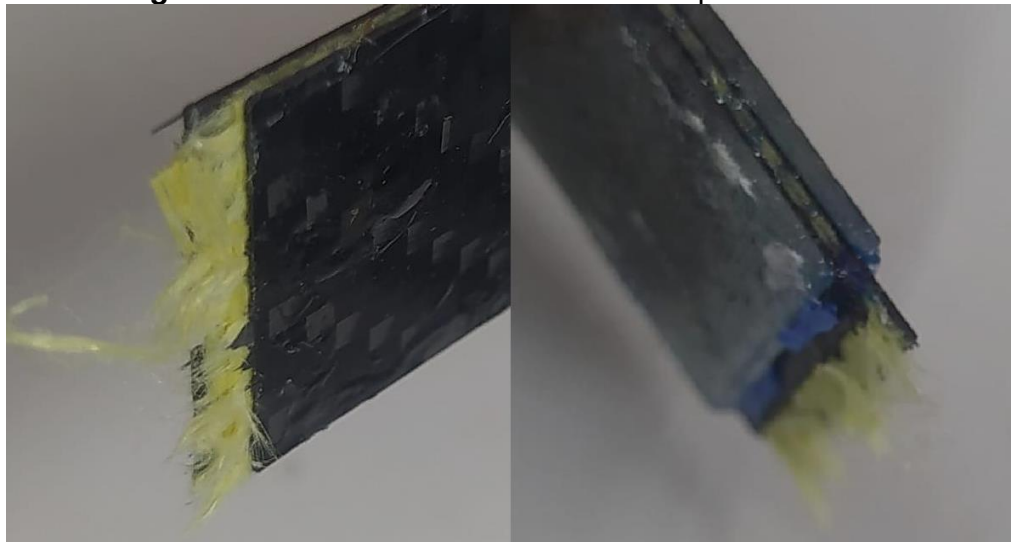
Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 24, é possível perceber que todas as fraturas foram do tipo LAT, (lateral na base da lingueta de uma das garras). Esse tipo de fratura é característico de materiais considerados frágeis. Através da Figura 25 é detalhado como ocorreu a fratura destes CP's, as camadas de carbono não se romperam linearmente.

Não foi encontrado nada que explique de forma clara o motivo deste tipo de fratura, uma das possíveis razões seria a transferência de tensão das fibras de aramida ao centro, para dois pontos distintos das fibras de carbono externas.

Possivelmente, a fratura da fibra de aramida, que como suporta uma menor resistência (mostrado no tópico 4.2.3 Comparativo 4C x 4A e Gráfico 3), gerou uma grande deformação de forma repentina, distribuindo a tensão suportada pelas fibras de aramida no centro, para as fibras de carbono externas, gerando pontos distintos de falha nas camadas externas.

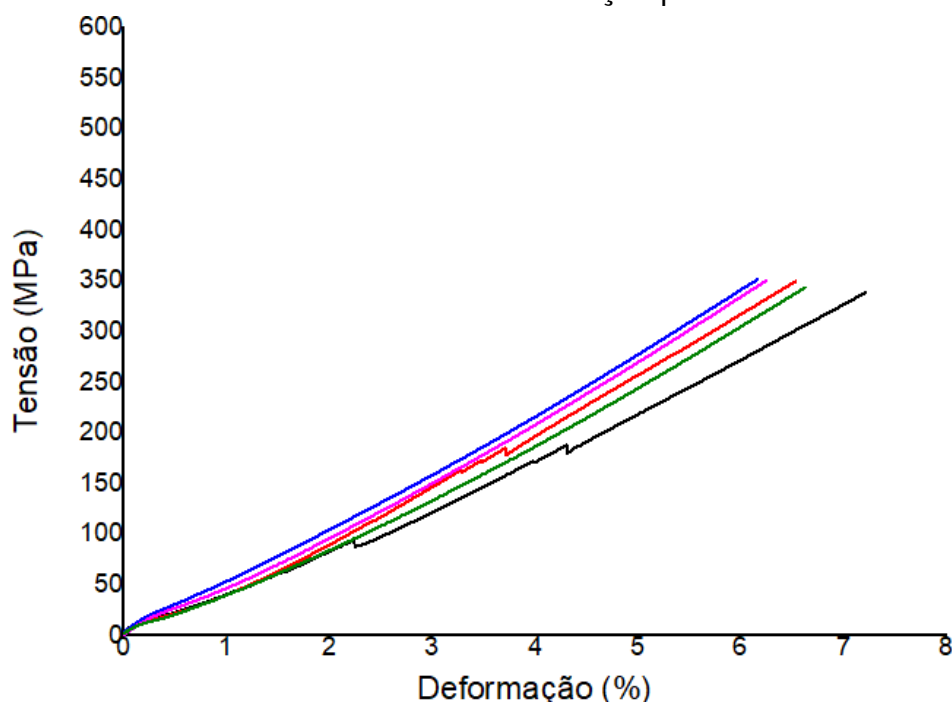
Figura 25 – Detalhes da fratura dos compósitos **CAAC**.



Fonte: Autoria própria.

4.2.5 Ensaio de tração uniaxial para os CP's THA

Neste tópico será discutido acerca dos resultados obtidos para o conjunto de CP's do compósito poliméricos composto por 4 camadas de tecido híbrido carbono/aramida em sua estrutura, onde a direção da carga de tração foi no sentido longitudinal das fibras de aramida. O Gráfico 7 mostra os dados de Tensão x Deformação dos 5 CP's válidos, assim como a Figura 26 mostra os mesmos após a realização dos testes rompidos e a Tabela 6 mostra os valores médios para a tensão máxima suportada, a deformação normal e o módulo de elasticidade.

Gráfico 7 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs **THA**.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas dos CPs de **THA**.

Propriedade Mecânica	Valor Médio	Desvio Padrão
Tensão Máxima (MPa)	346,52	±5,63
Deformação Normal (%)	6,56	±0,41
Módulo de Elasticidade (GPa)	4,84	±0,39

Fonte: Autoria própria.

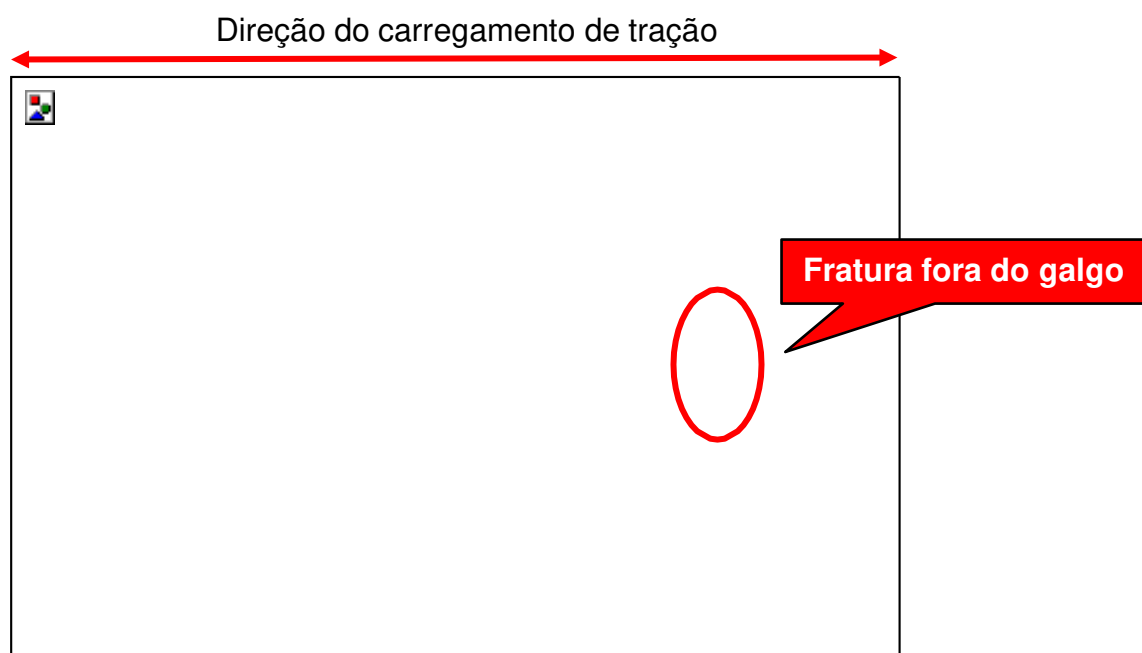
Levando em consideração o Gráfico 7 e a Tabela 6, é facilmente notável que este compósito foi um dos que obtiveram os resultados mais alinhados entre os 5 CP's válidos, fato este visível em seus baixos desvios padrões.

Oliveira (2013) utilizou o tecido híbrido CKS-220, gramatura 220 g/m², contendo 55% de fibra de carbono e 45% de fibra de aramida, com tecelagem tipo sarja, onde obteve 365,87 MPa de resistência última e 9,33 GPa de módulo de elasticidade, sendo este conjunto de compósitos ensaiados no sentido da aramida na direção de carregamento do ensaio de tração, tendo como processo de fabricação o *Hand Lay-up*.

Batista (2017) desenvolveu compósitos híbridos pelo processo de moldagem manual (*Hand Lay-up*) contendo 10 camadas de tecidos tipo sarja 2x2 empilhados

com gramatura de 200 g/m² cada e resina Epóxi Ester Vinílica como matriz, os CP's foram submetidos ao ensaio de tração na direção da aramida no carregamento, onde foram obtidos os resultados de 393,52 MPa para a resistência à tração e 6,36 GPa de módulo de elasticidade.

Figura 26 - CP's válidos **THA** rompidos.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 26, é possível observar que 4 das fraturas foram do tipo LAT, (lateral na base da lingueta de uma das garras), e uma do tipo LGM (Lateral e no meio do galgo). Esses tipos de fraturas são característicos de materiais considerados frágeis.

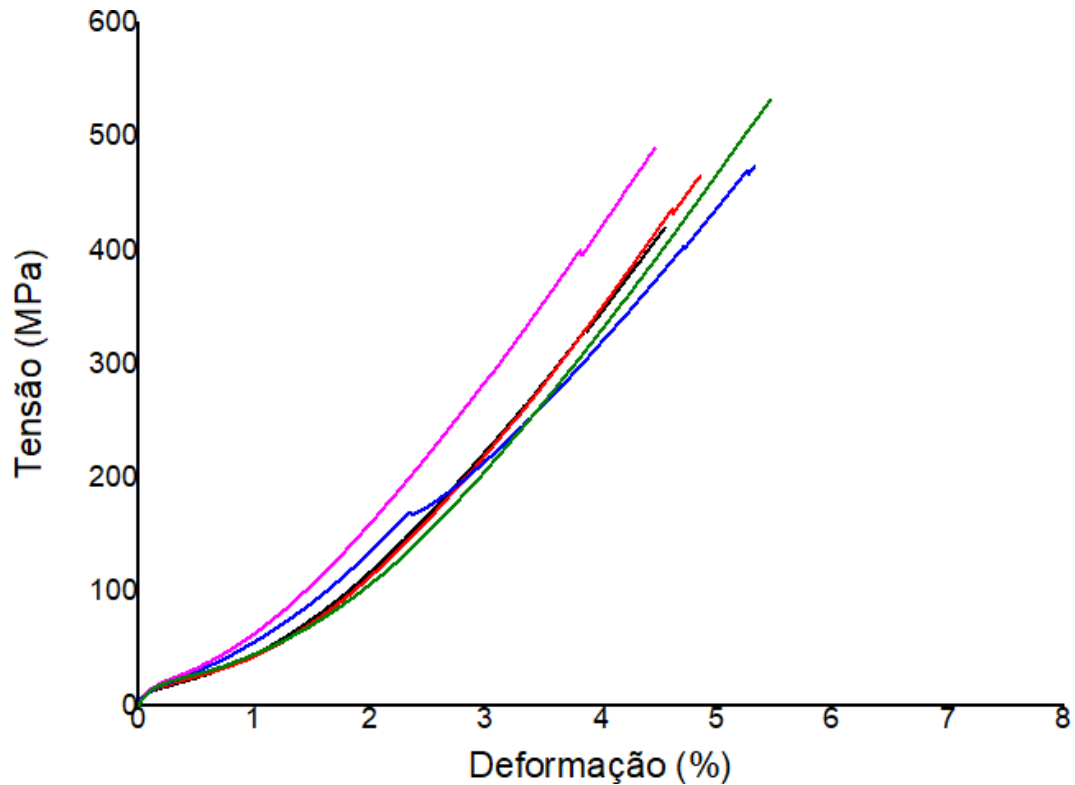
Vale salientar também que um dos 5 CP's rompeu de maneira simultânea dentro e fora do galgo (provavelmente pela boa homogeneidade dos CP's), porém a norma ASTM D 3039 (2014) não comenta sobre esta situação e, portanto, o mesmo foi considerado válido para o ensaio.

4.2.6 Ensaio de tração uniaxial para os CP's THC

Nesta seção, será discutido acerca dos resultados obtidos para o conjunto de CP's do compósito composto por 4 camadas de tecido híbrido carbono/aramida em sua estrutura, onde a direção da carga de tração foi no sentido longitudinal das fibras de carbono. O Gráfico 8 mostra os dados de Tensão x Deformação dos 5 CP's válidos,

a Tabela 7 ilustra os valores das principais propriedades mecânicas, assim como a Figura 27 mostra os mesmos após a realização dos testes rompidos.

Gráfico 8 - Gráfico Tensão x Deformação para os CPs **THC**.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas dos CPs de **THC**.

Propriedade Mecânica	Valor Médio	Desvio Padrão
Tensão Máxima (MPa)	476,13	$\pm 40,83$
Deformação Normal (%)	4,93	$\pm 0,45$
Módulo de Elasticidade (GPa)	7,75	$\pm 0,75$

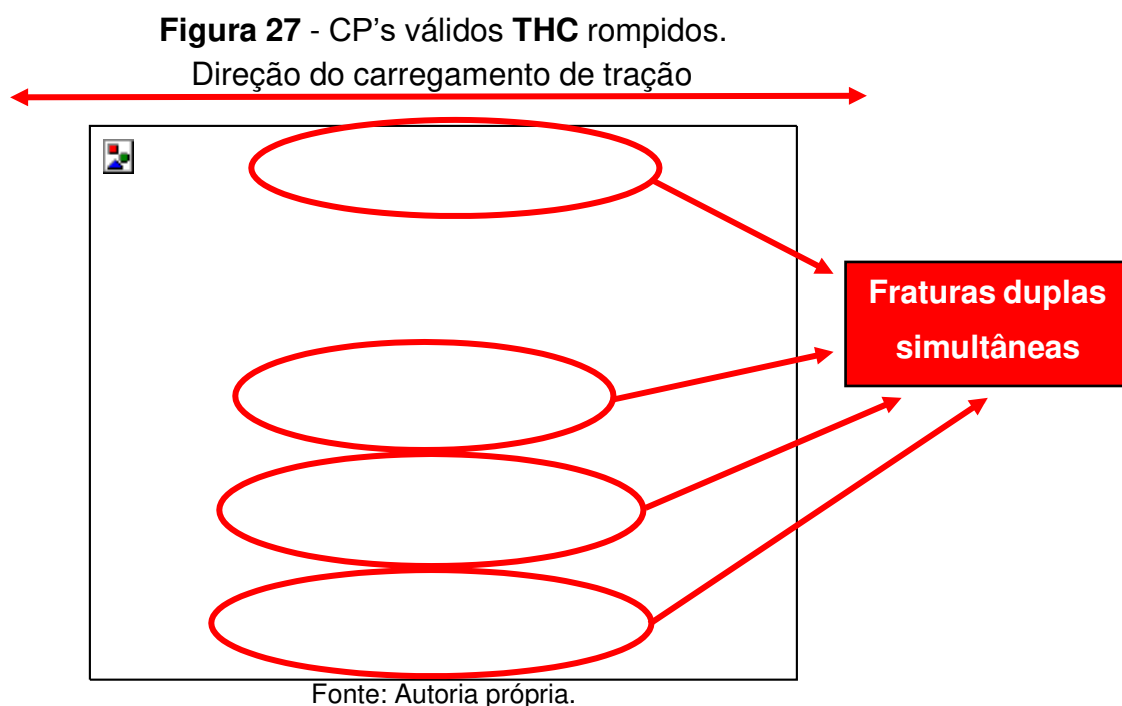
Fonte: Autoria própria.

Analisando o Gráfico 8 juntamente com a Tabela 7, é possível notar que o compósito **THC** obteve os valores médios para a tensão máxima suportada e para o módulo de elasticidade de $476,13 \pm 40,83$ e $7,75 \pm 0,75$ respectivamente, por fim, obteve uma deformação normal de exatos $4,93\% \pm 0,45$.

Em Batista (2017) que desenvolveu compósitos híbridos pelo processo *Hand Lay-up* contendo 10 tecidos tipo sarja 2x2 empilhados, com gramatura de 200 g/m^2

cada e resina Epóxi Ester Vinilica como matriz, foi obtido 297,41 MPa de resistência última e 6,89 GPa de módulo de elasticidade.

Oliveira (2013) utilizou o tecido híbrido CKS-220, gramatura 220 g/m², contendo 55% de fibra de carbono e 45% de fibra de aramida, com tecelagem tipo sarja, obtendo valores de 410,68 MPa para a tensão última e 17,06 GPa para o módulo de elasticidade. Todos os seus CP's continham 4 camadas do tecido mencionado e processo de fabricação *Hand Lay-up*.



Uma das possíveis razões para as fraturas duplas simultâneas (Figura 27) seria a boa homogeneidade dos CP's produzidos, onde a tensão foi distribuída de maneira uniforme por todo o corpo de prova, não foi encontrado nada concreto que explique esse fenômeno.

4.3 Análise da influência da anisotropia

Tendo em vista e isolando os resultados da tensão máxima, deformação normal e módulo de elasticidade obtidos pelos compósitos híbridos **THA** e **THC**, é possível avaliar de forma quantitativa, o nível de influência que a anisotropia exerceu para este par de compósito híbridos analisados, os resultados finais foram deduzidos tendo como base a análise de gráficos e tabelas, além do comportamento das fibras dos compósitos que os constituem. As análises e comparativos são mostrados a seguir.

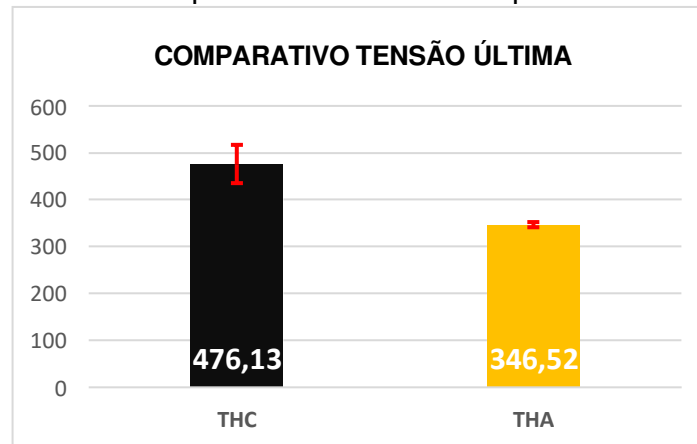
Se tratando da tensão máxima, o compósito **THC** obteve um resultado médio de 476,13 MPa, enquanto que o compósito **THA** obteve média de 346,52 MPa, o que representa um aumento de 37,40% do **THC** em relação ao **THA**. Por característica, e dentre as vantagens das fibras de carbono, está a sua elevada resistência a tração, portanto, os compósitos onde a carga de tração foi aplicada no sentido longitudinal das fibras de carbono obtiveram uma melhor performance em relação ao compósito onde a carga de tração era aplicada no sentido longitudinal das fibras de aramida, diante disso, os resultados apresentados foram coerentes e satisfatórios. No Gráfico 9 esses dados de tensão foram isolados e ilustrados de uma maneira mais detalhada.

Levando em consideração a deformação normal, os dados obtidos foram os seguintes: 6,56 % de média para o compósito **THA**, enquanto o compósito **THC** obteve 4,93% de deformação média, portanto, o compósito **THA** que teve o carregamento de tração no sentido longitudinal das fibras de aramida obteve uma deformação 1,63% maior, que também é coerente com a literatura, pelo fato da aramida possuir características de maior tenacidade do que a fibra de carbono. No Gráfico 10 é mostrado os detalhes desta abordagem.

Se tratando do módulo de elasticidade dos dois compósitos em questão, o compósito **THA** obteve um módulo de elasticidade médio de 4,84 GPa, enquanto que o **THC** alcançou um módulo médio de 7,75 GPa (o maior encontrado em todos os compósitos analisados nesta pesquisa), o que configura um ganho de 60,12% do módulo de elasticidade do compósito **THC** em relação ao **THA**. Pelo fato de a fibra de carbono possuir normalmente um maior módulo que a fibra de aramida, os valores encontrados neste caso, estão coerentes com a literatura. O Gráfico 11 ilustra os dados expostos nesta análise.

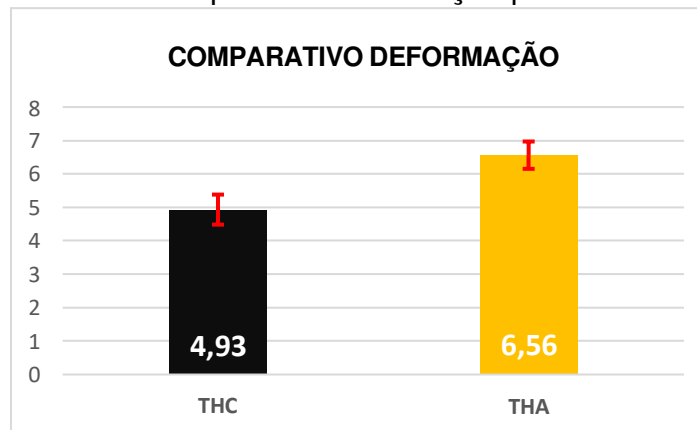
Dado o exposto, é possível notar claramente a influência da anisotropia em todas as características mecânicas avaliadas, pois a mesma se caracteriza pela dependência da resposta mecânica do laminado em função da orientação da fibra com relação à direção da carga aplicada. As características principais das fibras em questão (carbono e aramida) quando submetidas na direção da carga de tração em seu sentido longitudinal foram determinantes.

Gráfico 9 - Gráfico comparativo tensão última para os CPs **THC** x **THA**.



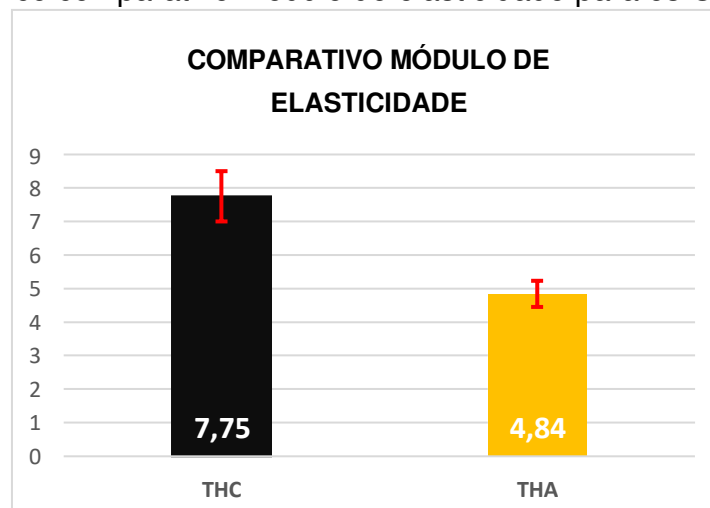
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 10 - Gráfico comparativo deformação para os CPs **THC** x **THA**.



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 11 - Gráfico comparativo módulo de elasticidade para os CPs **THC** x **THA**.



Fonte: Autoria própria.

4.4 Comparativos gerais

Dado o exposto, pelas análises feitas de todos os conjuntos de compósitos de maneira isolada, foi também realizado o estudo de suas características e resultados obtidos de maneira simultânea, através de gráficos, comparativos e discursões acerca dos seus valores e propriedades mecânicas apresentadas.

No que diz respeito a tensão última de tração, o compósito que alcançou o melhor resultado foi o **4C**, com um valor médio de 521,44 MPa com desvio padrão de $\pm 32,32$, logo em seguida foi o compósito **THC** com 476,13 MPa e desvio padrão $\pm 40,83$, segundo maior desvio padrão, o que remete a uma dispersão entre os CP's válidos. É possível notar que os dois compósitos com maiores tensões foram os que possuíam carbono na direção da carga de tração.

O valor médio de 346,52 obtido para os CP's **THA**, representa um aumento de 7,25% em relação ao compósito também híbrido **CAAC**. Vale salientar que no compósito **THA** sua hibridização acontece no próprio tecido, entre as fibras de carbono e aramida em seu urdume e trama, enquanto que o compósito **CAAC** a hibridização é vista em suas camadas, com cada camada de uma única fibra. O que se pode concluir é que a hibridização no tecido, quando se tratando de tensão máxima, é levemente mais eficaz que a hibridização na camada, neste caso.

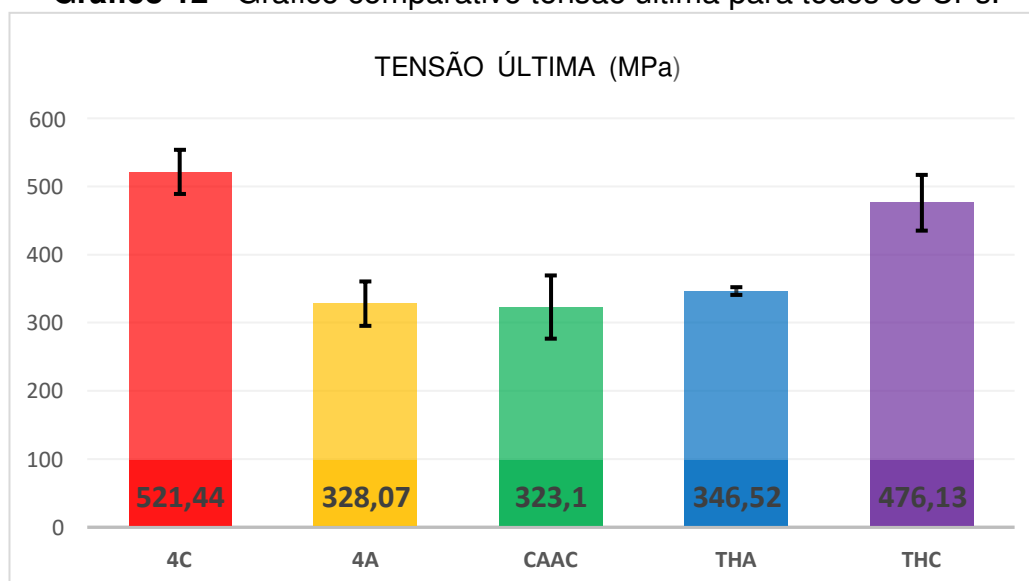
O terceiro compósito neste quesito foi o **THA**, com um valor médio de 346,52 MPa e desvio padrão $\pm 5,63$, o menor desvio entre todos os compósitos ensaiados. O penúltimo compósito foi o **4A** que alcançou uma média de 328 MPa e desvio padrão $\pm 32,58$ e por fim, o que apresentou a menor tensão de tração foi o compósito híbrido na camada **CAAC**, que obteve uma resistência última a tração de 323,10 MPa com desvio padrão de $\pm 46,44$, também é possível notar um desvio padrão alto entre suas amostras.

O compósito **THA** apresentou um pequeno ganho de 5,62% em relação ao **4A**, se tratando da resistência a tração, assim como outro pequeno ganho de 7,25% em relação ao compósito **CAAC**, neste caso, nenhum tipo de hibridização surtiu uma diferença considerável.

O compósito **CAAC** não apresentou diferença significativa em relação ao compósito **4A**, visto seus valores foram praticamente iguais, portanto, esse tipo de hibridização não se mostrou interessante para resistência a tração.

Foi percebido um efeito bastante positivo da hibridização se tratando do compósito **THC** em relação a tensão última, pois, ao trocar metade das fibras de aramida por carbono e colocar a direção do carbono no sentido de solicitação de tração, foi percebido um ganho de 45,13% na tensão última de tração em relação ao compósito **4A**, que possui apenas aramida na sua composição, e ao se atentar ao compósito **4C** não existe uma diferença significativa em relação a esta característica. Portanto, além de baratear o material, existe um ganho significativo desta propriedade (resistência à tração) do compósito **THC** em relação ao compósito **4A**. O Gráfico 12 ilustra todas as tensões alcançadas.

Gráfico 12 - Gráfico comparativo tensão última para todos os CPs.



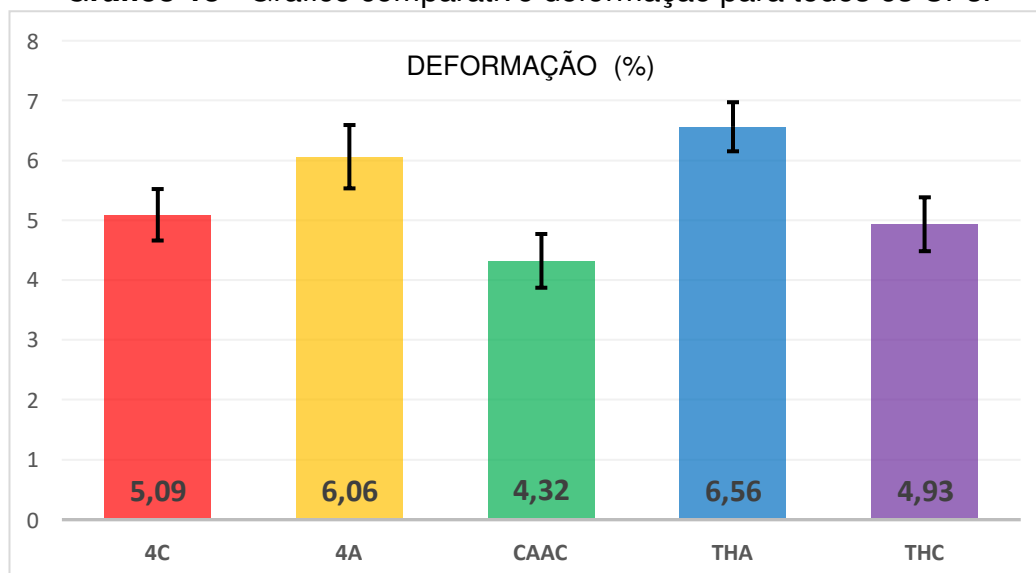
Fonte: Autoria própria.

Tendo a deformação normal em foco, o compósito que apresentou a maior deformação foi o **THA** com $6,56\% \pm 0,41$, em seguida o compósito **4A** com deformação com valor de $6,06\% \pm 0,53$, semelhante ao visto no tópico anterior, as duas maiores deformações se apresentam nos compósitos com aramida na sua composição, mais um reflexo das características das fibras no qual estão em tração diretamente.

Analisando a deformação do **THA**, é possível enxergar que a mesma é 2,24% maior que a encontrada no compósito **CAAC**, pois a deformação encontrada no compósito **THA** foi de 6,56%, enquanto que no compósito **CAAC** a sua deformação foi de 4,32%.

A terceira maior deformação foi do compósito **4C** com 5,09% $\pm 0,43$, seguido dos dois últimos compósitos com menores deformações, que são, o **THC** e o **CAAC**, com 4,93% $\pm 0,45$ e 4,32% $\pm 0,45$ respectivamente. É possível perceber que todos os compósitos apresentaram baixos desvios padrões. Todas essas análises e valores comentados podem ser encontrados no Gráfico 13.

Gráfico 13 - Gráfico comparativo deformação para todos os CPs.



Fonte: Autoria própria.

Por fim, foram analisados todos os módulos de elasticidade dos compósitos ensaiados. O compósito com o maior módulo de elasticidade foi o **4C** com um valor médio de 8,90 GPa $\pm 0,43$, em seguida o compósito **THC** com média de 7,75 GPa $\pm 0,75$. O próximo ranqueado ficou abaixo, de maneira significativa (18,84% menor), onde o compósito **CAAC** obteve 6,29 GPa $\pm 0,63$.

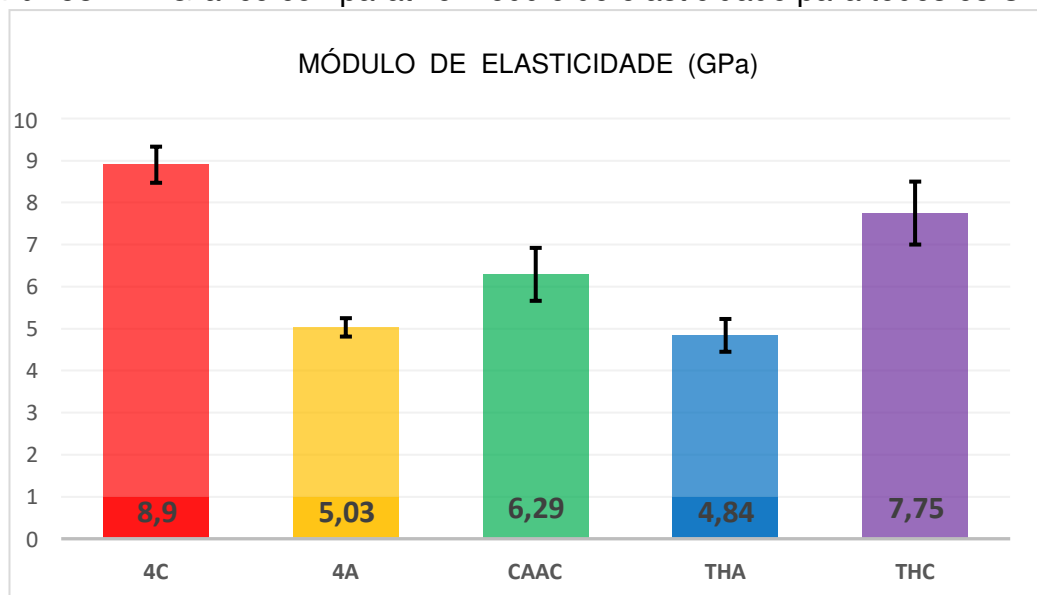
Ao analisar o compósito **THC** em relação ao **4A**, é possível perceber uma grande vantagem da hibridização, pois ao substituir metade das fibras de aramida por fibras de carbono é notável um ganho de 54,07% em relação ao módulo de elasticidade, e apenas uma diferença de 12,92% em relação ao **4C**. Portanto, a

hibridização neste caso é bastante vantajosa, visto que, além de baratear o material, ainda é percebido melhoras significativas desta característica mecânica (módulo de elasticidade) do compósito **THC** em relação ao **4A**.

Ao comparar os CP's **CAAC** e **4A**, é possível perceber que houve um ganho de 25,05% do módulo de elasticidade do **CAAC** em relação ao **4A**, porém, o **THA** não obteve resultados significativos nesta propriedade, visto que seus valores foram muito próximos, portanto, a hibridização se mostrou eficaz e vantajosa para dois dos 3 compósitos estudados no quesito módulo de elasticidade.

Por fim os dois últimos com os menores módulos de elasticidade foram o **4A** e o **THA** com 5,03 GPa $\pm 0,22$ e 4,84 GPa $\pm 0,39$ respectivamente. Neste caso, é possível concluir que estes dois compósitos não apresentaram uma diferença significativa entre eles, vale salientar que ambos possuem a fibra de aramida na direção do carregamento de tração e sentido longitudinais de suas fibras. Todos os dados foram separados e ilustrados no Gráfico 14 a seguir.

Gráfico 14 - Gráfico comparativo módulo de elasticidade para todos os CPs.



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÕES

Diante das análises e testes realizados nos compósitos durante todo o percurso do projeto, é correto afirmar que a hibridização, tanto na camada quanto no tecido, influencia diretamente no comportamento mecânico em todas as propriedades mecânicas analisadas.

O objetivo de produzir e ensaiar compósitos híbridos para avaliar a influência da anisotropia em suas propriedades mecânicas, assim como o objetivo de estudar através de gráficos e análises os resultados obtidos mediante os testes de tração (ASTM D3039, 2014) e densidade volumétrica (ASTM D792, 2008) foram alcançados.

As propriedades e situações apresentadas e testadas, de acordo com a organização do tipo de compósito escolhido em várias configurações foram bastantes interessantes e promissoras, visto que para cada situação específica há de haver um compósito que à atenda.

Diante disso, as principais considerações acerca das propriedades mecânicas discutidas são:

- O compósito mais denso foi o **4C** (1,34 g/cm³), o menos denso foi o **4A** (1,22 g/cm³). As densidades dos compósitos híbridos **CAAC** e **TH** foram exatamente os mesmos (1,28 g/cm³), o que já era esperado, visto que foram utilizados os mesmos tecidos nas mesmas proporções.
- O compósito com maior resistência a tração foi o **4C**, com média de 521,44 MPa de resistência à tração e desvio padrão de $\pm 32,32$;
- O compósito que obteve o maior módulo de elasticidade também foi o **4C** com 8,90 GPa;
- Ao substituir metade das fibras de aramida por fibras de carbono (**THC**), foi notado um aumento de 45,13% na resistência última a tração, em relação ao **4A**, e não houve perdas significativas em relação ao compósito **4C**;
- Ao substituir metade das fibras de aramida por fibras de carbono (**THC**), foi notado um aumento de 54,07% do módulo de elasticidade em relação ao **4A**, havendo uma pequena diferença em relação ao compósito **4C**;

- A hibridização se mostrou bastante eficaz para as propriedades: resistência última à tração e módulo de elasticidade, quando comparado ao compósito **4A**;
- O compósito **CAAC** obteve um ganho de 25,05% do módulo de elasticidade em relação ao **4A**;
- O compósito com maior deformação normal apresentada foi o **THA** com 6,56%;
- O efeito da anisotropia foi bastante evidente nos compósitos híbridos produzidos, onde houve um aumento de 37,40% do **THC** em relação ao **THA** na resistência última, uma deformação 1,63% maior do **THA** em relação ao **THC** e por fim, um ganho de 60,12% do módulo de elasticidade do compósito **THC** em relação ao **THA**. Ao se tracionar no sentido das fibras de carbono, as características desta fibra se sobressaiam, o mesmo acontece no sentido das fibras de aramida.

Com a realização deste projeto, foi possível notar claramente a influência da anisotropia em todas as características mecânicas avaliadas. Como visto, os materiais produzidos tem um grande potencial de agregar ainda mais na área da engenharia, onde cada vez mais se faz necessário novos materiais e métodos deste tipo, afim de se atender uma demanda cada vez mais específica, portanto, a pesquisa realizada se mostrou bastante relevante, como possível banco de dados para tentar resolver problemas futuros.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOU, T. R. TENÓRIO, J. A. S. ROMANO, D. C. E. Caracterização de um compósito polimérico reforçado com fibras de carbono visando a recuperação das fibras de carbono. **Abm Week**, In: 70º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 17-21 de agosto de 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

AGUIAR, L. L. S. **Fabricação de compósitos e ensaios de absorção de água para aplicações em embarcações**. 2018. 57 f. Monografia (Ciência e Tecnologia). Universidade Federal Rural do Semiárido, Caraúbas, 2018.

AQUINO, R. C. M. P.; D'ALMEIDA, J. R. M; MONTEIRO, S.N. **Análise do Compósito de Piaçava/Resina poliéster, como substituto da Madeira**. In: 60º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 24-27 de julho de 2005, Belo Horizonte, MG, Brasil.

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

ASTM D3878. **Standard Terminology for composite materials**. ASTM International, 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, 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, 2017.

BOTELHO, R. S. **Influência do método de preparação da fibra de Curauá nas propriedades**. Universidade do Estado do Amazonas. Manaus, p. 59. 2017.

BERNARDI, S. T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida Kevlar**. 2003. 179 f. Dissertação (Mestre em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BRANQUINHO, T. E. L. **Processamento e Caracterização de Compósitos com Fillers de Argila Expandida**. 2017. 128 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Designer de Produto). Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, 2017.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. 8. ed. 2014. Sérgio Murilo Stamile Soares.

CHAWLA, K. K. Fibrous materials. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

FELIPPES, B. A. **Estudo do comportamento mecânico de dutos de aço com reparos compósitos híbridos**. 2010. 227 f. Dissertação (Mestre em Ciências Mecânicas). Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2010.

FLINN, R. A., Trojan, P. 1990. Engineering Materials and Their Applications. s.l. : John Wiley & Sons, Inc, 1990.

FONTES, R. S. **Compósitos poliméricos reforçados por tecidos multiaxiais acoplados: anisotropia, configuração e concentração da deformação**. 2017. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

FONTES, R. S. **Compósito polimérico híbrido: comportamento mecânico, descontinuidade geométrica e resistência residual**. 2013. 81 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2013.

GOMES, M. A. **Propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados com fibras de folhas de abacaxizeiro (palf)**. 2015. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2015.

GUIMARÃES, F. A. **Avaliação das propriedades mecânicas de um compósito híbrido de matriz termoplástica PPS reforçado com fibras de carbono contínuas e descontínuas**. 2018. 111 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

HERTER, F. F. **Desempenho de compósitos tri-componente époxi/fibra de vidro/hidróxidos duplos lamelares**. 2010. 66 f. Monografia (Engenharia de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

HULL, D. An Introduction to composite Materials. Cambridge: Ed. Cambridge University Press, 1988. 246 p.

LEÃO, R. M. **Tratamento superficial de fibra de coco e aplicação em materiais compósitos como reforço do polipropileno**. Universidade de Brasília. [S.l.], p. 74. 2012.

LEÃO, M. A. **Compósitos poliméricos a base de fibras de licuri: efeitos da hibridização e do envelhecimento ambiental acelerado**. 2013. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia dos Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. **Composite materials: engineering and science**, Great Britain: Chapman & Hall, 1994, 470 p.

MISHRA, S.; MOHANTY, A.; DRZAL, L.; MISRA, M.; PARIJAS, S.; NAYAK, S.; TRIPATHY, S. – Studies on Mechanical Performance of Biofibre/grass Reinforced Polyester Hybrid Composites. **Composites Science and Technology**, 63 (10), pp. 1377-1385, 2003.

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.

NASCIMENTO, D. C. O. **Análise das propriedades de compósitos de fibras de piaçava e matriz de resina epóxi**. 2009. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2009.

NETO, J. R. A., CARVALHO, L. H., ARAÚJO, E. M. (2007) “Influência da Adição de uma Carga Nanoparticulada no Desempenho de Compósitos Poliuretano/Fibra de Juta”, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 17, nº 1, p. 10-15.

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.

NUNES, L. M. **Cinética de degradação do sistema resina epóxi/fibra de carbono**. 2013, 62 f. Dissertação (Engenharia dos Materiais). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

OLIVEIRA, J. F. S. **Plásticos reforçados a base de tecidos híbridos: efeitos da anisotropia e geometria normativa na caracterização mecânica e da fratura**. 2013. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia dos Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

OLIVEIRA, J. F. S. **Estudos da influência da configuração em compósitos poliméricos híbridos**. 2007. 118 f. Dissertação (Mestre Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

PARDINI, L. C. PERES, R. J. C. Tecnologia de fabricação de pré-impregnados para compósitos estruturais utilizados na indústria aeronáutica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, V. 10, nº 1, pág. 32-42, Abr/Jun-1996.

PEREIRA, F. A. A. **Compósitos poliméricos híbridos reforçados com fibras de pet recicladas e partículas de sílica**. 2016. 87 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2016.

PESSÔA, V. A. F. **Reciclagem e reutilização de materiais poliméricos plásticos**. 2018. 50 f. Dissertação (Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

REZENDE, M. C. BOTELHO, E. C. **O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol 10, nº 2, E4, 2000.

Silva, A. S. Silva. S. M. Garcia del Pino, G. **CONFECÇÃO DE COMPÓSITO EM MATRIZ DE RESINA EPÓXI REFORÇADO COM FIBRA DE CURAUÁ**. Revista Científica Semana Acadêmica. Fortaleza, ano MMXVIII, Nº. 000148, 26/11/2018. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/artigo/confeccao-de-composito-em-matriz-de-resina-epoxi-reforcado-com-fibra-de-curaua>. Acessado em: 10/05/2022.

SILVA, Antonia Tayla. **Propriedades Mecânicas em Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibra de Juta**. 2014. 50 f. Monografia (Bacharel em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2014.

SILVA, M. SPINELLI, L. F. OLIVEIRA, L. C. TAGLIARI, L. D. Propriedades mecânicas de um compósito de fibra de carbono e aramida considerando diferentes condições de fabricação. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, São Paulo, V. 12, nº 1, pag. 116-127, Abr/2020.

SILVA, I. L. A. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta**. 2014. 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2014.

SILVA, C. C. **Influência da umidade nas propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos híbridos (sisal/vidro)**. 2012. 100 f. Dissertação (Mestre Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

SILVA, A. A. X. KOEHLER, B. O. SANTOS, M. S. C. REICHWALD, L. G. G. AMICO, S. C. **Propriedades em tração de laminados híbridos de aramida/vidro-R produzidos por infusão à vácuo**. 15th Brazilian Polymer Conference, Bento Gonçalves, Outubro 27-31, Rio Grande do Sul, 2019.

SOARES, R. S. **Avaliação da resistência à tração de materiais compósitos reforçados com fibras contínuas de curauá**. 2019. 75 f. Monografia (Engenharia Mecânica). Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2019.