



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO

CAMPUS CARAÚBAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GLÓRIA MARIA LEITE CARLOS

**PROPRIEDADES MECÂNICAS EM LÂMINAS DE COMPÓSITOS COM TECIDOS
SINTÉTICOS E HÍBRIDOS À $\pm 45^\circ$.**

CARAÚBAS

2022

GLÓRIA MARIA LEITE CARLOS

**PROPRIEDADES MECÂNICAS EM LÂMINAS DE COMPÓSITOS COM TECIDOS
SINTÉTICOS E HÍBRIDOS À $\pm 45^\circ$.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Mecânica.

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

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 tornar-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.

C284p Carlos, Glória Maria Leite.
Propriedades Mecânicas em Lâminas de Compósitos
com Tecidos Sintéticos e Híbridos à $\pm 45^\circ$ / Glória
Maria Leite Carlos. - 2022.
54 f. : il.

Orientadora: Ana Claudia de Melo Caldas
Batista.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2022.

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

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

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

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

GLÓRIA MARIA LEITE CARLOS

**PROPRIEDADES MECÂNICAS EM LÂMINAS DE COMPÓSITOS COM TECIDOS
SINTÉTICOS E HÍBRIDOS À $\pm 45^\circ$.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, Campus Caraúbas para a obtenção
do título de Engenheira Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

ANA CLAUDIA DE MELO
CALDAS BATISTA: [REDACTED]

Assinado de forma digital por ANA CLAUDIA
DE MELO CALDAS BATISTA: [REDACTED]
Dados: 2022.06.23 15:45:31 -03'00'

Ana Claudia de Melo Caldas Batista, Profa. Dra. (UFERSA)
Presidente

DORGIVAL ALBERTINO DA
SILVA JUNIOR: [REDACTED]

Assinado de forma digital por DORGIVAL
ALBERTINO DA SILVA JUNIOR: [REDACTED]
Dados: 2022.06.23 13:17:34 -03'00'

Dorgival Albertino da Silva Júnior, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Rudson de Souza Lima

Assinado de forma digital por
Rudson de Souza Lima
Dados: 2022.06.23 11:23:14 -03'00'

Rudson de Souza Lima, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a todos que, de maneira direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial, agradeço a Moisés que me ajudou na etapa de fixação dos tabs e a minha orientadora Profa. Dra. Ana Claudia de Melo Caldas Batista, por tudo.

A história é escrita pelos vencedores.

George Orwell

RESUMO

Materiais compósitos são considerados materiais de grande importância no cenário das novas tecnologias, pois, de maneira geral, tem como característica oferecer boas propriedades mecânicas e menor custo em relação aos materiais convencionais. O presente trabalho apresenta um estudo sobre as propriedades mecânicas em lâminas de compósitos com tecidos sintéticos (fibra de vidro, fibra de aramida e fibra de carbono) e tecidos híbridos (fibras de carbono/vidro e fibras de carbono/aramida) orientados à $\pm 45^\circ$. Os procedimentos metodológicos realizados neste trabalho atendem a normas relacionadas aos ensaios de tração uniaxial (ASTM D3039) e ensaio de densidade (ASTM D792). Como conclusões, tem-se que, para todas as condições, compósitos híbridos e não híbridos, as amostras exibem módulo de elasticidade característico dos compósitos em sua região linear, além disso, a lâmina de Carbono apresentou a menor deformação de projeto e a maior tensão de projeto e módulo, dentre as lâminas ensaiadas. Dentre os híbridos o composto híbrido Vidro/Carbono apresentou melhores resultados em relação a deformação e tensão de projeto, no entanto, obteve menor módulo de elasticidade, quando comparado ao composto híbrido Aramida/Carbono. Em relação ao comportamento da fratura dos corpos de prova, todas as amostras proporcionaram fratura final na região do comprimento útil.

Palavras-chave: Compósitos. Hibridização. Vidro. Carbono. Aramida.

ABSTRACT

Composite materials are considered materials of great importance in the scenario of new technologies, because in general, it has the characteristic of offering good mechanical properties and lower cost compared to conventional materials. The present work presents a study on the mechanical properties of composite blades with synthetic fabrics (fiberglass, aramid fiber, and carbon fiber) and hybrid fabrics (carbon/glass fibers and carbon/aramid fibers) guidance to $\pm 45^\circ$. The methodological procedures performed in this work meet the standards related to uniaxial tensile tests (ASTM D3039) and density tests (ASTM D792). In conclusion, for all conditions, hybrid and non-hybrid composites, the samples exhibit modulus of elasticity characteristic of the composites in their linear region. of design and module, among the tested slides. Among the hybrids, the hybrid Glass/Carbon compound presented better results concerning deformation and design stress, however, it obtained a lower modulus of elasticity when compared to the hybrid Aramid/Carbon compound. Regarding the fracture behavior of the specimens, all samples provided final fracture in the useful length region.

Key words: Composite. hybridization. Glass. Carbon. Aramid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de laminação manual - <i>Hand Lay-up</i>	20
Figura 2 - Modos de falha dos compósitos submetidos à tração	21
Figura 3 - Tecido de fibra de Vidro.....	23
Figura 4 - Tecido de fibra de Carbono	24
Figura 5 - Tecido de fibra de Aramida	24
Figura 6 - Tecido híbrido Vidro/Carbono.....	25
Figura 7 - Híbrido Aramida/Carbono	25
Figura 8 - Resina utilizada para confecção dos compósitos	26
Figura 9 - Produto final dos corpos de provas.....	27
Figura 10 - Dimensões de corpo de prova (carbono) para ensaio de tração uniaxial.....	27
Figura 11 - Utilização das lixas para acabamento dos corpos de prova	28
Figura 12 - Balança de precisão	29
Figura 13 - Máquina utilizada para a realização do ensaio de tração uniaxial	31
Figura 14 - (a) Tensão x Deformação – V; (b) Tensão x Deformação na região linear – V.....	34
Figura 15 - Fratura macroscópica – V	36
Figura 16 - (a) Tensão x Deformação – C; (b) Tensão x Deformação na região linear – C.....	37
Figura 17 - Fratura macroscópica – C	38
Figura 18 - (a) corpo de prova antes do ensaio x (b) corpo de prova pós ensaio	39
Figura 19 - (a) Tensão x Deformação – A. (b) gráfico Tensão x Deformação região linear – A	40
Figura 20 - Fratura macroscópica – A.....	42
Figura 21 - (a) Tensão x Deformação – V/C. (b) Tensão x Deformação região linear – V/C	43
Figura 22 - Fratura macroscópica – V/C	45
Figura 23 - (a) Tensão x Deformação – A/C; (b) Tensão x Deformação na região linear – A/C	46
Figura 24 - Fratura macroscópica – A/C	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Código das características do modo da falha	21
Tabela 2 - Descrição das siglas utilizadas para categorizar as amostras	28
Tabela 3 - Densidades volumétricas do laminado compósito proposto	32
Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos corpos de prova – V	35
Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos corpos de prova – C.....	38
Tabela 6 - Propriedades mecânicas dos corpos de prova – A	41
Tabela 7 - Propriedades mecânicas dos corpos de prova - V/C	44
Tabela 8 - Comparativo lâmina V x lâmina C x Híbrido V/C.....	44
Tabela 9 - Propriedades mecânicas dos corpos de prova – A/C.....	47
Tabela 10 - Comparativo lâmina A x lâmina C x híbrido A/C.....	48
Tabela 11 - Comparativo híbrido V/C x híbrido A/C.....	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 Objetivo geral.....	14
1.1.2 Objetivos específicos.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	15
2.1.1 Matriz	15
2.1.2 Reforço	16
2.4 FIBRAS SINTÉTICAS.....	16
2.3.1 Fibra de Aramida.....	17
2.3.2 Fibra de Carbono.....	17
2.3.3 Fibra de Vidro	18
2.5 COMPARATIVO DAS FIBRAS SINTÉTICAS.....	18
2.6 COMPÓSITOS HÍBRIDOS	20
2.7 PROCESSO DE LAMINAÇÃO <i>HAND LAY-UP</i>	20
2.8 CARACTERIZAÇÃO DA FRATURA MACROSCÓPICA EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS.....	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA CONFEÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS	24
3.2 CONFEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	27
3.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	29
3.4 ENSAIOS REALIZADOS.....	30
3.4.1 Ensaio de Densidade	30
3.4.2 Ensaio de Tração	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
4.1 ENSAIO DE DENSIDADE	34

4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL	35
4.2.1 Análise nos corpos de prova para a condição lâmina de fibra de Vidro (V).....	35
4.2.2 Análise nos corpos de prova para a condição lâmina de fibra de Carbono (C)	38
4.2.3 Análise nos corpos de prova para a condição lâmina de fibra de Aramida (A).....	41
4.2.4 Análise nos corpos de prova para a condição compósito híbrido Vidro/Carbono (V/C).....	44
4.2.5 Análise nos corpos de prova para a condição compósito híbrido Aramida/Carbono (A/C).....	48
5 CONCLUSÕES.....	52
6 REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

Compósitos são materiais fundamentais no processo evolutivo tecnológico. Sua aplicação em elementos estruturais de diferentes áreas é motivo de estudo cujo intuito consiste em melhor compreender suas características mecânicas, entendendo que, geralmente apresentam bom/alto desempenho mecânico quanto aos reforços. Nesse sentido, Callister e Rethwisch (2012) afirmam que os materiais compósitos são uma combinação de dois ou mais materiais, sendo caracterizados por serem insolúveis entre si.

Sua combinação é realizada de maneira que seja vantajoso para ambos e proporcione o desempenho mecânico que um único material isolado não seria capaz de fornecer. Em geral, os compósitos são constituídos a partir da combinação matriz e reforço e, tanto o primeiro quanto o segundo apresenta mais de uma origem.

A matriz pode ser classificada em polimérica, metálica ou cerâmica e o reforço pode ser de origem natural ou sintética. Para este trabalho é utilizada uma matriz de origem polimérica (Epóxi) e os reforços fibrosos sintéticos (fibra de vidro, fibra de aramida e fibra de carbono), que podem ter origem orgânica ou inorgânica. Desses, serão confeccionadas (05) cinco tipos de amostras nas condições compósitos híbridos e compósitos não híbridos, no caso dos últimos tem-se as lâminas de fibra de vidro, fibra de carbono e fibra de Aramida, para os compósitos híbridos tem-se as condições fibra de Vidro/Carbono e fibra de Aramida/Carbono.

Para Cavalcanti (2018) compósitos híbridos são compósitos que contêm dois ou mais elementos diferentes de reforço em uma matriz. O autor entende que esses compostos permitem alterar propriedades como resistência ao impacto e à tração, assim como, absorção de umidade.

A utilização do processo de hibridização se dá pelo mesmo princípio, onde o componente é utilizado de maneira a compensar um comportamento mecânico daquele componente que apresenta a desvantagem, mas que é imprescindível para o composto (SOUZA, 2017; SILVA, 2019).

Assim, para que a combinação da matriz com a fibra produza resultados satisfatórios alguns parâmetros precisam ser satisfeitos. Para citar, o teor da fibra; módulo de elasticidade da fibra; resistência da fibra; aderência entre a fibra e a matriz; comprimento da fibra; orientação da fibra; ligação e falha (SOUZA, 2010).

A orientação da fibra é um parâmetro a ser considerado, uma vez que, neste trabalho é observada a fibra orientada à $\pm 45^\circ$ com relação à aplicação da carga. De acordo com Tinô (2010) quando um compósito está orientado à $\pm 45^\circ$ recebe o nome de equiangular sendo submetido diretamente as tensões cisalhantes uma vez que o laminado fica submetido as

direções em que atuam as tensões cisalhantes de maneira direta. Para o autor existem algumas características específicas desse tipo de material, sendo elas: apresentar linearidade entre a tensão/deformação até cerca de 25% da carga aplicada; começo da fissuração na matriz; saturação da matriz e começo do dano na fibra; região de falha na fibra até a ruptura final (TINÔ, 2010).

Portanto, ao longo do trabalho será avaliada a maneira como se comportam os compósitos híbridos e não híbridos submetidos a testes de tração de acordo com as normas ASTM consideradas com o intuito de avaliar a viabilidade, assim como, as vantagens e desvantagens da utilização dos tecidos com orientação à $\pm 45^\circ$.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Estudar lâminas de compósitos tendo como reforço fibras sintéticas (fibra de vidro, fibra de carbono e fibra de aramida) e lâminas com tecidos híbridos (fibras de carbono/vidro e fibras de carbono/aramida) à $\pm 45^\circ$ buscando entender a viabilidade/vantagens/desvantagens da utilização de tecidos híbridos à $\pm 45^\circ$.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar as propriedades mecânicas de lâminas à $\pm 45^\circ$ com tecidos constituídos unicamente de fibra carbono, fibra de vidro e fibra de aramida;
- Avaliar as propriedades mecânicas de lâminas híbridas com tecidos híbridos constituídos de carbono/vidro e carbono/aramida à 45° ;
- Determinar a densidade dos laminados propostos e compará-las; e
- Verificar a eficácia, propriedades e custo das lâminas híbridas e não híbridas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Por definição a união entre dois ou mais materiais distintos resulta na obtenção de um novo material, denominado compósito, cujas propriedades assumem comportamento único, caracterizado pela diferença e pela melhoria das propriedades físicas e químicas dos materiais em conjunto, quando comparado à sua utilização de maneira isolada (MEDEIROS, 2016). Nesse sentido, a criação de um compósito permite ao projetista obter um material com características desejáveis, além de minimizar aquelas características que não se deseja para o projeto (Mendonça 2005 *apud* Medeiros 2016).

Em sua constituição um material compósito apresenta duas fases distintas: a matriz e o reforço. Cada fase tem uma função garantindo que o material compósito seja capaz de fornecer as características para as quais foi desenvolvido. Para Mendonça (2019) o principal objetivo da fase matriz é fazer a interligação com a fase reforço.

2.1.1 Matriz

A matriz é o constituinte responsável pelo aglutinamento, sendo o material capaz de garantir o aspecto externo do compósito e, além disso, de proteger o material contra ataques de natureza químicos e físicos os quais o material estaria sujeito, sua escolha depende da aplicação do compósito, uma vez que, sua constituição não pode ser um processo generalizado, mas depende de fatores como funcionalidade, combinação dos materiais constituintes, finalidade do composto, entre outros (CALLISTER e RETHWISCH, 2012; NÓBREGA, 2007).

Ou seja, a matriz funciona como um constituinte que atua de maneira a proteger as fibras e manter o reforço coeso e em condição estável. De acordo com Silva (2014) as interações causadas pelo meio ambiente podem inserir falhas ou defeitos superficiais com a capacidade de formação de fissuras, desse modo, uma importante função da matriz é a de proteger as fibras da deterioração superficial. Ademais, matriz é responsável por atribuir forma geométrica ao compósito uma vez que o processo é finalizado.

A matriz também pode se apresentar de diferentes formas podendo ser encontrada principalmente na condição de matriz polimérica, matriz metálica e matriz cerâmica. No que

compete à matriz polimérica as matrizes podem ser classificadas em termofixas (ou termoendurecíveis) e termoplásticas, sendo a constituição molecular o que difere uma da outra.

Na situação termoendurecível a resina torna-se um produto infusível e insolúvel, uma vez que é curado pela ação do calor e tratamento químico, no composto termoplástico o processo ocorre de maneira diferente e o material assume a capacidade de se tornar um produto plástico, quando aquecido, assim como um produto rígido, quando arrefecido (SILVA, 2014).

Vale ressaltar que a matriz utilizada é a resina epóxi, uma matriz de origem termofixa que, de acordo com Mendonça (2019) apresentam vantagens como, excelente adesão a grande diversidade de cargas, baixa contração na cura, ausência de produtos voláteis evitando a formação de bolhas, além de excelente resistência química. A autora afirma ainda que, embora o módulo de elasticidade apresentado por essas resinas seja elevado, existem desvantagens como aderência indesejável nas paredes do molde e o fato de essa resina não ser reciclável (MENDONÇA, 2019).

2.1.2 Reforço

O reforço é o constituinte responsável por melhorar as propriedades mecânicas do material, tais como, aumento da resistência ou rigidez específica (SILVA, 2019). Esse constituinte pode ser de origem natural ou sintético, para a primeira situação o mesmo ainda pode ser categorizado em origem vegetal, animal ou mineral, já a segunda situação, quando o mesmo é sintético, ele pode obtido a partir de origem orgânica ou inorgânica.

É comum que os reforços, tanto os naturais quanto os sintéticos, sejam encontrados na forma de fibras, porém há também aqueles que são utilizados de forma particulada, isso reafirma a característica principal do material compósito, ele é constituído de maneira a satisfazer determinada solicitação, logo não pode ser generalizado. Desse modo, Gama (2019) afirma que a escolha da fibra deve levar em consideração o ambiente ao qual o reforço será exposto e o incremento de carga demandado pela estrutura.

2.4 FIBRAS SINTÉTICAS

As fibras sintéticas são fibras obtidas a partir de produtos químicos mediante processos não naturais. Dentre as fibras sintéticas orgânicas é possível citar alguns exemplos, tais como,

acetato, acrílico, aramida, fibra proteica, poliéster, entre outras, já dentre aquelas inorgânicas, para citar algumas delas, são a fibra cerâmica, fibra de carbono, fibra de vidro, fibra metálica (SOUZA, 2010; KUASNE, 2008). Vale lembrar que esses tipos de fibras são preparados por processos de fabricação diferentes, de acordo com sua origem.

2.3.1 Fibra de Aramida

A fibra de aramida é um reforço sintético composto por materiais orgânicos aromáticos sintéticos, constituídos por carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio (GAMA, 2019). De acordo com Trombetta (2012) as fibras são fiadas a partir de poliamidas aromáticas e, devido ao alinhamento da cadeia polimérica com o eixo das fibras e a alta rigidez dos núcleos aromáticos, as propriedades mecânicas obtidas são de excelência.

Dentre as vantagens da utilização da fibra de aramida é o fato de ser muito leve e apresentar alta rigidez e resistência à tração. As fibras de aramida são conhecidas por apresentar boa estabilidade térmica, alta tenacidade, resistência à combustão, resistência a fluência (SILVA, 2019). Em contrapartida, apresenta dificuldade de modelagem, baixa resistência a compressão, a ação dos raios ultravioleta e a temperaturas elevadas.

2.3.2 Fibra de Carbono

As fibras de carbono apresentam melhores propriedades mecânicas, são as mais resistentes a ação de agentes químicos, são imunes a corrosão e não absorvem água. Sua composição depende do tipo de material e da temperatura empregados no processo de fabricação, como afirma Silva (2014), quanto maior a temperatura de exposição, maior será o módulo de elasticidade do material resultante, que varia de 100 GPa a 300 GPa nas fibras de carbono. Desse modo, quanto maior o módulo de elasticidade, maior é o custo do produto final, devido ao gasto energético para sua produção ser bastante elevado (SILVA, 2014).

Gama (2019) afirma que as fibras de carbono têm origem a partir de métodos diferentes, mediante tratamento térmico de fibras orgânicas denominado carbonização, com base no alcatrão derivado do petróleo ou do carvão em ambiente inerte, ou a partir de fibras de rayon. É um processo que se constitui da oxidação das fibras e requer que o composto seja exposto a altas temperatura (GAMA, 2019). Quando o mesmo é finalizado tem-se uma fibra onde os

átomos de carbono se apresentam perfeitamente alinhados fazendo com que isso resulte em um produto final com uma resistência mecânica excelente (MACHADO, 2011 *apud* GAMA, 2019).

Portanto, consideradas suas características, assim como propriedades, a fibra de carbono assume vasto campo de aplicação, este fato está diretamente relacionado à sua elevada resistência mecânica, elevada rigidez, elevado módulo de elasticidade e baixa densidade, além disso, apresenta outras vantagens, quando comparado a outras fibras, tais como, resistência a fadiga, boa condutibilidade elétrica, estabilidade dimensional, porém apresenta desvantagens como, baixo coeficiente de dilatação térmica, baixa resistência ao impacto e fratura frágil, ainda que apresente um custo relativamente alto (CAMPOS, 2017).

2.3.3 Fibra de Vidro

A fibra de vidro é a mais utilizada dentre os reforços nos materiais compósitos e é de origem inorgânica tendo a sílica (SiO_2) com constituinte básico e mais importante para uso em compósitos. De acordo com Kemerich (2013) *apud* Matthews & Rawlings (1994), a fibra do tipo S (S-glass - strength) leva vantagem em relação sobre a fibra tipo E em relação a sua resistência mecânica. Compósitos fabricados com utilização da fibra de vidro como reforço apresentam algumas características favoráveis, sendo elas: boa estabilidade, boa resistência ao calor, à umidade e à corrosão; facilidade de fabricação e relativo custo baixo, além de elevado quociente entre resistência e peso (KEMERICH 2013 *apud* BARCELLOS 2009).

2.5 COMPARATIVO DAS FIBRAS SINTÉTICAS

É sabido que as fibras apresentam características diferentes dentre elas, além de propriedades mecânicas com compensações diferentes. Utilizando o exemplo das três fibras relacionadas ao processo – fibra de aramida; fibra de carbono e fibra de vidro – é possível traçar um comparativo onde se pode constatar algumas vantagens e desvantagens da utilização de uma em detrimento da outra ou mesmo o porquê da utilização de mais de uma fibra nesse processo.

Levando em conta aspectos como custo, desempenho desejado e técnica de fabricação, a escolha dos reforços deve considerar uma escolha onde haja uma harmonia entre os custos e

as necessidades estruturais. Desse modo, observe o Quadro 1 onde é apresentado um comparativo entre as fibras.

Quadro 1 – Comparativo – fibras de carbono, vidro e aramida.

CARACTERÍSTICAS	FIBRAS		
	CARBONO	VIDRO	ARAMIDA
Resistencia à tração	Ótimo	Bom	Ótimo
Resistencia à compressão	Ótimo	Bom	Regular
Rigidez	Ótimo	Bom	Bom
Resistencia à fadiga	Ótimo	Ruim	Regular
Expansão térmica	Ruim	Ótimo	Ruim
Resistência à umidade	Ótimo	Regular	Regular
Resistência à corrosão	Ruim	Ótimo	Ótimo
Custo	Alto	Baixo	Médio

Fonte: Adaptada (Gama 2019, op.cit., Perelles et al., 2013).

De acordo com o Quadro 1 as características da fibra de carbono, de maneira geral, são superiores as demais, porém a mesma apresenta um alto custo, de maneira que esse fator pode ser uma desvantagem para sua utilização, além de ter uma resposta ruim para os quesitos expansão térmica e resistência à corrosão. A fibra de vidro é a que apresenta um comportamento mais equilibrado, com relação aos quesitos elencados.

Uma característica importante em relação à fibra de aramida é que a mesma apresenta uma altíssima resistência à tração e, de acordo com Gama (2019) com adição da resina Epoxi, promove extraordinário aumento nos valores da resistência à flexão, tração e impacto (GAMA. 2019).

Dentre as três fibras (vidro, carbono e aramida), a fibra de vidro apresenta o maior valor para densidade e os menores valores de módulo de elasticidade e resistência a tração. De acordo com Medeiros (2016), as fibras de carbono e aramida são uma boa alternativa para aplicação em estrutura de grande e médio portes por suas características de alto módulo elástico e elevada resistência à fadiga e à tração, enquanto que, as fibras de vidro tem maior limitação para aplicação em estrutura justamente por apresentar baixo módulo de elasticidade (MEDEIROS, 2016).

2.6 COMPÓSITOS HÍBRIDOS

Para Cavalcanti (2018) compósitos híbridos são compósitos que contêm dois ou mais elementos diferentes de reforço em uma matriz. A hibridização pode ocorrer em lâminas onde há a presença de dois reforços diferentes e uma matriz entre eles, assim também pode atuar com mais camadas assumindo postura mais robusta, além de unir dois ou mais materiais diferentes em um mesmo produto final, como por exemplo, os materiais híbridos avaliados, resultando em um produto final da combinação de fibra de Aramida, fibra de Vidro e fibra de Carbono.

Sua utilização é interessante, pois, esses compostos permitem alterar propriedades como resistência ao impacto e à tração, assim como, absorção de umidade (CAVALCANTI, 2018). Dessa forma, a hibridização proporciona a capacidade de combinar propriedades mecânicas, peso e custo, além de, obter um novo material que, combinados os constituintes, proporcionem vantagens que superem as desvantagens e ainda reduzam os custos, uma vez que, de modo geral, um constituinte tem valor de aquisição mais elevado que o outro (SOUZA, 2017). A escolha por utilizar mais de um tipo de reforço tem propósito no alcance de características singulares que um material compósito (convencional) não seria capaz de oferecer.

Assim, para que a combinação da matriz com a fibra produza resultados satisfatórios alguns parâmetros precisam ser satisfeitos. Para citar, o teor da fibra; módulo de elasticidade da fibra; resistência da fibra; aderência entre a fibra e a matriz; comprimento da fibra; orientação da fibra; ligação e falha (SOUZA, 2010). De modo geral, os materiais compósitos híbridos têm a tendência de apresentar combinações de propriedades melhores em comparação aos compósitos com um único tipo de fibra (CALLISTER e RETHWISCH, 2012). Porém, existem materiais compósitos com melhor desempenho mecânico quando comparado a compósitos híbridos oriundos da combinação do material originário com adição de um novo reforço.

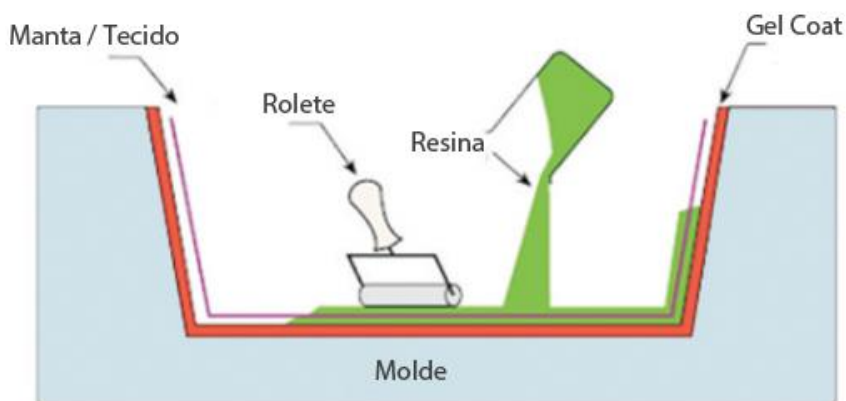
2.7 PROCESSO DE LAMINAÇÃO *HAND LAY-UP*

Para a fabricação de materiais compósitos existem diferentes processos, onde a escolha por um em detrimento dos demais se deve à necessidade de projeto, assim como, da finalidade do composto a ser fabricado. De maneira geral, tais processos podem ocorrer em molde aberto e molde fechado. Para os compósitos analisados neste estudo foram utilizados matriz de resina epóxi e reforços de tecidos de fibra de vidro, fibra de aramida e fibra de carbono com orientação de $\pm 45^\circ$ na formação do material.

O processo utilizado para fabricação das lâminas foi o processo de laminação manual ou *Hand Lay-up*, como é mais conhecido na literatura. É um processo que pode ser feito, como o próprio nome sugere, de maneira manual apresentando maior simplicidade em relação aos demais processos no mercado, além disso, é um método bastante antigo, que reduz a necessidade de grande investimento em maquinário e tem funcionado de maneira satisfatória desde que foi empregado na indústria (NETO, 2007).

Nesse sentido é um processo à base de resina termofixa e ocorre em molde aberto em quatro etapas distintas, são elas: adaptação do material compósito ao molde; processo de impregnação; cura do material; desmolde da peça final. Na etapa inicial desse processo é que pode ser definida a orientação do reforço que se deseja para o projeto. Assim, de início ocorre a aplicação do desmoldante, em seguida a aplicação da resina e também a aplicação da camada de reforço – esse passo ocorre de acordo com a espessura que se deseja obter – para que a fixação melhora é necessária a utilização de um rolete ou pincel causando maior aderência e minimizando defeitos de fabricação, tais como bolhas de ar; a etapa seguinte é a cura da resina, após concluída ocorre o desmolde de material, seguido do último processo, o acabamento final da peça. Observe o esquema de laminação manual representado na Figura 1.

Figura 1 - Processo de laminação manual - *Hand Lay-up*.



Fonte: Adaptado de <http://br.cpicfiber.com/processos.asp?codigo=1&cat=Processos>

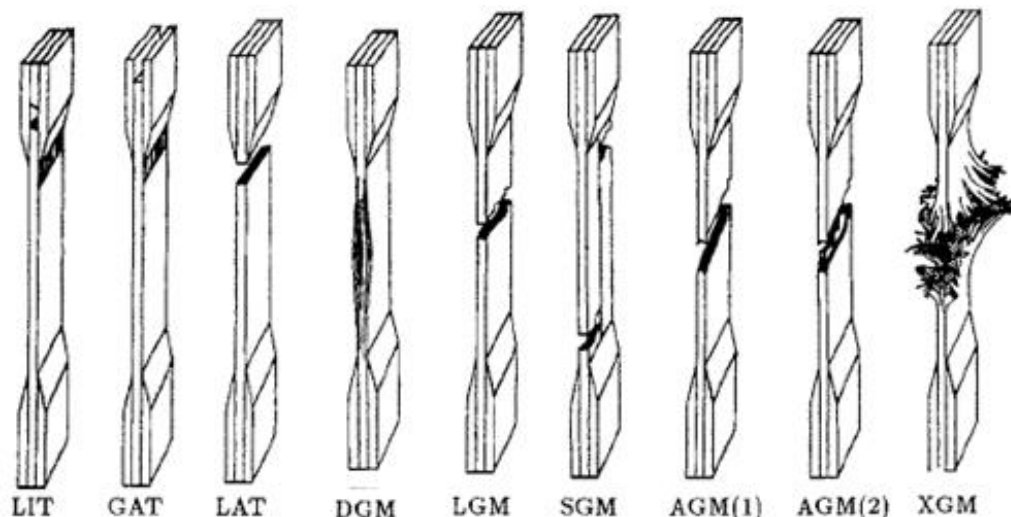
Esse processo apresenta algumas desvantagens, pois, requer maior quantidade de mão de obra para pouca produção, além disso, há uma maior possibilidade de presença de defeitos de fabricação, pois a qualidade da peça depende da habilidade do laminador e apenas um dos lados da peça apresentará um bom acabamento.

2.8 CARACTERIZAÇÃO DA FRATURA MACROSCÓPICA EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

A caracterização da fratura/dano ao longo do comprimento do corpo de prova consiste na análise macroscópica em um compósito. Para ensaios de tração, a fratura pode ser caracterizada a partir de dois modos, quando há a presença da descontinuidade, ou seja, quando há um furo central no comprimento útil do corpo de prova; e quando não há a presença da descontinuidade, que é o caso dos corpos de prova analisados neste trabalho. A Figura 2 ilustra de maneira mais evidente tais diferenças. Além disso, a Tabela 1 apresenta os tipos de fraturas que podem acontecer no decorrer dos ensaios.

Para os corpos de prova relacionados ao trabalho, sem descontinuidade, em caso de as falhas ocorrerem de modo LIT e GAT o ensaio não será validado. Ou seja, a falha/fratura deve ocorrer no decorrer do comprimento útil do corpo de prova definido por norma.

Figura 2 - Modos de falha dos compósitos submetidos à tração.



Fonte: Adaptado de ASTM D3039 (2013).

Tabela 1 - Código das características do modo da falha.

CÓDIGO	DEFINIÇÃO DO CÓDIGO (normativo)	DEFINIÇÃO DO CÓDIGO
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 de ASTM D3039 (2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

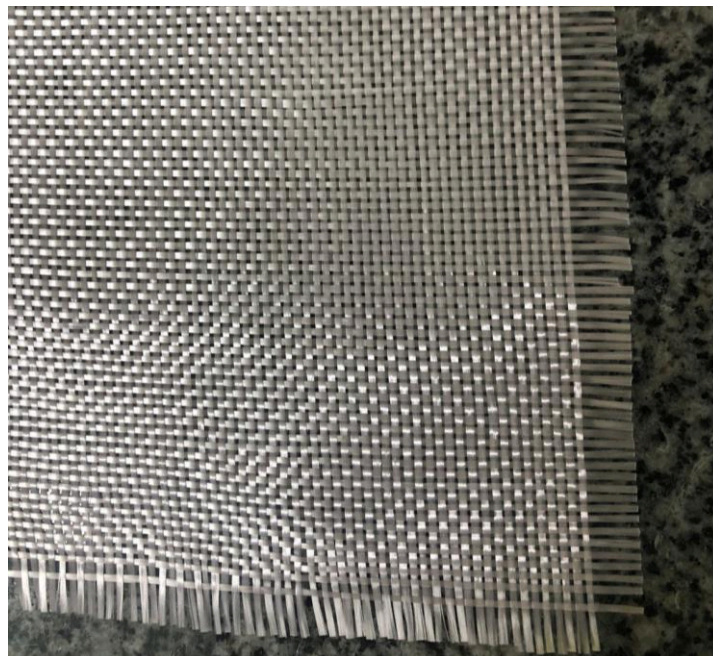
Neste capítulo constam os materiais e a metodologia aplicada na execução do trabalho.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA CONFEÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

O laminado foi fabricado pelo processo *Hand Lay-up*. Para a confecção dos compósitos foram necessários:

- **Reforços:**
 - I. Tecido tela 1x1 têxtil de fibra de Vidro E (200 g/m²) orientado a $\pm 45^\circ$ em relação a aplicação da carga. Foi utilizada 1 camada de tecido de fibra de Vidro, ver na Figura 3.

Figura 3 - Tecido de fibra de Vidro.



Fonte: Autora

- II. Tecido sarja 2x2 têxtil de fibra de carbono HTS40 (200 g/m²) orientado a $\pm 45^\circ$ em relação a aplicação da carga. Foi utilizada 1 camada de tecido de fibra de Carbono, ver na Figura 4.

Figura 4 - Tecido de fibra de Carbono



Fonte: Autora.

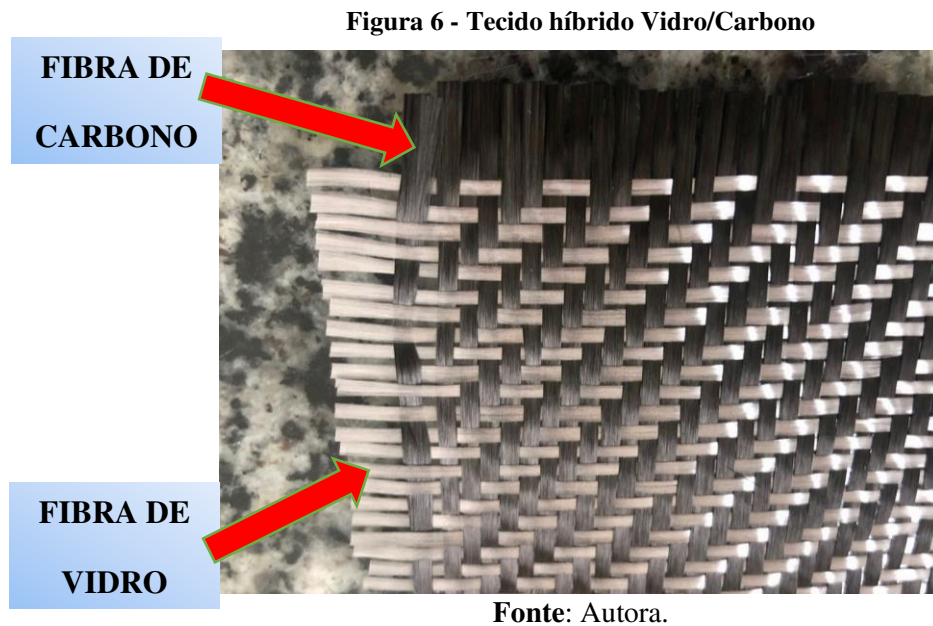
- III. Tecido tela 1x1 têxtil de fibra de aramida Twaron D2200 (180 g/m²) orientado a $\pm 45^\circ$ em relação a aplicação da carga. Foi utilizada 1 camada de tecido de fibra de Aramida, ver na Figura 5.

Figura 5 - Tecido de fibra de Aramida

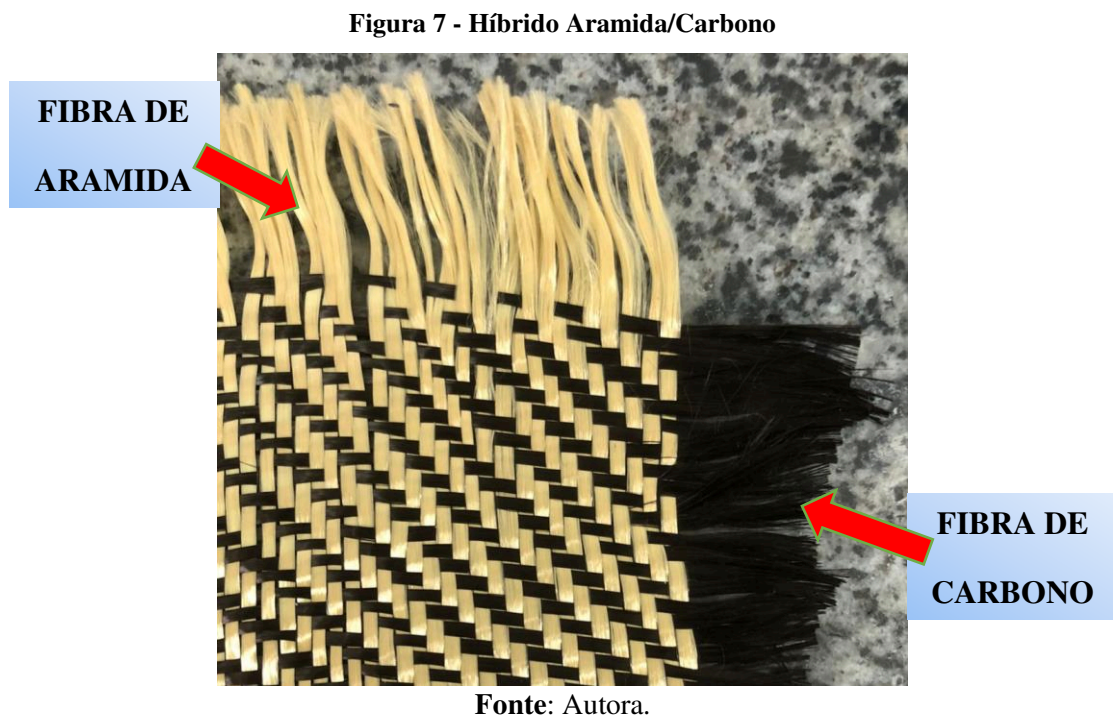


Fonte: Autora.

- IV. Tecido sarja 2x2 híbrido Vidro E/Carbono T300 (200 g/m²) orientado a $\pm 45^\circ$ em relação a aplicação da carga. Foi utilizada uma camada do híbrido para a fabricação do compósito. Figura 6.



- V. Tecido sarja 2x2 híbrido Aramida Twaron D2200 /Carbono HTS40 (200 g/m²) orientado a $\pm 45^\circ$ em relação a aplicação da carga. Foi utilizada uma camada do híbrido para a fabricação do compósito. Figura 7.



- **Matriz:** Resina 2001 Epoxi Transparente com Endurecedor 3154 (01 kg). Figura 8.

Figura 8 - Resina utilizada para confecção dos compósitos.



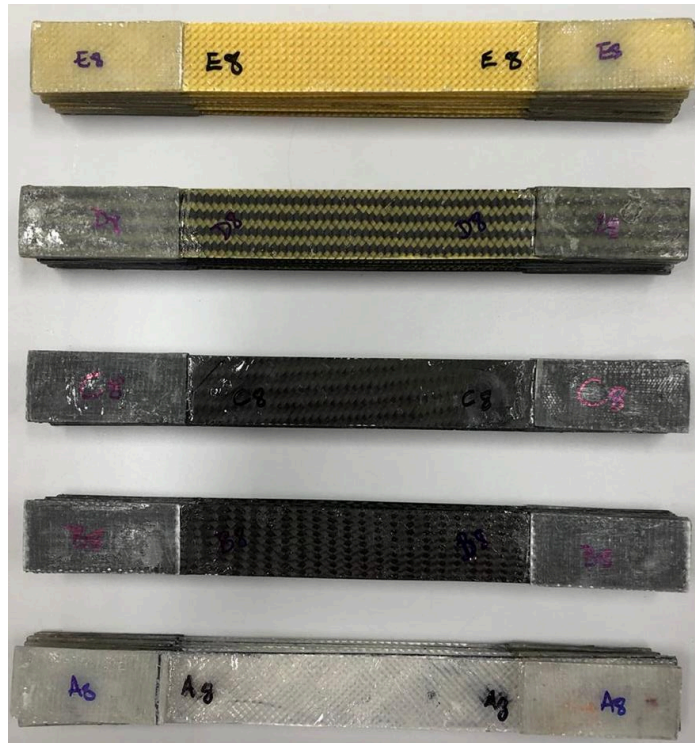
Fonte: <https://www.redelease.com.br/catalog/product/view/id/1645/s/resina-epoxi-transparente-com-endurecedor-01-kg>

3.2 CONFEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A confecção dos corpos de prova obedece a norma ASTM D3039 (2014) para ensaio de tração, que tem por objetivo analisar o comportamento dos materiais quando submetidos a ação das forças de tensão e, com isso, determinar as propriedades mecânicas dos materiais ensaiados. O material compósito final consiste em lâminas com uma camada de reforço de fibra de aramida, fibra de vidro e fibra de carbono orientados a $\pm 45^\circ$ e compósitos híbridos com a presença de uma camada de fibra de carbono/vidro e carbono/aramida cuja orientação do ensaio é realizado a $\pm 45^\circ$ e a matriz de resina detalhada no tópico anterior.

A Figura 9 apresenta a disposição do material final dos 5 conjuntos de corpos de prova que serão submetidos ao ensaio.

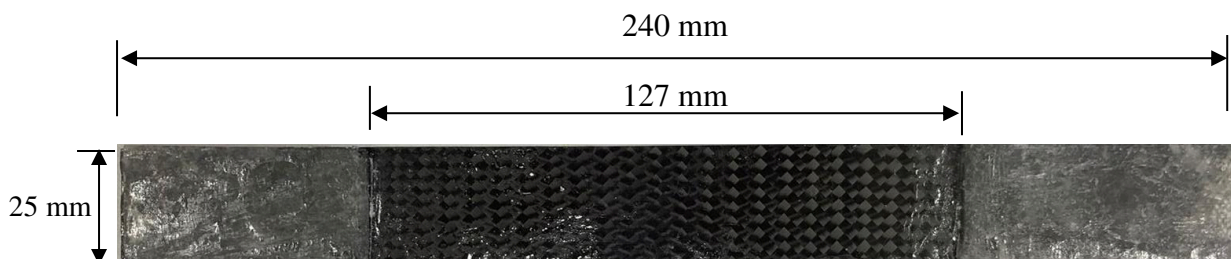
Figura 9 - Produto final dos corpos de provas



Fonte: Autora.

Para que se obtenha um produto final válido para testes é preciso que algumas condições sejam satisfeitas, assim, a padronização de dimensões e tolerâncias e a obtenção de 5 corpos de prova válidos para cada condição exigida. Desse modo, para o ensaio de tração seguindo a norma ASTM D3039 (2014) os corpos de prova devem apresentar comprimento final de 240 mm, um comprimento útil de 127 mm e largura 25 mm, com tolerância de $\pm 1\%$. Ver Figura 10.

Figura 10 - Dimensões de corpo de prova (carbono) para ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Autora.

3.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Nessa seção foram realizados procedimentos de corte das lâminas para a obtenção das amostras, em seguida lixamento para que o produto final estivesse dentro das medidas exigidas e nesse passo foram utilizadas folhas de lixa d'água em lixamento úmido em geral gramatura variadas de 100, 220, 400, 600, 1000 e a lixa d'água com gramatura de 1200. Desse modo, obteve-se 8 corpos de prova para cada condição dentro das dimensões normatizadas. Ver Figura 11.

Figura 11 - Utilização das lixas para acabamento dos corpos de prova.



Fonte: Autora.

Para obter precisão nas medições foram utilizados instrumentos de medição metrológicos - paquímetro manual e micrômetro digital resolução 0,02 mm e 0,001 mm, respectivamente – cujas medidas de largura (25 mm, com tolerância de $\pm 1\%$) e espessuras foram satisfeitas, tendo variação nas espessuras de acordo com o material utilizado.

De maneira a padronizar o estudo e ainda facilitar a dinâmica de leitura do texto, a Tabela 2 apresenta as siglas referentes a nomenclatura dos corpos de prova para cada condição.

Tabela 2 - Descrição das siglas utilizadas para categorizar as amostras.

SIGLAS	DESCRIÇÃO
A	Corpos de prova para a condição compósito polimérico reforçado com tecido de fibra de Aramida
C	Corpos de prova para a condição compósito polimérico reforçado com tecido de fibra de Carbono
V	Corpos de prova para a condição compósito polimérico reforçado com tecido de fibra de Vidro
V/C	Corpos de prova para a condição compósito polimérico reforçado com tecido de híbrido de fibra de Vidro/Carbono
A/C	Corpos de prova para a condição compósito polimérico reforçado com tecido híbrido de fibra de Aramida/Carbono

Fonte: Autora.

3.4 ENSAIOS REALIZADOS

3.4.1 Ensaio de Densidade

O ensaio de densidade segue a norma ASTM D792 (2008) e pode ser obtido a partir da densidade da fibra e da densidade da resina. Ele pode ser utilizado para controlar a qualidade dos materiais, verificar a uniformidade de conjuntos de materiais e, além disso, pode ser útil na avaliação de possíveis mudanças físicas em um modelo. A mudança de densidade de um material pode ser explicada por diferentes causas, por exemplo, a cristalinidade, a absorção de solvente, entre outros.

O teste de densidade ocorre em etapas e deve ser realizado no interior de um laboratório cuja temperatura esteja em torno dos 23°C e uma variação de 2°C. O material necessário para a realização do teste consiste em uma balança de precisão de 0,1mg, um vaso, no caso, um becker de boca larga foi utilizado e um suporte onde a amostra será suspensa e água. A Figura 12 ilustra o sistema descrito.

Figura 12 - Balança de precisão**Fonte:** Autora.

O teste é feito em duas etapas, primeiro são fabricados pequenos cortes do compósito com geometria quadrada, os mesmos são pesados ao ar e, posteriormente, o mesmo material é imerso no líquido (água) para a obtenção dos valões de massa aparente, a partir desses dados de massa seca e massa molhada são obtidos os valores de densidade específica ou relativa mediante cálculos. A densidade do compósito é calculada pela Equação:

$$\rho = \frac{a\eta}{a + b - w} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde a densidade volumétrica do compósito (g/cm^3) é representada por “ ρ ”, o peso da amostra seca (g) representado por “a”, “ η ” para a densidade da água na temperatura de ensaio a 23°C ($0,9975 \text{ g/cm}^3$), o peso do afundador parcialmente imerso em água (g) atende por “w”, e “b” representa o peso da amostra imersa com o afundador em água (g).

3.4.2 Ensaio de Tração

Para o ensaio de tração uniaxial é utilizada a norma ASTM D3039 (2014), como dito anteriormente. Este ensaio tem por objetivo obter as propriedades mecânicas de resistência à tração (MPa), deformação à ruptura (%) e módulo de elasticidade (GPa) do material para as condições: lâmina de fibra de Vidro (V), lâmina de fibra de Aramida (A), lâmina de fibra de

Carbono (C), híbrido vidro carbono (V/C) e híbrido Aramida/Carbono (A/C). Com essa finalidade foram confeccionados (08) corpos de prova para cada configuração acima citada. Os ensaios foram realizados na Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA – Campus Mossoró, laboratório de ensaios mecânicos cujos corpos de prova foram submetidos a testes na máquina Universal de ensaios mecânicos da EMIC, com célula de carga de 30kN. Ver Figura 13.

Figura 13 - Máquina utilizada para a realização do ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Autora

Para os cálculos dos valores de resistência última à tração, deformação à ruptura e módulo de elasticidade foram utilizadas as seguintes equações:

$$\sigma_f = \left(\frac{P}{A} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde: σ_f é a Tensão última de tração, (MPa); P é a Carga aplicada, (N) e A Área da seção transversal do corpo de prova, (mm²).

$$\epsilon = \left(\frac{\Delta L}{L_o} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde: ϵ é a Deformação, (%); L_o é o Comprimento útil do corpo de prova, (mm) e ΔL é a Variação do comprimento ($L - L_o$), (mm).

$$E = \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \right) \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde: E é o Módulo de elasticidade longitudinal, (MPa); $\Delta\sigma$ é a Variação da tensão na região linear, (MPa) e $\Delta\epsilon$ é a Variação da deformação linear, (%).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIO DE DENSIDADE

Os valores de densidades volumétricas dos laminados propostos podem ser identificados na Tabela 3.

Tabela 3 - Densidades volumétricas do laminado compósito proposto.

DENSIDADE VOLUMÉTRICA (g/cm³)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
ARAMIDA	1,20	0,014
CARBONO	1,35	0,017
VIDRO	1,55	0,054
ARAMIDA/CARBONO	1,25	0,007
VIDRO/CARBONO	1,42	0,057

Fonte: Autora.

Como consta na Tabela 3 os resultados do ensaio de densidade para as amostras das lâminas de fibra de vidro, fibra de carbono e fibra de aramida, assim como os híbridos carbono/aramida e vidro/carbono, é possível afirmar que a lâmina de fibra de aramida apresentou a menor média de 1,20 g/cm³, seguida do híbrido aramida/carbono com 1,25 g/cm³, no entanto, este último apresenta um desvio padrão com o valor de 0,007 o que é metade do desvio padrão para a lâmina de aramida. Ambos apresentam baixa densidade e menores desvios padrão, em relação aos demais.

A lâmina de vidro apresenta os maiores valores tanto para a média quando para o desvio padrão sendo 1,55 g/cm³ e 0,054 respectivamente. Os valores intermediários são para a lâmina de fibra de carbono cujos valores são uma média 1,35 g/cm³ e desvio padrão de 0,017 o híbrido aramida/carbono com média de 1,42 g/cm³ e desvio padrão de 0,057.

Nesse sentido, o ensaio de densidade obteve os resultados esperados, posto que, decorrente da mistura matriz/reforço e sabendo que a densidade da resina é na faixa de 1,11 g/cm³ e as densidades das fibras de vidro 2,55 g/cm³, fibra de carbono 1,80 g/cm³ e fibra de aramida 1,45 g/cm³ foram obtidos valores de densidade intermediários para os laminados não híbridos.

4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL

As propriedades mecânicas de resistência última à tração (MPa), módulo de elasticidade (GPa) e deformação à ruptura (%) do material para as condições lâmina de fibra de Vidro (**V**), lâmina de fibra de Carbono (**C**), lâmina de fibra de Aramida (**A**), compostos híbridos Aramida/Carbono (**A/C**) e Vidro/Carbono (**V/C**) foram obtidas a partir da realização de ensaios de tração uniaxial.

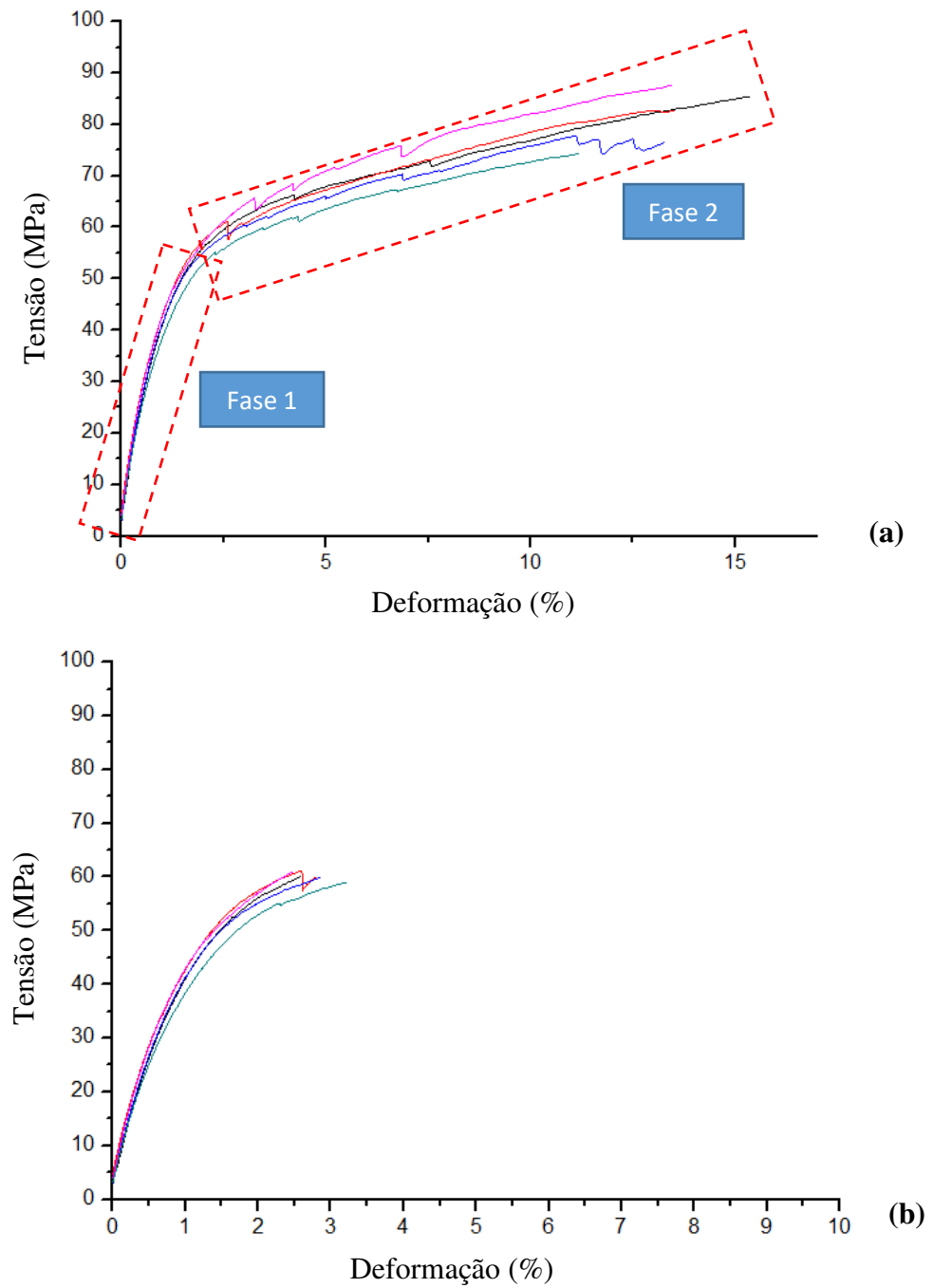
Vale salientar que os compósitos laminados com orientação $\pm 45^\circ$ são submetidos a tensões cisalhantes, devido a reorientação que a fibra sofre ao tentar se alinhar no sentido do carregamento. Souza (2017) afirma que esse fator proporciona uma linearidade tensão/deformação de até 25% da carga aplicada na zona de regime elástico, começo de fissuração e região de falha na fibra até a ruptura final.

4.2.1 Análise nos corpos de prova para a condição lâmina de fibra de Vidro (**V**)

Ensaio de tração

O gráfico da Figura 14 (**a**) apresenta o comportamento do material onde é possível, a partir das curvas, perceber que ocorrem duas fases diferentes, a fase (**1**) ocorre na região linear. A fase (**2**) gráfico (**b**) é a região não linear onde acontece a estrição resultando na ruptura do material.

Figura 14 - (a) Tensão x Deformação – V; (b) Tensão x Deformação na região linear - V.



Fonte: Autora.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos corpos de prova – V.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DESVIO PADRÃO
Deformação de Projeto (%)	2,788	0,2881
Deformação Total (%)	13,74	1,7489
Tensão de Projeto (MPa)	60,20	0,8791
Tensão de Ruptura (MPa)	80,76	6,4154
Módulo de Elasticidade (GPa)	5,11	0,3788

Fonte: Autora.

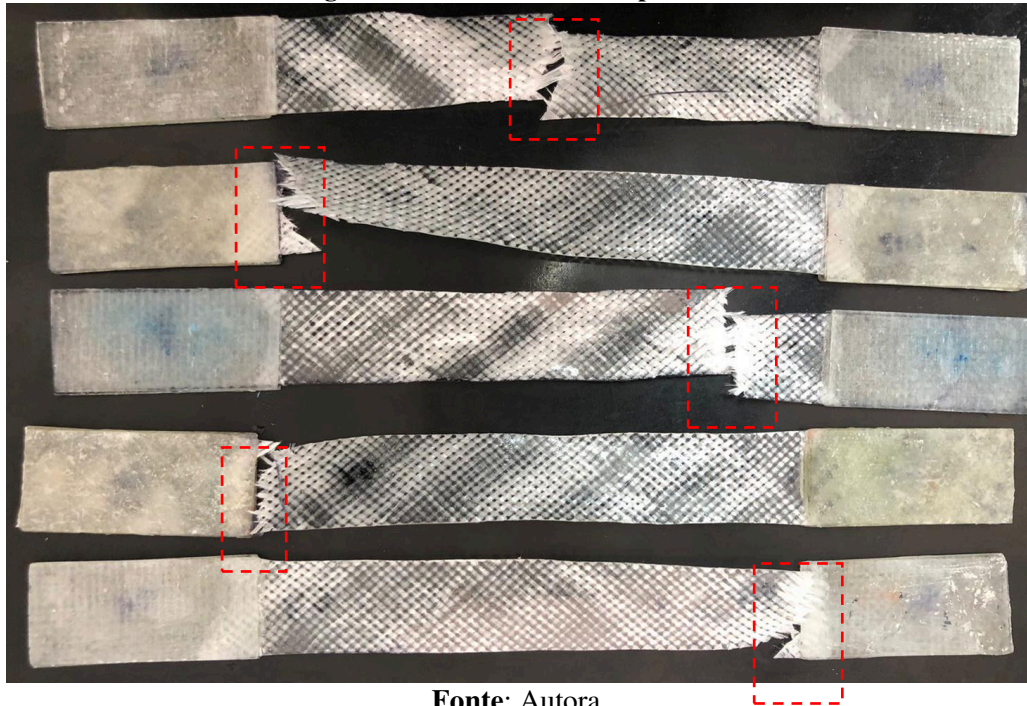
A partir dos valores obtidos na região linear observada no gráfico apresentado na Figura 15 (b) calcula-se os valores de Deformação de Projeto 2,788%, Tensão de Projeto 60,20 MPa – que correspondem aos valores para a região linear, onde ocorre a deformação elástica – e módulo de 5,11 GPa, esses são os valores recomendados para utilização em projetos. Tinô (2010), em estudo realizado com laminados reforçados por fibra de vidro, apresenta os resultados obtidos no ensaio de tração para as propriedades mecânicas: resistência última à tração 93,89MPa; módulo de elasticidade 2,21GPa e deformação de ruptura 4,00%.

Análise da fratura macroscópica

Em relação à análise da fratura macroscópica os corpos de prova fraturados apresentaram comportamento que corresponde ao padrão de ensaios ocorrendo a fratura dentro do limite de comprimento útil de 127 mm, o que pode ser observado na Figura 12, a fratura mecânica obtida no V atende ao modo de falha AGM (*Angled - gage – middle*) e LAT (*Lateral - at grip – top*), norma ASTM D 3039 (2014), como visto na Tabela 1 e Figura 2.

De acordo com o gráfico da Figura 14 (a) entende-se que o fenômeno de estricção se deve à mudança nas curvas da fase (1) para fase (2) onde o material sai da fase linear, onde apresenta uma deformação elástica, para a fase não linear caracterizada pela deformação plástica até atingir o limite de tensão onde o material rompe. A Figura 15 apresenta o material pós ensaio caracterizando a fratura macroscópica angular e no meio do galgo.

Figura 15 - Fratura macroscópica – V.



Fonte: Autora.

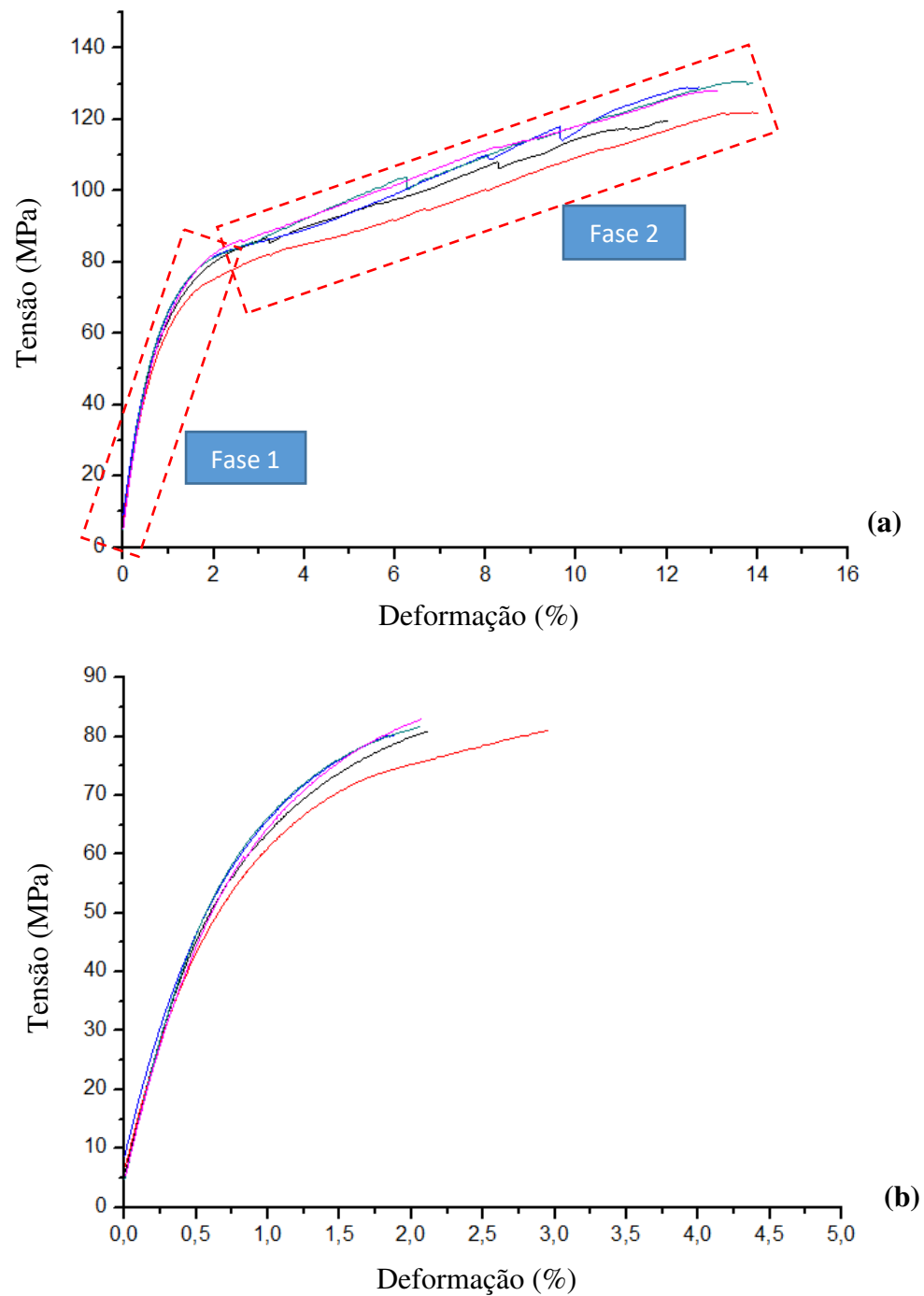
Em estudo realizado por Tinô (2010), para descontinuidade na seção transversal em laminados compósitos poliméricos, o autor obtém resultados semelhantes para os corpos de prova orientados à $\pm 45^\circ$ onde o mesmo observa que a linearidade entre tensão e deformação se mantém até certo valor de carga de ruptura, desse ponto em diante o gráfico começa a apresentar comportamento não linear, o autor ainda afirma haver coincidência entre a mudança de comportamento linear para o não linear com o início do processo de fissuração da matriz (TINÔ, 2010).

4.2.2 Análise nos corpos de prova para a condição lâmina de fibra de Carbono (C)

Ensaio de tração

O gráfico da Figura 16 que ilustra o comportamento para a lâmina de fibra de Carbono apresenta duas fases distintas.

Figura 16 - (a) Tensão x Deformação – C; (b) Tensão x Deformação na região linear - C.



Fonte: Autora.

Desse modo, a curva Figura 16 gráfico (b) apresenta uma região linear em relação onde consta uma tensão de projeto de 81,46 MPa como citado, em relação a lâmina de fibra de Vidro, por exemplo, é uma tensão bem superior, enquanto que a lâmina de fibra de Carbono consegue oferecer uma tensão de 81,46 MPa a lâmina de fibra de Vidro atinge uma tensão de projeto inferior de 60,20 MPa em sua região linear. Além disso, o módulo para as lâminas

comparadas também difere, enquanto (C) tem módulo calculado de 9,62 GPa (V) apresenta um módulo inferior calculado em 5,11 GPa. Souza (2017) realizou ensaio de tração em lâminas de fibra de carbono orientada a $\pm 45^\circ$ e obteve uma média de resistência última à tração de 61,094MPa e desvio padrão de 9,122.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos corpos de prova – C.

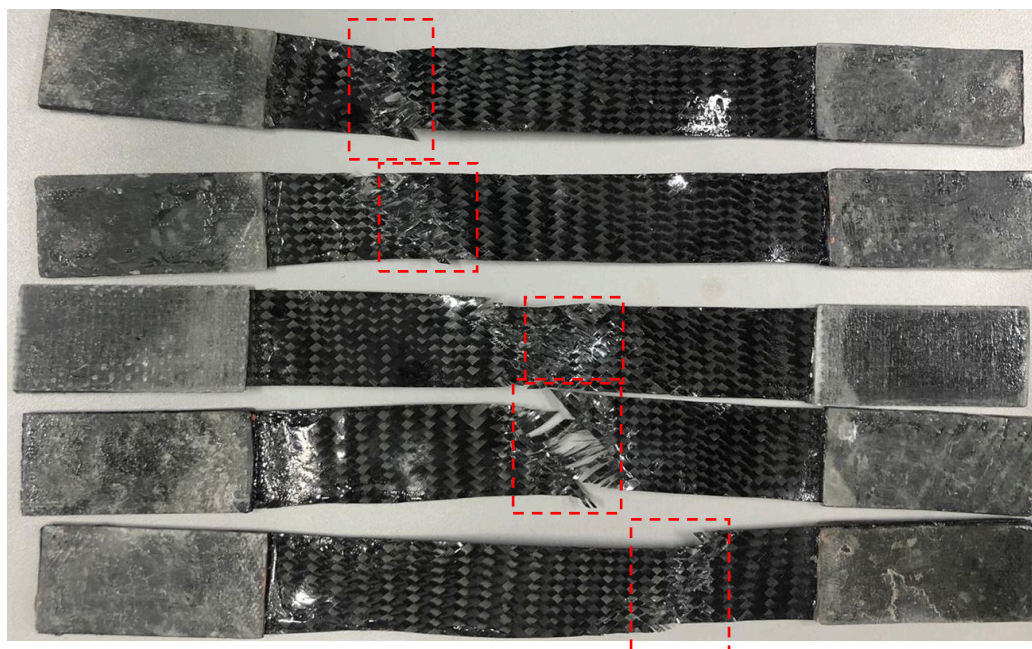
PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DESVIO PADRÃO
Deformação de Projeto (%)	2,22	0,4097
Deformação Total (%)	13,16	0,8369
Tensão de Projeto (MPa)	81,46	0,9024
Tensão de Ruptura (MPa)	125,61	4,8530
Módulo de Elasticidade (GPa)	9,62	0,4961

Fonte: Autora.

Análise da fratura macroscópica

A Figura 17 mostra a região fraturada nos corpos de prova C. Observa-se que a fratura ocorre dentro do comprimento útil caracterizando o ensaio como válido. Além disso, a fratura mecânica atende ao modo de falha **AGM** (*Angled - gage - middle*), norma ASTM D 3039 (2014).

Figura 17 - Fratura macroscópica – C.



Fonte: Autora.

4.2.3 Análise nos corpos de prova para a condição lâmina de fibra de Aramida (A)

Ensaio de tração

Para o ensaio de tração uniaxial das amostras de lâmina com fibra de Aramida tem-se que o material apresenta curva tensão x deformação mais acentuada indicando que o mesmo pode se deformar mais antes de fratura, o que sugere a característica de material dúctil mais acentuada. A deformação pode ser percebida pela diferença entre o corpo de prova Figura 18(a) na condição original antes de receber a carga e o corpo de prova Figura 18(b) depois de ensaiado, onde é possível perceber a ocorrência de estrição caracterizada pela diminuição da área da seção transversal.

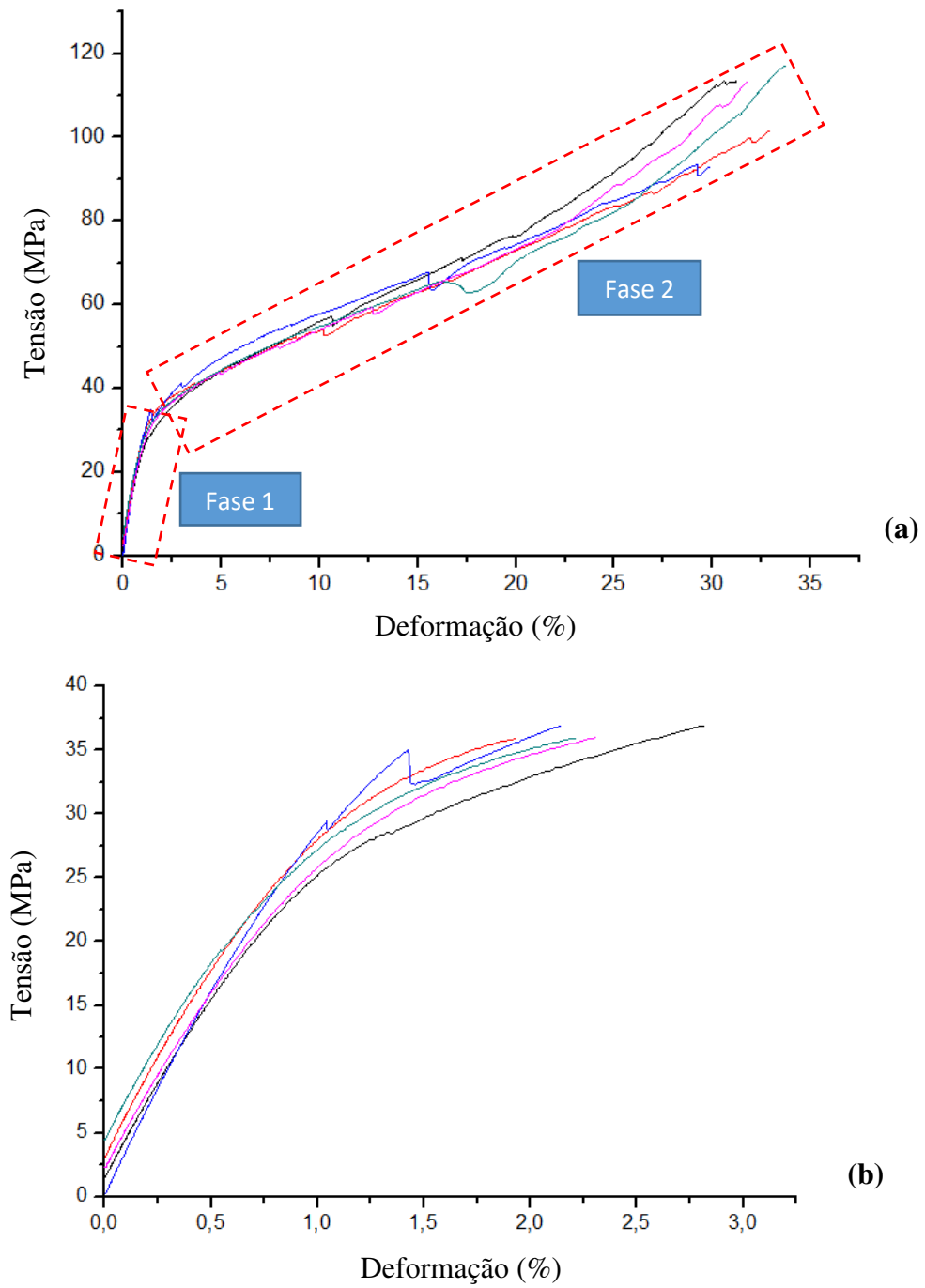
Figura 18 - (a) corpo de prova antes do ensaio x (b) corpo de prova pós ensaio



Fonte: Autora.

Como pode ser observado na Figura 19, as curvas apresentam comportamento semelhante aos demais ensaios contendo duas fases distintas. No entanto, ao analisar os gráficos (a) e (b), nota-se que a região linear, detalhada no gráfico (b) conta com uma fase (1) onde a tensão de projeto é bastante inferior às demais amostras ensaiadas.

Figura 19 - (a) Tensão x Deformação – A. (b) gráfico Tensão x Deformação região linear – A



Fonte: Autora.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas dos corpos de prova - A.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DESVIO PADRÃO
Deformação de Projeto (%)	2,28	0,3294
Deformação Total (%)	31,90	1,4869
Tensão de Projeto (MPa)	36,32	0,5063
Tensão de Ruptura (MPa)	107,58	9,9929
Módulo de Elasticidade (GPa)	3,26	0,3274

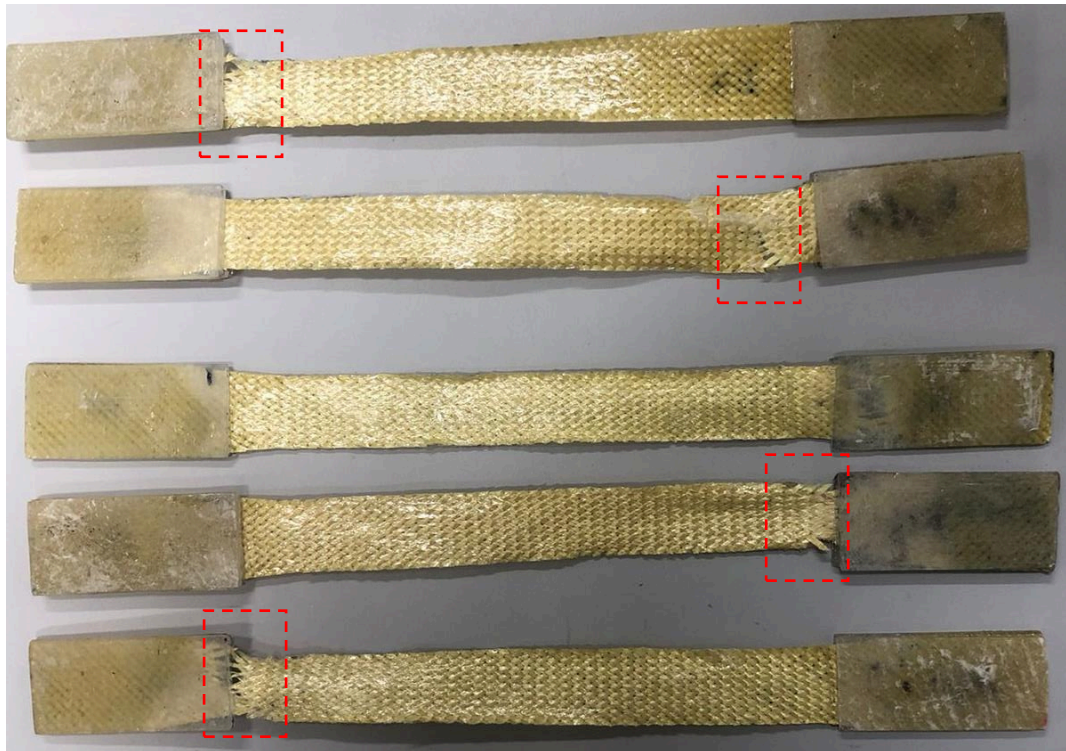
Fonte: Autora.

A lâmina de fibra de Aramida (**A**) aceita um limite de deformação superior aos demais, além disso, embora a tensão de ruptura do material seja alta tendo a média de 107,58 MPa, a tensão de projeto é bem inferior aos demais tendo um valor médio de 36,32 MPa e a partir desse ponto começando o processo de estrição na fase **(2)** não linear até a ruptura, identificado na Figura 19 gráfico **(a)**. Dentre as amostras é o material que apresenta maior ductibilidade.

Análise da fratura macroscópica

A Figura 20 mostra a região do **A** fraturada. Seguindo o padrão dos ensaios realizados a fratura, para os corpos de prova na condição laminado fibra de Aramida (**A**), está ocorrendo dentro do comprimento útil, caracterizando o tipo de fratura normatizada **LAT** (*Lateral - at grip – top*) a ruptura total das fibras de Aramida, como pede na Figura 1 e Tabela 2.

Figura 20 - Fratura macroscópica – A.



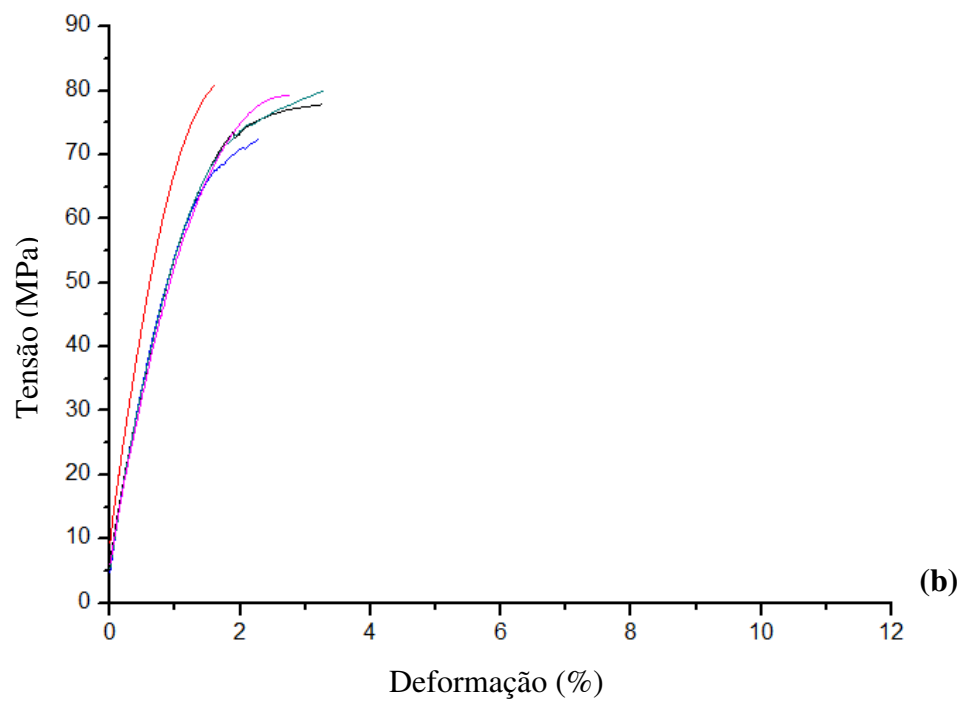
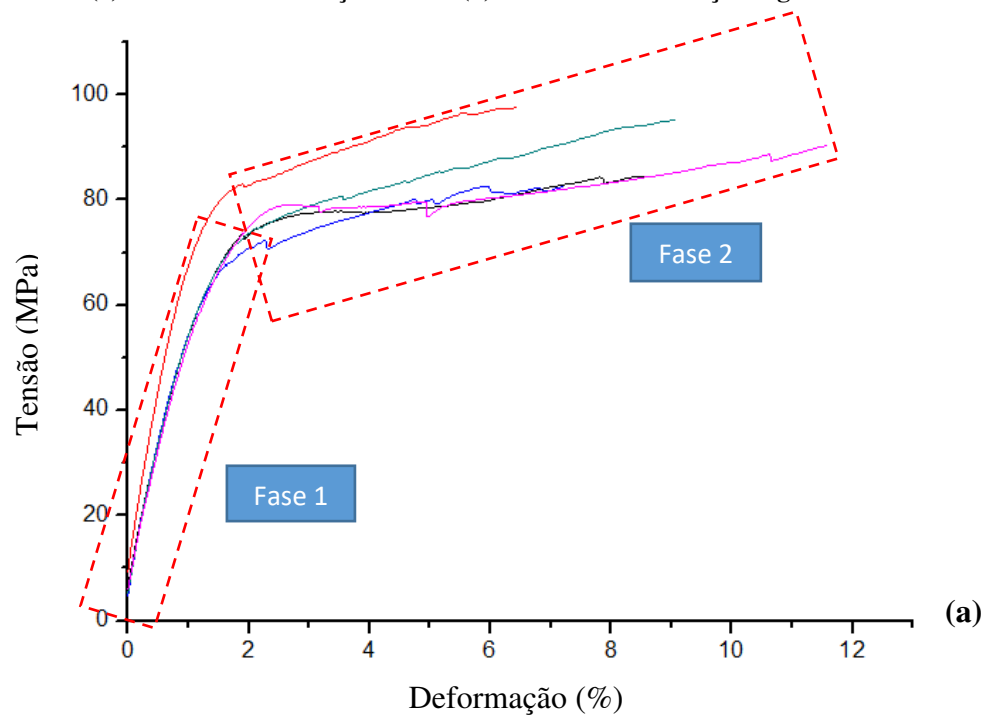
Fonte: Autora.

4.2.4 Análise nos corpos de prova para a condição compósito híbrido Vidro/Carbono (V/C)

Ensaio de tração

O gráfico da Figura 21 ilustra o comportamento do material caracterizado pela hibridização Vidro/Carbono. Neste gráfico são observadas curvas distintas, comportamento semelhante aos demais materiais não híbridos e híbridos ensaiados. A fase (1) Figura 21 gráfico (a) é caracterizada pela região linear enquanto a fase (2) assume comportamento não linear, o gráfico (b) mostra a fase linear de maneira mais detalhada.

Figura 21 - (a) Tensão x Deformação – V/C. (b) Tensão x Deformação região linear – V/C



Fonte: Autora.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas dos corpos de prova - V/C.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DESVIO PADRÃO
Deformação de Projeto (%)	2,63	0,7068
Deformação Total (%)	8,57	1,9734
Tensão de Projeto (MPa)	78,03	3,3827
Tensão de Ruptura (MPa)	90,08	6,5629
Módulo de Elasticidade (GPa)	6,89	1,2392

Fonte: Autora.

Pode-se perceber pela Tabela 7 que a tensão de projeto média assume valor de 78,03MPa e a deformação de projeto 2,636%. Quando comparados aos valores obtidos para as lâminas de fibra de Vidro (V) e fibra de Carbono (C) pode-se afirmar que, para a tensão de projeto o híbrido V/C obteve um valor de 78,03MPa sendo superior ao obtido pela lâmina de fibra de Vidro (V) 60,20MPa, porém, embora próximo, o híbrido V/C resultou em um valor menor quando comparado à lâmina de fibra de Carbono (C) 81,46MPa.

Nesse sentido, é possível afirmar que em relação à lâmina de fibra de vidro (V) a utilização do híbrido (V/C) assume melhor condição de projeto na Tabela 8.

Tabela 8 - Comparativo lâmina V x lâmina C x Híbrido V/C.

COMPARATIVO	Deformação de projeto (%)	Tensão de projeto (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Lâmina V	2,78	60,20	5,11
Lâmina C	2,22	81,46	9,62
Híbrido V/C	2,63	78,03	6,89

Fonte: Autora.

Pela Tabela 8 é possível concluir que ao se utilizar o tecido híbrido Vidro/Carbono (V/C) percebe-se um aumento na tensão em projeto de 29,61% e no módulo de elasticidade de 34,83% em relação à lâmina de fibra de Vidro (V). A fibra de Carbono obteve um maior desempenho tanto para a tensão de projeto quanto para o módulo de elasticidade, o que já era esperado por se tratar de uma fibra de maior desempenho, apresentando um aumento de 8,24%

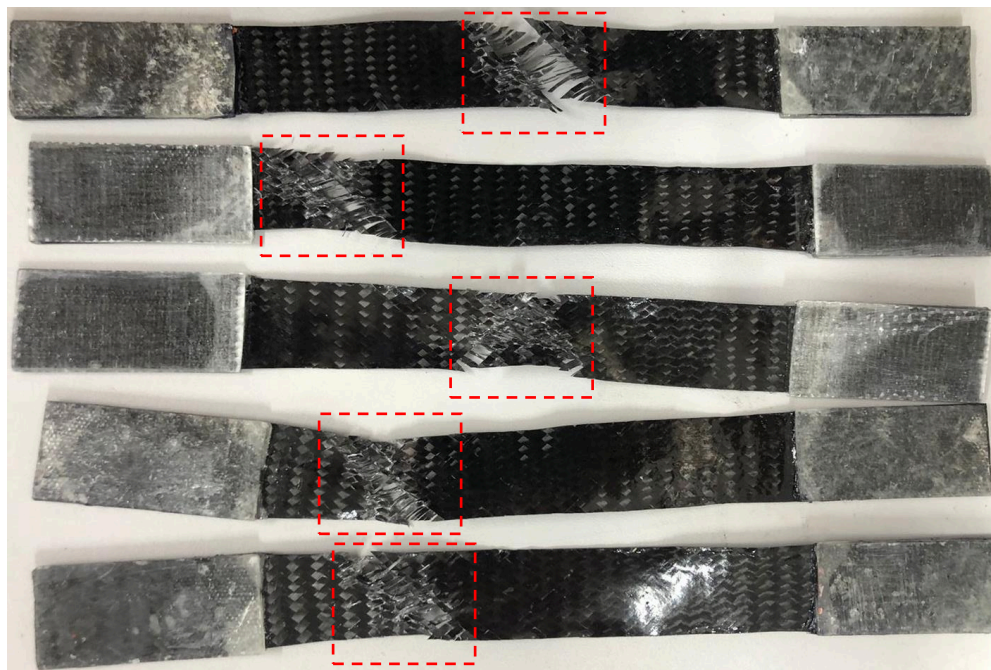
para tensão de projeto e 39,66% para o módulo de elasticidade em relação ao híbrido Vidro/Carbono V/C.

Vale salientar que a fibra de Carbono utilizada no tecido híbrido Vidro E/Carbono é a T300 que é uma fibra de baixo módulo, enquanto que a fibra de carbono utilizada na lâmina de fibra de carbono é a HTS40, classificada como uma fibra de médio módulo.

Análise da fratura macroscópica

A Figura 22 mostra a região do V/C fraturada. Para todos os corpos de prova válidos o local da fratura ocorre dentro do comprimento útil, assim as amostras apresentam comportamento semelhante as demais onde ocorre o tipo de fratura normatizada **AGM** (*Angled - gage - middle*) e a ruptura total dos híbridos de Vidro/Carbono atendem às normas contidas na Figura 1 e Tabela 2. O que pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 - Fratura macroscópica – V/C



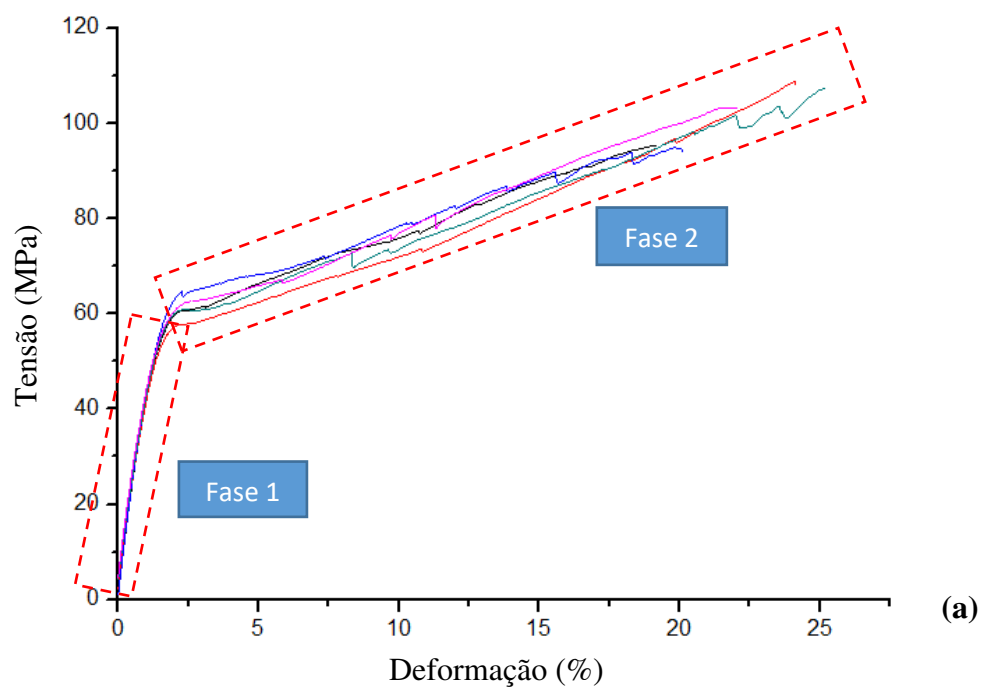
Fonte: Autora.

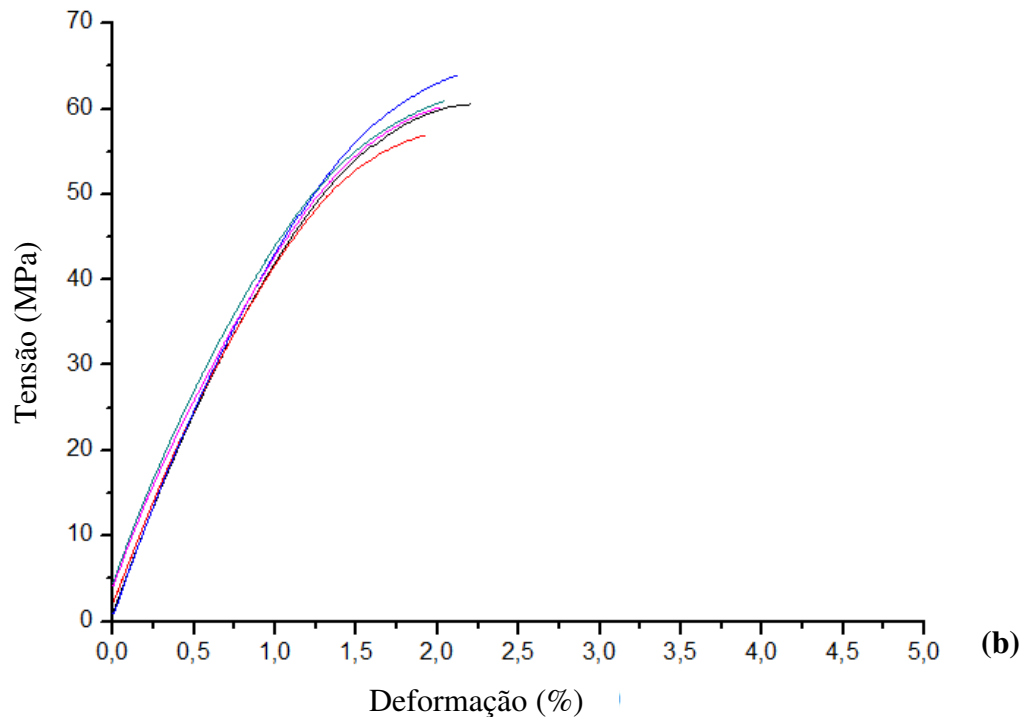
4.2.5 Análise nos corpos de prova para a condição compósito híbrido Aramida/Carbono (A/C)

Ensaio de tração

Com relação aos ensaios de tração uniaxial na condição híbrido Aramida/Carbono (A/C), no gráfico (a) da Figura 23 são claramente evidenciadas duas regiões distintas, que podem ser classificadas por duas fases, a fase (1) onde ocorre a região linear e a fase (2) onde está ocorrendo a fase não linear. O gráfico (b) ilustra a região linear, nesta fase é perceptível que o compósito híbrido A/C atinge um valor médio para tensão de projeto de 60,50MPa e para deformação de projeto de 2,06%.

Figura 23 - (a) Tensão x Deformação – A/C; (b) Tensão x Deformação na região linear – A/C.





Fonte: Autora.

Tabela 9 - Propriedades mecânicas dos corpos de prova – A/C.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DESVIO PADRÃO
Deformação de Projeto (%)	2,06	0,1074
Deformação Total (%)	22,13	2,5523
Tensão de Projeto (MPa)	60,50	2,4968
Tensão de Ruptura (MPa)	101,62	6,6687
Módulo de Elasticidade (GPa)	4,81	0,2109

Fonte: Autora.

De acordo com a Tabela 9 o híbrido (A/C) apresenta uma deformação de projeto de 2,06%, tensão de projeto média de 60,50MPa e módulo de 4,81GPa, sendo esses os valores indicados para utilização em projetos, posto que, é o valor referente à região linear.

Em comparação aos valores referentes às lâminas de fibra de Aramida (A) e lâminas de fibra de Carbono, o híbrido (A/C) prevalece em relação ao primeiro, porém, diante do segundo o híbrido não é capaz de apresentar propriedades mecânicas melhores.

Traçando um comparativo para lâmina A x lâmina C x híbrido A/C (Tabela 10) conclui-se que o híbrido possui menor deformação de projeto dentre as três amostras, mas em relação à tensão de projeto e ao módulo de elasticidade obteve-se valores intermediários, dadas as

propriedades dos materiais originários. De maneira semelhante ao que se concluiu pela leitura da Tabela 8, o híbrido A/C leva vantagem em relação à lâmina de fibra de Aramida (A).

Tabela 10 - Comparativo lâmina A x lâmina C x híbrido A/C.

COMPARATIVO	Deformação de projeto (%)	Tensão de projeto (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Lâmina A	2,28	36,32	3,26
Lâmina C	2,22	81,46	9,62
Híbrido A/C	2,06	60,50	4,81

Fonte: Autora.

De acordo com a Tabela 10 percebe-se que, em relação à lâmina de fibra de Aramida (A) o híbrido Aramida/Carbono (A/C) obteve um desempenho superior cujo aumento foi significativo para tensão de projeto em 66,57% e para o módulo de elasticidade em 47,54%. Porém quando comparado à lâmina de fibra de carbono, o híbrido não superou seu desempenho mecânico, uma vez que, a lâmina de carbono apresentou um aumento de 34,64% para tensão de projeto e em relação ao módulo de elasticidade teve um aumento de 100%. É nitidamente perceptível que ao adicionar a fibra de carbono a tensão de projeto melhorou significativamente se comparada ao valor para a lâmina de fibra de Aramida, assim também houve um aumento para o módulo de elasticidade. De maneira isolada, percebe-se que a fibra de Carbono alcança valores superiores de tensão de projeto e módulo de elasticidade.

Em relação aos compósitos híbridos a Tabela 11 apresenta um comparativo onde percebe-se os valores de projeto dos materiais.

Tabela 11 - Comparativo híbrido V/C x híbrido A/C.

COMPARATIVO	Deformação de projeto (%)	Tensão de projeto (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Híbrido V/C	2,636	78,03	6,89
Híbrido A/C	2,06	60,50	4,81

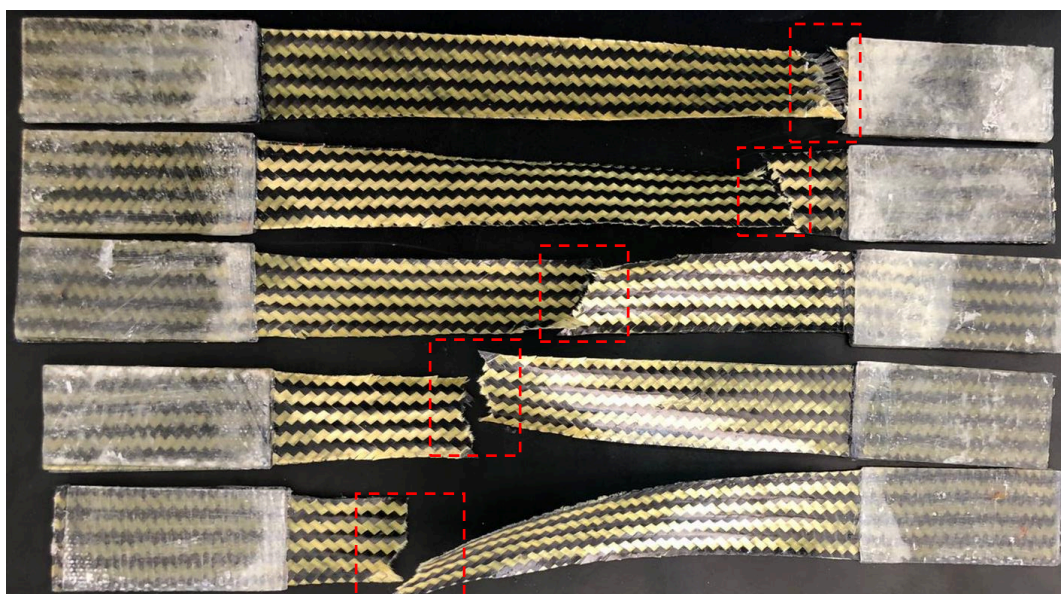
Fonte: Autora.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios e pela Tabela 11, quando comparados o híbrido (V/C) tem melhor desempenho em relação ao híbrido (A/C) obtendo um aumento na tensão de projeto em 28,97% e módulo de elasticidade em 43,24%. É importante ressaltar que a fibra de carbono utilizada no híbrido Vidro/Carbono é a T300 caracterizada por ser uma fibra de baixo módulo, para o híbrido Aramida/Carbono Twaron D2200 /Carbono HTS40 foi utilizada uma fibra de carbono de médio módulo elevando consideravelmente as condições de projeto em relação à lâmina de Aramida, porém não sendo capaz de superar a combinação das propriedades do compósito híbrido V/C. Logo, sabendo-se que o custo da fibra de vidro é menor que a fibra de aramida, em solicitações que exijam um esforço a 45° é mais vantajoso a utilização da hibridização Vidro/Carbono.

Análise da fratura macroscópica

A região fraturada do híbrido A/C pode ser observada na Figura 24. É possível notar que o local onde ocorre a fratura, em todos os corpos de prova, está dentro do comprimento útil, assim as amostras apresentam comportamento semelhantes as demais onde ocorre o tipo de fratura normatizada **AGM** (*Angled - gage – middle*), **LGM** (*Lateral - gage – middle*) e **LAT** (*Lateral - at grip – top*), a ruptura total dos híbridos Aramida/Carbono estão validadas, como pede na Figura 1 e Tabela 2.

Figura 24 - Fratura macroscópica – A/C



Fonte: Autora.

5 CONCLUSÕES

Com relação aos resultados obtidos no ensaio de densidade, a lâmina de fibra de Vidro possui a maior densidade volumétrica e desvio padrão dentre as amostras, nos valores 1,55 g/cm³ e 0,054, respectivamente. A lâmina de fibra de Aramida obteve o menor valor para densidade volumétrica de 1,20 g/cm³ dentre as amostras e o seu desvio padrão é 0,014. O compósito híbrido Aramida/Carbono obteve um valor de densidade de 1,25 g/cm³ e um desvio padrão de 0,017 inferior ao obtido pelo compósito híbrido Vidro/Carbono cujo valor foi de 1,42 g/cm³ e desvio padrão de 0,057.

Os resultados referentes ao ensaio de tração permitem concluir que os compósitos híbridos e não híbridos apresentam comportamento característico dos materiais compósitos com presença de uma região linear onde foram determinados os valores de tensão de projeto, deformação de projeto e módulo de elasticidade para as amostras nas diferentes condições.

De maneira geral, a lâmina de fibra de Carbono apresentou o maior valor para tensão de projeto de 81,46 MPa dentre as amostras, condizendo com o esperado, uma vez que, é uma fibra de maior desempenho. Em contrapartida a lâmina de fibra de Aramida obteve o menor valor de tensão de projeto 36,32 MPa, em sua região linear, embora sua tensão de ruptura tenha sido de 101,63 MPa. Os compósitos híbridos Aramida/Carbono e Vidro/Carbono ofereceram melhores condições de projeto do que as condições Lâmina de fibra de Aramida e lâmina de fibra de vidro. O híbrido Aramida/Carbono proporcionou uma tensão de projeto de 60,50 MPa enquanto que a lâmina de Aramida apresentou tensão de apenas 36,32 MPa, já o híbrido Vidro/Carbono ofereceu uma tensão de projeto de 78,03 MPa, valor superior àquela ofertada pela lâmina de Vidro cujo valor foi de 60,20 MPa.

Em suma, para as condições ensaiadas a lâmina de fibra de Carbono foi aquela que ofertou as melhores condições de projeto para tensão de projeto 81,46 MPa e módulos de elasticidade 9,62 GPa mesmo quando comparada aos compósitos híbridos ensaiados. No entanto, a condição compósito híbrido Vidro/Carbono oferece um material com uma tensão de projeto um pouco inferior (78,03 MPa) a da lâmina de fibra de Carbono, porém em relação ao custo apresenta uma vantagem, já que o vidro tem valor de aquisição inferior ao carbono, sendo assim, uma possibilidade interessante para se trabalhar. E ainda, com relação aos híbridos, o híbrido Vidro/Carbono apresenta vantagem referente ao custo, apesar de ser um material um pouco mais denso que o híbrido Aramida/Carbono.

6 REFERÊNCIAS

ASTM D792. **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.

ASTM D3039, **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. 8. ed. tradução Sergio Murilo Stamile Soares; revisão técnica José Roberto Morais D’Almeida. – Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CAMPOS, Virginia Bezerra Oliveira. **Análise de critérios de falha em lâmina reforçada com tecido híbrido de fibra de vidro e carbono**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM. Natal-RN, 2017.

CAVALCANTI, Daniel Kioshi Kawasaki. **Caracterização mecânica de compósitos híbridos com reforços de fibras naturais**. CEFET/RJ. Rio de Janeiro/RJ, 2018.

GAMA, Kelly Nara de Carvalho. **Análise comparativa entre fibras de carbono, vidro e aramida para reforço estrutural em elementos de concreto armado**. 4º Congresso Interdisciplinar de Pesquisa, Iniciação Científica e Extensão Universitária – Centro Universitário Metodista Izabel Hendrix. 22 a 25 de abril de 2019.

KEMERICH, Pedro Daniel Cunha. **Fibras de vidro: caracterização, disposição final e impactos ambientais gerados**. Rev. Elet. Em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental (e-ISSN: 2236-1170) Kemerich et al., v(10), n° 10, p. 2112-2121, JAN-ABR, 2013.

KUASNE, Angela. **Fibras têxteis**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina Unidade de Araranguá – CEFET/SC, 2008.

MEDEIROS, Roberto José de. **Laminado compósito a base de tecido híbrido: anisotropia, furo concêntrico, fratura mecânica e análise por MEF**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM. Natal-RN, 2016.

MENDONÇA, Vanessa Cristina de Souza Melo. **Caracterização das propriedades mecânicas de uma resina epoxy reforçada com nanotubos de carbono e ferro**. IPL – Instituto Politecnico de Leiria. Escola Superior de Tecnologia e Gestão, 2019.

NETO, José R. A. **Influência da adição de uma carga nanoparticulada no desempenho de compósitos poliuretano/fibra de juta**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 17, n°1, p. 10-15, 2007.

SILVA, Bruno Henrique Alves da. **Comportamento compressivo de compósito polimérico a base de tecido híbrido kevlar/vidro**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte/UFRN. Centro de Tecnologia. Curso de Engenharia Mecânica – Natal/RN, 2019.

SILVA, Júlio Rodrigues da. **Reforço híbrido à flexão de vigas “T” de concreto armado com compósitos de fibra de carbono e fibra de vidro.** Universidade de Brasília/DF, 2014.

SOUZA, Marcus Vinícius Ribeiro e. **Efeito de fibras sintéticas nas propriedades de ligantes e concretos asfálticos.** Universidade de Brasília/DF, março de 2010.

SOUZA, Filipi Marques de. **Estudo da descontinuidade geométrica em lâmina de tecido bidirecional vidro/carbono.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM. Natal-RN, 2017.

TINÔ, Sérgio Renan Lopes. **Descontinuidade na seção transversal em laminados compósitos poliméricos: efeitos e propriedades.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM. Natal-RN, 2010.

TROMBETTA, Fabiane. **Uso de fibras de aramidas para melhoria de propriedades de compósitos de borrachas nitrílicas.** Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM – Porto Alegre/RS, 2012.