



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

MOISÉS MEDEIROS DE LIMA

**VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE LÂMINAS POLIMÉRICAS HÍBRIDAS COM
FIBRAS SINTÉTICAS**

CARAÚBAS/RN

2022

MOISÉS MEDEIROS DE LIMA

**VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE LÂMINAS POLIMÉRICAS HÍBRIDAS COM
FIBRAS SINTÉTICAS**

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

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

Coorientador: Prof. Dr. Wendell Albano.

CARAÚBAS/RN

2022

© Todos os direitos estão reservados à 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.

L734v Lima, Moisés Medeiros de.
VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE LÂMINAS
POLIMÉRICAS HÍBRIDAS COM FIBRAS SINTÉTICAS / Moisés
Medeiros de Lima. - 2022.
106 f. : il.

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

1. Tecidos híbridos. 2. Ensaio de tração. 3.
Hibridização. 4. Propriedades mecânicas. I.
Batista, Ana Claudia de Melo Caldas , orient. II.
Albano, Wendell, co-orient. III. 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.

MOISÉS MEDEIROS DE LIMA

**VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE LÂMINAS POLIMÉRICAS HÍBRIDAS COM
FIBRAS SINTÉTICAS**

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

Defendida em: 15 / 06 / 2022.

BANCA EXAMINADORA

ANA CLAUDIA DE MELO CALDAS
BATISTA: [REDACTED]

Assinado de forma digital por
ANA CLAUDIA DE MELO CALDAS
BATISTA: [REDACTED]
Dados: 2022.06.21 19:41:02 -03'00'

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

**DIEGO DAVID
SILVA DINIZ:** [REDACTED]

Assinado digitalmente por DIEGO DAVID SILVA DINIZ:
DN: CN=DIEGO DAVID SILVA DINIZ, [REDACTED]
OU=UFERSA - Universidade Federal Rural do Semi-Árido,
O=ICPEdu, C=BR
Razão: Eu estou aprovando este documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2022.06.21 17:53:03-03'00'
Font: PDF Reader Versão: 11.2.2

Diego David Silva Diniz, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Rudson de Souza Lima

Assinado de forma digital por
Rudson de Souza Lima
Dados: 2022.06.21 13:52:55 -03'00'

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

Dedico este trabalho à minha família, que sempre esteve presente em todos os momentos de minha vida. Seus incentivos e apoio foram primordiais para chegar até aqui. Esta pequena vitória é apenas o começo de outras que virão.

AGRADECIMENTOS

Para chegar neste momento, foi trilhado um caminho com vários obstáculos. Para vencê-los, muitas pessoas contribuíram diretamente ou indiretamente. A todos que contribuíram de alguma forma, o meu muito obrigado.

Inicialmente, gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida em momentos tão difíceis pelos quais passamos, por me proporcionar mais uma conquista acadêmica e por colocar pessoas em meu caminho que contribuíram de forma imprescindível com o meu aprendizado.

Agradeço especialmente a minha orientadora, professora e pesquisadora Dra. Ana Claudia de Melo Caldas Batista, que nunca mediu esforços para me ajudar ou me apoiar durante este trabalho e em todas as pesquisas que fizemos juntos. Agradeço de coração por todas as orientações realizadas neste trabalho, nos artigos, nos projetos de pesquisa e nas orientações e conselhos do dia a dia que levarei para a vida. Uma profissional exemplar, de grande respeito e admiração.

Agradeço ao meu coorientador Dr. Wendell Albano, por todos os ensinamentos durante o projeto do Aero (minha eterna equipe Acceptor Aerodesign), sempre levarei comigo todos os aprendizados adquiridos neste projeto e nos conselhos do professor Wendell.

Agradeço a todos os meus companheiros do projeto Caraubaja e ao professor orientador Dr. Diego David Silva Diniz por toda experiência repassada, conselhos e orientações. Trabalhar neste projeto se tornou para mim um momento de lazer. Estar dentro do laboratório, projetando, fabricando, é um momento em que todos os problemas e preocupações do dia a dia desaparecem com um único foco, fazer o melhor para a equipe Caraubaja.

Agradeço ao técnico Fabricio e ao professor Quirino do laboratório de ensaios e caracterizações mecânicas do curso de engenharia mecânica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) campus Mossoró pela disponibilidade e pelo acompanhamento nos ensaios mecânicos deste trabalho.

Agradeço ao técnico dos laboratórios da engenharia mecânica da UFERSA – Caraúbas (Samir Adson) pela disponibilidade e apoio durante a utilização do laboratório de ensaios metalográficos do campus.

Agradeço ao meu orientador Professor Dr. Daniel Freitas Freire Martins do grupo de pesquisa GPQAT (Grupo de Pesquisa em Química Ambiental e Tecnológica) por todos os ensinamentos durante desenvolvimento deste projeto.

Agradeço a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA - Caraúbas), a todos os professores que colaboraram e construíram bases sólidas no meu desenvolvimento e

aprendizagem para o crescimento profissional, aos técnicos e funcionários terceirizados que sempre estiveram dispostos a ajudar.

A todos que acreditaram no desenvolvimento deste trabalho, que acreditaram que eu chegaria neste momento de conclusão de curso e me deram forças e estímulo para continuar e nunca desistir, em especial aos meus pais e minha irmã (Netiene, Manoel e Manuela).

A minha companheira (Vanessa), por todo amor e carinho em todas as horas. Por sempre me apoiar nos meus sonhos e objetivos e lutar comigo até realizá-los. Agradeço de coração por tudo.

A minha tia Nizeilde, que desde o início me apoiou, incentivou e me deu forças para continuar no curso. Sempre serei eternamente grato por tudo que fez por mim e por toda a nossa família, minha tia.

Aos meus amigos da época do IFRN (Mateus, Samuel e Gustavo) que sempre estiveram comigo, realizando trabalhos e projetos juntos e que mesmo distante sempre mantivemos contato e me ajudaram quando precisei.

“Que todos os nossos esforços estejam sempre focados no desafio à impossibilidade. Todas as grandes conquistas humanas vieram daquilo que parecia impossível”.

Charles Chaplin

RESUMO

Um dos ramos que vem se tornando cada vez mais importante para a engenharia é a tecnologia de desenvolvimento de novos materiais que atendam a variadas condições de serviço, onde em sua maioria é atrelado a condições de propriedades de alto desempenho estrutural, minimização de custo, leveza, entre outros. Diante desta premissa, surge os materiais compósitos, utilizados em larga escala nos mais variados ramos tecnológicos, principalmente nos setores aeroespacial e automobilístico, onde atualmente vem se destacando os tecidos híbridos desenvolvidos. Assim, o objetivo deste trabalho foi de verificar a viabilidade da utilização dos tecidos híbridos quando comparado as suas propriedades e o seu custo-benefício. Para isso foram avaliadas as propriedades mecânicas à tração em cinco lâminas (uma única camada) de compósito polimérico avaliando as principais fibras sintéticas (vidro, aramida e carbono) e seus respectivos tecidos híbridos (carbono/aramida e carbono/vidro) comparando suas propriedades e seu custo-benefício. Foram realizados neste trabalho ensaios de tração em corpos de prova seguindo a norma ASTM D3039 (2017) com o carregamento aplicado nas fibras sintéticas puras carbono, vidro, aramida e nas fibras sintéticas híbridas: carbono/vidro (aplicado na direção longitudinal da fibra de carbono 0° - urdume e na direção longitudinal da fibra de vidro 90° - trama); carbono/aramida (aplicado na direção longitudinal da fibra de carbono 0° - urdume e na direção longitudinal da fibra de aramida 90° - trama). O estudo demonstrou de forma geral que, com a utilização de lâminas híbridas é possível obter propriedades mecânicas excelentes à tração atrelado a uma grande viabilidade econômica, se destacando alguns efeitos positivos da hibridização: o ensaio de tração na lâmina carbono/vidro apresentou resultado semelhante a lâmina carbono/aramida (ambos no sentido carbono), justificando a utilização da hibridização do carbono/vidro por ter custo 41,56% menor comparado ao carbono/aramida; em relação a módulo de elasticidade a lâmina carbono/vidro direção carbono obteve resultado semelhante a lâmina de carbono, o que justifica a utilização da hibridização do carbono/vidro por ter 76,50% menor custo comparado ao carbono puro; em relação a densidade a lâmina de carbono/aramida obteve um decréscimo de 8% em relação a lâmina de carbono, apresentando características mecânicas semelhantes, o que torna mais viável a utilização da hibridização carbono/aramida por ter 24,68% menor custo comparado a lâmina de carbono puro. A partir desta pesquisa, foi possível evidenciar a influência da hibridização, mostrando suas vantagens e desvantagens em relação a comportamento mecânico e custo-benefício.

Palavras-chave: Tecidos híbridos. Ensaio de tração. Hibridização. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

A considerable growing engineering branch is the development of new materials and the technologies associated with them. These new materials are such that they can meet different required service conditions, mainly: high structural performance characteristics, minimal cost, lightness, etc. Hence the development of composite materials, which are largely applied in several technological branches (aerospatial and automotive fields, for example), and, more specifically, the distinguished hybrid fabrics. That said, this work aimed to verify the viability of applying hybrid fabrics based on their properties and cost-benefit relationships. For this purpose, the tensile properties of five polymeric composite laminates (one layer each) were evaluated. The main synthetic fibers (glass, aramid, and carbon) and their respective hybrid fabrics (carbon/aramid and carbon/glass) were then assessed and their properties and cost benefits were compared. Tensile tests were performed on tensile specimens according to the ASTM D3039 (2017) standard such that the load was applied on pure synthetic fibers (carbon, glass, aramid) and on synthetic hybrid fibers: on the carbon/glass laminate the load was applied lengthwise both to the carbon fiber (0°, warp) and to the glass fiber (90°, weft); on the carbon/aramid laminate the load was again applied lengthwise both to the carbon fiber (0°, warp) and to the aramid fiber (90°, weft). The study showed that, in general, the employment of hybrid laminate offers great tensile properties, but it is also economically viable. Some hybridization's positive effects were noted as well: the carbon/glass experiment's results were similar to the carbon/aramid's when performed carbon lengthwise. This justifies why deploying carbon/glass hybridization since it is 45.56% cheaper than carbon/aramid. The carbon/glass's Young's module was similar to pure carbon's. This also supports the use of carbon/glass laminate, since it is 76.50% cheaper than the pure carbon laminate. The carbon/aramid laminate, in turn, was 8% less dense than the carbon laminate, even though their properties were alike, thus encouraging the use of the hybrid laminate (24,68% cheaper). Therefore, this research indicates the influence of hybridization, highlighting its advantages and disadvantages based on its mechanical behavior and cost-benefit.

Keywords: Hybrid fabrics. Tensile Testing. Hybridization. Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (a) tipo <i>roving</i> . (b) Tecido unidirecional tipo tela 1x1, (c) Tecido bidirecional tipo tela 1x1 e (d) Tecido bidirecional tipo sarja 3x1.....	27
Figura 2: Formas de comercialização da fibra de carbono, exemplo: (a) tipo <i>roving</i> . (b) Tecido sarja 2x2, (c) Tecido multiaxial e (d) <i>braided</i>	29
Figura 3: Formas de comercialização da fibra de aramida, exemplo: (a) tipo <i>roving</i> . (b) Tecido sarja 2x2, (c) Manta e (d) <i>braided</i>	30
Figura 4: Densidade volumétrica das fibras de vidro, carbono e aramida.....	31
Figura 5: Resistência última a tração das fibras de vidro, carbono e aramida.....	32
Figura 6: Módulo de elasticidade das fibras de vidro, carbono e aramida.....	32
Figura 7: Composição estrutural do Boeing 787 Dreamliner.....	34
Figura 8: Bordos de ataque do Airbus A380 fabricado com fibra de vidro.....	35
Figura 9: Aplicação de materiais compósitos no setor automobilístico.....	36
Figura 10: Processo de laminação manual (<i>Hand Lay-Up</i>).....	38
Figura 11: Esquemático de ensaio de tração uniaxial.....	39
Figura 12: Modos de falha dos compósitos submetidos à tração (ASTM D3039, 2017).....	40
Figura 13: Resina Epóxi 2001 e Endurecedor 3154.....	42
Figura 14: Tecido sarja 2x2 de fibra de carbono.....	43
Figura 15: Tecido bidirecional 1x1 de fibra de vidro/E.....	44
Figura 16: Tecido bidirecional 1x1 de fibra de aramida Twaron D2200.....	45
Figura 17: Tecido híbrido sarja 2x2 carbono/aramida.....	46
Figura 18: Tecido híbrido carbono/vidro sarja 2x2.....	47
Figura 19: Ilustração de um TAB em um CP.....	48
Figura 20: (a) Resina Poliéster e Catalizador; (b) Manta de fibra de vidro.....	48
Figura 21: Rolo utilizado na laminação.....	49
Figura 22: Fluxograma da elaboração do trabalho.....	50
Figura 23: Etapas do processo de fabricação das lâminas de compósitos.....	51
Figura 24: Placas Laminadas.....	52
Figura 25: Esquemático com as dimensões (mm) dos corpos de prova para o ensaio de tração uniaxial.....	53
Figura 26: Exemplares de CP's já finalizados.....	53
Figura 27: Procedimentos de fabricação dos TABs.....	55

Figura 28: Procedimentos de fixação dos TABs nos CP's: (a) Lixando a parte de fixação do CP, (b) Impregnando resina no local do TAB, (c) TABs fixados nos CP's.....	56
Figura 29: Máquina universal DL-10000, da EMIC com célula de carga de capacidade máxima de 30 KN.....	57
Figura 30: Medições de espessuras e largura dos CP's.....	58
Figura 31: Corpos de prova pronto para o ensaio de densidade volumétrica.....	59
Figura 32: (a) Corpos de prova recortados dentro de travessa de vidro, (b) Travessa com os corpos de prova dentro da estufa, (c) Estufa utilizada, (d) Corpos de prova após a estufa sendo resfriado dentro de dessecador.....	60
Figura 33: (a) pesagem dos corpos de prova secos, (b) pesagem do afundador corpo de prova imerso em água destilada.....	61
Figura 34: CP's LC após o ensaio de tração uniaxial.....	91
Figura 35: CP's LV após o ensaio de tração uniaxial.....	92
Figura 36: CP's LA após o ensaio de tração uniaxial.....	93
Figura 37: CP's LCV-C após o ensaio de tração uniaxial.....	94
Figura 38: CP's LCV-V após o ensaio de tração uniaxial.....	95
Figura 39: CP's LCA-C após o ensaio de tração uniaxial.....	96
Figura 40: CP's LCA-A após o ensaio de tração uniaxial.....	97

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Diagrama tensão x deformação do LC	66
Gráfico 2: Diagrama tensão x deformação do LV	69
Gráfico 3: Diagrama tensão x deformação do LA	71
Gráfico 4: Diagrama tensão x deformação do LCV-C	73
Gráfico 5: Diagrama tensão x deformação do LCV-V	75
Gráfico 6: Diagrama tensão x deformação do LCA-C	77
Gráfico 7: Diagrama tensão x deformação do LCA-A	79
Gráfico 8: Deformação dos CP's LC , LCV-C e LCA-C	81
Gráfico 9: Resistência à tração dos CP's LC , LCV-C e LCA-C	82
Gráfico 10: Módulo de elasticidade dos CP's LC , LCV-C e LCA-C	83
Gráfico 11: Deformação dos CP's LV e LCV-V	84
Gráfico 12: Resistência à tração dos CP's LV e LCV-V	84
Gráfico 13: Módulo de elasticidade dos CP's LV e LCV-V	85
Gráfico 14: Deformação dos CP's LA e LCA-A	86
Gráfico 15: Resistência à tração dos CP's LA e LCA-A	86
Gráfico 16: Módulo de elasticidade dos CP's LA e LCA-A	87
Gráfico 17: Resistência à tração dos CP's LCV-C e LV	88
Gráfico 18: Módulo de elasticidade dos CP's LCV-C e LV	88
Gráfico 19: Resistência à tração dos CP's LCA-C e LA	89
Gráfico 20: Módulo de elasticidade dos CP's LCA-C e LA	89
Gráfico 21: Densidade Volumétrica dos CP's LC , LV , LA , LCV e LCA	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características da matriz utilizada.	43
Quadro 2: Características técnicas do tecido sarja 2x2 de fibra de carbono.....	44
Quadro 3: Características técnicas do tecido bidirecional 1x1 de fibra de vidro/E.	44
Quadro 4: Características técnicas do tecido bidirecional 1x1 de fibra de aramida Twaron D2200.	45
Quadro 5: Características técnicas do tecido híbrido sarja 2x2 carbono/aramida.	46
Quadro 6: Características técnicas do tecido híbrido carbono/vidro sarja 2x2.....	47
Quadro 7: Siglas para os CP's e quantidade fabricada.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Códigos de características de modos de falha.	42
Tabela 2: Orçamento para os tecidos utilizados.	63
Tabela 3: Espessuras dos CP's.	64
Tabela 4: Densidade volumétrica do LC	65
Tabela 5: Propriedades de resistência última à tração do LC	67
Tabela 6: Densidade volumétrica do LV	67
Tabela 7: Propriedades de resistência última à tração do LV	69
Tabela 8: Densidade volumétrica do LA	70
Tabela 9: Propriedades de resistência última à tração do LA	71
Tabela 10: Densidade volumétrica do LCV	72
Tabela 11: Propriedades de resistência última à tração do LCV-C	74
Tabela 12: Propriedades de resistência última à tração do LCV-V	75
Tabela 13: Densidade volumétrica do LCA	76
Tabela 14: Propriedades de resistência última à tração do LCA-C	78
Tabela 15: Propriedades de resistência última à tração do LCA-A	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CP	Corpo de Prova
CP's	Corpos de Prova
LA	Lâmina de fibra de aramida
LC	Lâmina de fibra de carbono
LCA	Lâmina de carbono/aramida
LCA-A	Lâmina carbono/aramida com o ensaio de tração realizado no sentido longitudinal da fibra de aramida
LCA-C	Lâmina carbono/aramida com o ensaio de tração realizado no sentido longitudinal da fibra de carbono
LCV	Lâmina de carbono/vidro
LCV-C	Lâmina carbono/vidro com o ensaio de tração realizado no sentido longitudinal da fibra de carbono
LCV-V	Lâmina carbono/vidro com ensaio de tração realizado no sentido longitudinal da fibra de vidro
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS	23
2.1 OBJETIVO GERAL	23
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
3. REFERENCIAL TEÓRICO	24
3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	24
3.1.1 Matriz	24
3.1.2 Reforços	25
3.2 FIBRAS	25
3.2.1 Fibra de Vidro	26
3.2.2 Fibra de Carbono	27
3.2.3 Fibra de Aramida	29
3.3 COMPARATIVO DE PROPRIEDADES ENTRE AS FIBRAS DE VIDRO, CARBONO E ARAMIDA	30
3.4 COMPÓSITOS HÍBRIDOS	33
3.5 APLICAÇÕES DOS COMPÓSITOS	33
3.6 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE COMPÓSITOS POLÍMERICOS	36
3.6.1 Processo de fabricação manual (<i>Hand Lay-Up</i>)	37
3.7 ENSAIO DE TRAÇÃO	38
3.8 ANÁLISE DE FRATURA FINAL	39
4 MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS NOS LAMINADOS COMPÓSITOS	42
4.1.1 Fabricação das Placas	42
4.1.2 Fabricação dos TABs	47
4.2 METODOLOGIA	49
4.2.1 Fabricação das Lâminas de Compósitos	51
4.2.2 Fabricação dos Corpos de Prova	52
4.2.3 Metodologia da Fabricação dos TABs	54
4.2.4 Fixação dos TABs nos CP's	55

4.2.5	Ensaio de Tração Uniaxial	56
4.2.6	Ensaio de Densidade Volumétrica	59
4.2.7	Estimativa de porcentagem de constituintes	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
5.1	LEVANTAMENTO DE VALOR FINANCEIRO DAS FIBRAS DE VIDRO, CARBONO, ARAMIDA E OS TECIDOS HÍBRIDOS (CARBONO/VIDRO E CARBONO/ARAMIDA)	63
5.2	ESPESSURAS DOS CORPOS DE PROVA	64
5.3	CARACTERIZAÇÃO DO LC.....	65
5.3.1	Densidade volumétrica e estimativa de porcentagem dos constituintes do LC	65
5.3.2	Ensaio de tração uniaxial do LC	66
5.4	CARACTERIZAÇÃO DO LV	67
5.4.1	Densidade volumétrica e estimativa de porcentagem dos constituintes do LV	67
5.4.2	Ensaio de tração uniaxial do LV	68
5.5	CARACTERIZAÇÃO DO LA	70
5.5.1	Densidade volumétrica e estimativa de porcentagem dos constituintes do LA	70
5.5.2	Ensaio de tração uniaxial do LA	70
5.6	CARACTERIZAÇÃO DO LCV.....	72
5.6.1	Densidade volumétrica e estimativa de porcentagem dos constituintes do LCV	72
5.6.2	Ensaio de tração uniaxial do LCV-C	73
5.6.3	Ensaio de tração uniaxial do LCV-V	74
5.7	CARACTERIZAÇÃO DO LCA.....	76
5.7.1	Densidade volumétrica e estimativa de porcentagem dos constituintes do LCA	76
5.7.2	Ensaio de tração uniaxial do LCA-C	77
5.7.3	Ensaio de tração uniaxial do LCA-A	78
5.8	COMPARATIVOS	80
5.8.1	Comparativo entre deformação, resistência e módulo de elasticidade do LC, LCV-C e LCA-C.....	80

5.8.2	Comparativo entre deformação, resistência e módulo de elasticidade do LV e LCV-V	83
5.8.3	Comparativo entre deformação, resistência e módulo de elasticidade do LA e LCA-A	85
5.8.4	Comparativo entre resistência e módulo de elasticidade do LCV-C com LV e LCA-C com LA.....	87
	Para um comparativo global geral, podemos fazer o comparativo entre os CP's LCV-C com o LV e o LCA-C com o LA.	87
5.8.5	Comparativo de densidade volumétrica do LC, LV, LA, LCV e LCA	90
5.9	ANÁLISE DE FRATURA FINAL	91
5.9.1	Fratura final do LC	91
5.9.2	Fratura final no LV	92
5.9.3	Fratura final no LA	93
5.9.4	Fratura final no LCV-C	94
5.9.5	Fratura final no LCV-V	95
5.9.6	Fratura final no LCA-C	96
5.9.7	Fratura final no LCA-A	97
6	CONCLUSÃO	99
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

1. INTRODUÇÃO

Um dos ramos que vem se tornando cada vez mais importante para a engenharia é a tecnologia de desenvolvimento de novos materiais que atendem a diversas condições variadas de serviço, na maioria dos casos, é atrelado a propriedades de alto desempenho estrutural aliado a quesitos como leveza, fácil moldagem e minimização de custo na produção e operação.

Utilizado em larga escala em vários ramos tecnológicos, destacando-se nos setores aeroespacial e automobilístico (HANHN, 2014), os materiais compósitos são muito utilizados por terem um bom desempenho estrutural atrelado a requisitos citados anteriormente.

Para Daniel & Ishai (2006), os materiais compósitos são constituídos de um material com duas ou mais fases (denominado reforço e matriz) em escala macroscópica, sendo o resultado da combinação de materiais distintos, em que o desempenho mecânico e suas propriedades finais são projetados para serem superiores aos dos seus constituintes. A matriz, por sua vez, possui menor resistência mecânica, sendo reforçada por um componente de maior resistência (o reforço), o qual é responsável por suportar as solicitações impostas ao material (PETERS, 1998).

Nos materiais compósitos, destacam-se os compósitos híbridos, que segundo Callister e Rethwisch (2013), um compósito híbrido é quando se utiliza mais de um tipo de matriz ou fibra de reforço. Ainda segundo o autor (CALLISTER E RETHWISCH, 2013), os compósitos híbridos apresentam em sua estrutura final combinações de diferentes reforços, combinando diferentes fibras e partículas em um único material.

Dentre os compósitos híbridos se destacam os que utilizam o tecido híbrido carbono/vidro e carbono/aramida devido apresentar combinações de propriedades mecânicas e principalmente uma relação custo-benefício. Os compósitos de fibra de carbono apresentam excelentes propriedades mecânicas e térmicas (CALLISTER E RETHWISCH, 2013), entretanto, segundo o autor a sua produção é limitada pelo seu alto custo, limitando sua utilização e aplicação. Assim, a hibridização da fibra de carbono com outros tipos de fibras, como por exemplo a fibra de vidro e aramida, pode ampliar a sua utilização, devido apresentar uma boa relação de custo-benefício para engenharia (BATISTA *et al.*, 2017).

Segundo Hull e Clyne (1996), a fibra de vidro/E é a mais utilizada em consideração a outras fibras de vidro e apresenta boas propriedades de resistência e rigidez, não é bom condutor de eletricidade e é resistente a intemperismo. Para Hangar (2016), a fibra de vidro é considerada

de fácil manuseio, relativamente barata e comercialmente disponível, entretanto, em comparação a outras fibras ela é relativamente pesada.

A fibra de carbono comumente utilizada pelo seu alto desempenho a propriedades mecânicas e térmicas, apresenta excelentes propriedades quanto a leveza e alta condutividade elétrica. São mais utilizadas para cargas trativas quando comparada a solicitações de flexão e compressão, devido seu alto desempenho trativo (BATISTA, 2017). A fibra de carbono é consideravelmente mais leve que a fibra de vidro, visto que a massa específica da fibra de carbono T300 é de $1,76 \text{ g/cm}^3$ (DANIEL e ISHAI, 2006), já a fibra de vidro/E é de $2,54 \text{ g/cm}^3$ (MATTHEUS e RAWLLINGS, 1994).

A fibra de aramida por sua vez apresenta uma grande resistência a impactos, excelente rigidez e um baixo peso específico, o que permite sua aplicação em projetos que busque obter redução de massa e ao mesmo tempo manter ou melhorar suas propriedades mecânicas (FIBERTEX®, 2022). Destaca-se que a massa específica da aramida é menor que a massa específica da fibra de carbono, apresentando uma massa específica de $1,45 \text{ g/cm}^3$ (MATTHEUS e RAWLLINGS, 1994).

Para níveis comparativos em relação a custo-benefício, atualmente é encontrado no mercado a fibra de carbono pura cerca de 77% acima do tecido híbrido carbono/vidro e aproximadamente 25% acima do valor do tecido híbrido carbono/aramida. Com a hibridização, utilizando cinquenta por cento de fibra de carbono com cinquenta por cento de fibra de vidro ou cinquenta por cento da fibra de aramida, é possível obter propriedades desejadas atrelado a uma relação eficaz de custo-benefício.

Combinando propriedades mecânicas, físicas e químicas dos componentes de um compósito é possível proporcionar características desejadas para determinada aplicação (OLIVEIRA, 2007). Destaca-se que diversos fatores influenciam nas propriedades mecânicas finais de um compósito, dentre eles: temperatura e umidade do ar (CUNHA *et. al*, 2006); a quantidade de camadas de fibras utilizadas (FIORELLI, 2002); a sequência de empilhamento (FREITAS, 2016); a anisotropia (HULL e CLYNE, 1996); o percentual (fração volumétrica) de fibra/resina (CALLISTER E RETHWISCH, 2013); o processo de laminação (LIMA, 2021); entre outros.

Assim, a proposta deste trabalho é avaliar as propriedades mecânicas à tração em lâminas produzidas com as principais fibras sintéticas (vidro, aramida e carbono) e seus respectivos tecidos híbridos (carbono/aramida e carbono/vidro) comparando suas propriedades e seu custo-benefício. Será realizado neste trabalho ensaios de tração em corpos de prova seguindo a norma ASTM D3039 (2017) com o carregamento aplicado nas fibras sintéticas puras

carbono, vidro, aramida e nas fibras sintéticas híbridas: carbono/vidro (aplicado na direção longitudinal da fibra de carbono 0° - urdume e na direção longitudinal da fibra de vidro 90° - trama); carbono/aramida (aplicado na direção longitudinal da fibra de carbono 0° - urdume e na direção longitudinal da fibra de aramida 90° - trama). Também, será realizado o ensaio de densidade volumétrica seguindo a norma ASTM D792 (2008), a estimativa de porcentagem dos constituintes das lâminas fabricadas (utilizado o método teórico utilizado por Dong *et al.*, 2012) e a análise de fratura final seguindo a norma ASTM D3039 (2017).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar as propriedades mecânicas à tração em lâminas de tecidos sintéticos (Tecido sarja 2x2 fibra de carbono HTS40; Tecido bidirecional 1x1 de fibra de vidro/E; Tecido bidirecional 1x1 de fibra de aramida Twaron D2200) e em duas lâminas híbridas (Tecido híbrido sarja 2x2 carbono T300/vidro/E; Tecido híbrido sarja 2x2 carbono HTS40/aramida Twaron D2200) para verificar a influência das propriedades comparando o tipo de fibra e verificando a viabilidade da utilização de tecidos híbridos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Confeccionar, pelo processo *Hand Lay-up*, cinco placas contendo uma matriz em resina epóxi e, como reforço, uma camada de tecido diferente para cada placa, sendo empregada: Tecido sarja 2x2 fibra de carbono HTS40; Tecido bidirecional 1x1 de fibra de vidro/E; Tecido bidirecional 1x1 de fibra de aramida Twaron D2200; Tecido híbrido sarja 2x2 carbono T300/vidro/E; e Tecido híbrido sarja 2x2 carbono HTS40/aramida Twaron D2200;
- Obter os corpos de provas das placas utilizando a norma ASTM D3039 (2017);
- Realizar ensaio de tração uniaxial;
- Realizar ensaio de densidade volumétrica seguindo a norma ASTM D792 (2008);
- Realizar cálculo de estimativa de porcentagem pela regra das misturas;
- Realizar análise de fratura final seguindo a norma ASTM D3039 (2017);
- Obter valores numéricos e gráficos dos resultados do ensaio de tração dos laminados;
- Avaliar as propriedades mecânicas à tração das lâminas, fazendo o comparativo entre as de fibras sintéticas puras (carbono, aramida e vidro) com as de fibras sintéticas híbridas (carbono/vidro e carbono/aramida).

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção será abordado sobre os materiais compósitos e seus constituintes (reforços e matriz), os principais tipos de fibras sintéticas mais utilizadas, os compósitos híbridos, as principais aplicações dos materiais compósitos e suas metodologias de fabricação.

3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Para Callister e Rethwisch (2013) e a norma ASTM D3878 (2020), os materiais compósitos têm a capacidade de unir propriedades incomuns, que é impossível ser atingida separadamente como as tradicionais ligas metálicas, materiais poliméricos e cerâmicos. Ainda de acordo com os autores, o material compósito é constituído pela combinação de dois ou mais microconstituintes ou macro constituintes que se caracteriza pela sua forma e composição química, sendo insolúveis uns nos outros, apresentando fases separadas.

Projetados de forma a obter um maior desempenho e propriedades mecânicas melhores que a de seus constituintes separadamente, os compósitos são formados por duas fases, uma contínua e outra considerada descontínua. Para Daniel e Ishai (2006), a fase contínua é o reforço, apresentando uma elevada resistência e rigidez, já a fase descontínua também considerada mais frágil, é denominado de matriz.

Segundo Batista (2017), é considerado como grande vantagem a utilização dos compósitos justamente por haver a possibilidade de ajustes das propriedades do material que deseja ter para determinada aplicação. Os compósitos são empregados em variadas aplicações, dentre elas: setores automotivos, aeronáutico, esportivo, construção e arquitetura (RAGONDET, 2005).

De forma geral, os materiais compósitos apresentam uma grande eficiência em relação a propriedades mecânicas, destacando como grandes vantagens a alta resistência a corrosão, baixa expansão térmica, alto desempenho à fadiga e tolerância a dano, fácil moldagem, excelentes razões entre rigidez/peso, e resistência/peso (LOPES, 2009).

3.1.1 Matriz

Em compósitos de alto desempenho, a fase matriz tem como principal função proteger e servir como suporte para as fibras, transferir as tensões entre elas, deixando a estrutura de forma coesa (COSTA, 2016). Segundo Daniel & Ishai (2006), existem quatro tipos de materiais

que são mais utilizados na função de matriz, sendo eles: as cerâmicas, metais, carbono e as matrizes poliméricas, destacando as matrizes poliméricas por serem a mais utilizada de forma ampla.

Os polímeros são caracterizados em três grupos: termofixos, termoplásticos e elastômeros, classificados de acordo com suas propriedades (ASKELANND *et al.*, 2008 *apud* OLIVEIRA, 2013). Ainda segundo Oliveira (2013), os termofixos é considerado mais resistente e mais frágil quando comparado ao termoplástico e quando aquecido a sua estrutura se decompõe. Já os termoplásticos podem ter tanto a estrutura cristalina quanto amorfa, sendo capaz de se fundir quando aquecido, podendo ser reciclado. Por fim, o autor classifica os elastômeros como borrachas, podendo ter grandes deformações elásticas devido a sua cadeia polimérica se comportar como mola ao sofrerem esforços.

Uma das matrizes mais utilizada é a resina Epóxi, a qual é considerada um polímero do grupo termofixo, contendo um elevado teor de ligações cruzadas que endurecem após a adição do catalisador, o que torna o material com boas propriedades mecânicas, tendo como características uma elevada temperatura de distorção térmica e transição vítrea, excelente resistência ao envelhecimento causado pelo calor e boa resistência química (MARINUCCI, 2011).

3.1.2 Reforços

O principal objetivo do reforço é proporcionar uma maior rigidez e resistência térmica no compósito (MATTHEWS E RAWLINGS, 1994). Segundo o autor, o reforço acaba sendo mais resistente e rígido do que a matriz do compósito, fazendo com que as propriedades finais do compósito fiquem melhores. Para Daniel e Ishai (2006), os reforços podem ser do tipo particulados ou fibrosos.

Para obter melhor resistência mecânica, as fibras são os principais elementos empregados como reforço em compósitos, principalmente devido ao seu tamanho, efeito microestrutural e efeito geométrico (SILVA, 2014).

3.2 FIBRAS

As fibras são os materiais mais empregados como reforço em compósitos poliméricos, entretanto, na maioria das aplicações elas só têm o propósito estrutural quando atrelado a um tipo de matriz (MEDEIROS, 2016).

As fibras são classificadas em dois grupos: as sintéticas e as naturais. Os materiais compósitos que utilizam como reforço as fibras sintéticas são consideradas compósitos de alto desempenho.

No mercado as fibras sintéticas são encontradas na forma de fios em rolos, tecidos ou mantas, destacando que existem diversos tipos de gramaturas para os tecidos e mantas.

3.2.1 Fibra de Vidro

Desenvolvida por volta de 1870 por John Player, a fibra de vidro começou a ser comercializada e produzida pela empresa Corning Glass, em 1932 (SANTOS, 2015). As fibras de vidro apresentam composições variadas o que torna possível obter diferentes tipos de fibra com a mudança dos percentuais dos constituintes, entretanto, é constituída basicamente por areia, calcário e caulim (FONTES, 2013). Sua fabricação consiste num processo de moagem dos constituintes, onde são misturados em grandes quantidades e colocado em fornos de fusão com temperatura por volta de 1.550 °C e por fim é realizado o procedimento de produzir os filamentos (FELTREM, 2008).

A fibra de vidro é largamente utilizada como reforço de materiais compósitos, se destacando e ocupando um grande espaço nas indústrias. Para Oliveira (2013), a fibra de vidro possui boas propriedades mecânicas, tem coeficiente de dilatação térmico baixo, ótimas propriedades isolantes elétricas e é um material consideravelmente leve e barato quando comparado a outros tipos de fibras. Segundo Fontes (2013), a fibra de vidro também apresenta uma excelente aderência fibra/matriz devido ao tratamento ao qual recebe, o que o autor denomina de encimagem.

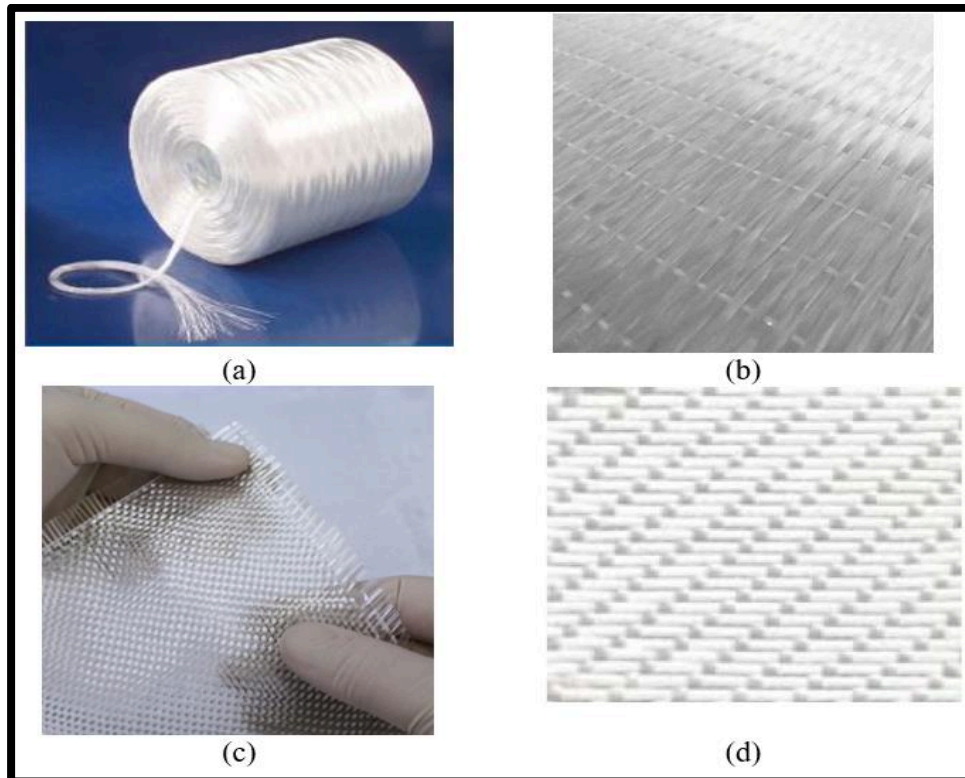
A fibra de vidro/E é a mais utilizada industrialmente, apesar de existir outros tipos (TINÔ, 2014). Ainda de acordo com o autor, ela se destaca por possuir baixo teor de álcali e excelentes propriedades elétricas isolantes, boa resistência mecânica, rigidez e desgaste.

Carvalho (1992) também cita características da fibra de vidro, sendo: fácil moldagem atrelado a aderência à matriz, resistência química por não sofrer ataque ou degradação de agentes químicos, resistência ao calor e ao fogo, resistência a umidade, além de outras citadas anteriormente.

As fibras de vidro são encontradas no mercado na forma de fio *Roving* que são fios dispostos em rolos, em mantas que tem como características fibras contínuas e curtas prensadas,

e na forma de tecidos encontrados em diversas gramaturas. A Figura 1 demonstra as formas que são encontradas as fibras de vidro.

Figura 1: (a) tipo *roving*. (b) Tecido unidirecional tipo tela 1x1, (c) Tecido bidirecional tipo tela 1x1 e (d) Tecido bidirecional tipo sarja 3x1.



Fonte: Fibertex® (2022).

3.2.2 Fibra de Carbono

Produzido inicialmente por Thomas Edison em 1878 com o intuito de utilizar como filamento em lâmpadas incandescentes, a fibra de carbono passou a ser comercializada em 1950 (FOGAÇA, 2018).

Para Matthews e Rawlings (1994), as fibras de carbono são compostas por diversos percussores, sendo suas propriedades dependente do precursor que é utilizado e o alinhamento dos cristais. Se destaca como os principais percussores o *Rayon* (seda sintética), o *Pan* (Poliacrilonitrilo) e o *Pitch* (Piche) (IGTPAN, 2016).

Callister e Rethwisch (2013) classifica as fibras de carbono com excelentes características mecânicas, térmicas, boa condutividade elétrica e é consideravelmente leve. Por apresentar tais características citadas, a fibra de carbono é largamente utilizada em plásticos

reforçados por fibras. Segundo Batista (2017), as fibras de carbono apresentam boas propriedades devido ao fato da forma na qual a sua estrutura se encontra organizada, além dos tipos de ligações moleculares que estão presentes em sua estrutura.

A fibra de carbono apresenta uma relação de compressão relativamente baixa quando comparada com à tração, por isso acaba sendo mais utilizada para cargas tratativas do que cargas flexivas e/ou compressivas.

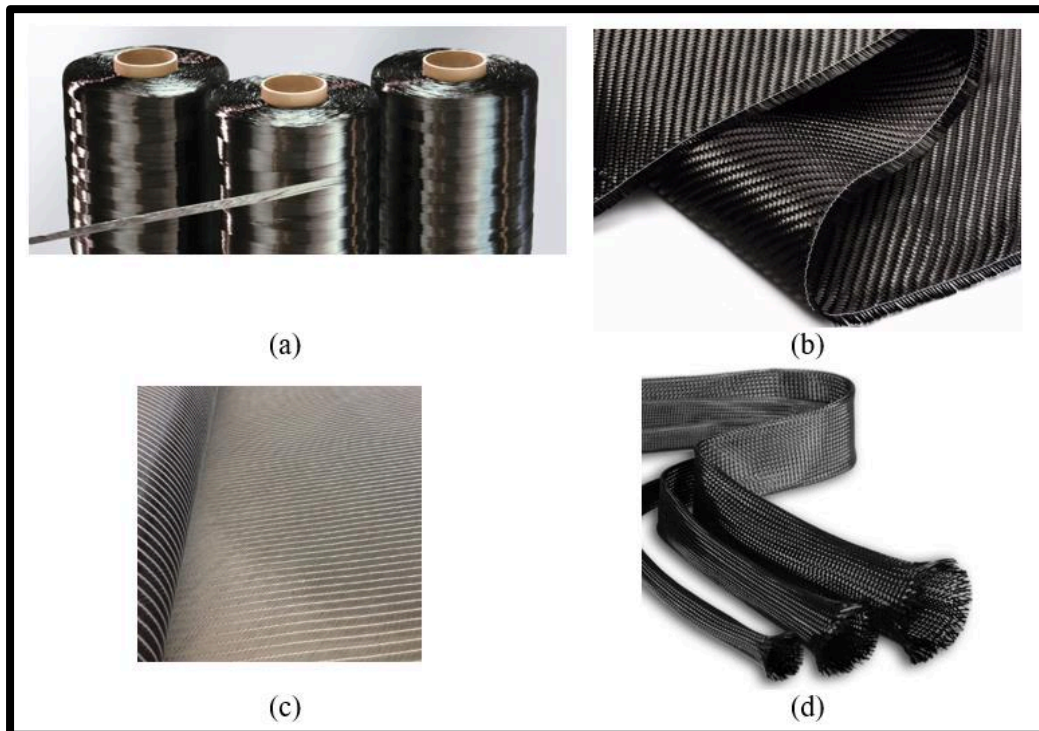
A fibra de carbono apresenta inúmeras vantagens em sua aplicação, entre elas: maior módulo específico e resistência específica comparada a todas as outras fibras, alto módulo de elasticidade e resistência à tração mesmo sob altas temperaturas, não é afetada por umidade e reagentes químicos a temperatura ambiente (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

Destaca-se que a fibra de carbono quando utilizada sozinha não possui as boas propriedades já citadas anteriormente, entretanto, quando adicionado com uma matriz polimérica, o material final apresentará excelentes resultados em relação a características mecânicas (SANTOS, 2015).

A aplicação das fibras de carbono se dá principalmente quando os quesitos são: fadiga, resistência, rigidez e quando é necessário fazer alguma estrutura onde se procura reduzir massa e garantir bom desempenho estrutural, como por exemplo, em aplicações aeronáuticas e automotivas (OLIVEIRA, 2013).

As fibras de carbono podem ser encontradas na forma de fio *Roving* que consiste em rolos e em tecidos no mercado. A Figura 2 ilustra as formas que são encontradas as fibras de carbono.

Figura 2: Formas de comercialização da fibra de carbono, exemplo: (a) tipo *roving*. (b) Tecido sarja 2x2, (c) Tecido multiaxial e (d) *braided*.



Fonte: Direct Industry (2022).

3.2.3 Fibra de Aramida

A fibra de aramida foi desenvolvida em 1965 pela química Stephanie Kwolek e passou por um longo período de desenvolvimento até ser inserida no mercado em 1971 pela empresa Dupont de Kevlar® (CARBONSTORE, 2016).

Para Batista (2017), a fibra de aramida é um termo genérico para a categoria de fibras sintéticas orgânicas que são chamadas de fibras de poliamida aromática. Ainda segundo a autora, comercialmente à fibra de aramida se apresenta em várias designações, sendo as principais a Kevlar ou Novex, Teijinconex e Tcnora e Twaron, onde a mais conhecida em termos de aplicação estrutural é a fibra Kevlar.

A kevlar é formada por longas cadeias de anéis de benzeno interconectadas com grupos amina (CHAWLA, 2019). Ainda segundo o autor, a fibra de aramida tem estrutura altamente cristalina e com ligações covalentes na posição dos anéis aromáticos, o que resulta em uma cadeia de polímero com fator de empacotamento alto.

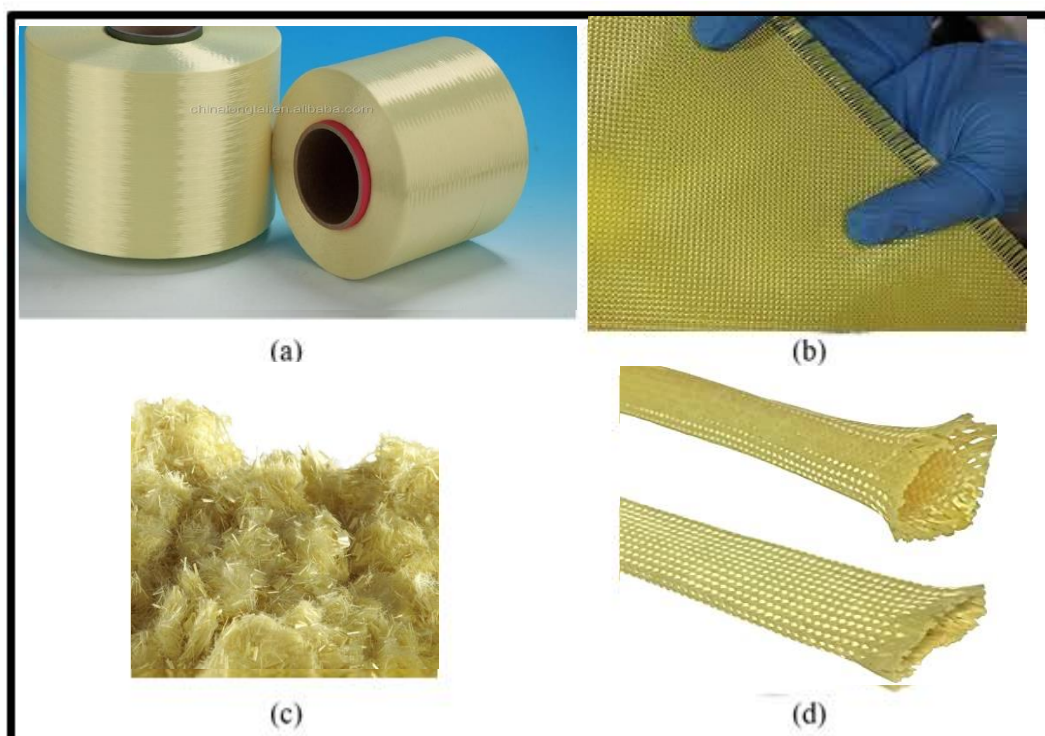
De acordo com a Fibertex® (2022), a fibra de aramida concilia grande resistência a impactos, excelente rigidez e baixo peso específico, o que permite o uso de menos material para

obter características mecânicas iguais. A empresa também afirma que a aramida é resistente a rachaduras, aumenta rigidez de estruturas, tem alta capacidade de absorver energia e não corrói em água doce nem salgada, além de ser considerada incombustível.

Por apresentar características como boa tolerância ao dano, baixa massa específica e excelente resistência ao impacto, é largamente empregado em capacetes militares, coletes a prova de balas, armaduras, automóveis e na indústria aeronáutica (Sayer *et al.* 2010 *apud* Batista 2017).

As fibras de aramida podem ser encontradas no mercado nas formas de fio *Roving* dispostos em rolos, mantas e tecidos. A Figura 3 demonstra como são encontrados no mercado as fibras de aramida.

Figura 3: Formas de comercialização da fibra de aramida, exemplo: (a) tipo *roving*. (b) Tecido sarja 2x2, (c) Manta e (d) *braided*.



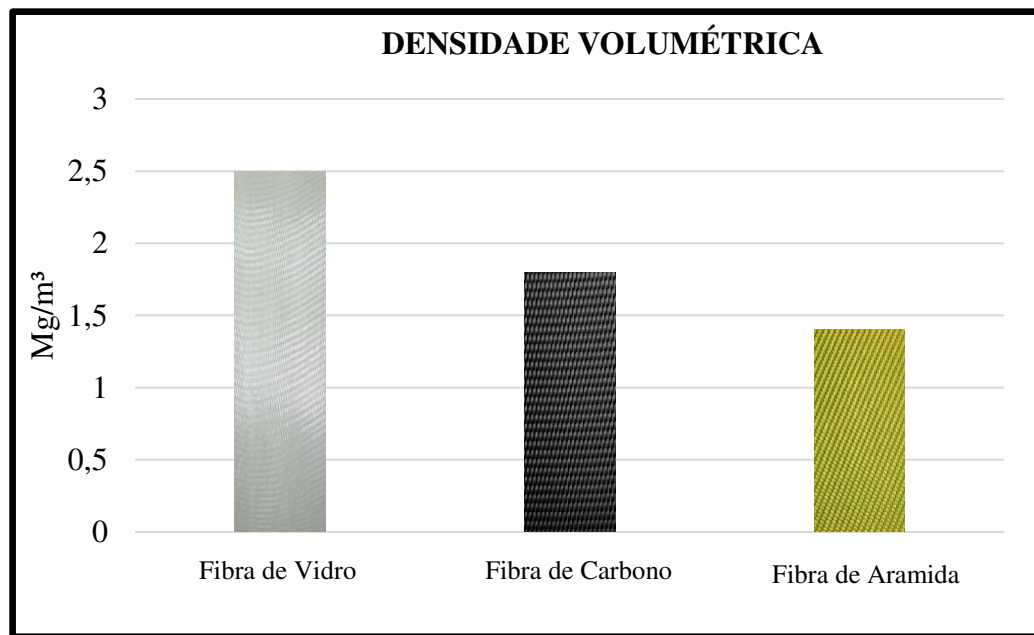
Fonte: Direct Industry (2022).

3.3 COMPARATIVO DE PROPRIEDADES ENTRE AS FIBRAS DE VIDRO, CARBONO E ARAMIDA

Fazendo um comparativo entre as propriedades mecânicas das principais fibras sintéticas (as fibras de vidro, carbono e aramida) é possível observar que: em relação a

densidade volumétrica, à fibra de vidro possui $2,5 \text{ Mg/m}^3$, à fibra de carbono $1,8 \text{ Mg/m}^3$ e à fibra de aramida $1,4 \text{ Mg/m}^3$ (MATTHEWS; RAWLINGS, 1994). Pode-se observar algumas características relevantes em relação a esta propriedade, pois existe uma diferença de 44% da densidade volumétrica da fibra de aramida em relação a fibra de vidro e comparada com a fibra de carbono a diferença é de 22,22%, como ilustrado na Figura 4.

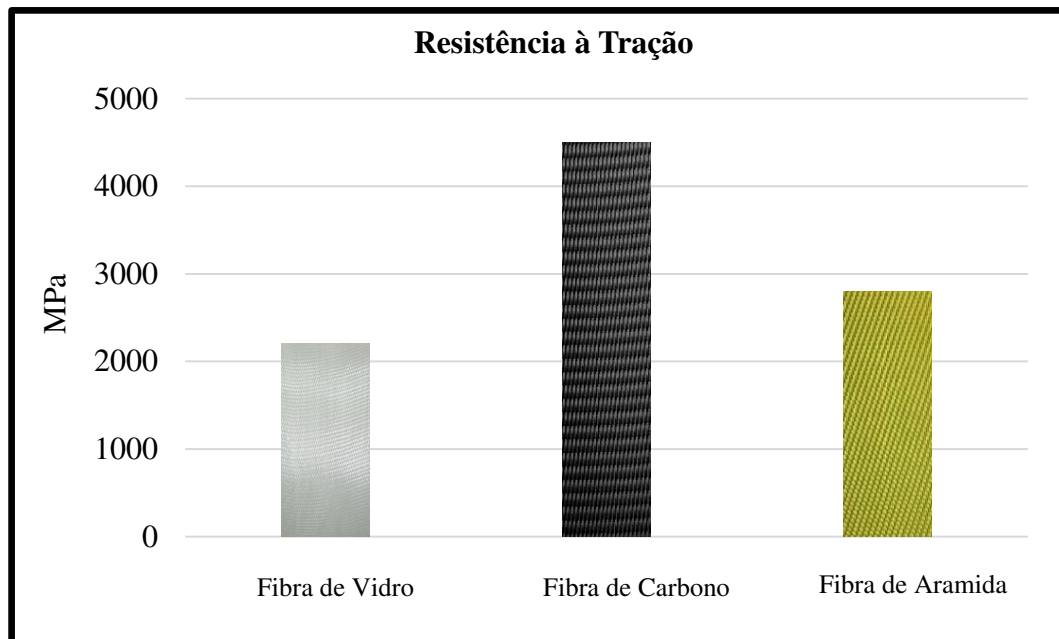
Figura 4: Densidade volumétrica das fibras de vidro, carbono e aramida.



Fonte: Autor (2022) com os dados de Matthews e Rawlings (1994).

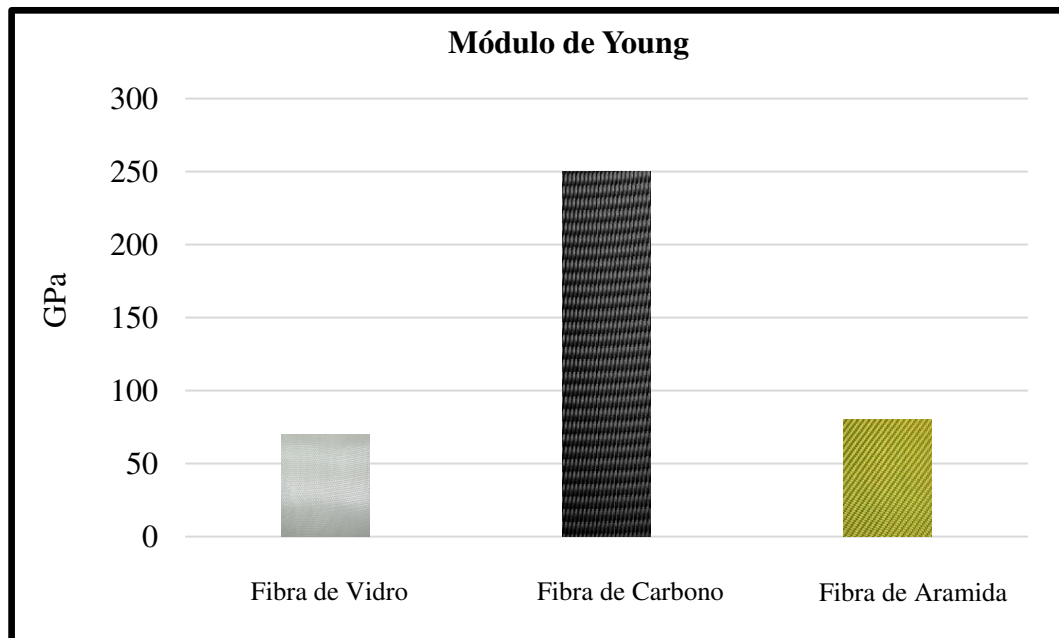
Em relação as propriedades de resistência última à tração e ao módulo de elasticidade (propriedades mecânicas importantes em ensaios de tração uniaxial), pode-se observar nas Figuras 5 e 6, a superioridade da fibra de carbono em relação ao valor médio da resistência à tração quanto também no módulo de Young, quando comparado com a fibra de vidro e a fibra de aramida. Além disso, a fibra de aramida apresenta superioridade em relação a fibra de vidro, quando comparado os valores médios de resistência última à tração e módulo de Young.

Figura 5: Resistência última à tração das fibras de vidro, carbono e aramida.



Fonte: Autor (2022) com os dados de Matthews e Rawlings (1994).

Figura 6: Módulo de elasticidade das fibras de vidro, carbono e aramida.



Fonte: Autor (2022) com os dados de Matthews e Rawlings (1994).

3.4 COMPÓSITOS HÍBRIDOS

Segundo a norma ASTM D3878 (2020), um compósito híbrido é composto por mais de um reforço ou de matrizes diferentes, de modo que, cada um possua características físicas e/ou mecânicas diferentes, a forma do material ou até mesmo a sua composição química.

Os laminados de compósitos poliméricos que utilizam reforço do tipo tecido, atualmente, vêm se destacando em aplicações estruturais devido a vasta possibilidade de alterações em suas propriedades, onde uma das formas de se obter novas propriedades é a hibridização (MEDEIROS, 2016).

De acordo com Akmar *et al.* (2018) houve um aumento nos últimos anos da utilização de compósitos híbridos laminados nas indústrias aeroespacial, naval, automotiva e defesa devido as excelentes propriedades.

Com a hibridização, é possível ajustar propriedades que se deseja em um determinado compósito, no qual seria impossível de se obter utilizando um único tipo de reforço (THWE *et al.*, 2003 *apud* OLIVEIRA FILHO, 2019).

É possível encontrar no mercado tecidos híbridos com diferentes tipos de fibras, tecelagem e gramatura diferentes. A empresa Fibertex®, por exemplo, tem disponível tecidos híbridos estruturados nas formas: unidirecional, bidirecional com diferentes padrões (tela, sarja, etc.) e com diversas gramaturas (entre 100g/m² a 800g/m²), que acarreta uma grande variedade de opções.

Os projetistas estão sempre buscando soluções e propriedades como alta rigidez e resistência específica, estabilidade dimensional maior, alta capacidade de absorção de energia, resistência a corrosão, redução de custos e redução de massa estrutural (PANDYA *et al.*, 2011 *apud* BATISTA, 2017). Assim, a hibridização acaba sendo uma das soluções para estas necessidades citadas.

3.5 APLICAÇÕES DOS COMPÓSITOS

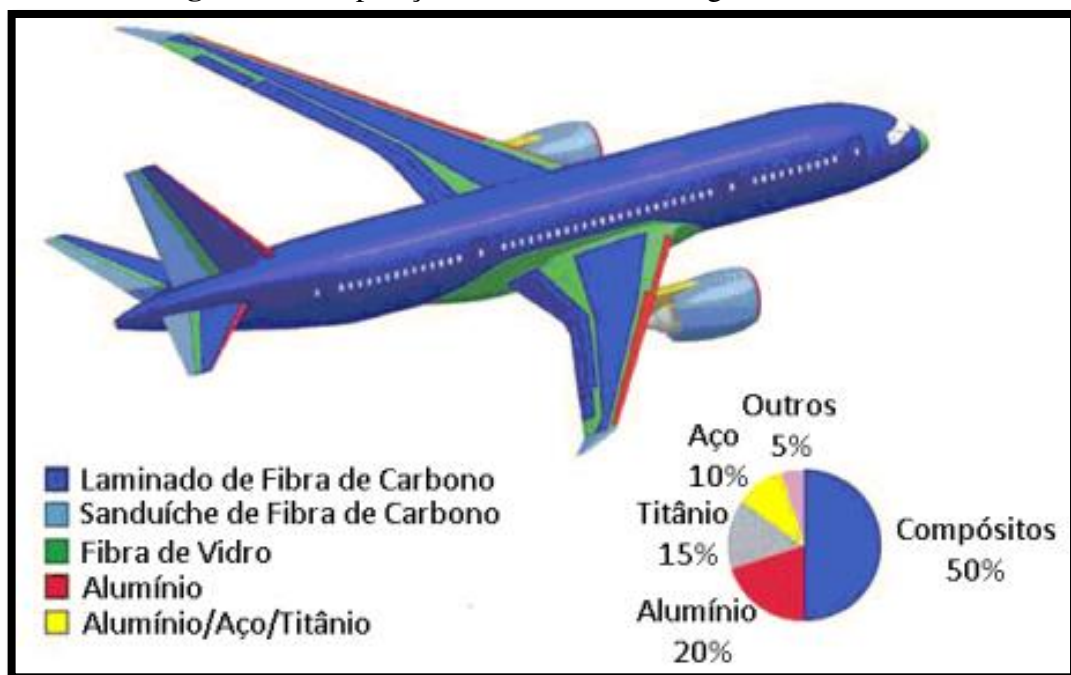
Segundo Daniel & Ishai (2006), no final da década de 1970 as aplicações de materiais compósitos expandiram amplamente nos setores aeronáuticos, náuticos, automotivos, artigos esportivos e biomédicos, com um aumento significativo de fibras de alto desempenho na década de 1980.

Atualmente os materiais compósitos são aplicados à uma gama de setores, dentre eles no setor automotivo, aeronáutico, esportivo, náutico, construção civil, arquitetura, aplicações

militares e de segurança (como no caso dos coletes e capacetes a prova de balas e blindagens veiculares) e nas energias renováveis (destacando-se na energia eólica). Estes são desenvolvidos por diferentes processos de fabricação, dependendo da aplicação empregada, da taxa de produção e das dimensões dos componentes (RAGONDET, 2005).

De acordo com Katunin *et al.* (2016), a porcentagem de materiais compósitos existente em uma aeronave Boeing 787 Dreamliner chega a constituir cerca de 50% de sua estrutura total, como ilustrado na Figura 7. Na Figura 8 também é possível observar a aplicação de material compósito na indústria aeronáutica, na fabricação do bordo de ataque do gigantesco avião Airbus A380. Destaca-se que a empregabilidade dos materiais compósitos está se tornando cada vez mais frequente devido apresentar excelentes propriedades estruturais e baixo peso específico aliado à elevada resistência mecânica.

Figura 7: Composição estrutural do Boeing 787 Dreamliner.



Fonte: Katunin *et al.* (2016).

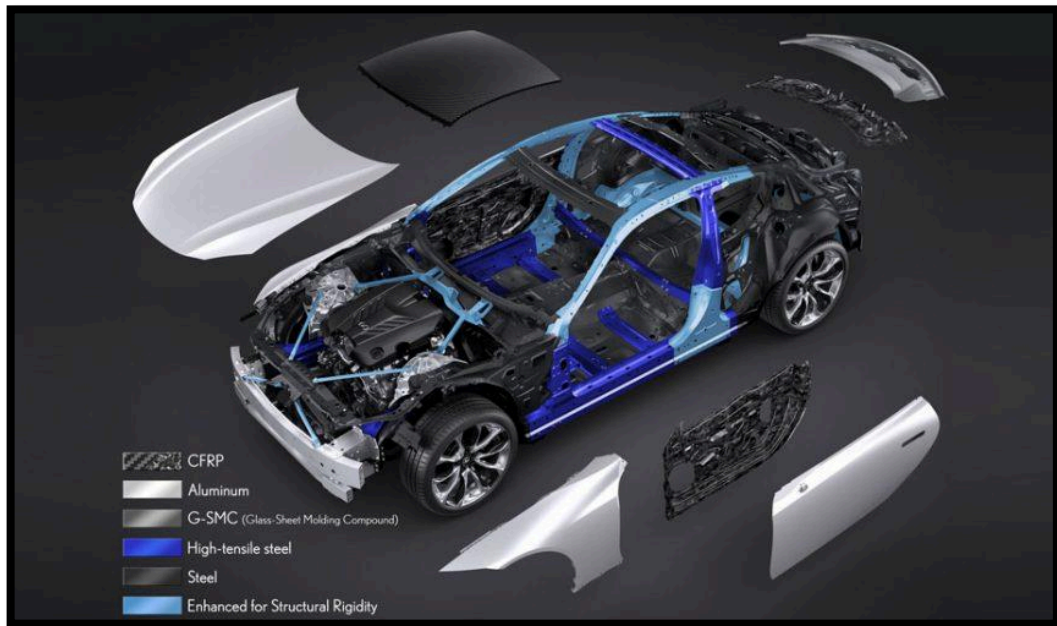
Figura 8: Bordos de ataque do Airbus A380 fabricado com fibra de vidro.



Fonte: Composites World (2017).

Já no setor automobilístico, segundo Ishikawa *et al.* (2018), os fatores como melhor desempenho mecânico, necessidade de maior conforto, maior segurança, durabilidade, entre outros, são os principais motivos da utilização dos materiais compósitos no setor automobilístico. A Figura 9 ilustra a aplicação dos compósitos no setor automotivo.

Figura 9: Aplicação de materiais compósitos no setor automobilístico.



Fonte: Lexus Enthusiast (2017).

3.6 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE COMPÓSITOS POLÍMERICOS

De acordo com Mendonça (2005), existe uma variedade de métodos de fabricação de componentes que utilizam materiais compósitos de matrizes poliméricas termorrígidas e a escolha do método de fabricação dependerá de uma série de fatores, como:

- O custo do processo: leva em consideração o custo do equipamento, da mão de obra, da matéria prima, do treinamento, etc.;
- A escala de produção: leva em consideração se é possível obter uma produção em série como na indústria automobilística, ou em baixa escala como na indústria aeronáutica e naval, ou também pode ser uma peça única;
- Dimensão do componente: Peças grandes como cascos de barcos, piscinas, reservatórios, carrocerias de ônibus e caminhões, necessitam de um procedimento de fabricação diferente de peças pequenas;
- Repetibilidade de características iguais da peça: quando se necessita de obter as mesmas características em peças repetidas, o processo manual tende a ter baixa repetibilidade de qualidade e há variações nas dimensões, sendo melhor neste caso métodos automatizados.

Para Marinucci (2011), os processos de laminações de compósitos podem ser classificados como molde aberto ou molde fechado, o que ocasiona diferença na qualidade do acabamento nas superfícies da peça fabricada. Para a autor, o processo de molde aberto proporciona um acabamento liso e uniforme em apenas uma das faces da peça, já no molde fechado geram um bom acabamento em ambas as faces. Os processos que se encaixam dentro do molde aberto são: *Hand Lay-up*, *Spray-up* e enrolamento (COMPOSITESLAB, 2017). Já os processos que se encaixam dentro do molde fechado são: moldagem por bolsa a vácuo, infusão de vácuo, moldagem por compressão, moldagem por injeção, centrifugação, pultrusão e laminação contínua (COMPOSITESLAB, 2017).

3.6.1 Processo de fabricação manual (*Hand Lay-Up*)

O processo de fabricação *Hand Lay-Up*, tem como principais características a não necessidade de altas pressões, possui baixo custo de operação, facilidade de manufatura e manuseio e não necessita de investimento em equipamentos (LEVY NETO & PARDINI, 2006).

O processo de laminação *Hand Lay-Up* consiste na colocação de sucessivas camadas do reforço utilizado devidamente impregnado pela matriz polimérica com auxílio de rolos para ajudar na compactação e diminuição de bolhas de ar diante a superfície de um molde da peça que se deseja fabricar. Para dar resistência mecânica a estrutura fabricada, os materiais mais utilizados são as mantas, tecidos e fios picados (MARINUCCI, 2011). Antes de aplicar as camadas de reforço sobre o molde, é necessário a aplicação de um desmoldante.

Para Marinucci (2011), as vantagens que fazem ser largamente utilizado o método *Hand Lay-Up* são: metodologia simples, flexibilidade de projeto, baixo custo investido para fabricação, nenhuma restrição ao tamanho da peça fabricada e pode ser laminado em ambiente de trabalho onde será utilizado a peça. Ainda para o autor, o processo de laminação *Hand Lay-Up* se tornou o mais utilizado no mundo e domina em várias cadeias industriais de compósitos para diversos produtos diferentes. A Figura 10 ilustra o processo de fabricação *Hand Lay-Up*.

Figura 10: Processo de laminação manual (*Hand Lay-Up*).



Fonte: Siqi, 2015.

3.7 ENSAIO DE TRAÇÃO

Segundo Hibbeler (2010), a resistência de um material tem a relação com a capacidade de suportar uma carga aplicada sem se deformar ou se romper. Tal propriedade caracteriza o material, o qual é obtido através de ensaios ou experimentos mecânicos. Para realização dessa análise, um dos ensaios mais comum utilizado é o ensaio de tração uniaxial (Figura 11). Com este ensaio, é possível determinar uma relação entre a tensão normal média com a deformação normal média. Com isso, é possível determinar diversas propriedades mecânicas dos materiais.

Figura 11: Esquemático de ensaio de tração uniaxial.



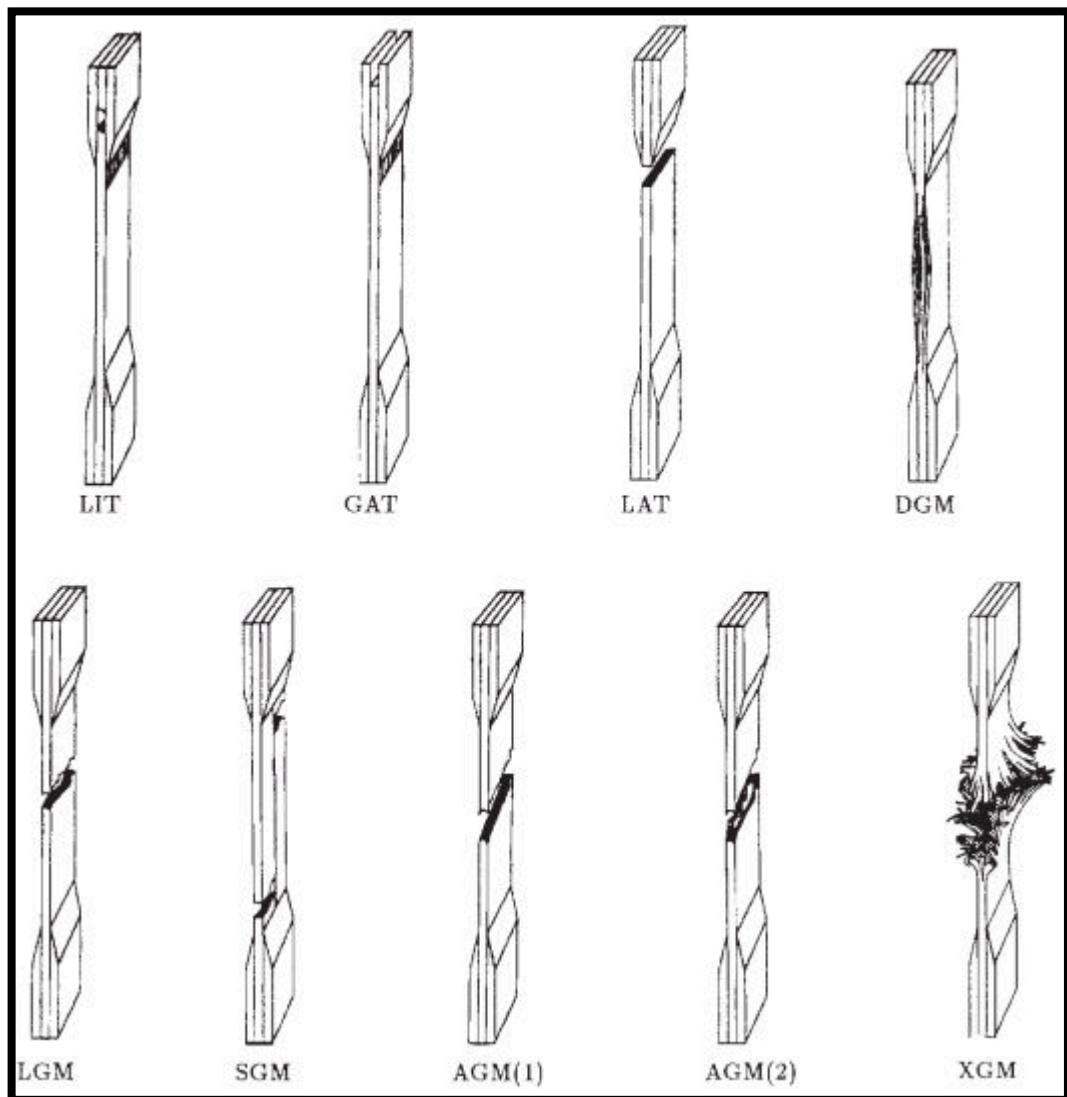
Fonte: Franceschi e Antonello (2017).

3.8 ANÁLISE DE FRATURA FINAL

A análise de fratura final observa a característica final da fratura mecânica em um corpo de prova após ser realizado o ensaio de tração uniaxial. Para a norma ASTM D3039 (2017) é de suma importância registrar o local e modo de falha depois da finalização dos ensaios, assim como também descrever o padrão utilizando os códigos de falha (Tabela 1) fornecidos pela norma.

Para Batista (2017), a análise de fratura pode ser realizada de duas formas, a forma macroscópica e microscópica, sendo que a forma macroscopia analisa o dano/fratura final ao longo do corpo de prova e a microscopia visualiza a microestrutura com auxílio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A Figura 12 demonstra os tipos de falhas macroscópicas possíveis em um ensaio de tração uniaxial.

Figura 12: Modos de falha dos compósitos submetidos à tração (ASTM D3039, 2017).



Fonte: ASTM D3039 (2017).

Tabela 1: Códigos de características de modos de 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: ASTM D3039 (2017).

Destaca-se que os modos de falha **LIT** e **GAT** não são considerados válidos de acordo com a norma ASTM D3039 (2017), caso sejam apresentados na análise de fratura final após ensaio de tração uniaxial.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será descrito os materiais utilizados para fabricação dos compósitos, assim como, os procedimentos metodológicos utilizados em toda a fabricação e nas análises realizadas para obtenção dos resultados.

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS NOS LAMINADOS COMPÓSITOS

4.1.1 Fabricação das Placas

Para fabricação das placas foi utilizado como matriz a resina termofixa Epóxi 2001 juntamente com o acelerador de processo de cura o endurecedor Epóxi 3154, ambos da marca Redelease®, com proporções de 2 de resina para 1 de endurecedor. A Figura 13 demonstra a resina e o endurecedor utilizados.

Figura 13: Resina Epóxi 2001 e Endurecedor 3154.



Fonte: Redelease® (2022).

Tendo em vista que a matriz que compõe o sistema é responsável por proporcionar ao compósito polimérico resistência e homogeneidade (JALES, 2019), é necessário conhecer suas

características. Assim, o Quadro 1 possui as informações sobre a resina e o endurecedor utilizados.

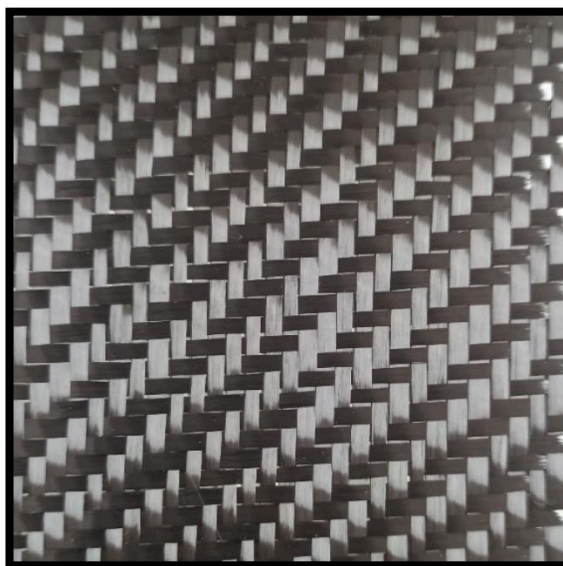
Quadro 1: Características da Matriz utilizada.

	Resina CQ 2001	Endurecedor CQ 3154
Aparência	Líquido incolor viscoso	Líquido levemente amarelado
Viscosidade, 20°C CP's	10.000 a 14.000	200 máx
Peso específico 20°C g/cm ³	1,16 ± 0,01	1,005 ± 0,015

Fonte: Redelease® (2022).

Para fabricação das placas, foram utilizados os seguintes tecidos: Tecido sarja 2x2 fibra de carbono HTS40 (ver Figura 14 e Quadro 2 com as características técnicas do tecido); Tecido bidirecional 1x1 de fibra de vidro/E (ver Figura 15 e Quadro 3 com as características técnicas do tecido); Tecido bidirecional 1x1 de fibra de aramida Twaron D2200 (ver Figura 16 e Quadro 4 com as características técnicas do tecido); Tecido híbrido sarja 2x2 carbono/aramida compostos por fibras de carbono HTS40 no urdume (0°) e fibra de aramida Twaron D2200 na trama (90°) (ver Figura 17 e Quadro 5 com as características técnicas do tecido) e Tecido híbrido sarja 2x2 carbono/vidro composto por fibras de carbono T300 no urdume (0°) e fibras de vidro E na trama (90°) (ver Figura 18 e Quadro 6 com as características técnicas do tecido).

Figura 14: Tecido sarja 2x2 de fibra de carbono.



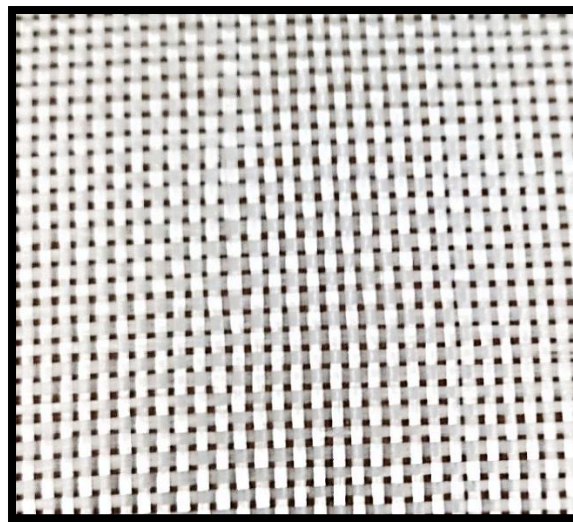
Fonte: Autor (2022).

Quadro 2: Características técnicas do tecido sarja 2x2 de fibra de carbono.

Características técnicas do tecido.	
Desenho	Sarja 2x2
Tratamento	cru
Fios / cm Urdume	5,0 ($\pm 0,2$)
Fios / cm Trama	5,0 ($\pm 0,2$)
Peso (g/m ²)	200 C ($\pm 5\%$)
Espessura (mm)	*0,23 mm

*Medição realizada pelo autor com micrômetro digital.

Fonte: Adaptado de Fibertex[®] (2022).

Figura 15: Tecido bidirecional 1x1 de fibra de vidro/E.

Fonte: Autor (2022).

Quadro 3: Características técnicas do tecido bidirecional 1x1 de fibra de vidro/E.

Características técnicas do tecido.	
Desenho	Tela 1x1
Tratamento	cru
Fios / cm Urdume	5,0 ($\pm 0,2$)
Fios / cm Trama	5,0 ($\pm 0,2$)
Peso (g/m ²)	200 V ($\pm 5\%$)
Espessura (mm)	0,18 mm

Fonte: Adaptado de Fibertex[®] (2022).

Figura 16: Tecido bidirecional 1x1 de fibra de aramida Twaron D2200.



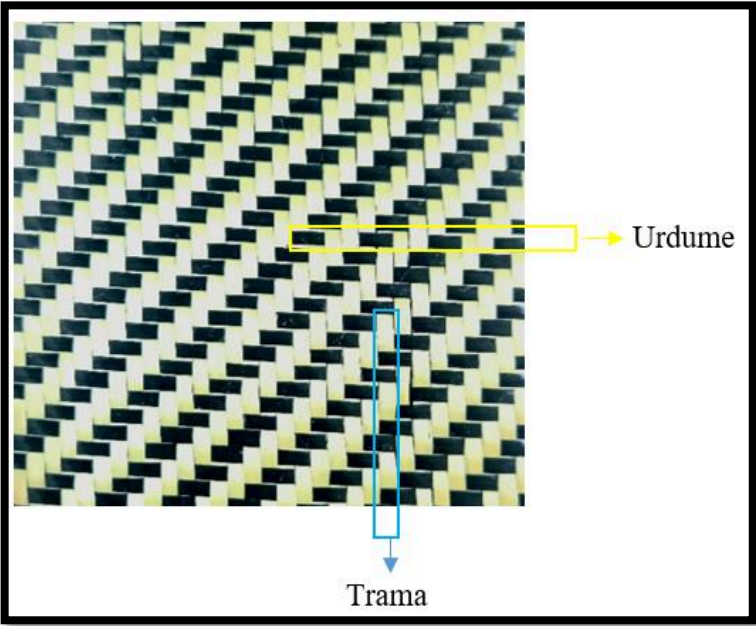
Fonte: Autor (2022).

Quadro 4: Características técnicas do tecido bidirecional 1x1 de fibra de aramida Twaron D2200.

Características técnicas do tecido.	
Desenho	Tela 1x1
Tratamento	cru
Fios / cm Urdume	5,0 ($\pm 0,2$)
Fios / cm Trama	5,0 ($\pm 0,2$)
Peso (g/m ²)	180 A ($\pm 5\%$)
Espessura (mm)	0,25 mm

Fonte: Adaptado de Fibertex[®] (2022).

Figura 17: Tecido híbrido sarja 2x2 carbono/aramida.



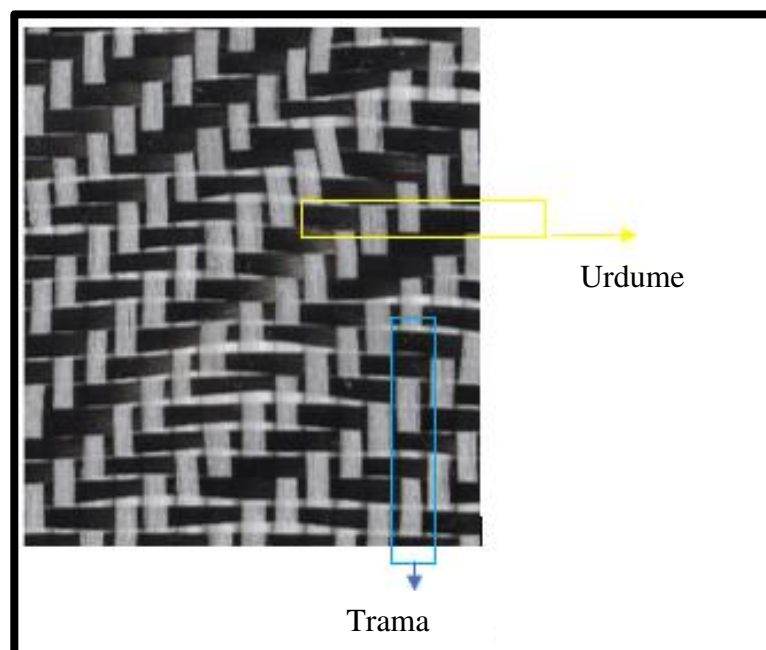
Fonte: Autor (2022).

Quadro 5: Características técnicas do tecido híbrido sarja 2x2 carbono/aramida.

Características técnicas do tecido.	
Desenho	Sarja 2x2
Tratamento	cru
Fios / cm Urdume	5,0 (± 0,2)
Fios / cm Trama	5,0 (± 0,2)
Peso (g/m²)	100 C / 100 A (± 5%)
Espessura (mm)	0,27 mm

Fonte: Adaptado de Fibertex® (2022).

Figura 18: Tecido híbrido carbono/vidro sarja 2x2.



Fonte: Autor (2022).

Quadro 6: Características técnicas do tecido híbrido carbono/vidro sarja 2x2.

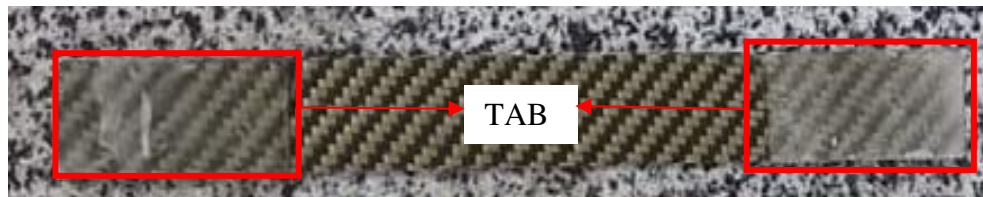
Características técnicas do tecido.	
Desenho	Sarja 2x2
Tratamento	cru
Fios / cm Urdume	5,0 ($\pm 0,2$)
Fios / cm Trama	5,0 ($\pm 0,2$)
Peso (g/m ²)	100 C / 100 V ($\pm 5\%$)
Espessura (mm)	0,22 mm

Fonte: Adaptado de Fibertex® (2022).

4.1.2 Fabricação dos TABs

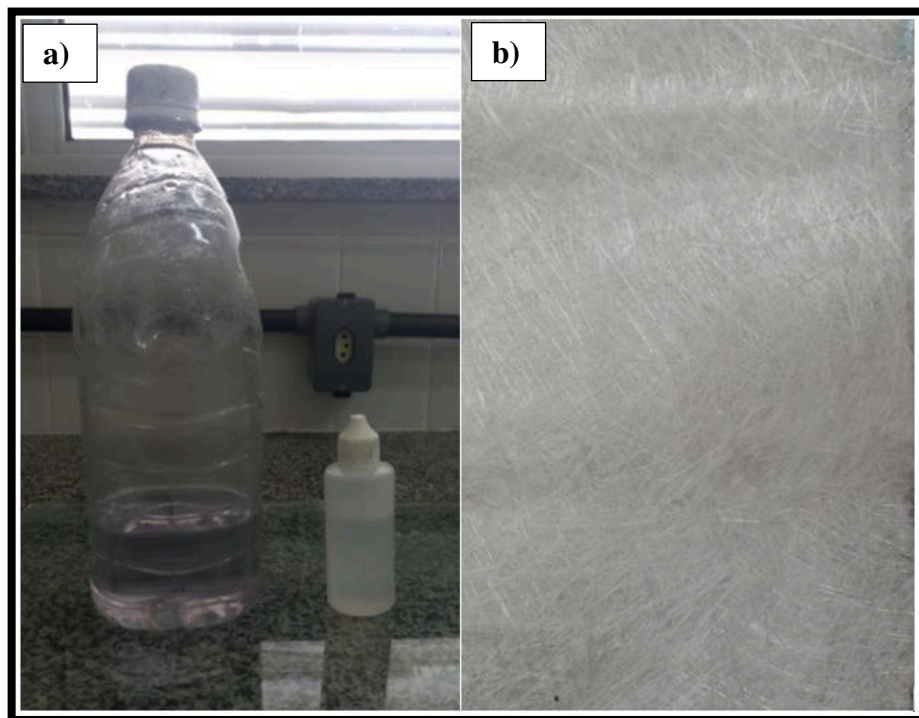
Para fabricação dos Tabs, apoios para melhor fixação dos corpos de provas na máquina de ensaio de tração uniaxial, foram utilizados os seguintes materiais: como matriz foi utilizado a resina poliéster e catalisador para acelerar a reação do processo (Figura 20 a), como reforço foi utilizado a manta de fibra de vidro (Figura 20 b) onde de acordo com França (2019), apresenta gramatura de $(595 \pm 81,81)$ g/m² e comprimento médio das fibras de 5,00 cm. Para auxiliar na laminação, também foi utilizado um rolo como demonstrado na Figura 21. Para melhor entendimento a Figura 19 ilustra o que seria o TAB.

Figura 19: Ilustração do TAB em um CP.



Fonte: Autor (2022).

Figura 20: (a) Resina Poliéster e Catalisador; (b) Manta de fibra de vidro.



Fonte: Autor (2022).

Figura 21: Rolo utilizado na laminação.



Fonte: Autor (2022).

4.2 METODOLOGIA

Para realização deste trabalho, inicialmente foi realizado um levantamento literário sobre os materiais compósitos, utilizando tecidos puros e híbridos, os processos que são utilizados para fabricação e os materiais que são mais empregados.

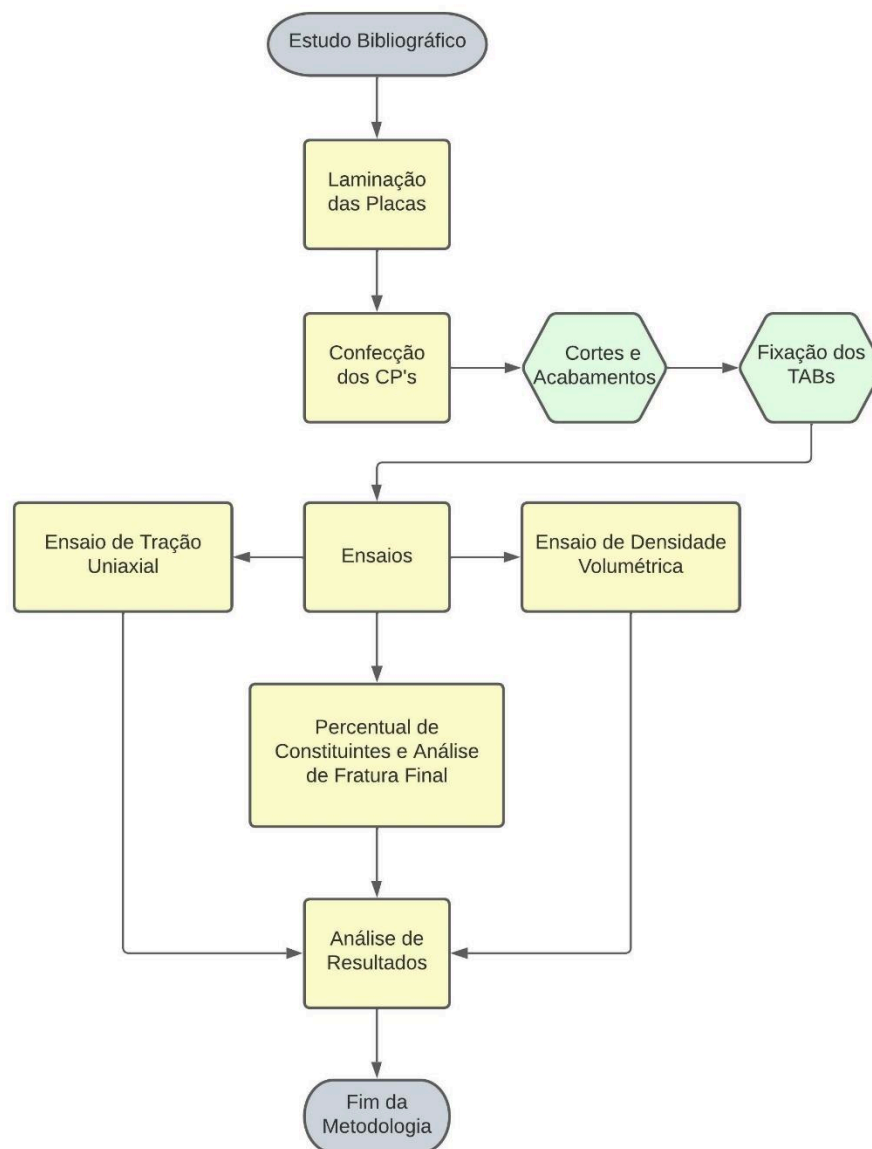
Após o levantamento bibliográfico em livros, revistas, artigos, teses e dissertações, foram confeccionados as lâminas de compósitos (todos com uma camada), sendo um de cada tecido: carbono, vidro, aramida, carbono/vidro e carbono aramida. Todos utilizando resina Epóxi como matriz e processo de fabricação *Hand Lay-up*.

Em seguida, foram realizados os cortes dos corpos de provas para o ensaio de tração uniaxial de acordo com a norma ASTM D3039 (2017). Os ensaios de tração uniaxial foram realizados na Universidade Federal Rural do Semi-Árido campus Mossoró, utilizando uma máquina universal de ensaios (EMIC modelo DL-1000 com a célula de carga de capacidade máxima de 30 KN).

Para realização dos ensaios foram confeccionados oito corpos de prova para cada lâmina, tendo em vista que pelo menos cinco corpos de prova têm que ser válidos para cada ensaio (ASTM D3039, 2017). Destaca-se que nas lâminas híbridas foram realizados corpos de provas nas duas direções. Os corpos de prova foram fabricados com as dimensões de 240mm x 25mm, com galgo (comprimento útil dos corpos de prova) de 127mm.

Também foi realizado o ensaio de densidade volumétrica seguindo a norma ASTM D792 (2008). A Figura 22 ilustra de forma objetiva a elaboração do trabalho no formato de fluxograma.

Figura 22: Fluxograma da elaboração do trabalho.

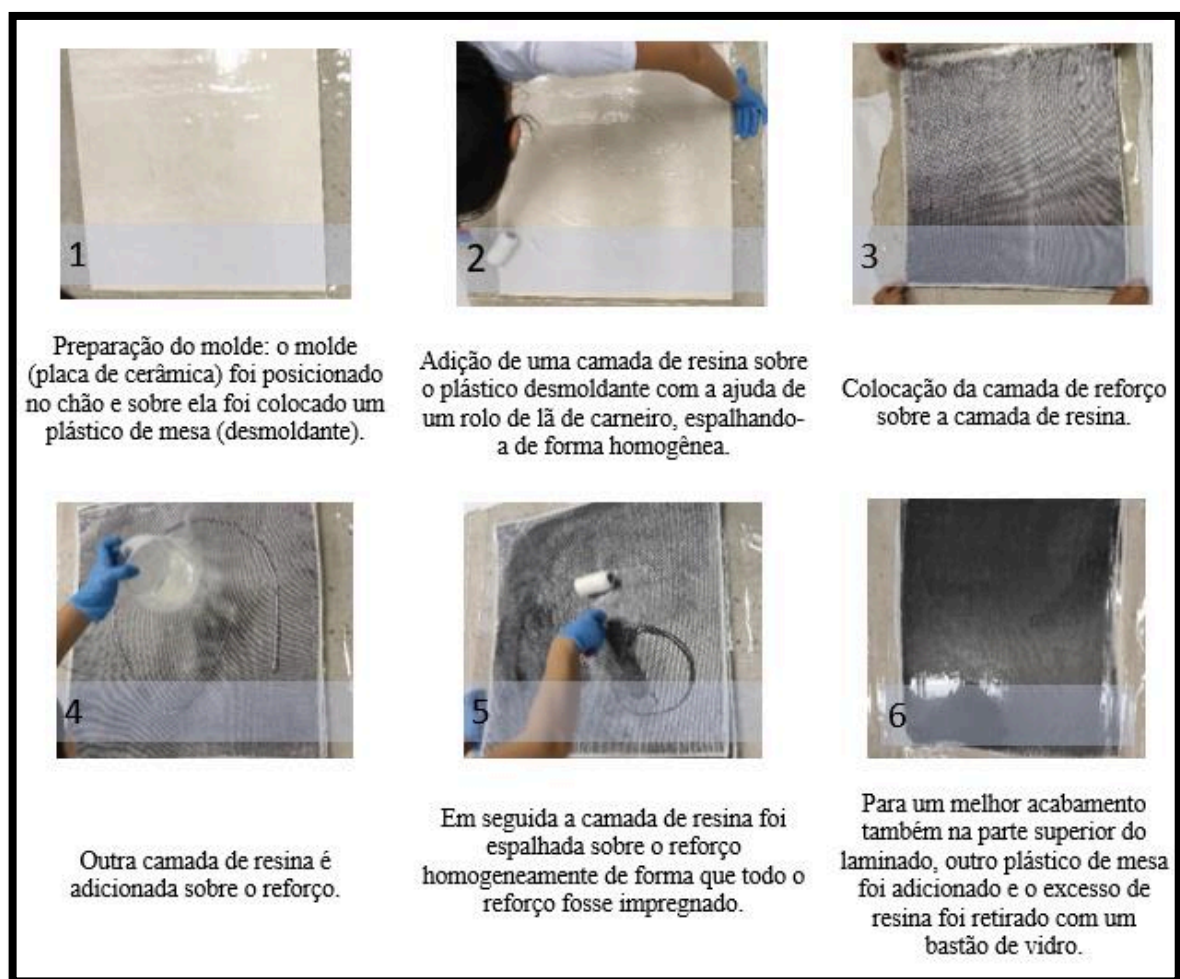


Fonte: Autor (2022).

4.2.1 Fabricação das Lâminas de Compósitos

As lâminas de compósitos foram fabricadas pelo processo manual denominado *Hand Lay-up*. O procedimento de fabricação foi realizado no laboratório de metalografia da UFERSA campus Caraúbas. As lâminas foram fabricadas com uma camada cada, sendo envolvida no mesmo tipo de matriz (100 g de resina e 50 g de endurecedor). A Figura 23 demonstra toda etapa de fabricação das lâminas de compósitos.

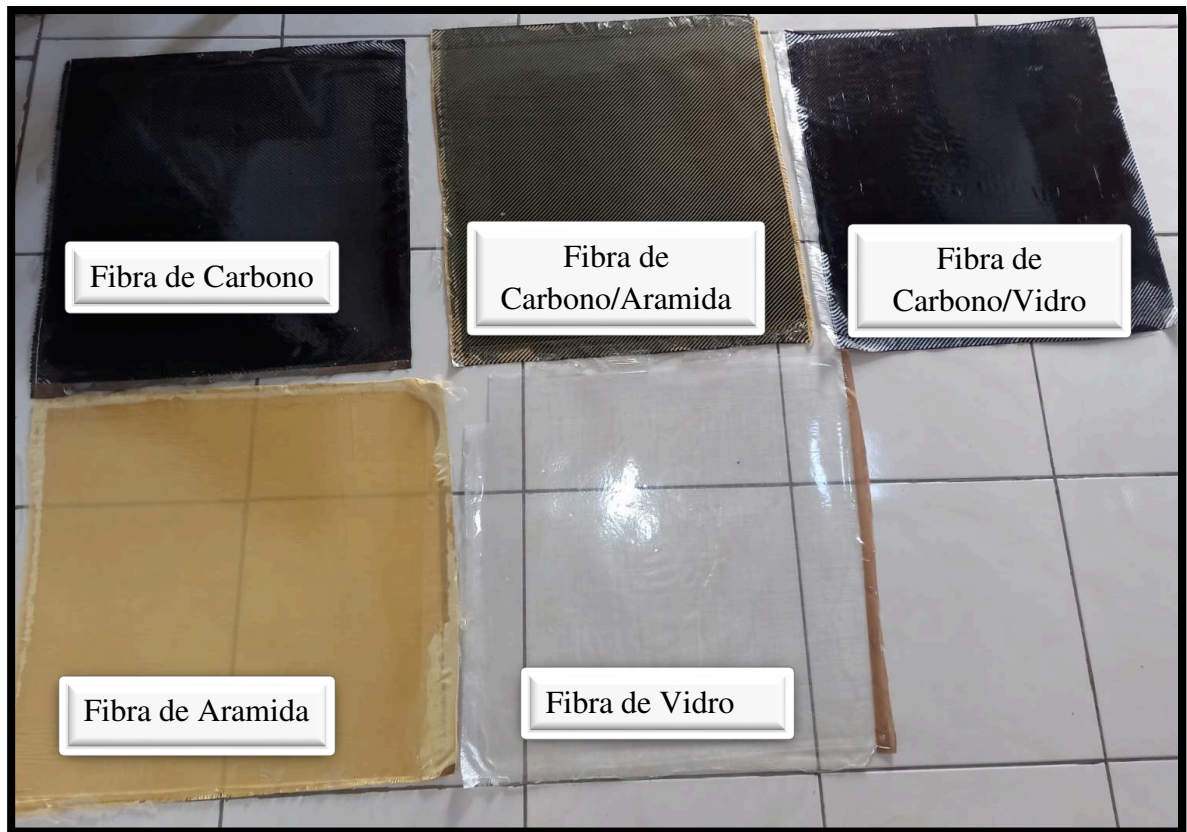
Figura 23: Etapas do processo de fabricação das lâminas de compósitos.



Fonte: Adaptado de Jackson (2020).

A Figura 24 demonstra todas as placas já laminadas. As placas laminadas foram nomeadas com as seguintes siglas: **LV** para a lâmina de fibra de vidro, **LC** para a lâmina de fibra de carbono, **LA** para a lâmina de fibra de aramida, **LCV** para a lâmina de carbono/vidro e **LCA** para a lâmina carbono/aramida.

Figura 24: Placas Laminadas.



Fonte: Autor (2022).

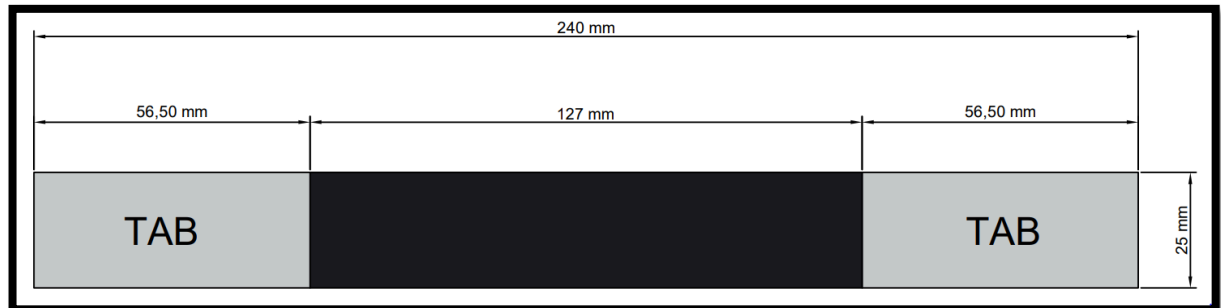
4.2.2 Fabricação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram cortados com lâminas de estilete deixando margem de aproximadamente 1 mm nas bordas para evitar a danificação das fibras durante o corte. Após o processo de corte, os corpos de prova foram submetidos a um processo de lixamento manual, a fim de eliminar imperfeições e descontinuidades geométricas, minimizando possíveis erros ou variações nos resultados. Para realização deste processo, foram utilizadas lixas d'água com numerações 100 e 220 para retirar as rebarbas laterais, seguido de acabamento com lixas de numeração 320, 500, 600, 1200, seguindo todas as normativas e tolerâncias da norma ASTM D3039 (2017).

A norma ASTM D3039 (2017) rege que a largura do CP deve ser de 25mm, com tolerâncias de $\pm 0,25$ mm. O comprimento útil do galgo utilizado foi de 127mm. Devido as restrições da dimensão da garra utilizada na máquina de ensaios, o comprimento total dos CP's

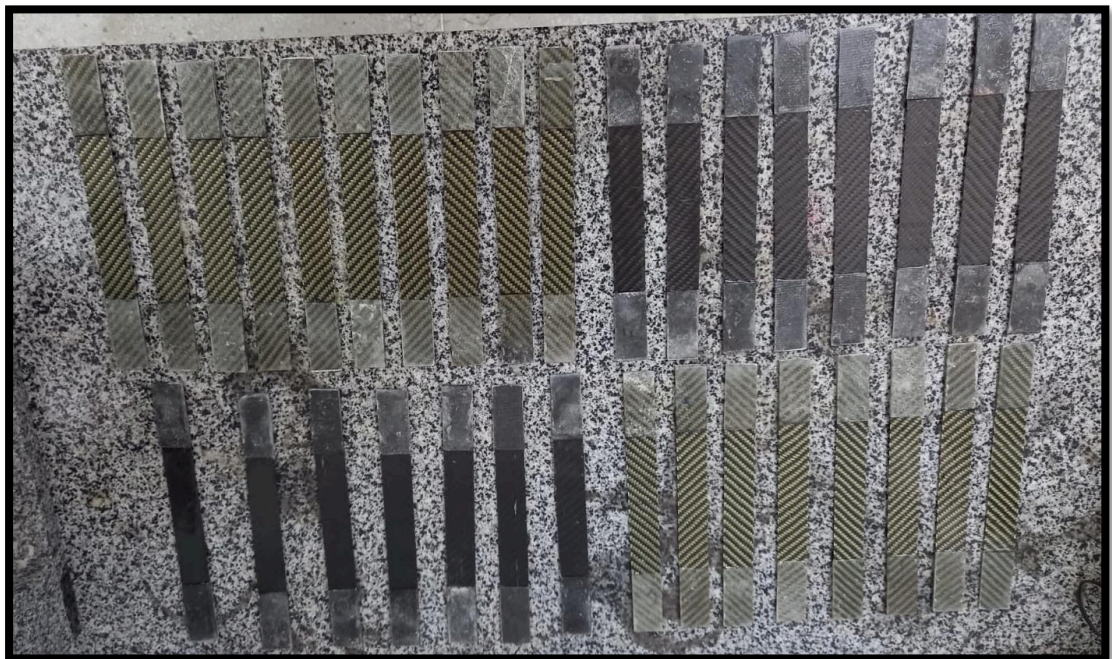
foi de 240mm. A Figura 25 ilustra o diagrama esquemático de como ficaram os CP's. A Figura 26 ilustra alguns corpos de provas já finalizados e prontos para o ensaio de tração uniaxial.

Figura 25: Esquemático com as dimensões (mm) dos corpos de prova para o ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Autor (2022).

Figura 26: Exemplos de CP's já finalizados.



Fonte: Autor (2022).

Os sete conjuntos de corpos de prova foram nomeados com as seguintes siglas (ver Quadro 7).

Quadro 7: Siglas para os CP's e quantidade fabricada.

SIGLA	NOMES DOS CP's	QUANTIDADE DE CP's
LV	CP's da lâmina de fibra de vidro	8
LC	CP's da lâmina de fibra de carbono	8
LA	CP's da lâmina de fibra de aramida	8
LCV-C	CP's da lâmina carbono/vidro com o ensaio de tração realizado no sentido longitudinal da fibra de carbono	8
LCV-V	CP's da lâmina carbono/vidro com o ensaio de tração realizado no sentido longitudinal da fibra de vidro	8
LCA-C	CP's da lâmina carbono/aramida com o ensaio de tração realizado no sentido longitudinal da fibra de carbono	8
LCA-A	CP's da lâmina carbono/aramida com o ensaio de tração realizado no sentido longitudinal da fibra de aramida	8

Fonte: Autor (2022).

4.2.3 Metodologia da Fabricação dos TABs

Para evitar a falta de aderência da garra da máquina com o material que vai ser submetido a carga de tração uniaxial (por ser pouco espesso), foram fabricados TABs para fixação nos corpos de prova.

Os TABs foram confeccionados a partir de um laminado manual utilizando manta de fibra de vidro como reforço e resina poliéster como matriz, onde foi cortado com auxílio de uma mini retífica (com dimensões de aproximadamente 56,5 mm de comprimento com cerca de 25mm de largura) e lixado até a dimensão correta, além de manter um bom acabamento. Tal procedimento também foi realizado no laboratório de metalografia da UFERSA campus Caraúbas. A Figura 27 demonstra algumas etapas do procedimento.

Figura 27: Procedimentos de fabricação dos TABs.



Fonte: Autor (2022).

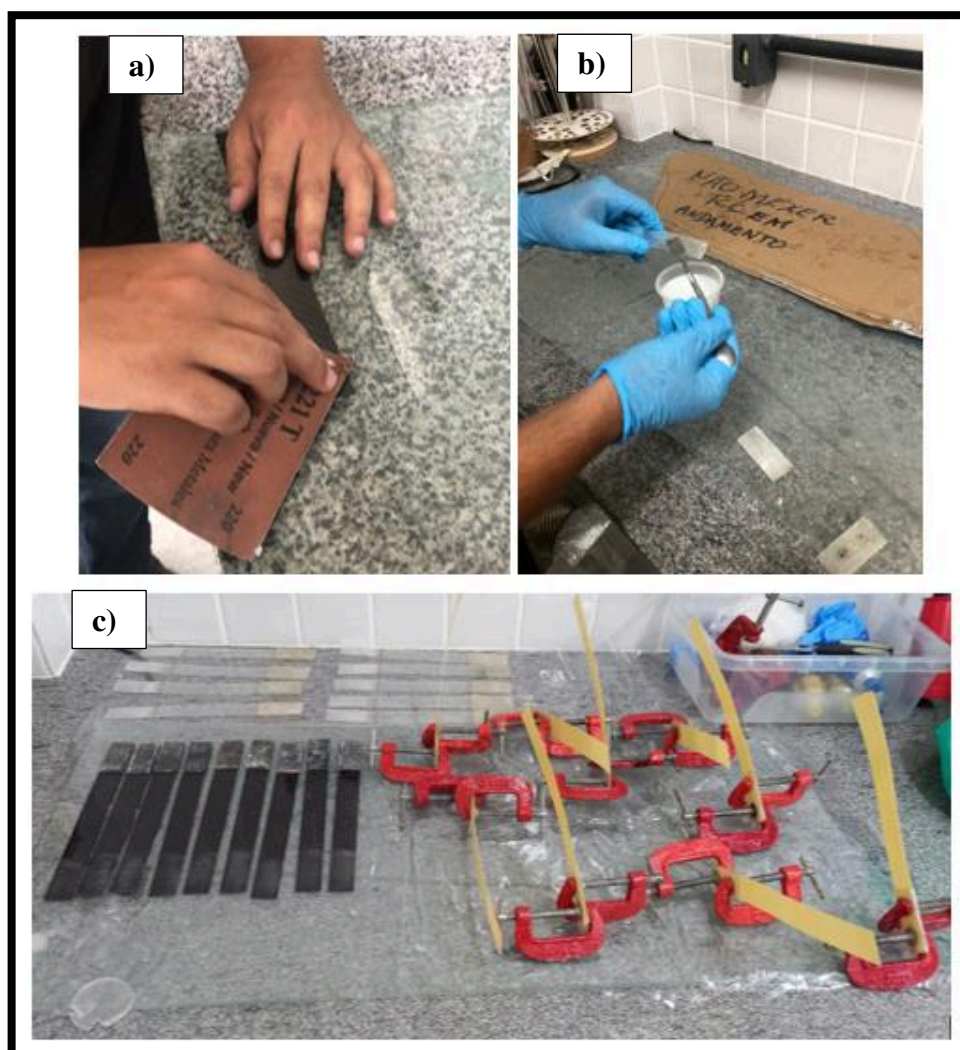
4.2.4 Fixação dos TABs nos CP's

Após a confecção de todos os corpos de provas e dos TABs, foi iniciado o procedimento de fixação dos tabs nos corpos de prova. O procedimento ocorreu da seguinte forma:

- Inicialmente foi lixado nos CP's a parte de fixação dos TABs juntamente com a parte do TAB que seria fixado, para que garantisse um maior aumento de aderência;
- Na sequência foi impregnado com resina entre os tabs e os CP's;
- Por fim, os TABs foram fixados nos CP's até a cura da resina presos por grampos do tipo C para evitar possíveis deslocamentos entre o TAB e o CP.

A Figura 28 demonstra os procedimentos citados anteriormente.

Figura 28: Procedimentos de fixação dos TABs nos CP's: (a) Lixando a parte de fixação do CP, (b) Impregnando resina no local do TAB, (c) TABs fixados nos CP's.



Fonte: Autor (2022).

4.2.5 Ensaio de Tração Uniaxial

O ensaio de tração uniaxial foi realizado no laboratório de ensaios e caracterização mecânicos do curso de engenharia mecânica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) campus Mossoró, onde foi utilizado a máquina universal DL-10000, da EMIC com célula de carga de capacidade máxima de 30 KN, como ilustrado na Figura 29. O ensaio realizado teve o objetivo de obter dados dos valores de resistência última à tração e a deformação até a ruptura dos CP's. Destaca-se que os CP's foram submetidos ao ensaio de tração com uma pré-carga variando entre 70 N à 100 N. A velocidade de deslocamento utilizada foi de 2mm/min.

Figura 29: Máquina universal DL-10000, da EMIC com célula de carga de capacidade máxima de 30 KN.



Fonte: Autor (2022).

Para obtenção dos valores de resistência última à tração, a deformação de ruptura e o módulo de elasticidade, utilizou-se as Equações (1), (2) e (3).

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

Onde: σ é Tensão última de tração (MPa), P é a carga aplicada (N) e A é a área da seção transversal do corpo de prova (mm²).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

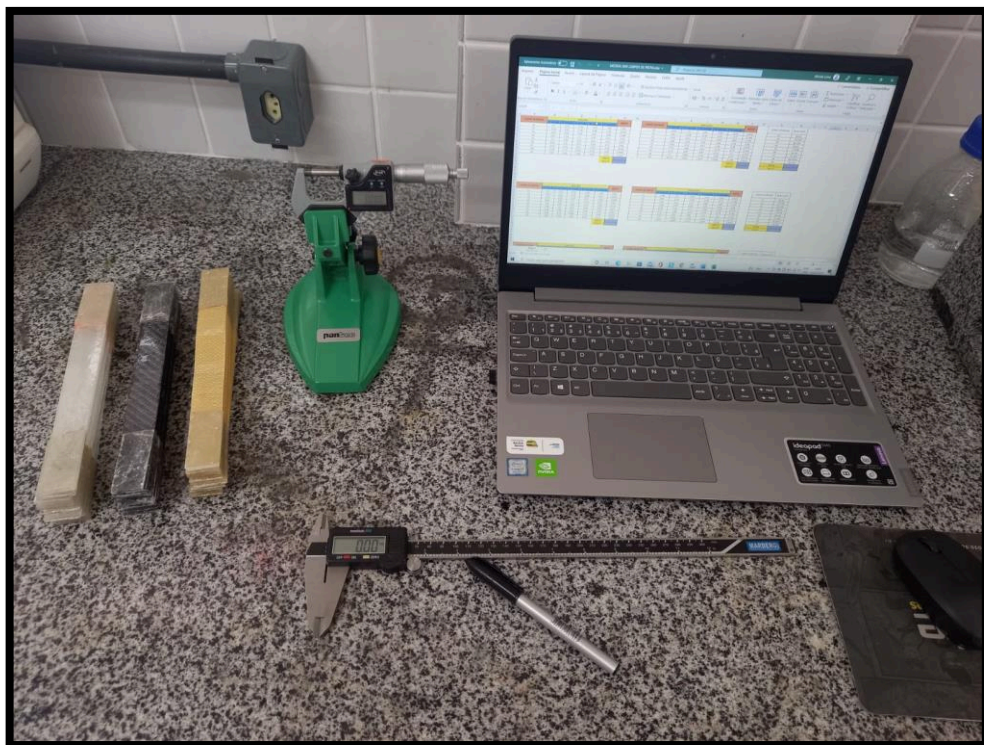
Onde: ε é a deformação (%), ΔL é a variação do comprimento ($L - L_0$) em mm, e L_0 é o comprimento útil do corpo de prova (mm).

$$E = \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \right) \quad (3)$$

Onde: E é módulo de elasticidade longitudinal (MPa), $\Delta\sigma$ é variação da tensão na região linear (MPa) e $\Delta\epsilon$ variação da deformação linear (mm/mm). Destaca-se que o cálculo foi realizado para 50% da tensão de ruptura dos CP's ensaiados.

Todos os cálculos foram realizados em planilhas automatizadas desenvolvidas no software Excel®. Para evitar e diminuir erros na variação da largura e espessura, foram retiradas cinco medições de cada CP para largura e espessura, em pontos diferentes na região do galgo, em seguida foi calculado o valor médio para ser utilizado nos cálculos. As medições foram realizadas com paquímetro e micrômetro, ambos digitais. A Figura 30 ilustra o procedimento.

Figura 30: Medições de espessuras e largura dos CP's.

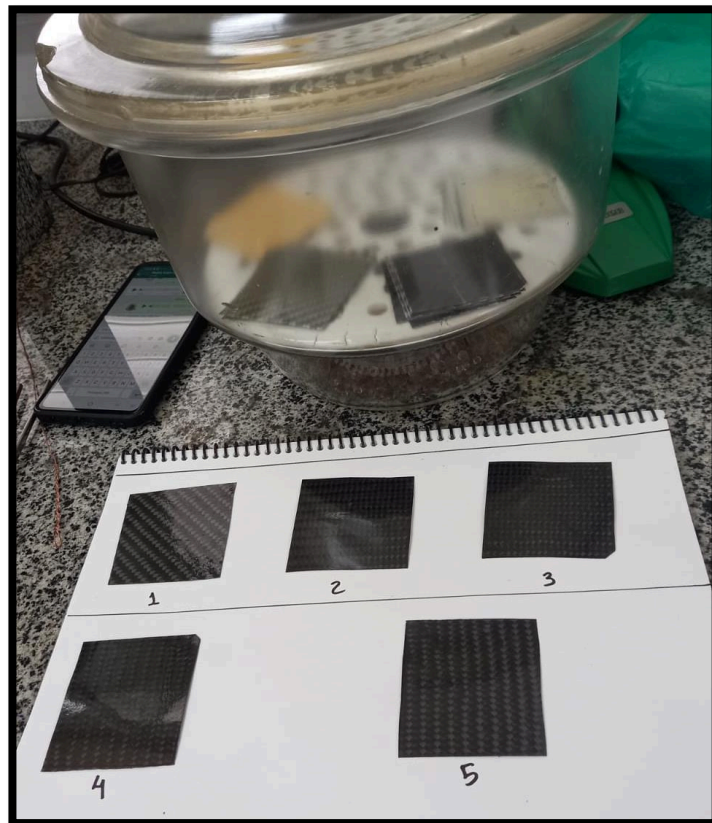


Fonte: Autor (2022).

4.2.6 Ensaio de Densidade Volumétrica

Para realização do ensaio de densidade volumétrica foram confeccionados cinco corpos de prova para cada lâmina de compósito (carbono, vidro, aramida, carbono/vidro, carbono/aramida) com as dimensões de aproximadamente 50mm x 50mm. Todo o procedimento experimental seguiu as premissas da norma ASTM D792 (2008) utilizando o método de teste para plásticos reforçados sólidos em água, onde permite amostras variando de 1 a 50 gramas. A Figura 31 ilustra os corpos de provas já cortados.

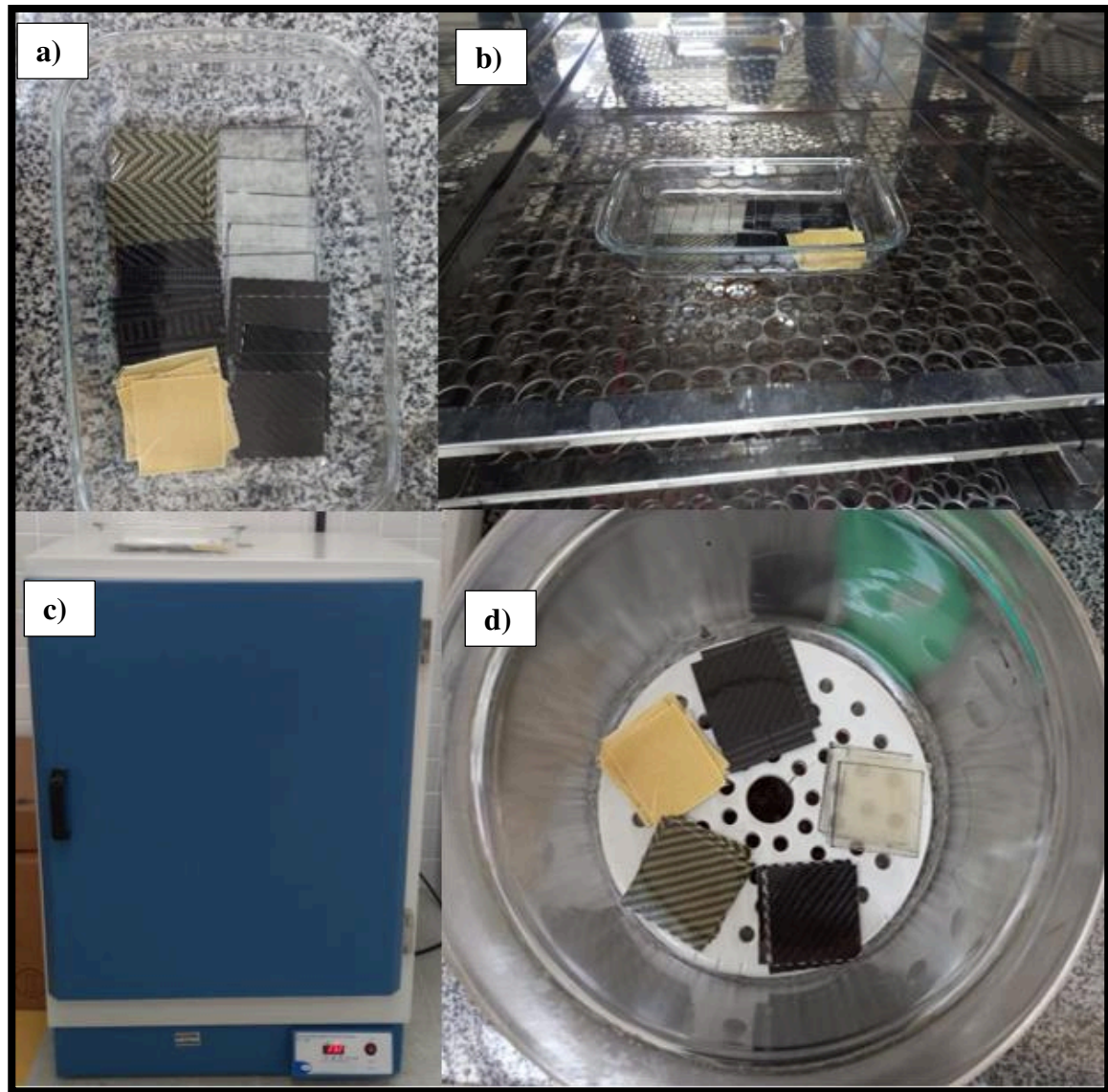
Figura 31: Corpos de prova pronto para o ensaio de densidade volumétrica.



Fonte: Autor (2022).

Antes da realização do ensaio, os corpos de prova foram submetidos a um processo de secagem na estufa de secagem e esterilização (SOLAB modelo SL-100) a uma temperatura de 100 °C durante uma hora. Este procedimento foi realizado para retirada de toda a umidade presente nos corpos de prova. Após o processo de estufa, os corpos de prova foram retirados e levados para um dessecador até serem resfriados. A Figura 32 ilustra todo o procedimento citado anteriormente.

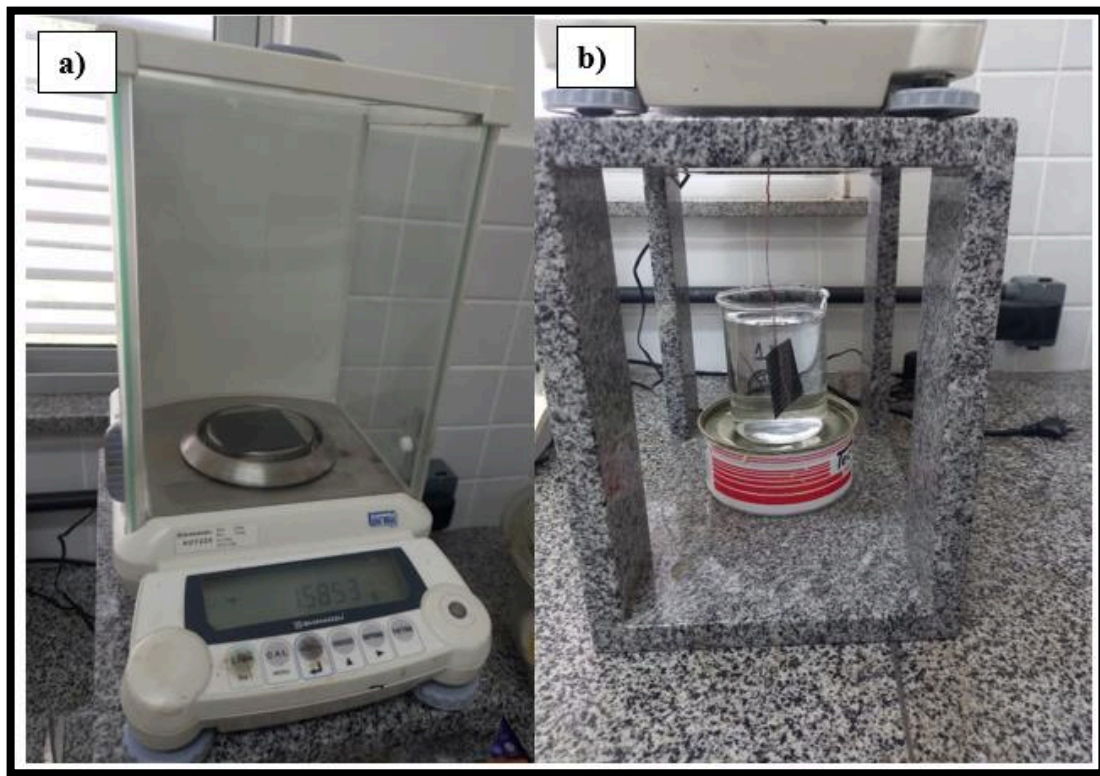
Figura 32: (a) Corpos de prova recortados dentro de travessa de vidro, (b) Travessa com os corpos de prova dentro da estufa, (c) Estufa utilizada, (d) Corpos de prova após a estufa sendo resfriado dentro de dessecador.



Fonte: Autor (2022).

A próxima etapa realizada do procedimento experimental foi a pesagem de cada corpo de prova, utilizando balança de precisão digital ((balança SHIMADZU modelo AUY220), em seguida foi obtido a massa do afundador (realizado com fio de cobre) parcialmente imerso na água. Por fim, foi realizado as medições de massa do afundador juntamente com cada corpo de prova imersos na água, como sugerido na norma ASTM D792 (2008). Neste procedimento foi utilizado água destilada. Todas as medições foram armazenadas em planilha no software Excel[®]. A Figura 33 demonstra o procedimento realizado.

Figura 33: (a) pesagem dos corpos de prova secos, (b) pesagem do afundador e corpo de prova imerso em água destilada.



Fonte: Autor (2022).

Para obtenção do valor de densidade volumétrica utilizou-se equação fornecida pela norma ASTM D792 (2008), demonstrada na Equação 4.

$$D = \frac{ad}{a + w - b} \quad (4)$$

Onde: D é a densidade volumétrica do laminado (g/cm^3), a é o peso do corpo de prova seco (g), w é o peso do afundador parcialmente imerso na água (g), b é o peso do corpo de prova mais o afundador imersos na água e d é o valor da densidade da água a 23°C ($0,9975 \text{ g/cm}^3$).

4.2.7 Estimativa de porcentagem de constituintes

Para estimar a porcentagem de constituintes das lâminas fabricadas, foi utilizado um método da regra das misturas, método teórico bastante utilizado, inclusive em trabalhos de grande relevância como Dong *et al.* (2012). Para obtenção dos resultados de percentual de

constituintes das lâminas de fibra de carbono, fibra de vidro e fibra de aramida foi utilizada a Equação 5.

$$\rho_l = \rho_f V_f + \rho_m (1 - V_f) \quad (5)$$

Onde: ρ_l é a densidade volumétrica encontrado do laminado; ρ_f é a densidade da fibra utilizada e V_f é o volume de fibra; ρ_m é a densidade da matriz utilizada.

Para determinar as porcentagens dos constituintes das lâminas híbridas carbono/vidro e carbono/aramida, foi utilizado a Equação 6, proposta por Dong *et al.* (2012).

$$\rho_l = \rho_{f1} V_{f1} + \rho_{f2} V_{f2} + \rho_m (1 - V_{f1} - V_{f2}) \quad (6)$$

Onde: ρ_l é a densidade volumétrica encontrado do laminado; ρ_{f1} é a densidade da fibra 1 utilizada; ρ_{f2} é a densidade da fibra 2 utilizada; V_{f1} é o volume de fibra 1 utilizada; V_{f2} é o volume de fibra 2 utilizada e ρ_m é a densidade da matriz utilizada.

Como a gramatura do carbono é igual a gramatura da fibra de vidro utilizada no tecido híbrido carbono/vidro e a gramatura do carbono é igual a gramatura da aramida utilizada no tecido híbrido carbono/aramida, logo, buscando uma estimativa considerou-se $V_{f1} = V_{f2}$. Assim, quando encontrar o percentual de fibra, a porcentagem da fibra 1 será igual a porcentagem da fibra 2.

Para encontrar o ρ_m (densidade da matriz utilizada), levou em consideração a densidade da resina e do endurecedor de acordo com as suas proporções utilizadas (2 x resina e 1 x endurecedor). Como descrito no Quadro 1, tem-se a densidade da resina sendo de 1,16 g/cm³ e o endurecedor sendo 1,005 g/cm³. Assim, pode-se encontrar o valor médio da densidade da matriz a ser considerada.

$$\rho_m = \frac{(1,16 \times 2) + (1,005 \times 1)}{3}$$

$$\rho_m = 1,11 \text{ g/cm}^3$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados todos os resultados encontrados no ensaio de resistência última à tração (tensão última à tração, deformação e módulo de elasticidade calculado a 50% da tensão última de ruptura medido na direção da carga aplicada), obtidos através do ensaio de tração uniaxial nos corpos de prova **LC, LV, LA, LCV-C, LCV-V, LCA-C e LCA-A**. Também será abordado nesta seção os resultados do ensaio de densidade volumétrica e a análise de fratura final dos CP's.

Para discussão dos resultados obtidos nos experimentos será tomado de base gráficos e tabelas geradas durante a pesquisa, a fim de realizar a discussão sobre a viabilidade da utilização de lâminas híbridas.

5.1 LEVANTAMENTO DE VALOR FINANCEIRO DAS FIBRAS DE VIDRO, CARBONO, ARAMIDA E OS TECIDOS HÍBRIDOS (CARBONO/VIDRO E CARBONO/ARAMIDA)

Para compra dos tecidos utilizado neste trabalho foi realizado um levantamento mercadológico (pesquisa de mercado) na época em que foram adquiridos (ano de 2020), onde o melhor orçamento encontrado é apresentado na Tabela 2. Destaca-se que esse orçamento foi realizado direto na fábrica, com os melhores preços encontrados no mercado.

Tabela 2: Orçamento para os tecidos utilizados.

Descrição	Un.	Preço/un (R\$)
Tecido de Fibra de Vidro/E	M ²	6,40
Tecido de Fibra de Carbono HTS40	M ²	146,50
Tecido de Aramida Twaron D2200	M ²	65,50
Tecido Híbrido Carbono/Vidro	M ²	83,00
Tecido Híbrido Carbono/Aramida	M ²	117,50

Fonte: Autor (2022), baseado em orçamentos de empresas.

5.2 ESPESSURAS DOS CORPOS DE PROVA

Após o término da fabricação dos CP's, foram retiradas as suas respectivas medidas para cada CP. Na medição da espessura do CP, foi utilizado micrômetro digital, sendo realizado a medição em cinco pontos diferentes ao longo do galgo. A Tabela 3 apresenta os valores médios das espessuras obtidas nos CP's válidos e seus respectivos desvios padrões (foi utilizado para o cálculo o software Excel® com função *desvpad.p*).

Tabela 3: Espessuras dos CP's.

Compósito	Espessura da Lâmina (mm)	Espessura do Tecido (mm)
LC	0,3640 ± 0,0239	0,23
LV	0,4180 ± 0,0609	0,18*
LA	0,4260 ± 0,0058	0,25*
LCV	0,4390 ± 0,0647	0,22*
LCA	0,4780 ± 0,0337	0,27*

Fonte: Autor (2022) e Fibertex®*.

Analisando os resultados das espessuras das lâminas, o compósito **LC** obteve um aumento de 56% na espessura após a impregnação da matriz. É possível observar de forma geral que o compósito **LV** obteve um aumento de 127,7 % de sua espessura após a inserção da resina. No compósito **LA** houve um aumento de 68% de espessura quando inserido a matriz. Na lâmina de compósito **LCV** houve um aumento de 95% da sua espessura. Por fim, no compósito **LCA** houve um aumento de 74,07% da sua espessura.

Foi observado um aumento maior de espessura nas lâminas **LV** e **LCV**. A característica que liga os dois é a presença da fibra de vidro/E. Logo, pode dizer que a fibra de vidro teve uma maior absorção de matriz. Destaca-se que uma das maiores vantagens da fibra de vidro, é possuir uma boa aderência fibra matriz, sendo sempre destaque a sua boa impregnação.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DO LC

5.3.1 Densidade volumétrica e estimativa de porcentagem dos constituintes do LC

O ensaio de densidade volumétrica foi realizado seguindo a norma ASTM D792 (2008), onde foi possível obter o resultado para o LC apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Densidade volumétrica do LC.

Densidade volumétrica (g/cm ³)		
Laminado	Valor médio	Desvio padrão
LC	1,35	0,017

Fonte: Autor (2022).

Para nível comparativo, Guilherme *et al.* (2019) obtiveram em sem compósito (fabricado pelo processo *Vacuum Bag*) com 3 camadas de carbono da Alltec® e resina Araldite Ardur 5052 uma densidade volumétrica de 1,12 g/cm³ com desvio padrão de 0,05 g/cm³. Vale destacar que o processo de laminação utilizado neste trabalho foi diferente do trabalho de Guilherme *et al.* (2019), o que pode ter acarretado na diferença do resultado encontrado neste trabalho.

Na estimativa de porcentagem dos constituintes do LC (pelo método proposto por Dong *et al.*, 2012), foi encontrado um percentual equivalente a 36% de volume de fibra de carbono no laminado. Sendo assim, 64% do volume do LC é composto por resina.

Para um breve comparativo, Lima (2021) obteve em seu trabalho (seu laminado utilizou a mesma matriz deste trabalho (Epóxi 2001) com duas camadas do tecido híbrido carbono/vidro) 65% de volume de resina, 30% de volume de reforço e 5% de vazio. No trabalho desenvolvido por Batista (2017) com compósito contendo dez camadas de tecido híbrido sarja 2x2 carbono/vidro laminado com Resina Epóxi Éster Vinílica, obteve 62% de volume de resina e 37% de volume de reforço e 1% de volume de vazio. Em ambos os trabalhos o percentual de constituintes foi realizado através de ensaio de calcinação. De forma geral, pode observar que o resultado encontrado utilizando a metodologia proposto por Dong *et al.* (2012), está em

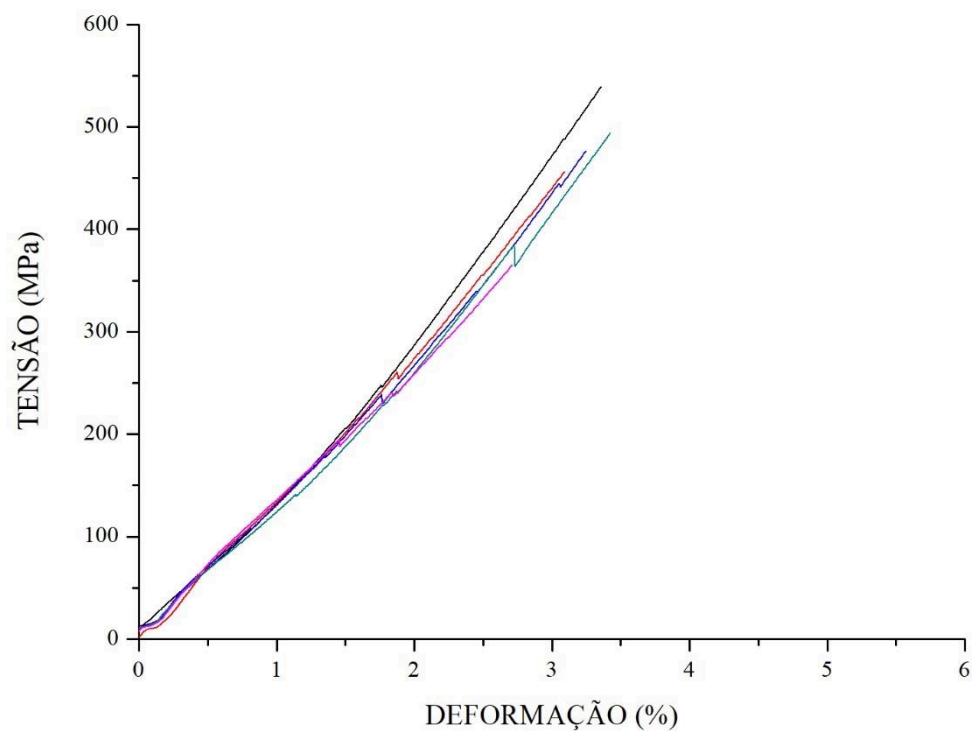
conformidade com os resultados encontrado por Lima (2021) e Batista (2017) que utilizaram o mesmo processo *Hand Lay-up*.

5.3.2 Ensaio de tração uniaxial do LC

Após a realização do ensaio de tração uniaxial, foi possível gerar o gráfico tensão x deformação com os resultados obtidos para os cinco CP's válidos (ruptura dentro do galgo) do LC.

O comportamento resultante dos CP's LC quando submetido a uma carga trativa é mostrado no diagrama tensão x deformação, exibido no Gráfico 1.

Gráfico 1: Diagrama tensão x deformação do LC.



Fonte: Autor (2022).

A Tabela 5, apresenta os resultados médios encontrados para as seguintes propriedades: deformação, tensão última à tração e módulo de elasticidade. Destaca-se que para o módulo de elasticidade foi considerado 50% da tensão de ruptura para cada CP.

Tabela 5: Propriedades de resistência última à tração do LC.

Propriedades	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Média	3,16	466,36	13,45
Desvio Padrão	0,25	57,50	0,42

Fonte: Autor (2022).

Guilherme *et al.* (2019), trabalho citado anteriormente (compósito fabricado pelo processo *Vacuum Bag* com 3 camadas de carbono da Alltec® e resina Araldite Ardur 5052) obteve uma tensão máxima de ruptura de 335 MPa com um desvio padrão de 58 MPa e módulo de elasticidade de 3,86 GPa com desvio padrão de 0,36 GPa. Vale destacar que o processo de fabricação utilizado pelos autores geralmente melhora o desempenho do compósito, aumentando sua resistência e seu módulo de elasticidade. Entretanto, o laminado compósito deste trabalho obteve resultados superiores aos dos autores citados, o que pode ser causado pelo tipo diferente do tecido, pois a fibra de carbono utilizada neste trabalho foi a HTS40 (alto desempenho).

5.4 CARACTERIZAÇÃO DO LV

5.4.1 Densidade volumétrica e estimativa de porcentagem dos constituintes do LV

O ensaio de densidade volumétrica foi realizado seguindo as premissas da norma ASTM D792 (2008), onde foi possível obter o resultado para o LV conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Densidade volumétrica do LV.

Densidade volumétrica (g/cm³)		
Laminado	Valor médio	Desvio padrão
LV	1,55	0,054

Fonte: Autor (2022).

Fontes (2017), obteve em seu trabalho com quatro camadas de fibra de vidro/E e resina Epóxi Ester Vinílica uma densidade de $1,54 \text{ g/cm}^3$ com desvio padrão de $0,03 \text{ g/cm}^3$.

Para Tinô (2014), os resultados de densidade volumétrica de compósitos utilizando fibras de vidro são comparáveis com outros trabalhos, pois tipicamente são encontrados resultados na faixa entre $1,5$ e $1,6 \text{ g/cm}^3$ (para processos *Hand Lay-up*).

Por tanto, o resultado do ensaio de densidade volumétrica encontrado neste trabalho está de acordo com as literaturas (Fontes, 2017 e Tinô, 2014).

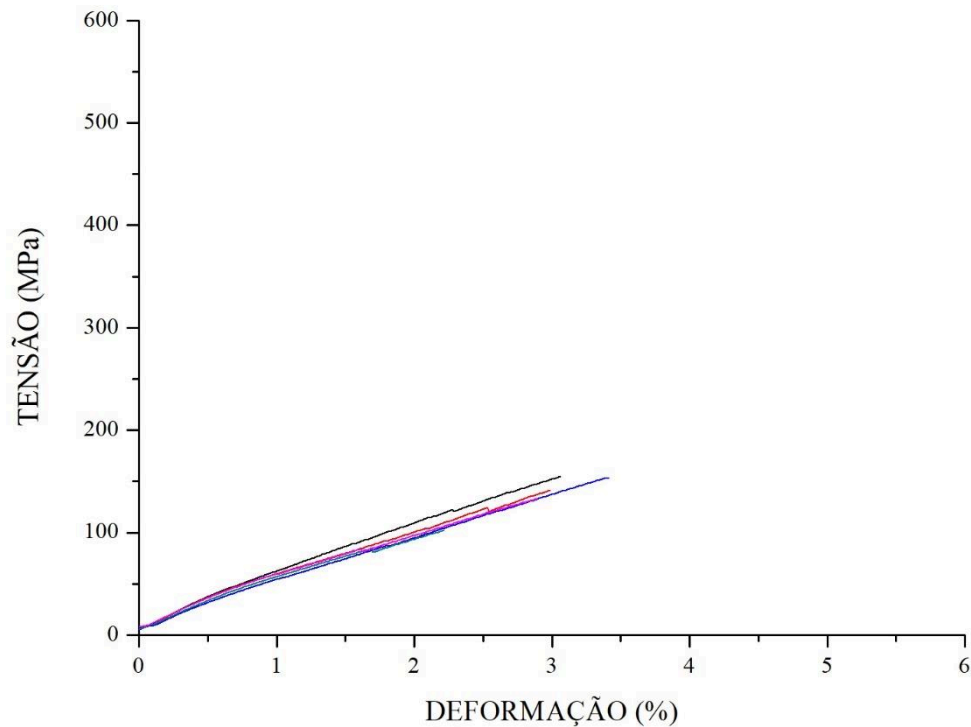
No cálculo de estimativa de porcentagem dos constituintes do **LV** (pelo método proposto por Dong *et al.*, 2012), foi encontrado um percentual equivalente a 30% de volume de fibra de vidro no laminado. Assim, 70% do volume do **LV** é composto por resina.

De forma geral, o resultado encontrado utilizando a metodologia proposto por Dong *et al.* (2012), está em conformidade com os resultados encontrado por Lima (2021) e Batista (2017), como já citado anteriormente.

5.4.2 Ensaio de tração uniaxial do LV

Após o ensaio de tração uniaxial, foi possível obter o gráfico tensão x deformação com os resultados encontrados para os cinco CP's válidos (ruptura dentro do galgo) do **LV**.

O comportamento resultante dos CP's **LV** quando submetido ao ensaio de tração é mostrado no diagrama tensão x deformação, exibido no Gráfico 2.

Gráfico 2: Diagrama tensão x deformação do LV.

Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 7, apresenta os resultados médios encontrados para as seguintes propriedades: deformação, tensão última à tração e módulo de elasticidade. Destaca-se que para o módulo de elasticidade foi considerado 50% da tensão de ruptura para cada CP.

Tabela 7: Propriedades de resistência última à tração do LV.

Propriedades	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Média	2,91	136,89	5,56
Desvio Padrão	0,39	19,18	0,36

Fonte: Autor (2022).

No trabalho de Fontes (2017), compósito fabricado pelo processo *Vacuum Bag* com quatro camadas de fibra de vidro/E e resina Epóxi Ester Vinílica, obteve sua resistência última à tração de 209,81 MPa com desvio padrão de 12,46 MPa e módulo de elasticidade de 4,68 MPa com desvio padrão de 0,17 GPa. Vale ressaltar que o processo de fabricação do autor é

diferente, a quantidade de camadas, orientação das camadas, a matriz utilizada, ou seja, vários fatores influenciam nos resultados.

5.5 CARACTERIZAÇÃO DO LA

5.5.1 Densidade volumétrica e estimativa de porcentagem dos constituintes do LA

Para o ensaio de densidade volumétrica realizado foi seguido as premissas da norma ASTM D792 (2008), onde foi possível obter o resultado para o **LA** conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: Densidade volumétrica do **LA**.

Densidade volumétrica (g/cm ³)		
Laminado	Valor médio	Desvio padrão
LA	1,20	0,014

Fonte: Autor (2022).

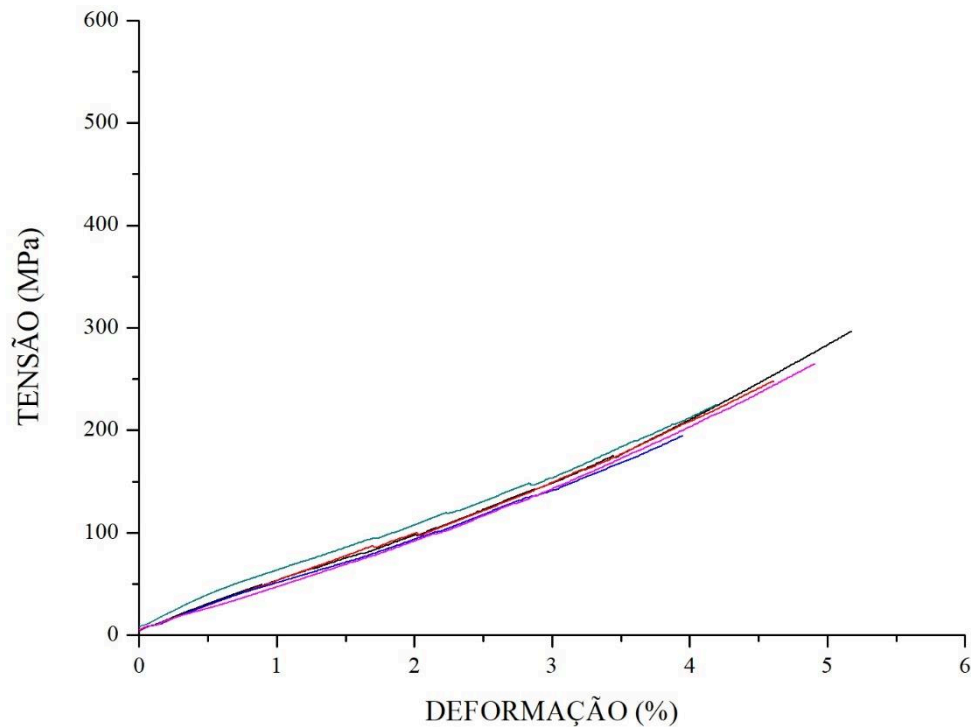
Na análise de estimativa de porcentagem dos constituintes do **LA** (pelo método proposto por Dong *et al.*, 2012), foi encontrado um percentual equivalente a 26% de volume de fibra de aramida no laminado. Assim, 74% do volume do **LA** é composto por resina.

De forma geral, o resultado encontrado utilizando a metodologia proposto por Dong *et al.* (2012), está em conformidade com os resultados encontrado por Lima (2021) e Batista (2017), como já citado anteriormente.

5.5.2 Ensaio de tração uniaxial do LA

Após a realização do ensaio de tração uniaxial, foi possível obter o gráfico tensão x deformação com os resultados encontrados para os cinco CP's válidos (ruptura dentro do galgo) do **LA**.

O comportamento resultante dos CP's **LA** quando submetido ao ensaio de tração é mostrado no diagrama tensão x deformação, exibido no Gráfico 3.

Gráfico 3: Diagrama tensão x deformação do LA.

Fonte: Autor (2022).

A Tabela 9 apresenta os resultados médios encontrados para as seguintes propriedades: deformação, tensão última à tração e módulo de elasticidade. Destaca-se que para o módulo de elasticidade foi considerado 50% da tensão de ruptura para cada CP.

Tabela 9: Propriedades de resistência última à tração do LA.

Propriedades	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Média	4,56	246,09	4,90
Desvio Padrão	0,44	34,67	0,24

Fonte: Autor (2022).

Amanda *et al.* (2019) em seu trabalho (compósito fabricado pelo processo *Vacuum Bag*) com cinco camadas de tecido plano Kevlar (aramida) e resina Epóxi AR 260 encontrou uma tensão última à tração de 387,68 MPa com desvio padrão de 16,23 MPa e módulo de elasticidade de 15,55 GPa com desvio padrão de 0,69 GPa. Destaca-se que as diferenças de

resultado deste trabalho com a dos autores citados neste caso podem estar relacionadas ao processo de fabricação utilizado como também a quantidade de camadas de fibra utilizadas.

5.6 CARACTERIZAÇÃO DO LCV

5.6.1 Densidade volumétrica e estimativa de porcentagem dos constituintes do LCV

Para o ensaio de densidade volumétrica realizado seguiu as premissas conforme a norma ASTM D792 (2008), onde foi possível obter o resultado para o LCV apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Densidade volumétrica do LCV.

Densidade volumétrica (g/cm ³)		
Laminado	Valor médio	Desvio padrão
LCV	1,42	0,057

Fonte: Autor (2022).

Lima (2021) obteve em seu trabalho uma densidade volumétrica de 1,40 g/cm³ com desvio padrão de 0,01 g/cm³, em seu laminado utilizando a mesma matriz deste trabalho (Epóxi 2001) com duas camadas do mesmo tecido utilizado neste trabalho (tecido híbrido carbono/vidro).

Jackson (2020), por sua vez obteve uma densidade volumétrica de 1,42 g/cm³ com desvio padrão de 0,02 g/cm³. No trabalho de Jackson (2020) utilizou a mesma matriz e o mesmo tecido deste trabalho, variando apenas a quantidade de camadas utilizada, pois a do autor foram quatro camadas.

Por tanto, o resultado do ensaio de densidade volumétrica encontrado neste trabalho está de acordo com a literatura (Lima, 2021 e Jackson, 2020).

Na análise de estimativa de porcentagem dos constituintes do LCV (pelo método proposto por Dong *et al.*, 2012), foi encontrado um percentual equivalente a 15% de volume de fibra de vidro e 15% de volume de fibra de carbono no laminado, somando um total de 30% de volume de reforço. Sendo assim, 70% do volume do LCV é composto por resina.

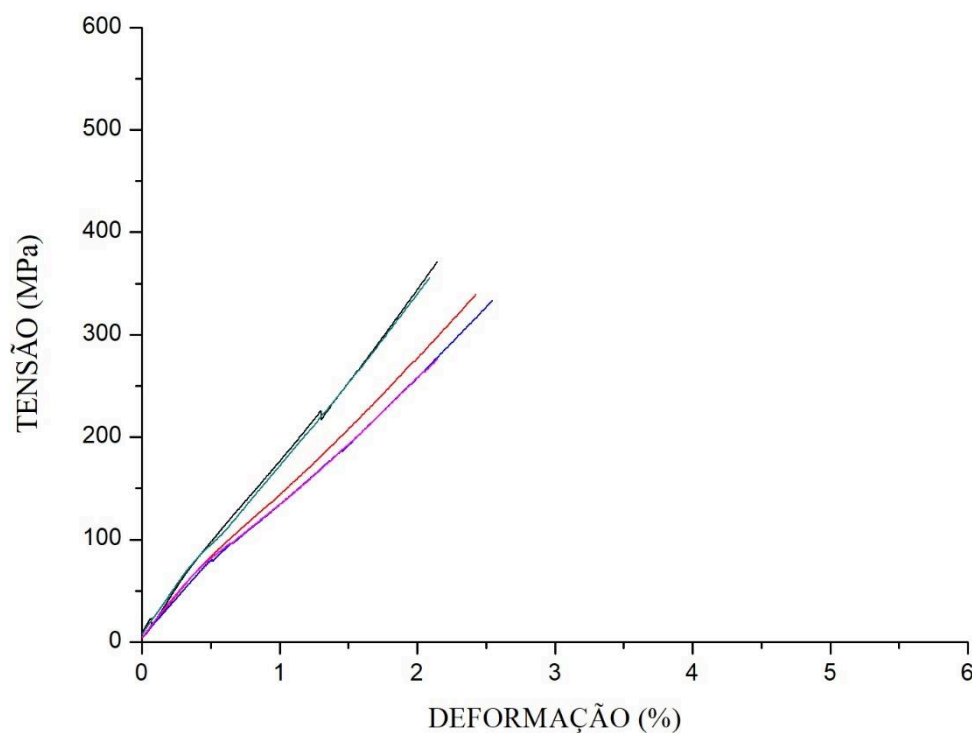
De forma geral, o resultado encontrado utilizando a metodologia proposto por Dong *et al.* (2012), está de acordo com os resultados encontrado por Lima (2021) e Batista (2017), como já citado anteriormente.

5.6.2 Ensaio de tração uniaxial do LCV-C

Após a realização do ensaio de tração uniaxial, foi possível obter o gráfico tensão x deformação com os resultados encontrados para os cinco CP's válidos (ruptura dentro do galgo) para o LCV-C.

O comportamento resultante dos CP's LCV-C quando submetido ao ensaio de tração é mostrado no diagrama tensão x deformação, exibido no Gráfico 4.

Gráfico 4: Diagrama tensão x deformação do LCV-C.



Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 11 encontra-se os resultados médios obtidos para as seguintes propriedades: deformação, tensão última à tração e módulo de elasticidade. Destaca-se que para o módulo de elasticidade foi considerado 50% da tensão de ruptura para cada CP.

Tabela 11: Propriedades de resistência última à tração do **LCV-C**.

Propriedades	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Média	2,27	335,29	14,95
Desvio Padrão	0,18	32,39	1,94

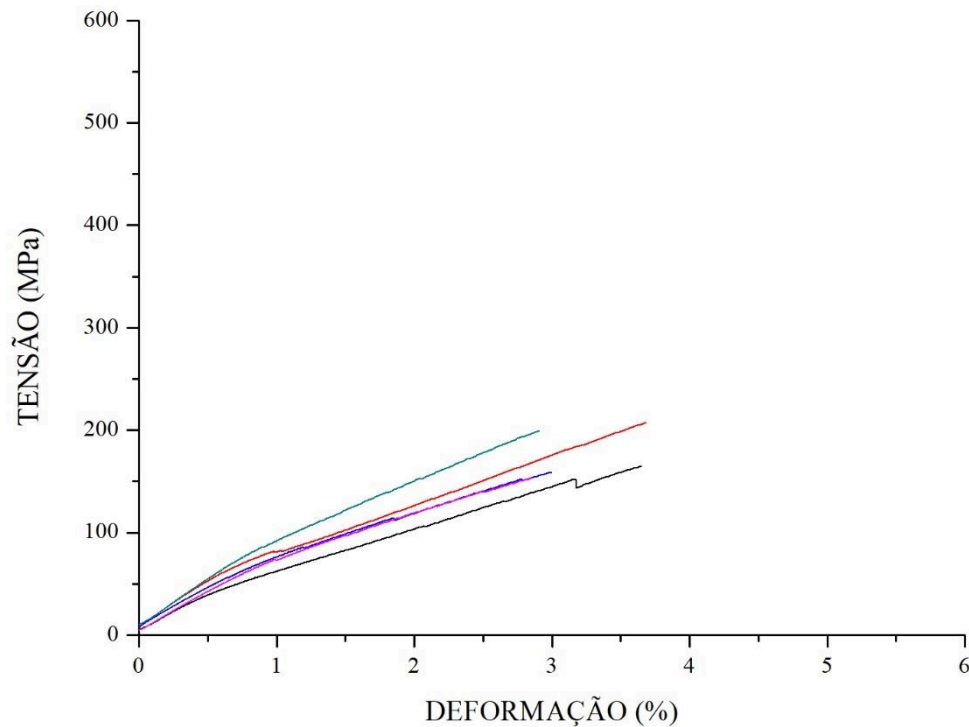
Fonte: Autor (2022).

No trabalho de Lima (2021) utilizando o mesmo tipo de matriz e mesmo tecido utilizado neste trabalho sendo duas camadas, foi obtido uma resistência última à tração de 333,23 MPa com um desvio padrão de 23,55 MPa e módulo de elasticidade de 13,82 GPa com desvio padrão de 1,05 GPa. Destaca-se que apesar da quantidade de camadas serem diferentes (a do autor citada tinha uma camada a mais) não houve muita diferença nos resultados, fazendo com que os resultados encontrados estivessem de acordo com a literatura de Lima (2021).

5.6.3 Ensaio de tração uniaxial do LCV-V

Após a realização do ensaio de tração uniaxial, foi possível obter o gráfico tensão x deformação com os resultados encontrados para os cinco CP's válidos (ruptura dentro do galgo) para o **LCV-V**.

O comportamento resultante dos CP's **LCV-V** quando submetido ao ensaio de tração é mostrado no diagrama tensão x deformação, mostrado no Gráfico 5.

Gráfico 5: Diagrama tensão x deformação do LCV-V.

Fonte: Autor (2022).

A Tabela 12 apresenta os resultados médios obtidos para as seguintes propriedades: deformação, tensão última à tração e módulo de elasticidade. Destaca-se que para o módulo de elasticidade foi considerado 50% da tensão de ruptura para cada CP.

Tabela 12: Propriedades de resistência última à tração do LCV-V.

Propriedades	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Média	3,21	176,80	7,13
Desvio Padrão	0,36	22,22	1,07

Fonte: Autor (2022).

No trabalho desenvolvido por Lima (2021), onde o autor utilizou o mesmo tipo de matriz utilizada neste trabalho e o mesmo tecido híbrido do LCV com duas camadas, obteve a resistência última à tração no sentido longitudinal à fibra de vidro de 225,93 MPa com um desvio padrão de 20,06 MPa e um módulo de elasticidade de 7,68 GPa com desvio padrão de

0,48 GPa. Destaca-se que a diferença do trabalho do autor para este trabalho foi apenas o número de camadas (o autor realizou seu compósito com duas camadas). Pode observar que os resultados também estão em conformidade, apenas uma resistência um pouco maior encontrado pelo autor (o que pode ser explicado pela camada utilizada a mais).

Fazendo um comparativo entre os CP's **LCV-C** e **LCV-V**, de forma geral foi possível observar uma diferença na resistência e no módulo de elasticidade quando comparado o ensaio no sentido longitudinal da fibra de carbono para a o ensaio no sentido longitudinal da fibra de vidro (a resistência no sentido da fibra de carbono foi 89,64% maior, enquanto o módulo de elasticidade na direção da fibra de vidro foi 109,67% maior). Para Callister e Rethwisch (2013), esse comportamento já é esperado, pois as fibras de carbono apresentam um maior desempenho em relação ao módulo de elasticidade e resistência à tração, sendo superior o seu desempenho quando comparado à fibra de vidro, como mostrado nas Figuras (5 e 6).

5.7 CARACTERIZAÇÃO DO LCA

5.7.1 Densidade volumétrica e estimativa de porcentagem dos constituintes do LCA

Para o ensaio de densidade volumétrica realizado foi utilizado a norma ASTM D792 (2008), onde foi possível obter o resultado para densidade volumétrica do **LCA** apresentado na Tabela 13.

Tabela 13: Densidade volumétrica do **LCA**.

Densidade volumétrica (g/cm ³)		
Laminado	Valor médio	Desvio padrão
LCA	1,25	0,007

Fonte: Autor (2022).

Batista (2017), em seu trabalho desenvolveu um compósito com dez camadas de tecido híbrido sarja 2x2 carbono/aramida utilizando resina Epóxi Ester Vinílica, obteve uma densidade volumétrica de 1,29 g/cm³ com desvio padrão de 0,01 g/cm³.

No cálculo realizado para a estimativa de porcentagem dos constituintes do **LCA** (pelo método proposto por Dong *et al.*, 2012), foi encontrado um percentual equivalente a 14% de

volume de fibra de aramida e 14% de volume de fibra de carbono no laminado, somando um total de 28% de volume de reforço. Sendo assim, 72% do volume do **LCA** é composto por resina.

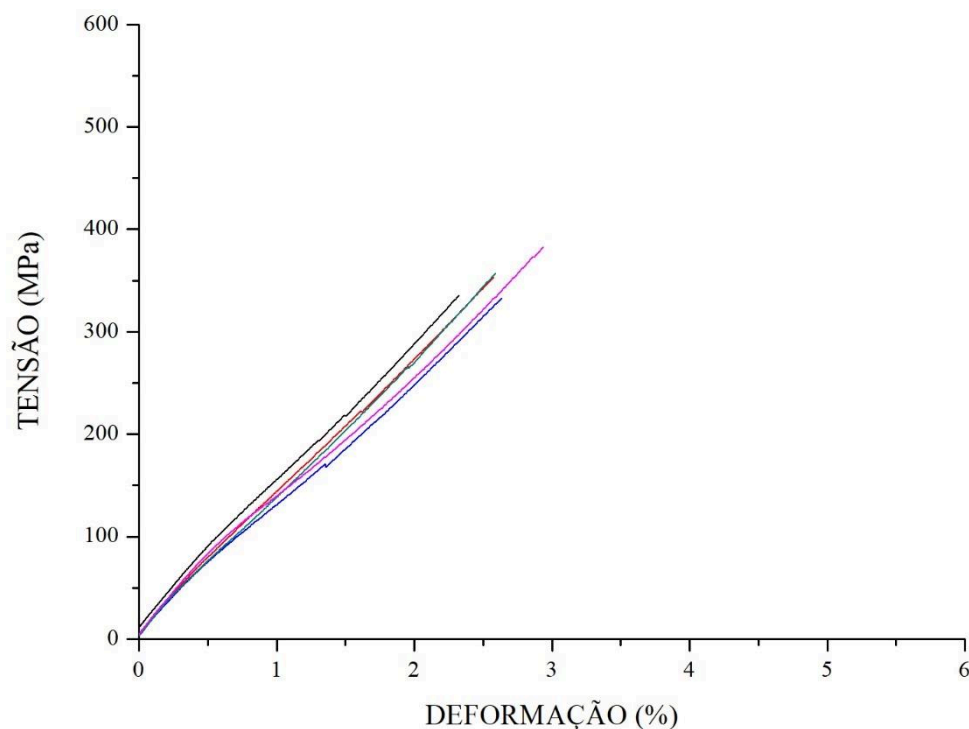
De forma geral, o resultado encontrado utilizando a metodologia proposto por Dong *et al.* (2012), está de acordo com os resultados encontrado por Lima (2021) e Batista (2017), como já citado anteriormente.

5.7.2 Ensaio de tração uniaxial do LCA-C

Após a realização do ensaio de tração uniaxial, foi possível obter o gráfico tensão x deformação com os resultados encontrados para os cinco CP's válidos (ruptura dentro do galgo) para o **LCA-C**.

O comportamento resultante dos CP's **LCA-C** quando submetido ao ensaio de tração é mostrado no diagrama tensão x deformação, mostrado no Gráfico 6.

Gráfico 6: Diagrama tensão x deformação do **LCA-C**.



Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 14 encontra-se os resultados médios obtidos para as seguintes propriedades: deformação, tensão última à tração e módulo de elasticidade. Destaca-se que para o módulo de elasticidade foi considerado 50% da tensão de ruptura para cada CP.

Tabela 14: Propriedades de resistência última à tração do **LCA-C**.

Propriedades	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Média	2,61	352,26	13,66
Desvio Padrão	0,19	17,87	0,90

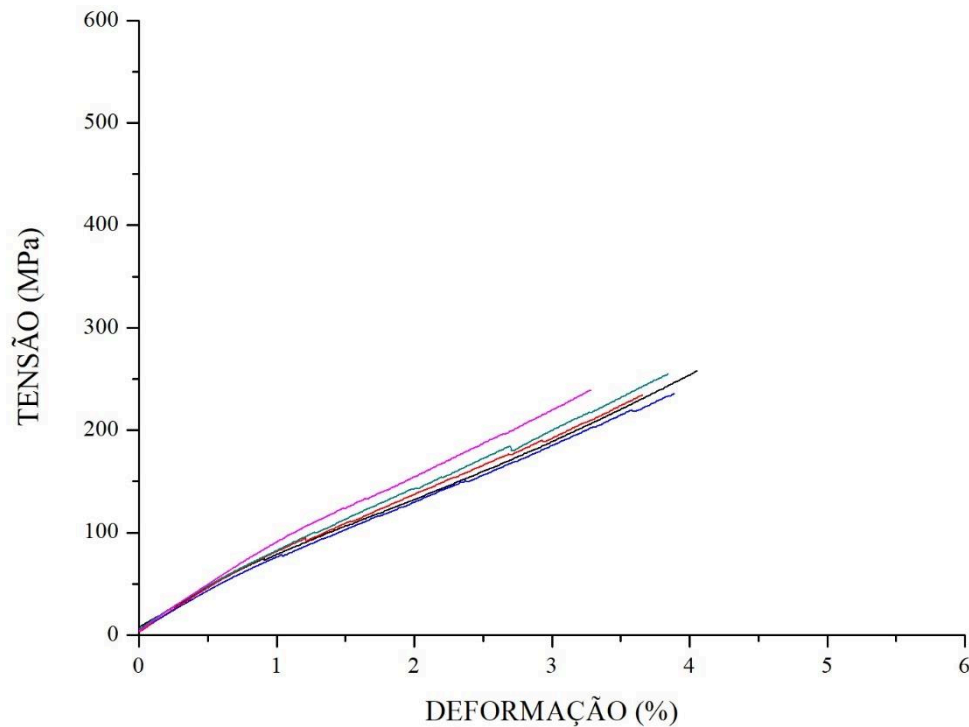
Fonte: Autor (2022).

No trabalho realizado por Batista (2017), (compósito com dez camadas de tecido híbrido sarja 2x2 carbono/aramida laminado com Resina Epóxi Éster Vinílica), foi obtido uma resistência no sentido longitudinal da fibra de carbono de 297,41 MPa com desvio padrão de 29,33 MPa e um módulo de elasticidade de 6,89 GPa com um desvio padrão de 0,24 GPa. Destaca-se que a quantidade de camadas e o tecido utilizado pela autora foi de fabricantes diferente (onde a fibra de carbono do tecido híbrido da autora era T300 e o deste trabalho HTS40), o que pode ter causa diferença nos resultados.

5.7.3 Ensaio de tração uniaxial do LCA-A

Após a realização do ensaio de tração uniaxial, foi possível obter o gráfico tensão x deformação com os resultados encontrados para os cinco CP's válidos (ruptura dentro do galgo) para o **LCA-A**.

O comportamento resultante dos CP's **LCA-A** quando submetido ao ensaio de tração é mostrado no diagrama tensão x deformação, mostrado no Gráfico 7.

Gráfico 7: Diagrama tensão x deformação do **LCA-A**.

Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 15 encontra-se os resultados médios obtidos para as seguintes propriedades: deformação, tensão última à tração e módulo de elasticidade. Destaca-se que para o módulo de elasticidade foi considerado 50% da tensão de ruptura para cada CP.

Tabela 15: Propriedades de resistência última à tração do **LCA-A**.

Propriedades	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Média	3,74	244,54	7,19
Desvio Padrão	0,29	9,99	0,64

Fonte: Autor (2022).

Ainda de acordo com os comparativos realizado com o trabalho de Batista (2017), a autora encontrou uma resistência última à tração no sentido longitudinal da fibra de aramida de 393,52 MPa com desvio padrão de 10,05 MPa e um módulo de elasticidade 6,36 GPa com

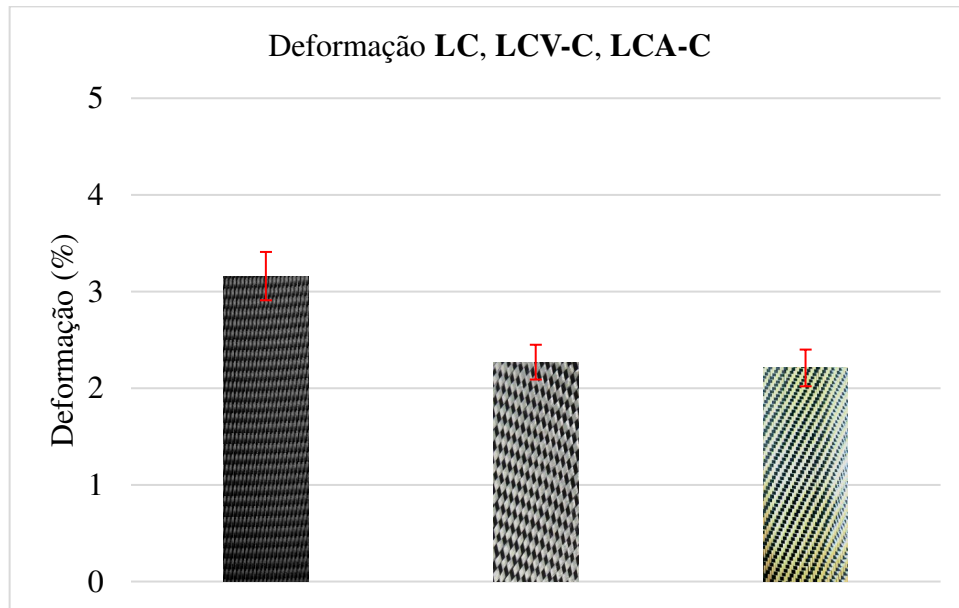
desvio padrão de 0,41 GPa. Vale ressaltar que o compósito foi fabricado com dez camadas de tecido híbrido sarja 2x2 carbono/aramida laminado com Resina Epóxi Éster Vinílica.

De forma geral, foi observado uma diferença no resultado de resistência à tração e módulo de elasticidade quando comparado os CP's **LCA-C** e **LCA-A**. Quando submetido a uma carga trativa no sentido da fibra de carbono houve um aumento na resistência à tração de 44,05% e no módulo de elasticidade de aproximadamente 90% quando comparado no sentido da fibra de aramida. Como citado anteriormente, a fibra de carbono é superior nos quesitos de resistência última à tração e módulo de elasticidade quando comparado com outras fibras, o que faz ser esperado esse comportamento (CALLISTER e RETHWISCH, 2013). Isso mostra que, pelo fato das fibras serem diferentes, o tecido é anisotrópico, produzindo propriedades anisotrópicas.

5.8 COMPARATIVOS

5.8.1 Comparativo entre deformação, resistência e módulo de elasticidade do LC, LCV-C e LCA-C

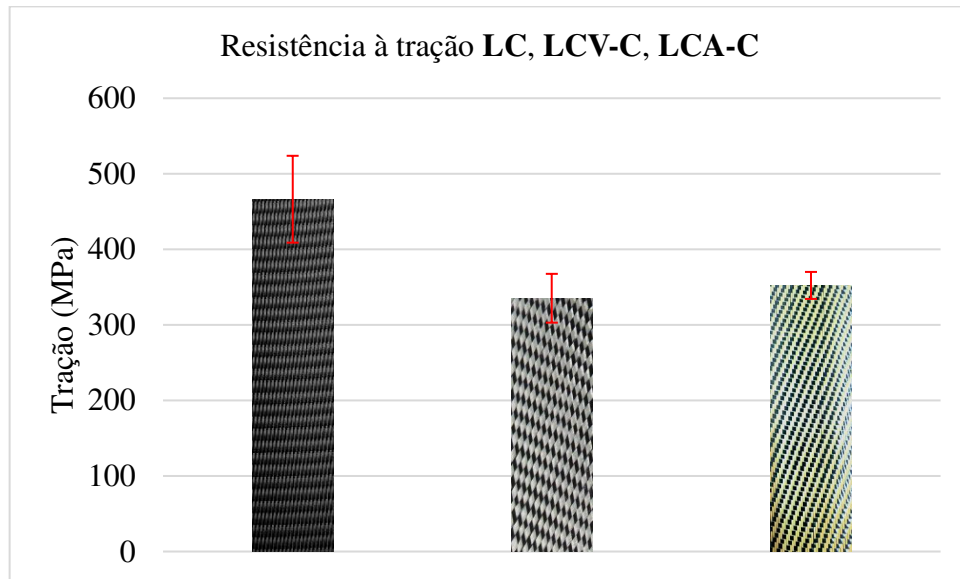
No quesito de deformação, quando comparado os CP's **LC**, **LCV-C** e **LCA-C**, foi observado que o carbono puro teve maior capacidade de deformação, sendo 39,20% superior ao **LCV-C** e 21,07% superior ao **LCA-C**, conforme demonstrado no Gráfico 8. Em relação à deformação do **LCV-C** e **LCA-C** foram praticamente iguais, visto que o desvio padrão o colocam muito próximo um do outro. Assim, podemos dizer que se a hibridização com o carbono utilizar fibra de vidro ou fibra de aramida a deformação será praticamente a mesma.

Gráfico 8: Deformação dos CP's **LC**, **LCV-C** e **LCA-C**.

Fonte: Autor (2022).

Em relação a resistência os CP's **LC** (fibra de carbono puro) obteve uma resistência 39,09% superior ao **LCV-C** e 32,39% superior ao **LCA-C**. Pode observar também que, apesar do resultado da resistência do **LCA-C** se apresentar um pouco acima da resistência do **LCV-C**, os desvios padrões estão próximos. Então podemos dizer que, para essa configuração de resistência pode-se utilizar a hibridização (fibra perpendicular ao carbono) com a fibra de aramida quanto também com a fibra de vidro que o resultado não terá diferença significativa. Assim, se faz viável utilizar a hibridização com a fibra de vidro, pois o tecido híbrido carbono/vidro atualmente é 41,56% mais barato que o tecido híbrido carbono/aramida. No Gráfico 9 pode observar os resultados em relação a resistência dos CP's **LC**, **LCV-C** e **LCA-C**.

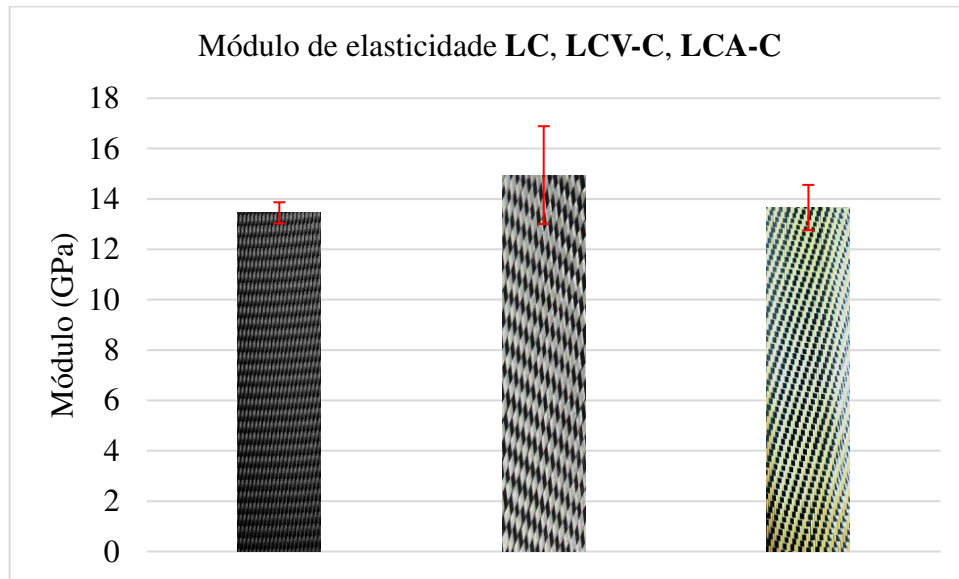
Gráfico 9: Resistência à tração dos CP's LC, LCV-C e LCA-C.



Fonte: Autor (2022).

Para o módulo de elasticidade, pode observar no Gráfico 10 que a hibridização não influenciou significativamente o parâmetro de módulo de elasticidade. Como podemos observar (ver Gráfico 10) que os desvios padrões ficaram muito próximos, não podemos afirmar com propriedade que um será melhor que o outro. Entretanto, para este parâmetro, podemos dizer que seria mais viável utilizar o tecido híbrido carbono/vidro, visto que o tecido híbrido carbono/vidro é 76,50% mais barato que o tecido de fibra carbono puro e 41,56% mais barato que o tecido híbrido carbono/aramida.

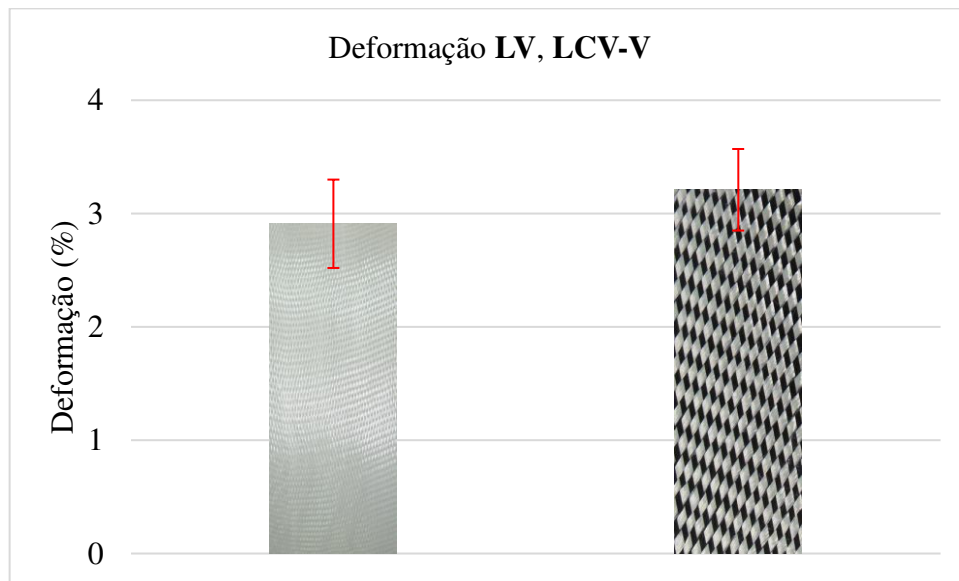
Gráfico 10: Módulo de elasticidade dos CP's **LC**, **LCV-C** e **LCA-C**.



Fonte: Autor (2022).

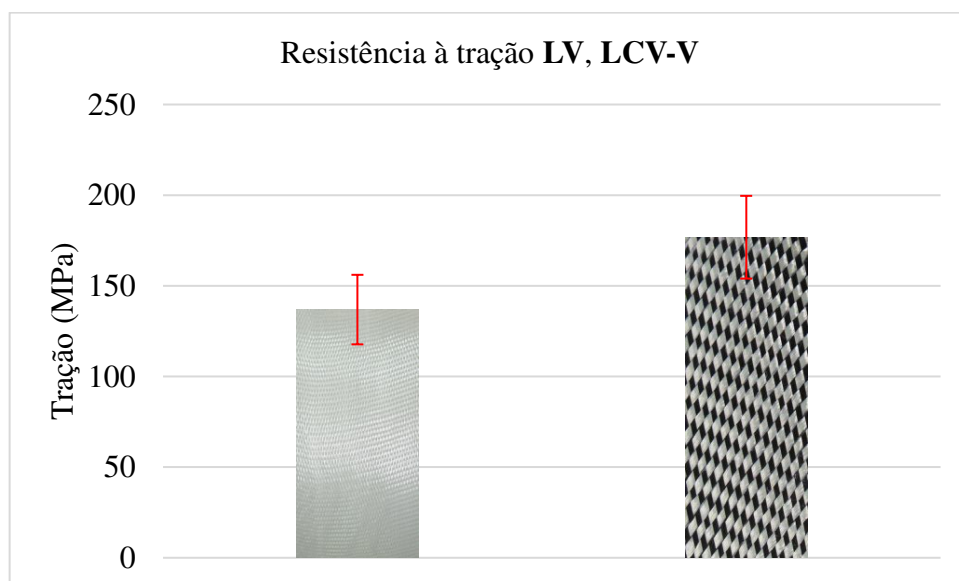
5.8.2 Comparativo entre deformação, resistência e módulo de elasticidade do LV e LCV-V

Pode-se observar que a deformação dos CP's **LV** e **LCV-V** foram bem próximas (desvios padrões próximos). Entretanto, os CP's **LCV-V** foram 10,30 % superior em relação a deformação, conforme ilustrado no Gráfico 11. Então podemos dizer que a fibra de carbono no sentido transversal ao carregamento influenciou na deformação.

Gráfico 11: Deformação dos CP's LV e LCV-V.

Fonte: Autor (2022).

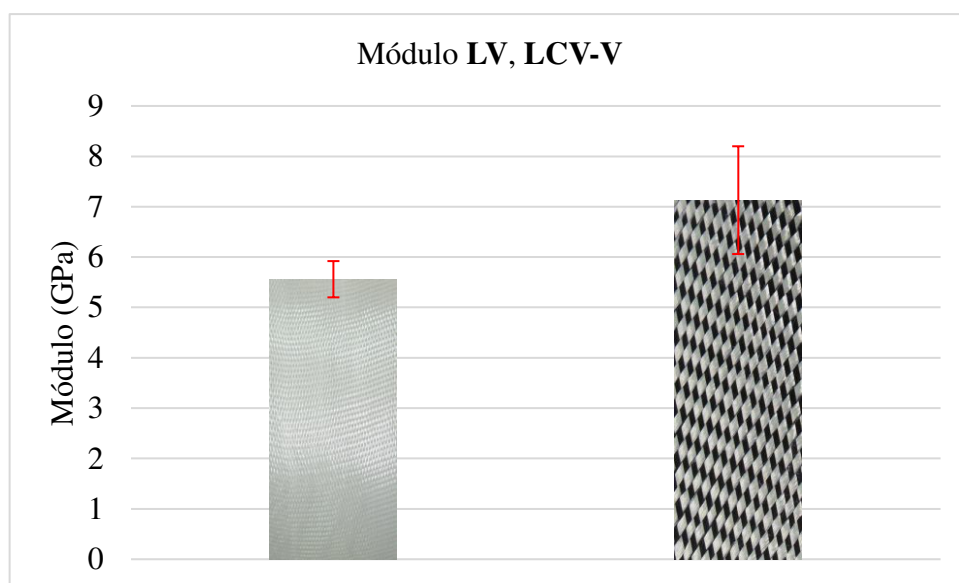
Em relação a resistência, a hibridização teve um efeito positivo, pois ao adicionar carbono (mesmo sendo no sentido transversal, ou seja, não sendo aplicado no sentido do carregamento), foi possível obter uma resistência do **LCV-V** 29,5% superior em relação a resistência do **LV**. Destaca-se que o tipo de tecelagem das fibras é diferente, mas a gramatura é a mesma. O Gráfico 12 demonstra a resistência à tração dos CP's **LV** e **LCV-V**.

Gráfico 12: Resistência à tração dos CP's LV e LCV-V.

Fonte: Autor (2022).

Para o módulo de elasticidade, a hibridização também teve um efeito positivo, pois ao adicionar carbono no sentido transversal (não sendo aplicado no sentido do carregamento), foi possível obter um módulo de elasticidade maior do **LCV-V** em relação ao módulo de elasticidade do **LV** (28,23% maior). Isso se dá pelo motivo da fibra de carbono impedir um deslocamento maior da fibra de vidro. Destaca-se que o tipo de tecelagem é diferente, mas a gramatura é a mesma. O Gráfico 13 exibe os resultados do módulo de elasticidade para os CP's **LV** e **LCV-V**.

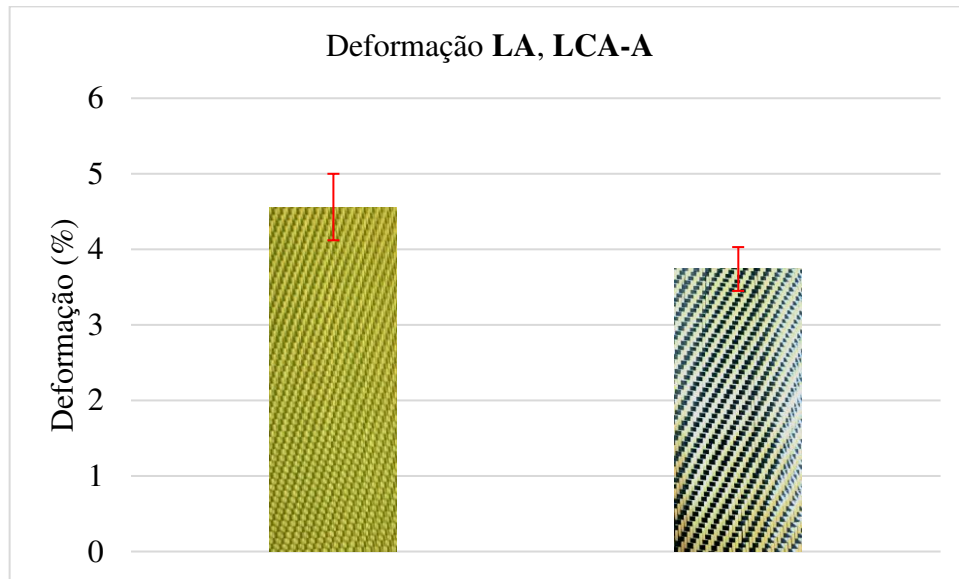
Gráfico 13: Módulo de elasticidade dos CP's **LV** e **LCV-V**.



Fonte: Autor (2022).

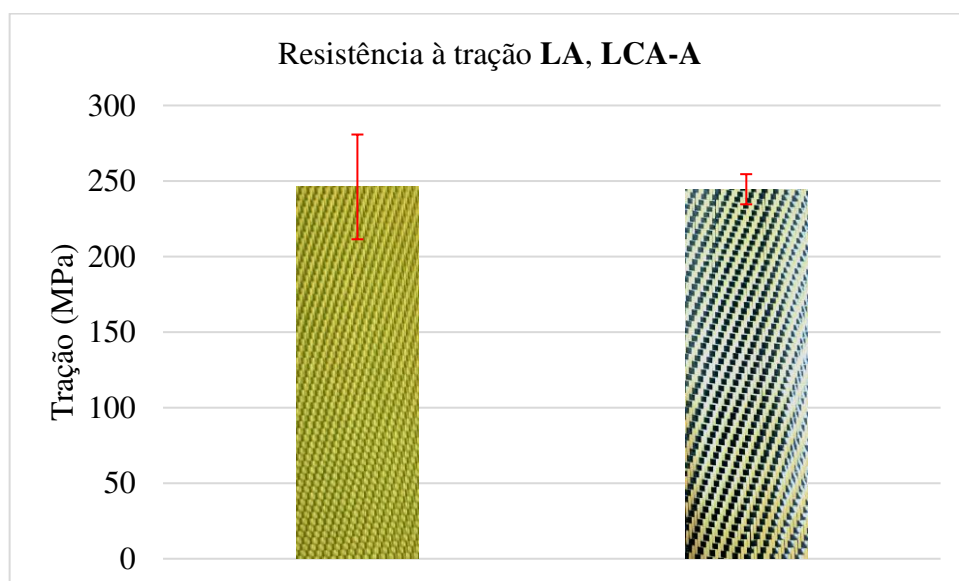
5.8.3 Comparativo entre deformação, resistência e módulo de elasticidade do **LA** e **LCA-A**

Em relação a deformação, pode-se observar que o **LA** obteve um deslocamento de 21,92% maior que o deslocamento do **LCA-A**. De forma geral, pode dizer que a fibra de carbono no sentido transversal ao carregamento impediu um maior deslocamento da aramida, conforme ilustrado no Gráfico 14.

Gráfico 14: Deformação dos CP's LA e LCA-A.

Fonte: Autor (2022).

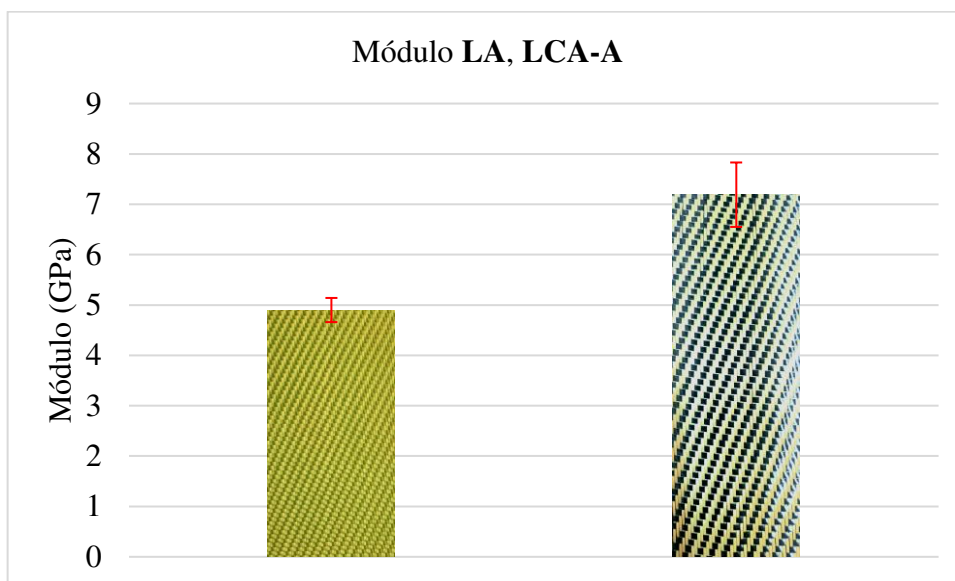
Na propriedade de resistência, pode-se observar que a hibridização não influenciou significativamente. Assim, para aplicação neste quesito é mais viável a utilização da fibra de aramida, pois atualmente a fibra de aramida possui 79,38% menor custo do que o tecido híbrido carbono/aramida. O Gráfico 15 ilustra os resultados encontrados para resistência última à tração nos CP's LA e LCA-A.

Gráfico 15: Resistência à tração dos CP's LA e LCA-A.

Fonte: Autor (2022).

Para o parâmetro de módulo de elasticidade, foi possível observar um efeito positivo da hibridização, onde houve um aumento do módulo de elasticidade de 46,73% do **LCA-A** em relação ao módulo de elasticidade do **LA** (ilustrado no Gráfico 16). Esse resultado se deu pelo fato comentado anteriormente, a fibra de carbono impediu o deslocamento maior da fibra de aramida.

Gráfico 16: Módulo de elasticidade dos CP's **LA** e **LCA-A**.



Fonte: Autor (2022).

Como ficou claro nos itens anteriores, de forma geral a fibra de carbono é melhor nos aspectos estudados, entretanto a mesma possui um custo elevado. Assim, deve ser pensado quais substituições podem ser viáveis em termos de ganhos e perdas de propriedades relacionados a custo-benefício para a hibridização.

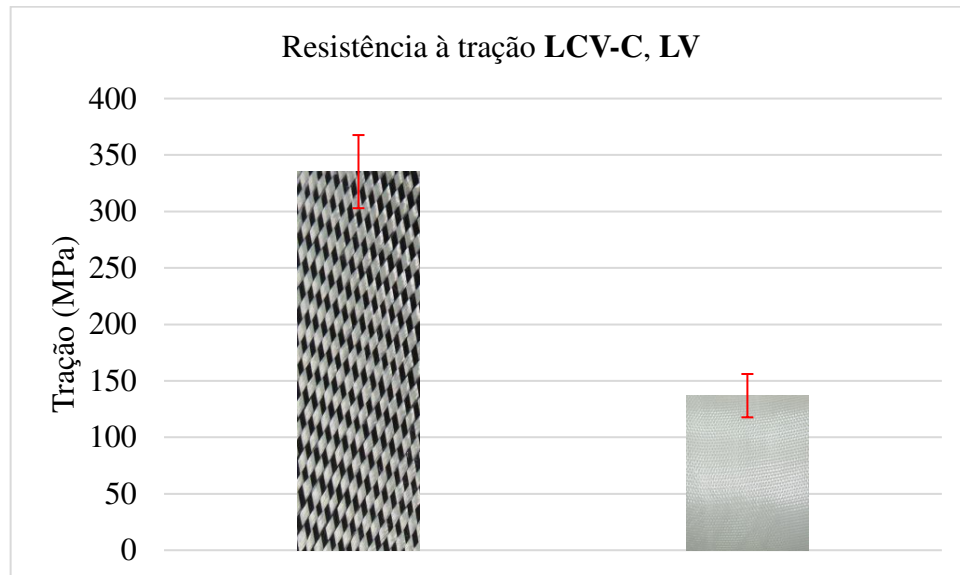
5.8.4 Comparativo entre resistência e módulo de elasticidade do LCV-C com LV e LCA-C com LA

Para um comparativo global geral, podemos fazer o comparativo entre os CP's **LCV-C** com o **LV** e o **LCA-C** com o **LA**.

A resistência última à tração do **LCV-C** em relação ao **LV** teve um aumento de 144,93% (ver Gráfico 17), enquanto o módulo de elasticidade do **LCV-C** em relação ao **LV** teve um aumento de 168,88% (ver Gráfico 18). Ou seja, houve um efeito positivo da hibridização ao adicionar a fibra de carbono com o vidro. Além disso, como citado anteriormente, utilizando a

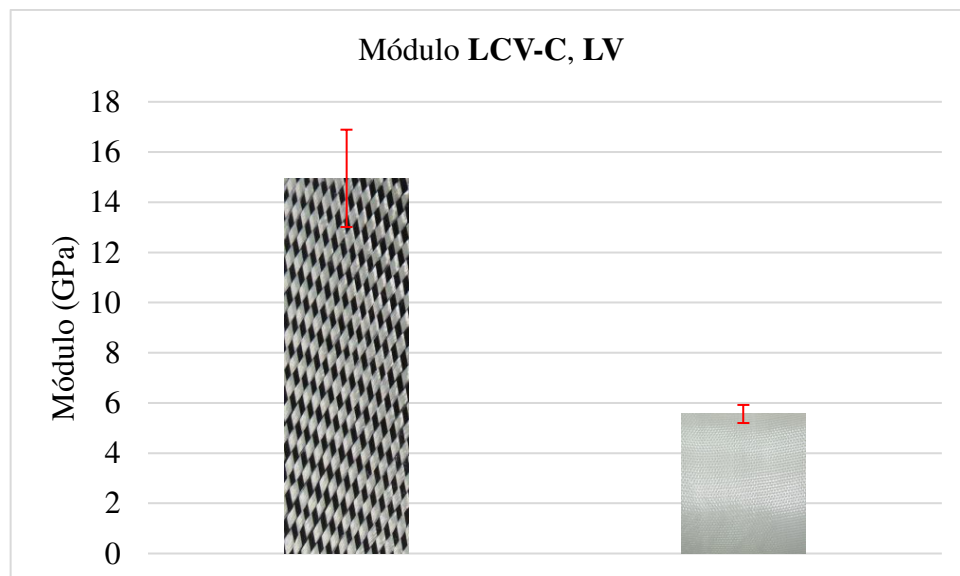
fibra de vidro na hibridização faz com que o custo seja 76,50% menor do que a fibra de carbono pura atualmente no mercado.

Gráfico 17: Resistência à tração dos CP's LCV-C e LV.



Fonte: Autor (2022).

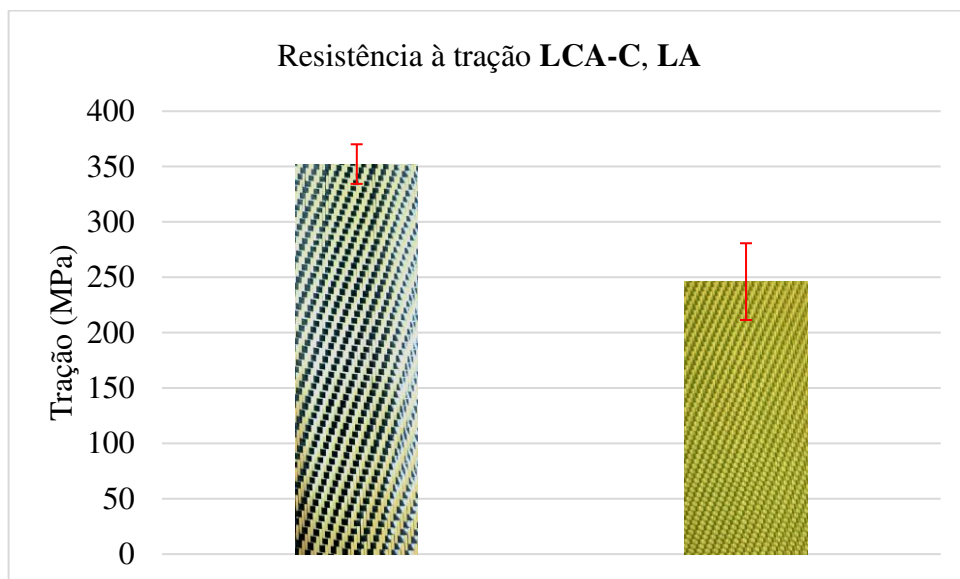
Gráfico 18: Módulo de elasticidade dos CP's LCV-C e LV.



Fonte: Autor (2022).

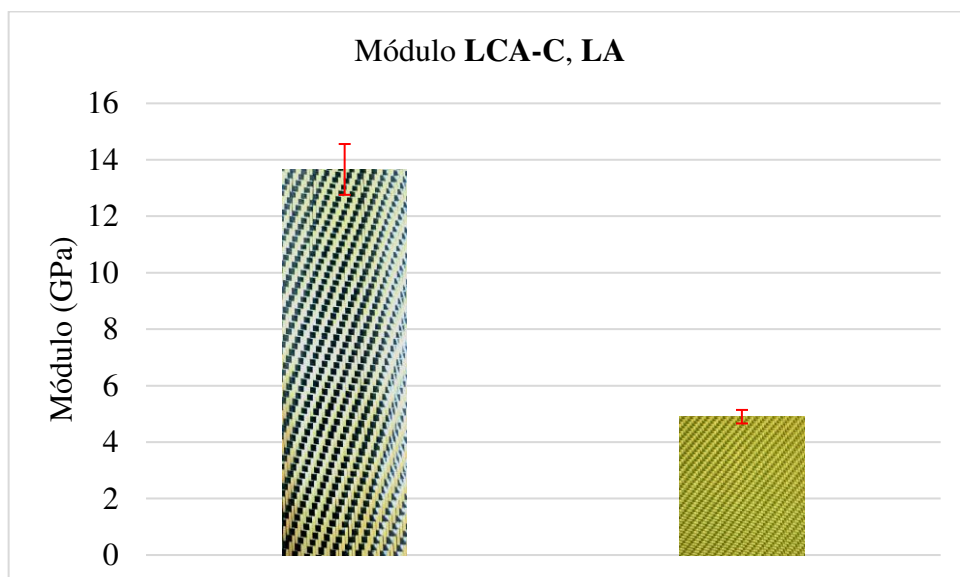
Em relação a resistência última à tração dos CP's **LCA-C** e **LA** houve um aumento de 43,14% na resistência (ver Gráfico 19) e um aumento de 178,77% no módulo de elasticidade (ver Gráfico 20). Também houve um efeito positivo da hibridização, pois ao adicionar a fibra de carbono à aramida houve aumento na resistência e no módulo. Outro ponto positivo da hibridização é o custo-benefício, pois o preço do tecido híbrido **LCA** é 24,68% menor que a fibra de carbono pura.

Gráfico 19: Resistência à tração dos CP's **LCA-C** e **LA**.



Fonte: Autor (2022).

Gráfico 20: Módulo de elasticidade dos CP's **LCA-C** e **LA**.

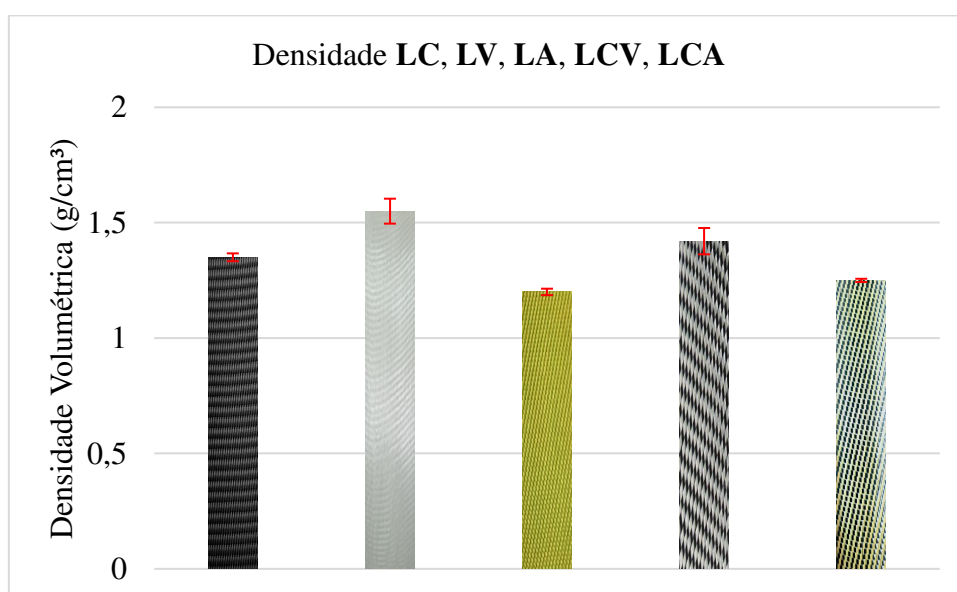


Fonte: Autor (2022).

5.8.5 Comparativo de densidade volumétrica do LC, LV, LA, LCV e LCA

Como já esperado e comentado na discussão da Figura 4 (seção da fundamentação teórica), a densidade da fibra de aramida tende a ser menor que a fibra de vidro e à fibra de carbono, como também à fibra de carbono tende a ser menos densa que à fibra de vidro. Assim foram encontrados os resultados de densidade volumétrica (ver Gráfico 21), coerente com o que já foi discutido na seção da fundamentação teórica deste trabalho.

Gráfico 21: Densidade Volumétrica dos CP's LC, LV, LA, LCV e LCA.



Fonte: Autor (2022).

A explicação do **LV** ter apresentado densidade volumétrica superior as demais lâminas de compósitos, é pelo fato da fibra de vidro apresentar densidade superior as demais, como ilustrado na Figura 4.

Podemos observar um efeito positivo da hibridização do carbono/aramida, pois com a hibridização (**LCA**) é possível encontrar um tecido 8% mais leve que o tecido de fibra de carbono puro e ao mesmo tempo apresentar propriedades mecânicas superiores ao tecido de fibra de aramida pura, como também apresenta propriedades mecânicas semelhantes a fibra de carbono pura. Sendo assim, o tecido híbrido carbono/aramida apresenta uma melhor relação custo-benefício em relação a fibra de carbono pura (24,68% mais barato).

Também pode observar um efeito positivo para a hibridização do carbono/vidro, onde o tecido híbrido carbono/vidro (**LCV**) apresenta características mecânicas superiores a fibra de

vidro pura e é cerca de 9% mais leve quando comparado com a densidade da fibra de vidro pura.

Assim, a hibridização além de trazer melhores características em aspectos que não são encontrados quando utilizado apenas um tipo de material, ela proporciona uma melhor aplicação em projetos onde se busca baixo peso específico atrelado a altas propriedades mecânicas, além de garantir um ótimo custo-benefício.

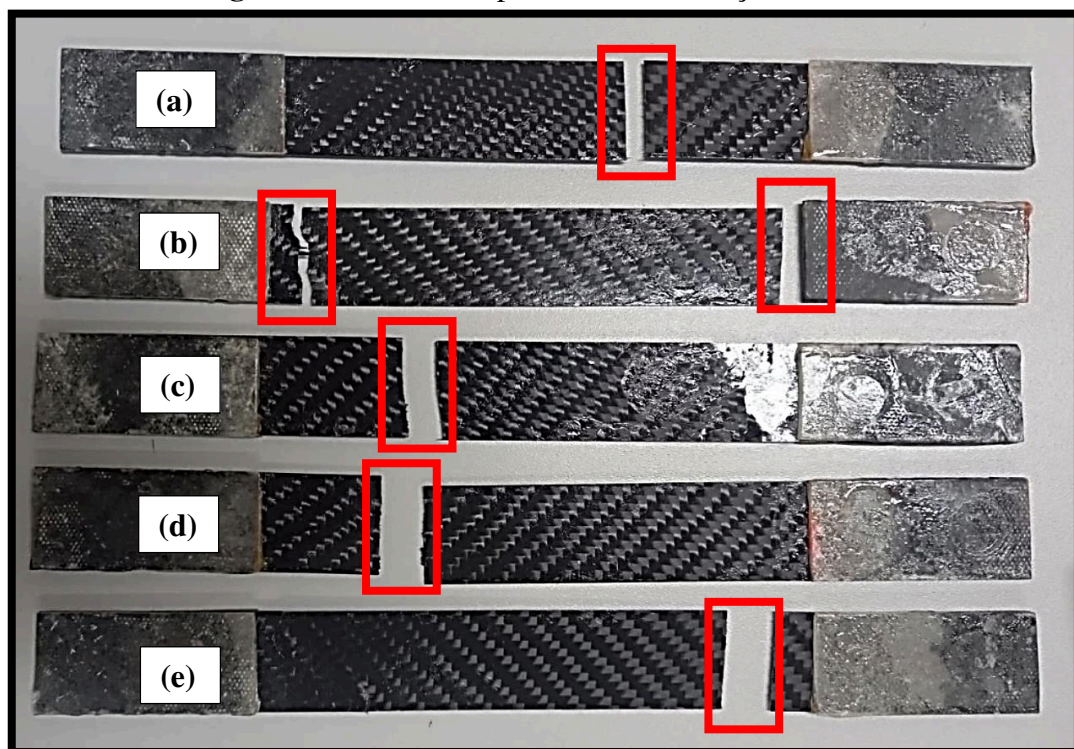
5.9 ANÁLISE DE FRATURA FINAL

Destaca-se que nas análises de fratura final não obteve nenhum modo de falha **LIT** e **GAT**, os quais não são considerados válidos de acordo com a norma ASTM D3039 (2017), caso sejam apresentadas estas falhas de fratura final após ensaio de tração uniaxial.

5.9.1 Fratura final do LC

Procedendo à análise macroscópica (característica de fratura) para os CP's **LC**, percebe-se a ocorrência predominante de dois tipos de fraturas (ver Figura 34) seguindo a norma ASTM D3039 (2017).

Figura 34: CP's **LC** após o ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Autor (2022).

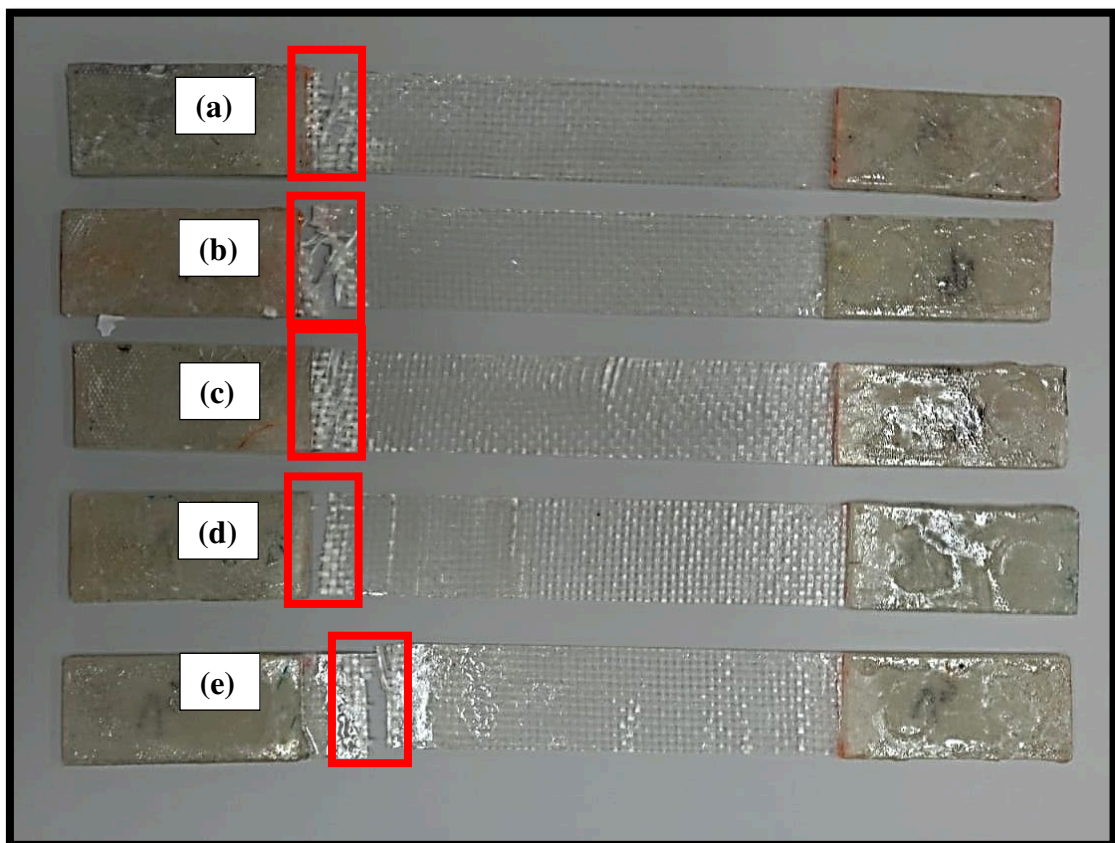
- (a) LGM
- (b) LAT e LAT
- (c) LGM
- (d) LGM
- (e) LAT

É possível observar que a fratura foi transversal ao sentido do carregamento, comportamento caracterizado por uma fratura frágil, condizente com o material proposto. Destaca-se no CP (b), houve o início de uma segunda fratura.

5.9.2 Fratura final no LV

Fazendo à análise macroscópica (para observar a característica de fratura) para os CP's LV, percebe-se a ocorrência predominante de um tipo de fratura, como observado na Figura 35. Para a análise seguiu a norma ASTM D3039 (2017).

Figura 35: CP's LV após o ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Autor (2022).

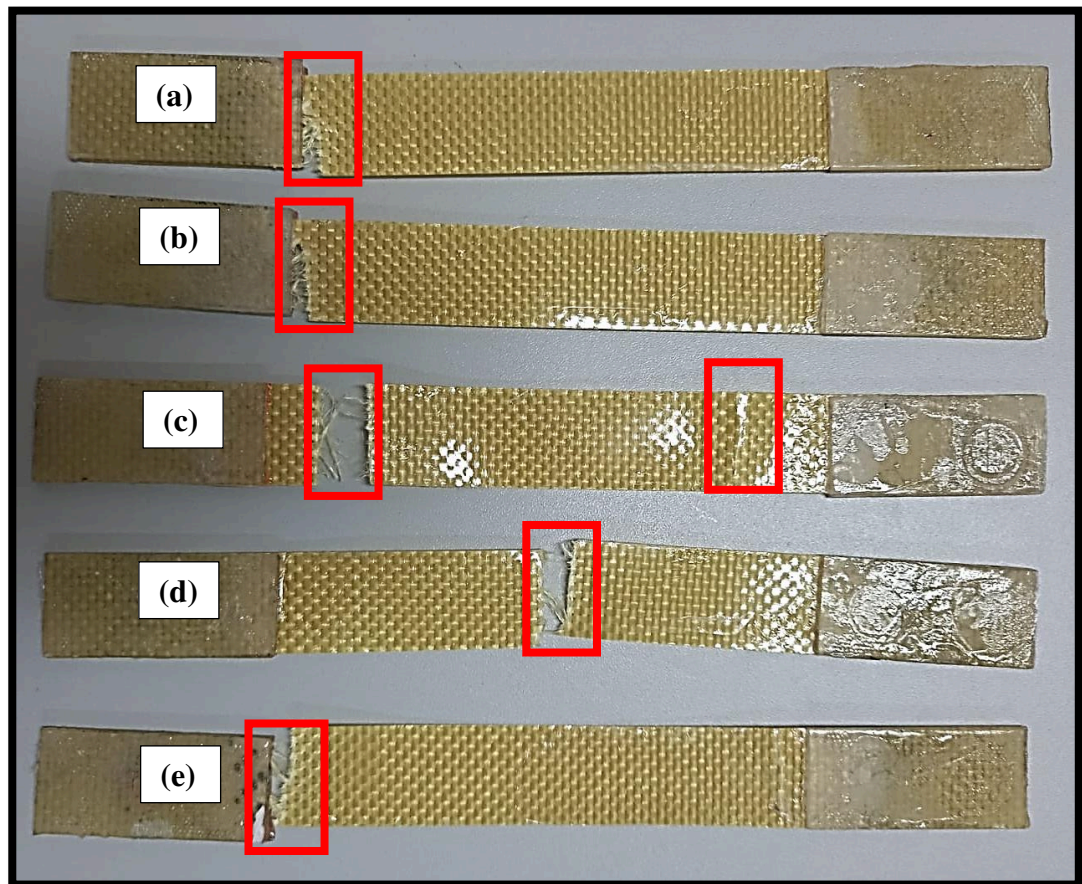
- (a) LAT
- (b) LAT
- (c) LAT
- (d) LAT
- (e) LAT

É possível observar que a fratura foi transversal ao sentido do carregamento, o que caracteriza como um comportamento de fratura frágil, condizente com o material proposto.

5.9.3 Fratura final no LA

Na análise macroscópica (para observar a característica de fratura) para os CP's LA, foi constatado a ocorrência predominante de dois tipos de fraturas, como demonstrado na Figura 36. Para a análise seguiu a norma ASTM D3039 (2017).

Figura 36: CP's LA após o ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Autor (2022).

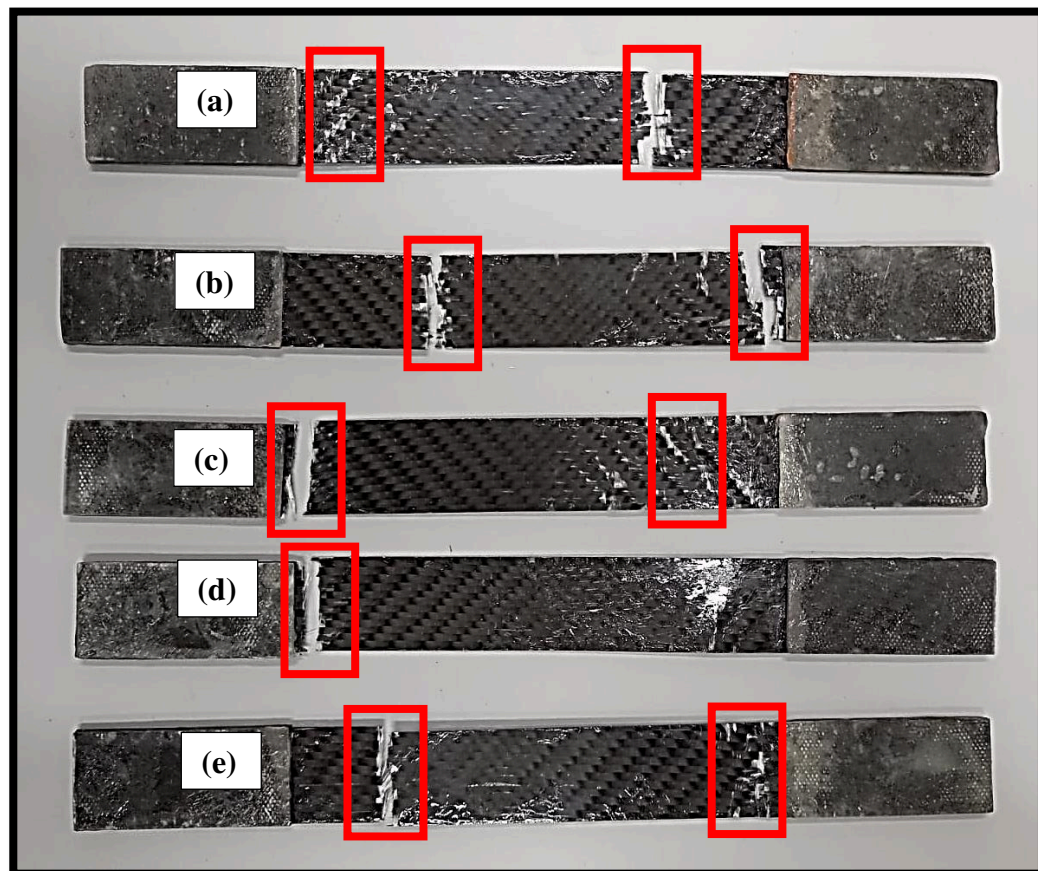
- (a) LAT
- (b) LAT
- (c) LAT e LGM
- (d) LGM
- (e) LAT

É possível observar de forma geral que a fratura aconteceu transversalmente ao sentido do carregamento, o que caracteriza como um comportamento de fratura frágil, condizente com o material proposto. Destaca-se no CP (c), houve o início de uma segunda fratura.

5.9.4 Fratura final no LCV-C

Com a análise macroscópica (para observar a característica de fratura) para os CP's LCV-C, foi constatado a ocorrência predominante de dois tipos de fraturas, como mostrado na Figura 37. Para a análise seguiu a norma ASTM D3039 (2017).

Figura 37: CP's LCV-C após o ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Autor (2022).

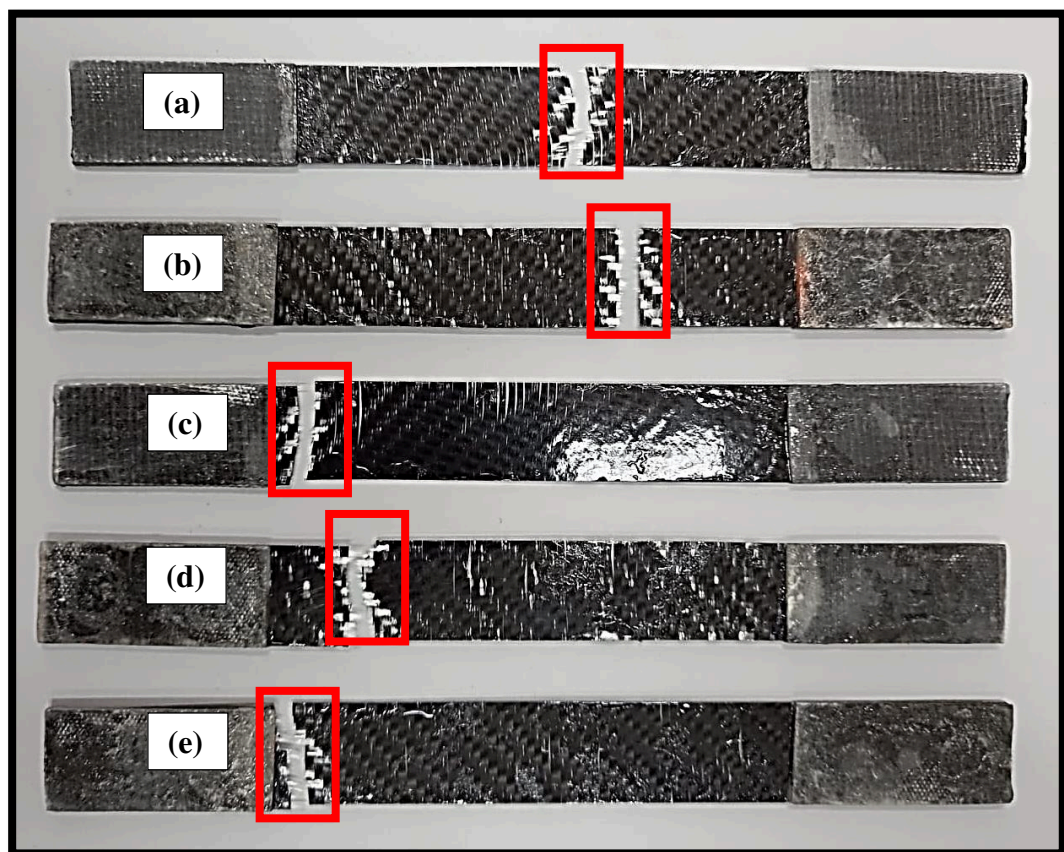
- (a) LGM
- (b) LAT e LGM
- (c) LAT
- (d) LAT
- (e) LAT

É possível observar de forma geral que a fratura aconteceu transversalmente ao sentido do carregamento, o que caracteriza como um comportamento de fratura frágil, condizente com o material proposto. Destaca-se no CP's (a), (b), (c) e (e) houve o início de uma segunda fratura.

5.9.5 Fratura final no LCV-V

Na análise macroscópica para observar a característica de fratura para os CP's **LCV-V**, foi constatado a ocorrência predominante de dois tipos de fraturas, como mostrado na Figura 38. Para a análise seguiu a norma ASTM D3039 (2017).

Figura 38: CP's **LCV-V** após o ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Autor (2022).

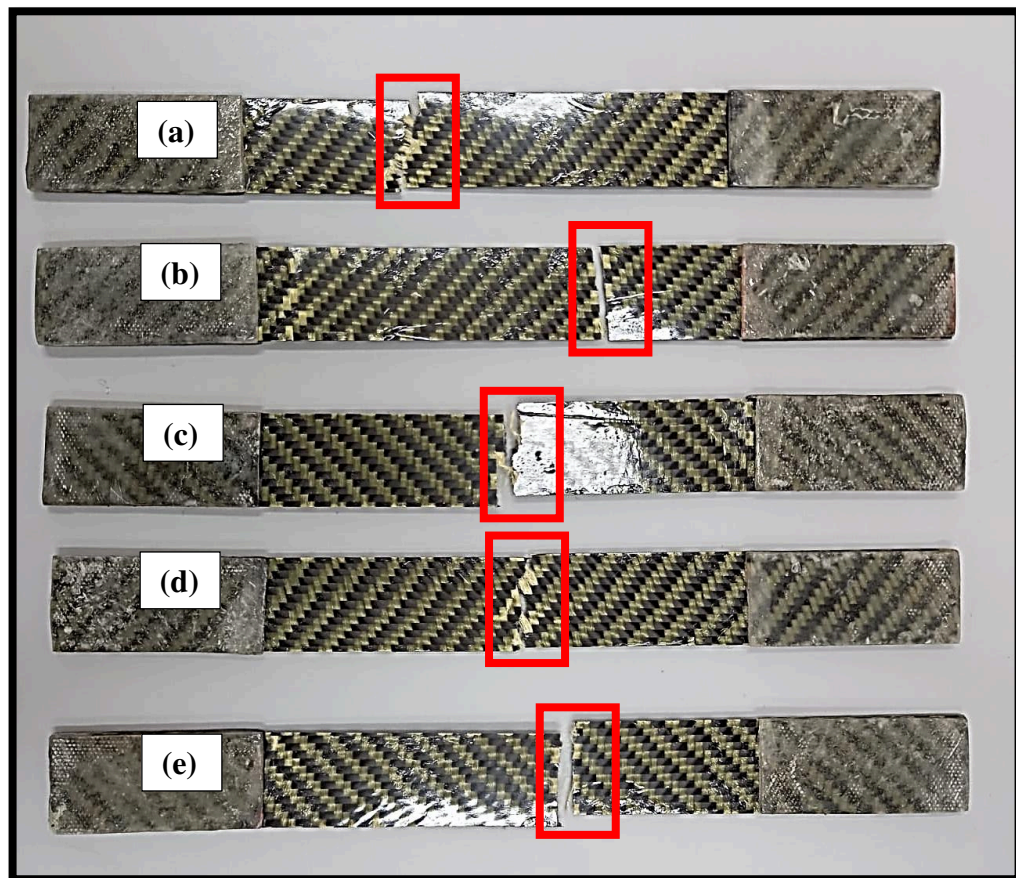
- (a) LGM
- (b) LGM
- (c) LAT
- (d) LAT
- (e) LAT

É possível observar de forma geral que a fratura aconteceu transversalmente ao sentido do carregamento, o que caracteriza como um comportamento de fratura frágil, condizente com o material proposto.

5.9.6 Fratura final no LCA-C

Com a análise macroscópica foi possível observar a característica de fratura para os CP's **LCA-C**, onde foi constatado a ocorrência predominante de um tipo de fraturas, como mostrado na Figura 39. Para a análise seguiu a norma ASTM D3039 (2017).

Figura 39: CP's **LCA-C** após o ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Autor (2022).

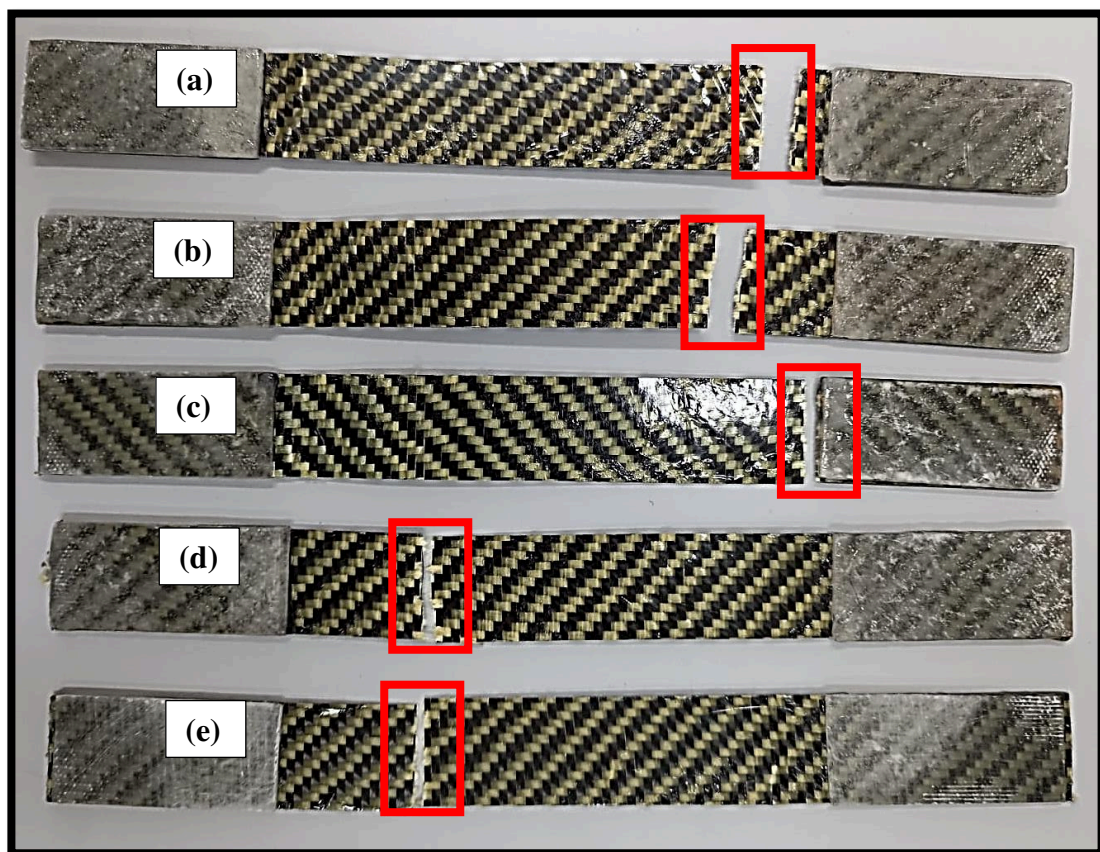
- (a) LGM
- (b) LGM
- (c) LGM
- (d) LGM
- (e) LGM

É possível observar de forma geral que a fratura aconteceu transversalmente ao sentido do carregamento, o que caracteriza como um comportamento de fratura frágil, condizente com o material proposto.

5.9.7 Fratura final no LCA-A

Na análise macroscópica foi possível observar a característica de fratura para os CP's LCA-A, onde foi constatado a ocorrência predominante de dois tipos de fraturas, como mostrado na Figura 40. Para a análise seguiu a norma ASTM D3039 (2017).

Figura 40: CP's LCA-A após o ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Autor (2022).

- (a) LAT
- (b) LAT
- (c) LGM
- (d) LGM
- (e) LGM

É possível observar de forma geral que a fratura aconteceu transversalmente ao sentido do carregamento, o que caracteriza como um comportamento de fratura frágil, o que é condizente com o material proposto.

Destaca que nos CP's que houveram ou iniciaram a segunda fratura pode ter sido ocasionado pela homogeneidade dos corpos de prova, sendo distribuído de forma uniforme as tensões, gerando dois pontos de fratura simultâneos.

6 CONCLUSÃO

Através dos estudos desenvolvidos, decorrido da realização do ensaio de tração uniaxial, densidade volumétrica, percentual de constituintes e modo de falha de fratura, foi evidenciado a influência positiva da hibridização em compósitos poliméricos, uma vez que os resultados obtidos mostraram bom desempenho no comportamento mecânico das lâminas híbridas. Assim, pode-se obter as seguintes conclusões:

- Foi constatado a partir das medições de espessura das lâminas de compósitos que à fibra de vidro teve uma maior absorção de matriz, comprovando na prática que uma das maiores vantagens da fibra de vidro, é possuir uma boa aderência fibra matriz, sendo sempre destaque a sua boa impregnação;
- A resistência última à tração das lâminas de compósitos **LCV-C** e **LCA-C** (ambos no sentido da fibra de carbono) não há influência significativa, tornando viável neste quesito a utilização do tecido híbrido carbono/vidro por ser 41,56% mais barato que o tecido híbrido carbono/aramida atualmente no mercado;
- Para o parâmetro de módulo de elasticidade, os CP's **LC**, **LCV-C** e **LCA-C** apresentaram valores próximos. Assim, diante deste quesito o tecido híbrido carbono/vidro torna-se mais viável por ser 76,50% mais barato que o tecido de fibra de carbono puro e 41,56% mais barato que o tecido híbrido carbono/aramida;
- Na resistência última à tração do **LCV-V** houve um aumento de 29,5% de resistência quando comparado com a resistência última à tração do **LV**. Assim, houve um efeito positivo da hibridização, pois apesar da fibra de carbono estar no sentido transversal do carregamento houve um aumento significativo na resistência última à tração no sentido longitudinal a fibra de vidro;
- Também houve um efeito positivo da hibridização do **LCV-V** em relação ao módulo de elasticidade do **LV** (aumento de 28,23% no módulo de elasticidade);
- Em relação a resistência última à tração do **LA** e **LCA-A** não houve influência significativa da hibridização (fibra de carbono no sentido transversal ao carregamento). Neste caso, é mais viável a utilização a fibra de aramida pura pelo fato da mesma ser encontrada no mercado 79,38% mais barata que o tecido híbrido carbono/aramida;
- Para o módulo de elasticidade, houve um efeito positivo da hibridização da fibra de carbono coma aramida (com o carbono sendo aplicado transversalmente ao sentido do

carregamento), onde houve um aumento no módulo de elasticidade do **LCA-A** de 46,73% em relação ao módulo de elasticidade do **LA**;

- A resistência última à tração do **LCV-C** em relação ao **LV** teve um aumento de 144,93%, enquanto o módulo de elasticidade do **LCV-C** em relação ao **LV** teve um aumento de 168,88%. Assim, houve um efeito positivo da hibridização ao adicionar a fibra de carbono com o vidro. Além disso, como citado anteriormente, utilizando a fibra de vidro na hibridização faz com que o custo seja 76,50% menor do que a fibra de carbono pura atualmente no mercado.
- Em relação a resistência última à tração dos CP's **LCA-C** e **LA** houve um aumento de 43,14% na resistência e um aumento de 178,77% no módulo de elasticidade. Também houve um efeito positivo da hibridização, pois ao adicionar a fibra de carbono a aramida houve aumento na resistência e no módulo. Outro ponto positivo da hibridização é o custo-benefício, pois o preço do tecido híbrido **LCA** é 24,68% menor que a fibra de carbono pura.
- Nas análises de fratura final houve predominância de dois tipos de falhas (**LAT** e **LGM**), ocorrendo transversalmente ao sentido do carregamento, o que caracteriza como um comportamento de fratura frágil (o que é condizente com o material proposto);
- Em relação a densidade volumétrica, a lâmina de compósito **LCA-C** proporcionou uma redução de 8% de densidade em relação a fibra de carbono pura, e é capaz de apresentar propriedades mecânicas superiores ao tecido de fibra de aramida pura, como também propriedades mecânicas semelhantes a fibra de carbono pura. O tecido híbrido carbono/aramida também apresenta um melhor custo-benefício em relação a fibra de carbono pura (24,68% mais barato);
- Ainda em relação a densidade volumétrica, a hibridização do **LCV-V** também apresentou efeito positivo, sendo 9% mais leve que a fibra de vidro pura, como também apresentou propriedades mecânicas superiores a fibra de vidro pura (aumento de 29,5% na resistência à tração e 28,23% no módulo de elasticidade).

Por tanto, a partir desta pesquisa foi possível evidenciar a influência da hibridização, mostrando suas vantagens e desvantagens em relação a comportamento mecânico e custo-benefício, onde foi possível observar de forma geral a viabilidade da utilização de lâminas híbridas (com fibras sintéticas) de compósitos poliméricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKMAR, AB Ilyani; KRAMER, O.; RABCZUK, T. **Probabilistic multi-scale optimization of hybrid laminated composites**. Composite Structures, v. 184, p. 1111-1125, 2018.

AMANDA, A. X. S.; BRUNA, O. K.; MARIANA, S. C. S.; LUÍS, G. G. R.; SANDRO, C. **propriedades em tração de laminados híbridos de aramida/vidro-r produzidos por infusão á vácuo**. 2019. 15th Brazilian Polymer Conference.

ASTM D3039. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. 2017.

ASTM D3878. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **Standard terminology of high modulus reinforcing fibers and their composites**. 2020.

ASTM D792. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement**. 2008.

BATISTA, A. C. M. C. **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS HÍBRIDOS: ESTUDOS EXPERIMENTAIS, ANALÍTICOS E NUMÉRICOS**. 2017. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte, Natal.

BATISTA, A.C.M.C., TINÔ, S.R.L., FONTES, R.S., NOBREGA, S.H.S., AQUINO, E.M.F. **Anisotropy and holes in epoxy composite reinforced by carbon/glass and carbon/aramid hybrid fabrics: Experimental and analytical results**. Composites Part B: Engineering Volume 125, 15 September 2017.

CALLISTER, W. D. Jr.; RETHWISCH, D. G. **CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS UMA INTRODUÇÃO**. Rio de janeiro: LTC, Rio de janeiro, 2013.

CARBONSTORE, Conhecendo a fibra de aramida. Disponível em: <<https://www.carbonstore.com.br/blog/conhecendo-os-materiais-fibra-de-aramida/>>. Acesso em: 20 Fev. 2022.

CARVALHO, A. **Fiberglass x Corrosão – Especificação, Instalação e manutenção de equipamentos de Fiberglass para Ambientes Agressivos**, São Paulo, 1992.

CHAWLA, K. K. **Composite Materials: Science and Engineering**. 4. Ed., Birmingham: Springer Nature, 2019.

COMPOSITES LAB. Composites manufacturing processes. Disponível em: <<http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/>>. Acesso em: 20 Fev. 2022.

COMPOSITES WORLD. Fokker aerostructures: hoogeveen, the Netherlands. Disponível em: <<https://www.compositesworld.com/articles/fokker-aerostructures-hoogeveen-the-netherlands>>. Acesso em: 20 fev. 2022.

COSTA, D. S. D. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS GERADOS PELA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO NAS PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS**. 2016. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) - Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Belém - PA, 2016.

CUNHA P. J. A.; COSTA L. M.; REZENDE C. M. **Influência de Diferentes Condições Higrotérmicas na Resistência à Tração de Compósitos de Fibra de Carbono/Epóxi Modificada**. Departamento de Engenharia Aeronáutica e Mecânica. ITA/SENAI, Divisão de Materiais, IAE, CTA - Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 16, 2006.

DANIEL, Isac M.; ISHAI, Ori. **ENGINEERING MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS**. 2nd ed. New York: OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2006.

DIRECT INDUSTRY. Disponível em: <<https://www.directindustry.com/pt/fabricanteindustrial/fibra-fibra-carbono->>. Acesso em: 21 Fev. 2022.

DONG, C.; RANAWEERA-JAYAWAEDENA, H. A.; DAVIES, I. J. Flexural properties of hybrid composites reinforced by S-2 glass and T700S carbono fibres. **Composites Part B**. 43:573-581, 2012.

FELTRAM, M. B. **COMPÓSITOS DE PVC REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO: USO DE TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO CONVENCIONAIS DA INDÚSTRIA**

BRASILEIRA. 2008. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Escola Politécnica Da Universidade De São Paulo, São Paulo.

FIBERTEX, Empresa Fibertex. Disponível em: <<http://www.fibertex.com.br>>. Acesso em: 20 Fev. 2022.

FIORELLI, J. Utilização de Fibras de Carbono e de Fibras de Vidro para Reforço de Vigas de Madeira. 2002. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo (São Carlos), São Paulo, 2002.

FOGAÇA, J. R. V. "Fibra de Carbono"; Brasil Escola. 2018. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/fibra-carbono.htm>>. Acesso em 20 de Fev. de 2022.

FONTES, R. S. COMPÓSITO POLIMÉRICO HÍBRIDO: COMPORTAMENTO MECÂNICO, DESCONTINUIDADE GEOMÉTRICA E RESISÊNCIA RESIDUAL. 2013. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) - Universidade Do Rio Grande Do Norte, Natal.

FONTES, R. S. COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS POR TECIDOS MULTIAXIAIS ACOPLADOS: ANISOTROPIA, CONFIGURAÇÃO E CONCENTRAÇÃO DA DEFORMAÇÃO. 2017. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) - Universidade Do Rio Grande Do Norte, Natal.

FRANCESCHI, A; ANTONELLO, M. G. **Tecnologia Mecânica II.** 2017.Colégio Técnico Industrial de Santa Maria.

FRANÇA, Rafaela Jordania Marinho. **Propriedades mecânicas à tração: estudo da influência na inserção de pó de pedra em PRFV.** 2019. 70 f. Monografia (Bacharel em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2019.

FREITAS, J. G. D. F. RESPOSTA AO IMPACTO LONGITUDINAL E TRANSVERSAL DE LAMINADOS DE VIDRO/EPÓXI. 2016. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica na especialização de produção e projeto) – Faculdade De Ciências e Tecnologia Universidade De Coimbra, Coimbra.

GUILHERME, B. L.; CEZAR A. C.; MÁRCIA, R. M.; FAUZE, A. A. Desenvolvimento de metodologia visando a obtenção de compósitos estruturais para aplicação em longarinas de Aerodesigns. 2019. **Journal of Experimental Techniques and Instrumentation**, v.2, n.1.

HANHN, C. **A Simulation Approach of Permeability Prediction for RTM Process Simulation**. [s.l.] Technischen Universität München, 2014.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7 ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010.

HULL, D.; CLYNE, T. W. **An Introduction to composites materials**. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

IGTPAN. Mercado de fibras de carbono. Instituto Granado de Tecnologia da Poliacrilonitrila, 2016. Disponível em: <<http://www.igtpan.com/mercadocarbono.asp>>. Acesso em: 03 mar. 2022.

ISHIKAWA, T. et al. **Overview of automotive structural composites technology developments in Japan**. Composites Science and Technology, [s. l.], v. 155, p. 221- 246, 2018.

JALES, C. J. M. **FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA AO IMPACTO DE UM COMPÓSITO POLIMÉRICO HÍBRIDO CARBONO/ARAMIDA/EPÓXI PARA APLICAÇÃO AUTOMOBILÍSTICA (CVT)**. 2019. Trabalho De Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semi-árido. Caraúbas, RN.

JACKSON, M. R. N. **INFLUÊNCIA DA SEQUÊNCIA DE EMPILHAMENTO NA PROPRIEDADE MECÂNICA À TRAÇÃO EM COMPÓSITO HÍBRIDO (CARBONO/VIDRO/EPÓXI)**. 2020. Trabalho De Conclusão de Curso em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-árido. Caraúbas, RN.

KATUNIN, A. et al. **Concept of a Conducting Composite Material for Lightning Strike Protection**. Advances In Materials Science, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 48, June 2016.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L.C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

LEXUS ENTHUSIAST. New Carbon Fiber Materials Coming to Lexus Vehicles? 2017. Disponível em: <<https://lexusenthusiast.com/2017/08/13/new-carbon-fibermaterials-coming-to-lexus-vehicles/>>. Acesso em: 20 Fev. 2022.

LIMA, M. M. **INFLUÊNCIA DO PERCENTUAL DOS CONSTITUINTES NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS À TRAÇÃO EM COMPÓSITO POLIMÉRICO HÍBRIDO (CARBONO/VIDRO/EPÓXI)**. 2021. Trabalho De Conclusão de Curso em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-árido. Caraúbas, RN.

LOPES, P. A. M. **OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS LAMINADOS, BASEADA EM CONFIABILIDADE, UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS E REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS**. 2009. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos**. São Paulo: Artliber Editora, 2011.

MATTHEUS, F. L.; RAWLLINGS, R. D. **Composite Materials: Engineering and Science**. NW Boca Raton: CRC, 1994.

MEDEIROS, R. J. D. **LAMINADOS COMPÓSITOS A BASE DE TECIDO HÍBRIDO: ANISOTROPIA, FURO CONCÊNTRICO, FRATURA MECÂNICA E ANÁLISE POR MEF**. 2016. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) - Universidade Do Rio Grande Do Norte, Natal.

MENDONÇA, P. T. R. **Materiais compostos & estruturas sanduíche: projeto e análise**. São Paulo: Manole, 2005.

OLIVEIRA FILHO, Genilson Cunha de. **EFEITOS DA HIBRIDIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS REFORÇADOS POR TECIDO DE FIBRAS DE PIAÇAVA**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

OLIVEIRA, J. F. S. **Estudos da Influência da Configuração em Compósitos Poliméricos Híbridos**. 2007. 118 f. Dissertação (Mestrado em engenharia Mecânica) – Programa de Pós Graduação em engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2007.

OLIVEIRA, J. F. D. S. **PLÁSTICOS REFORÇADOS A BASE DE TECIDOS HÍBRIDOS: EFEITOS DA ANISOTROPIA E GEOMETRIA NORMATIVA NA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E DA FRATURA**. 2013. Tese (Doutorado em engenharia dos materiais) - Universidade Do Rio Grande Do Norte, Natal.

PETERS, S. T. *Handbook of Composites*. 2ª Edição. Chapman & Hall, California, EUA, 1998.

RAGONDET, Agnes. **Experimental characterization of the vacuum Infusion process**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - University of Nottingham, Nottingham, 2005.

REDELEASE, Resina Epóxi 2001 e Endurecedor Epóxi 3154. Disponível em: <https://www.redelease.com.br/catalog/product/view/id/1642/s/resina-epoxi-transparente-com-endurecedor-1-5-kg/?gclid=Cj0KCQjwm6KUBhC3ARIsACIwxBhJ5VbAVaWKir2SkVU7QuuNPK2DXQ1fglj2GNC1g5da1xcF7AY9IlsaAhXNEALw_wcB>. Acesso em: 21 Maio. 2022.

SANTOS, A. S. **ESTUDO DA MODIFICAÇÃO SUPERFICIAL DE FIBRAS DE CARBONO POR MEIO DE TRATAMENTOS A PLASMA PARA O AUMENTO DA ADESÃO NA INTERFACE DE COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO/PPS**. 2015. Tese (Doutorado em engenharia mecânica na área de materiais) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

SIQI, Z. **An automated method for the layup of fiberglass fabric**. Iowa State University, 2015. Disponível em: <https://www.imse.iastate.edu/files/2015/12/Dissertation_Siqi-Zhu.pdf>. Acesso em: 20 Fev. 2022.

SILVA, H. P. D. **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS DE FIBRA DE VIDRO/EPOXY NANO-REFORÇADOS**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na especialidade de Construção Mecânica) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2014.

TINÔ, S. R. L. **LAMINADO COMPÓSITO DE PRFV: EFEITOS DA DESCONTINUIDADE GEOMÉTRICA E DO ENVELHECIMENTO AMBIENTAL ACELERADO**. 2014. Dissertação (Doutorado em engenharia mecânica) - Universidade Do Rio Grande Do Norte, Natal.