



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CARLOS JUNIOR MEDEIROS JALES

**FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA AO IMPACTO DE UM
COMPÓSITO POLIMÉRICO HÍBRIDO CARBONO/ARAMIDA/EPÓXI PARA
APLICAÇÃO AUTOMOBILÍSTICA (CVT)**

CARAÚBAS

2019

CARLOS JUNIOR MEDEIROS JALES

**FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA AO IMPACTO DE UM
COMPÓSITO POLIMÉRICO HÍBRIDO CARBONO/ARAMIDA/EPÓXI PARA
APLICAÇÃO AUTOMOBILÍSTICA (CVT)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharelem Engenharia Mecânica.

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

Coorientador: Jackson de Brito Simões, Prof.
Dr.

CARAÚBAS

2019

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

Jf Jales, Carlos Junior Medeiros.
Fabricação e Caracterização Mecânica ao Impacto
de um Compósito Polimérico Híbrido
Carbono/Aramida/Époxi para Aplicação Automobilística
(CVT) / Carlos Junior Medeiros Jales. - 2019.
54 f. : il.

Orientadora: Ana Claudia de Melo Caldas
Batista.
Coorientador: Jackson de Brito Simões.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2019.

1. Compósito Híbrido. 2. Teste de Impacto. 3. Aço
SAE 1010. I. Batista, Ana Claudia de Melo Caldas,
orient. II. Simões, Jackson de Brito, co-orient.
III. Título.

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.

CARLOS JUNIOR MEDEIROS JALES

**FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA AO IMPACTO DE UM
COMPÓSITO POLIMÉRICO HÍBRIDO CARBONO/ARAMIDA/EPÓXI PARA
APLICAÇÃO AUTOMOBILÍSTICA (CVT)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Defendida em: 13 / 08 / 2019

BANCA EXAMINADORA

[Redacted Signature]

Prof. Dra. Ana Claudia de Melo Caldas Batista
Presidente

[Redacted Signature]

Prof. Dr. Jackson de Brito Simões
Membro

[Redacted Signature]

Prof. Dra. Adiana Nascimento Silva
Membro

[Redacted Signature]

Prof. Me. Rafael Bezerra Azevedo Mendes
Membro

Em especial a minha irmã Valéria.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder saúde e força para alcançar meus objetivos, iluminando sempre meu caminho durante toda minha vida, me abastecendo de fé e coragem para vencer as dificuldades.

Agradeço a minha mãe (Jocelita), minha irmã (Valéria) e minha sobrinha (Beatriz), por trazer luz a minha vida e força para conquistar os meus objetivos.

Agradeço a minha equipe e família Caraubaja SAE, por todo aprendizado, crescimento e companheirismo ao longo desses dois anos.

Agradeço aos meus amigos que fizeram da minha vida acadêmica inesquecível, dividindo conhecimento e experiências que serão levados para o resto da vida.

Agradeço a minha orientadora (Ana Claudia) por toda ajuda, dedicação, carinho, conversas e por me mostrar que sempre posso evoluir cada vez mais, como pessoa e profissional.

Agradeço ao meu co-orientador (Jackson) por toda ajuda e contribuições para este trabalho.

E todos aqueles que contribuíram para a minha formação acadêmica.

“Acredite na força dos seus sonhos. Deus é justo e não colocaria em seu coração um desejo impossível de ser realizado.”

(Autor Desconhecido)

RESUMO

Atualmente, vem se tornando cada vez mais crescente o investimento das indústrias automotivas em pesquisas que tem por intuito desenvolver veículos mais leves, de bom desempenho, componentes com alta resistência e com um melhor custo benefício. Os compósitos poliméricos reforçados com fibras sintéticas vem se tornam um aliado fundamental nessa busca por apresentarem alta resistência mecânica e baixa densidade. Dessa forma, este trabalho de pesquisa teve como objetivo alinhar esses conhecimentos, aplicando um compósito polimérico híbrido carbono/aramida/epóxi na fabricação do anteparo de proteção das polias do CVT de um veículo off-road tipo baja. Para tal aplicação foi necessário avaliar o comportamento ao impacto do material compósito híbrido proposto, variando a orientação das fibras e sequência de empilhamento, realizando-se um comparativo com o aço SAE 1010, fazendo assim cumprir o regulamento RATBSB do Baja SAE Brasil (2018). Para a obtenção do laminado foi utilizado o processo de fabricação manual (*Hand lay-up*), contendo 12 camadas alternadas em que o tecido híbrido foi disposto tanto à $\pm 45^\circ$ quanto $0^\circ/90^\circ$. Com isso, foram confeccionados com quatro configurações distintas do laminado híbrido, variando o sentido do corte dos corpos de provas (0° , 90° , $+45^\circ$ e -45°), com o objetivo de conhecer a resistência ao impacto e escolher a melhor configuração para a fabricação do anteparo de proteção, os ensaios foram realizados no laminado compósito, baseado na norma ASTM D256 (2010). Estudos sobre a densidade volumétrica nos materiais foram desenvolvidos sendo realizados de acordo com a norma ASTM D792 (2008) para prever o percentual de massa reduzido pela substituição do aço pelo compósito. Pelos resultados obtidos, constatou-se que a influência da fibra atuou diretamente nos resultados e que ambas configurações, as configurações que contavam com a primeira camada $0^\circ/90^\circ$, com o martelo de impacto atingindo perpendicularmente tanto na direção da aramida, quanto do carbono foram superiores ou equivalentes quando comparadas a energia absorvida do Aço SAE 1010, tornando-se possível a substituição do aço pelo laminado proposto.

Palavras-chave: Compósito híbrido, Teste de Impacto, Aço SAE 1010.

ABSTRACT

Nowadays, the investment of the automotive industries in research that has been developing with the intention to develop lighter vehicles, of good performance, components with high resistance and with better cost benefit is becoming increasing. Synthetic fiber reinforced polymer composites make them a key ally in this quest for high mechanical strength and low density. Thus, this research work aimed to align this knowledge by applying a carbon/aramid/epoxy hybrid polymer composite in the manufacture of the CVT pulley protection screen of a baja off-road vehicle. For this application it was necessary to evaluate the impact behavior of the proposed hybrid composite material, varying the fiber orientation and stacking sequence, making a comparison with SAE 1010 steel, thus complying with the Baja SAE Brazil RATBSB regulation (2018). To obtain the laminate, we used the manual manufacturing process (Hand lay-up), containing 12 alternate layers in which the hybrid fabric was arranged at both $\pm 45^\circ$ and $0^\circ/90^\circ$. Thus, they were made with four different configurations of the hybrid laminate, varying the cutting direction of the specimens (0° , 90° , $+45^\circ$ and -45°), in order to know the impact resistance and choose the best configuration for the manufacturing of the protective screen, the tests were performed on the composite laminate, following the ASTM D256 (2010) standard. Studies on the volumetric density in the materials were developed and performed according to ASTM D792 (2008) to predict the percentage of mass reduced by the replacement of steel by composite. From the results obtained, it was found that the influence of the fiber directly acted on the results and that both configurations, which had the first layer $0^\circ/90^\circ$, the impact hammer reaching perpendicularly in both aramid and carbon directions were higher or equivalent when compared to the absorbed energy of SAE 1010 Steel, making it possible to replace the steel with the proposed laminate.

Keywords: Composite hybrid, Impact Test, SAE 1010 Steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Protótipo SEVERO da equipe Caraubaja SAE.....	18
Figura 2	–	Exemplo de um anteparo de trem de força.....	19
Figura 3	–	Esquema de classificação dos compósitos.....	20
Figura 4	–	Exemplos de formas comerciais da fibra de kevlar: (a) <i>Roving</i> e (b) Tecido.....	24
Figura 5	–	Exemplos de formas comerciais da fibra de carbono: (a) Tipo <i>Roving</i> . Tipos de tecidos: (b) unidirecional, (c) sarja 2x2 e (d) braided.....	25
Figura 6	–	Tipos de tecelagem em compósitos – Estruturas: (a) liso, (b) sarja e (c) cetim.....	28
Figura 7	–	Exemplo de formas comerciais de tecidos híbridos: (a) vidro/aramida unidirecional, (b) vidro/aramida multiaxial, (c) vidro/aramida (sarja), (d) carbono/innegra (bidirecional) e (e) carbono/aramida (bidirecional).....	29
Figura 8	–	Principais processos de fabricação para matrizes termofixas.....	30
Figura 9	–	Esquema do processo de laminação manual.....	31
Figura 10	–	Representação do ensaio de charpy: (a) máquina utilizada, (b) fixação do corpo de prova conforme a orientação da norma ASTM E23 (2015).....	33
Figura 11	–	Reforço utilizado no laminado proposto: tecido híbrido sarja 2x2.....	35
Figura 12	–	Etapas do processo de confecção do laminado.....	36
Figura 13	–	Configuração do laminado proposto.....	37
Figura 14	–	Dimensões do corpo de prova para ensaio de impacto Charpy conforme a ASTM D256 (2010).....	38
Figura 15	–	Orientação dos CP's.....	38
Figura 16	–	Direções das 12 camadas para as 4 configurações.....	39
Figura 17	–	Representação do entalhe no CP: (a) ferramenta utilizada, (b) angulação final do entalhe nos CP's.....	40
Figura 18	–	Corpo de prova compósito polimérico para o ensaio de impacto charpy.....	41
Figura 19	–	Parte do procedimento para determinação da densidade: (a) pesagem da amostra seca, (b) pesagem da amostra imersa com o afundador.....	42
Figura 20	–	Corpos de provas fraturados: (a) Configuração A, (b) Configuração B, (c) Configuração C e (d) Configuração D.....	46
Figura 21	–	Projeto do anteparo de proteção.....	48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	–	Comparativo da capacidade de absorção de energia das fibras.....	26
Gráfico 2	–	Resultado do ensaio de impacto Charpy.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Propriedades das principais fibras de aramida.....	23
Tabela 2	–	Propriedades das principais fibras de carbono.....	24
Tabela 3	–	Comparativo ferros x compósitos.....	27
Tabela 4	–	Informações técnicas do tecido híbrido.....	35
Tabela 5	–	Espessura média dos CP's fabricados.....	43
Tabela 6	–	Resultado do ensaio de impacto Charpy para o laminado.....	44
Tabela 7	–	Densidade volumétrica do laminado proposto.....	47
Tabela 8	–	Propriedades físicas do Aço SAE 1010 e laminado.....	48
Tabela 9	–	Massa do anteparo de proteção em relação ao material de fabricação.....	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	–	Comparativo das características das fibras carbono/aramida.....	26
Quadro 2	–	Características dos componentes.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CP	Corpo de Prova
CVT	<i>Continuously Variable Transmission</i>
DA	Direção Aramida
DC	Direção Carbono
Esp	Espessura
RATBSB	Regulamento Administrativo e Técnico Baja SAE Brasil
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
vs	<i>Versus</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Objetivos Gerais.....	17
1.2	Objetivos Específicos.....	17
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	Projeto Baja SAE.....	18
2.1.1	Regulamento Administrativo e Técnico Baja SAE Brasil (RATBSB).....	19
2.2	Material Compósito.....	20
2.2.1	Matrizes Poliméricas.....	21
2.2.1.1	Matrizes Termofixas.....	21
2.2.2	Reforço.....	22
2.2.2.1	Fibra de Aramida.....	22
2.2.2.2	Fibra de Carbono.....	24
2.2.2.3	Comparação entre as fibras de Carbono e Aramida.....	25
2.3	Materiais Compósitos Híbridos.....	27
2.4	Processos de Fabricação.....	29
2.4.1	Laminação Manual (<i>Hand lay-up</i>).....	30
2.5	Ensaio de Impacto.....	31
2.5.1	Ensaio de Impacto Charpy.....	32
2.5.2	Ensaio de Impacto Izod.....	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1	Materiais Utilizados no Laminado Compósito.....	34
3.1.1	Matriz.....	34
3.1.2	Reforço.....	35
3.2	Fabricação do Laminado Compósito.....	35
3.3	Confecção dos Corpos de Provas.....	37
3.4	Ensaio de Impacto Charpy.....	41
3.5	Ensaio de Densidade Volumétrica.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1	Fabricação dos Corpos de Provas.....	43
4.2	Ensaio de Impacto Charpy.....	43
4.3	Ensaio de Densidade Volumétrica.....	47

4.4	Projeto da Proteção do CVT.....	47
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
	REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

A procura por materiais leves e de alta resistência mecânica vem ganhando um enorme destaque durante os últimos anos, através da combinação de dois ou mais materiais distintos torna-se possível à obtenção dessas características, esta combinação geralmente inclui um material de baixa massa específica e outro com excelentes propriedades mecânicas (NETO e PARDINI, 2006). O material constituído por esta combinação é denominado compósito, que de acordo com a ASTM D3878 (2007) resulta em um material de engenharia útil, possuindo propriedades que seus constituintes separados não possuem.

Formados por apenas duas fases diferentes denominada por matriz (fase contínua) e reforço (fase dispersa) (CALLISTER JR, 2012). Os compósitos poliméricos apresentam como função principal unir as fibras e formar uma proteção contra o ambiente externo, diferente da fase descontínua, onde o reforço é geralmente mais rígida e resistente devido sua formação em fibra, que atribui ao material compostos suas características de rigidez e resistência a ruptura, o que permite uma grande aplicabilidade na área automotiva e aeroespacial (COSTA, 2019).

Atualmente o que mais vem se observando na indústria automotiva é a substituição dos materiais tradicionais por compósitos poliméricos de alta tecnologia, essa substituição, ocasiona uma série de vantagens, como a diminuição do peso total do carro, aumento na segurança dos passageiros e a diminuição e facilidade de manutenção, tudo isso aliado a uma diminuição nos custos e nas etapas do processo produtivo (RUBIO, 2014). Isso se deve ao fato dos materiais compósitos serem criados para melhorar as combinações das características mecânicas (CALLISTER, 2012).

No Brasil os fabricantes já dispõem de novidades quando se trata de materiais, técnicas e produtos para compósitos, além de contar com uma completa gama de produtos e processos com certificações internacionais para o nosso mercado automobilístico (TAFARELLO, 2013 *apud* STEENKAMER, 1994). Aonde as suas aplicações na área automobilística incluem componentes internos, como revestimento de portas e painéis (SILVA, 2011).

O presente trabalho alinha as ideologias da indústria automobilística com o projeto Baja SAE desenvolvido na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), *campus* Caraúbas, fabricando e caracterizando mecanicamente ao impacto um compósito polimérico utilizando um tecido híbrido tipo sarja 2x2 (carbono/aramida) como reforço e como matriz foi utilizada a resina epóxi (Redelease 2001) com o objetivo de projetar uma proteção para o

CVT, peça de veículo baja, obedecendo ao Regulamento Administrativo e Técnico Baja SAE Brasil (RATBSB).

1.1 Objetivos Gerais

Fabricar e caracterizar mecanicamente ao impacto um compósito polimérico utilizando tecido híbrido (carbono/aramida) para a fabricação da proteção do CVT de um veículo baja, atendendo o regulamento RATBSB (ensaios realizados baseados na norma ASTM D256, 2010) e quantificar a redução de massa que ocorrerá no projeto, pela determinação da densidade do material proposto pela norma ASTM D 792 (2008).

1.2 Objetivos Específicos

- Confeccionar um laminado com 12 camadas e retirar corpos de prova nas direções de corte 0° , 90° , $+45^\circ$ e -45° . Analisando a influência da sequência de empilhamento e a influência da direção da fibra de carbono e da fibra de aramida;
- Realizar a caracterização mecânica ao impacto;
- Obter uma redução de massa com relação à proteção do CVT produzida por aço SAE 1010;

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Projeto Baja SAE

Com sua criação em 1976 na Universidade da Carolina do Sul, nos Estados Unidos, o projeto Baja SAE foi lançado em 1994 no Brasil, mesmo ano em que a SAE BRASIL realizou a primeira prova em âmbito nacional, na pista Guido Caloi, bairro do Ibirapuera, em São Paulo, atualmente as competições a nível nacional são realizadas em São José dos Campos/SP e desde 1997 a SAE BRASIL realiza ainda etapas regionais do Baja, em vários estados brasileiros como Rio Grande do Sul, São Paulo, Minas Gerais e Bahia. (MARIOTO; NEGRETTI, 2018).

As competições do projeto Baja SAE consistem-se em desafios lançados aos estudantes de engenharia que necessitam desenvolver um veículo monoposto, fora de estrada, robusto e principalmente seguro (ver um exemplo na Figura 1), desde a sua concepção, construção e validação até a participação nas competições. Para os alunos, participar do programa é uma chance de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula, incrementando suas preparações para o mercado de trabalho (PORTAL SAE BRASIL, 2019).

Figura 1 – Protótipo SEVERO da equipe Caraubaja SAE



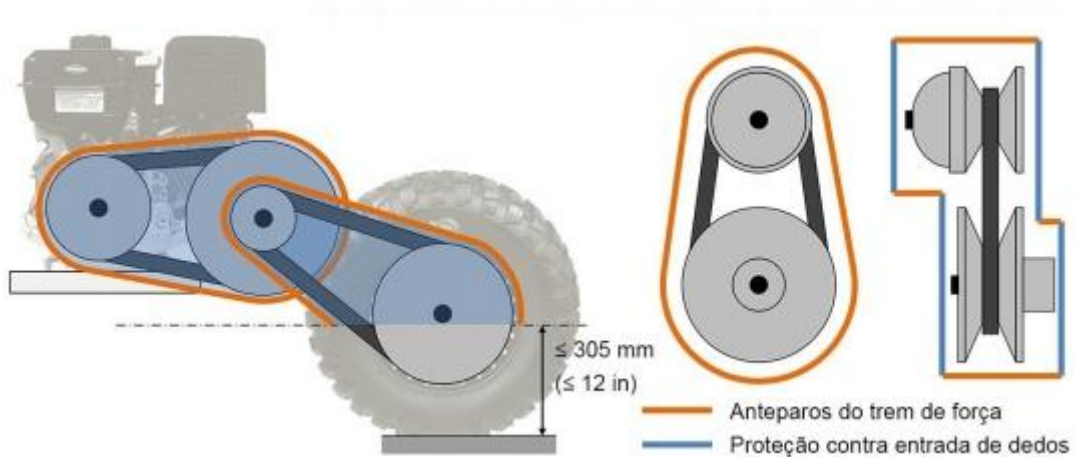
Fonte: Autor, 2018.

2.1.1 Regulamento Administrativo e Técnico Baja SAE Brasil (RATBSB)

O Regulamento Baja SAE Brasil é um conjunto de regras impostas aos competidores que definem o escopo do projeto e suas atividades relacionadas, sendo desenvolvidos pelas seções regionais da SAE Brasil, comitê Baja SAE Brasil e a Gerência de Associação e dos programas estudantis (PORTAL SAE BRASIL, 2019).

Devido à insistente busca por formas inovadoras para obtenção de novos materiais que agregue resistência e baixo peso aos veículos, o regulamento do Baja SAE Brasil (2018) trata em seu item B13 forma de substituir o uso de aço por um material compósito nas proteções de componentes rotativos (Figura 2).

Figura 2 – Exemplo de um anteparo de trem de força



Fonte: BAJA SAE BRASIL, 2018.

Neste contexto, o Baja SAE Brasil (2018) trata em seus subitens B13.1.5, B13.1.6 e B13.1.7 o procedimento a ser utilizado para a fabricação do anteparo de trem de força com materiais compósitos:

- “B13.1.5 - As proteções devem ser feitas utilizando apenas: Aço com ao menos 1,5 mm (0,06 in) de espessura e resistência ao impacto igual ou superior ao aço SAE 1010.
- B13.1.6 - Alternativamente, proteções podem ser feitas de um material com absorção de energia na ruptura equivalente. Ensaio aceito para prova de equivalência são ensaios de resistência ao impacto, como Charpy e Izod.

- B13.1.7 - Devido a problemas de fabricação, materiais compósitos, se utilizados, devem possuir o dobro da espessura com absorção de energia equivalente ao material padrão”.

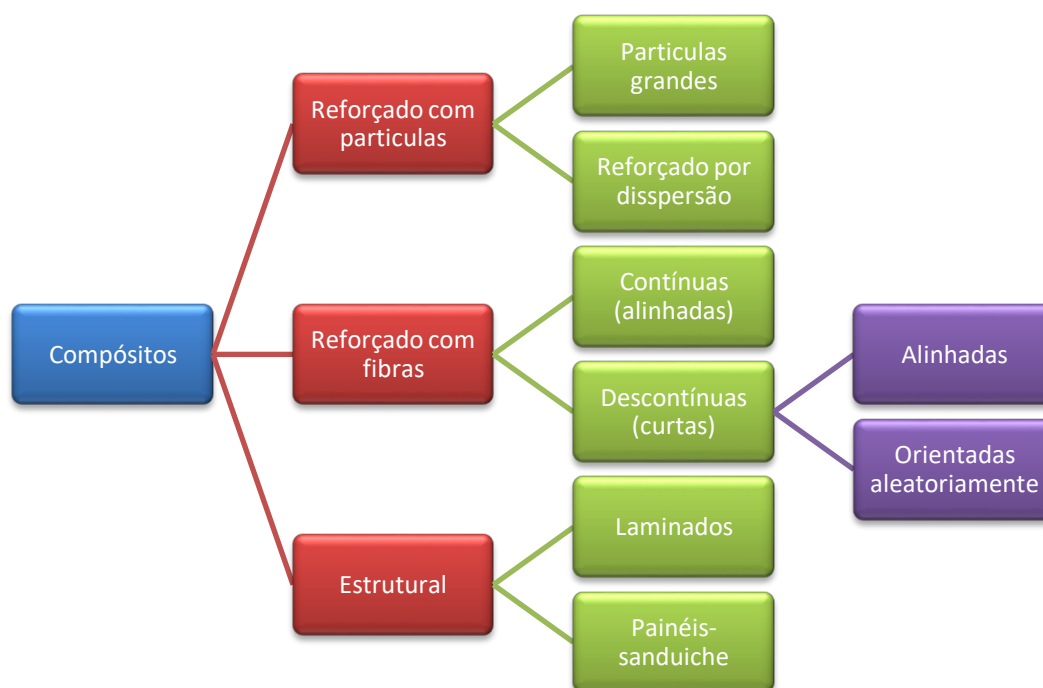
2.2 Material Compósito

Definidos pela norma ASTM D3878 (2007) como uma substância composta por dois ou mais materiais insolúveis, os quais são combinados para formar um material de engenharia útil, obtendo dessa combinação propriedades não possuídas pelos seus constituintes separadamente.

Os materiais compósitos são heterogêneos, multifásicos e resultante da combinação racional de um reforço e de uma matriz, de modo a maximizar algumas propriedades no produto final (TAFARELLO, 2013). De um modo geral, a forma que o material consolidado se deforma e fratura depende diretamente das propriedades mecânicas e químicas destes dois elementos (COSTA, 2019).

Existem várias classificações de compósitos, porém na Figura 3 pode-se observar a classificação proposta pelo CALLISTER JR (2012).

Figura 3 – Esquema de classificação dos compósitos



Fonte: Adaptado de CALLISTER JR, 2012.

Devido à versatilidade de fabricação é possível obter múltiplas combinações de materiais possíveis para projetar um compósito, podendo-se obter propriedades até então encontradas em materiais monofásicos (BATISTA, 2017).

Dentre as possibilidades de matriz, existem as de metal, poliméricas ou cerâmicas, que por sua vez proporcionam forma estável ao compósito, garantindo a distribuição de carga pelo reforço, que podem ser particulados, quando as partículas de várias formas e tamanhos estão dispersas aleatoriamente na matriz, de fibra curta, em forma de manta de fibras picadas, fibras longas e na forma de tecidos (CALLISTER JR, 2012).

Buscando mostrar a diversidade existente, propriedades e principais características dos materiais compósitos, os tópicos 2.2.1 e 2.2.2 mostram, respectivamente, estudos referentes às matrizes poliméricas e tipos de reforços que são abordadas nesse projeto de pesquisa.

2.2.1 Matrizes Poliméricas

Com função de envolver o reforço, a matriz proporciona uma transmissão dos seus esforços atuantes por meio do contato da fibra com a matriz (GAY, 2014). Neste caso, as matrizes poliméricas são compostas por um material formado por polímeros, e o estudo da resina utilizada como matriz polimérica de um compósito vem se tornando cada vez mais relevante, visto que a matriz exerce grande influência nas propriedades finais do material (SOBRINHO, 2005).

Estes polímeros podem ser divididos em dois grupos, separados por suas características de fusão: termoplásticos e termofixos. Devido à matriz proposta nesse trabalho ser somente termofixa, o tópico a seguir detalha as suas características e propriedades.

2.2.1.1 Matrizes Termofixas

Produzida por uma reação química que consiste em duas fases, onde a primeira resulta da formação de moléculas em cadeia longa e a segunda ocorre a ligação cruzada de cadeiras durante a moldagem (BATISTA, 2017 *apud* GRAWFORD, 1998). As matrizes termofixas são produzidas pela mistura de dois componentes, sendo estes, uma resina e um endurecedor (CUPERTINO, 2009). E são as mais empregadas em materiais compósitos, por apresentarem baixo custo, comportamento quebradiço, fácil manuseio e estado líquido a temperatura ambiente (BATISTA, 2013).

Dentre as principais resinas termofixas, destaque deve ser dado para as resinas poliméricas epóxi, por apresentarem excelente compatibilidade com diversos substratos, facilitando a adesão (SOARES, 2018). Além disso, apresentam alto desempenho, com boa tenacidade e plasticidade, podendo reduzir a propagação de trincas frágeis de uma fibra para outra, bom grau de molhabilidade e fator de contração desprezível, podendo ser curadas a frio (Temperatura Ambiente) ou a quente (Estufa) (TAFARELLO, 2013).

2.2.2 Reforço

O reforço aparece, usualmente, na forma de fibras, fazendo com que haja uma redução de defeitos em sua forma mássica, constituindo um meio mais efetivo e suportando os carregamentos mecânicos que são destinados a ele, quando introduzidos na matriz, o que torna responsável por fornecer a resistência mecânica ao compósito (NETO e PARDINI, 2006).

A vasta utilização dos compósitos reforçados com fibras é decorrente da resistência e rigidez elevada em relação ao peso do material (CALLISTER JR, 2012). Além de poder melhorar as propriedades físico-químicas, a processabilidade, fornecer a coloração desejada e reduzir custo do compósito (TAFARELLO, 2013).

Segundo Medeiros (2016), a maioria dos reforços em compósitos poliméricos é de origem sintética e prejudicial, em termos de resíduos. Porém, as vantagens do uso de fibras sintéticas, principalmente as fibras de carbono e kevlar, apresentam-se como uma boa alternativa para a aplicação em estrutura de médio e grande porte, por apresentar características de alto módulo de elasticidade e elevada resistência à tração, fadiga e ao impacto, quando comparadas a outras fibras sintéticas.

Para a confecção do material proposto nesse trabalho de pesquisa, serão utilizadas as fibras de aramida e carbono, as quais são detalhadas a seguir.

2.2.2.1 Fibra de Aramida

A fibra de aramida é um termo genérico para a classe de fibras sintéticas orgânicas chamadas de fibras de poliamida aromática, no qual são produzidas a partir de poliamidas aromáticas, apresentando uma excelente resistência química, mecânica e relação rigidez-peso, além de resistências à fadiga e ao impacto, da capacidade de amortecimento de vibrações,

características dielétricas e elevada resistência a solventes, lubrificantes, ácidos e combustíveis (MOURA, MORAIS e MAGALHÃES, 2005).

Capazes de absorver uma grande quantidade de energia durante a fratura, devido a sua resistência à fratura e sua capacidade de sofrer deformação plástica sob compressão (COSTA, 2019). As fibras de aramida ou kevlar (como são comercialmente conhecidas) é a matéria prima de coletes a prova de bala, sendo as primeiras fibras a se mostrarem adequadas a aplicações estruturais em campo aeronáutico (TAFARELLO, 2013).

Moura, Morais e Magalhães (2005) destacam a sua altíssima resistência ao cisalhamento como uma das suas propriedades mais importante, o que faz das fibras aramidas um material balístico importante, capaz de suportar fortes impactos localizados, além de serem significativamente leves e terem uma importante resistência à tração. Por outro lado, todo o trabalho de usar pode ser bastante complicado (COSTA, 2019).

Fornecidas comercialmente em diferentes especificações, as fibras de aramida devem ser selecionadas de acordo com os requisitos do projeto e a finalidade da aplicação. Os tipos mais comuns encontradas no mercado são a Kevlar 29, Kevlar 49, Kevlar 149, Technora HM 50, Twaron e TwaronHM. Na Tabela 1 são descritas algumas propriedades das principais fibras de aramidas.

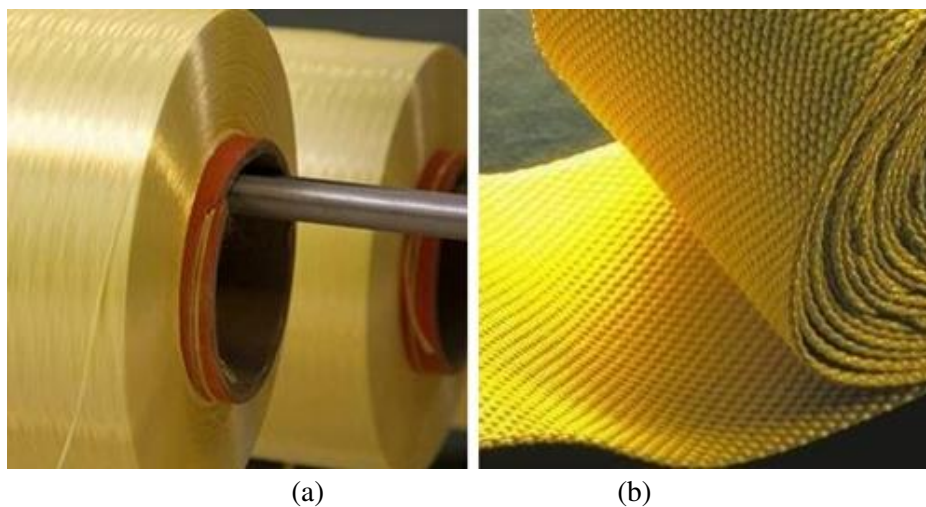
Tabela 1 – Propriedades das principais fibras de aramidas

	Densidade Volumétrica (Mg/m³)	Módulo de Young (GPa)	Resistência à Tração (Mpa)
Kevlar 29	1,44	59	2640
Kevlar 49	1,45	130	2900
Kevlar 149	1,47	146	2410
Technora HM50	1,39	74	2990
Twaron	1,44	80	2800
Twaron HM	1,45	115	3150

Fonte: Adaptada de Batista, 2017 *apud* Matthews e Rawlings, 1994.

Amplamente empregados em muitas aplicações de engenharia pelas suas excelentes características. As fibras de aramidas podem ser encontradas comercialmente nas formas de fio *Roving*, mantas e tecidos. A Figura 4 é uma ilustração das principais formas da fibra de aramida disponíveis no mercado.

Figura 4 – Exemplo de formas comerciais da fibra de kevlar: (a) *Roving* e (b) Tecido.



Fonte: Adaptado de DuPont, 2019.

2.2.2.2 Fibra de Carbono

Com produção baseada na decomposição térmica de vários precursores orgânicos, sendo os principais a *Rayon* (Seda sintética), PAN (Poliacrilonitrilo) e o *Pitch* (Piche) (BATISTA, 2017 *apud* MATTHEWS e RAWLLINGS, 1994). A junção de fibra de carbono e uma matriz são possíveis fabricar um composto com coeficiente de dilatação nulo, garantindo as dimensões finais, conforme o projeto desejado (NETO e PARDINI, 2006). A Tabela 2 mostra algumas das principais fibras de carbono comerciais com as suas propriedades.

Tabela 2 – Propriedades das principais fibras de carbono

	Densidade Volumétrica (g/cm ³)	Módulo de Young (GPa)	Resistência à Tração (Mpa)
AS4 (PAN)	1,81	235	3700
T300 (<i>Pitch</i>)	1,76	230	3100
T-400H (<i>Pitch</i>)	1,80	250	4500
IM-6 (PAN)	1,80	255	4500
IM-7 (PAN)	1,80	290	5170

Fonte: Adaptada de Batista, 2017 *apud* Daniel e Ishai, 2006.

As fibras de carbono comercialmente disponíveis podem duplicar seus valores de módulo de elasticidade quando comparada a outras fibras, tais como aramida e vidro, e exceder os metais em resistência à tração (CALLISTER JR, 2012). A Figura 5 mostra algumas configurações da fibra de carbono encontrada comercialmente.

Figura 5 – Exemplo de formas comerciais da fibra de carbono: (a) Tipo Roving. Tipos de tecidos: (b) unidirecional, (c) sarja 2x2 e (d) braided.



Fonte: <http://www.directindustry.com/pt/fabricante-industrial/fibra-fibra-carbono>

2.2.2.3 Comparação entre as fibras de Carbono e Aramida

Sendo utilizadas nesse trabalho de pesquisa as fibras de carbono e aramida, é importante realizar um comparativo entre algumas de suas propriedades básicas. Com isso, as fibras de aramida se destacam em relação às de carbono por possuir uma elevada resistência mecânica, alta estabilidade dimensional, módulo de elasticidade relativamente alto e baixa densidade (NOSSA, 2011). Enquanto as fibras de carbono apresentam alta resistência à tração e elevada tenacidade (TECNOLOGIA DE MATERIAIS, 2015). O Quadro 1 apresenta um comparativo das características dessas fibras.

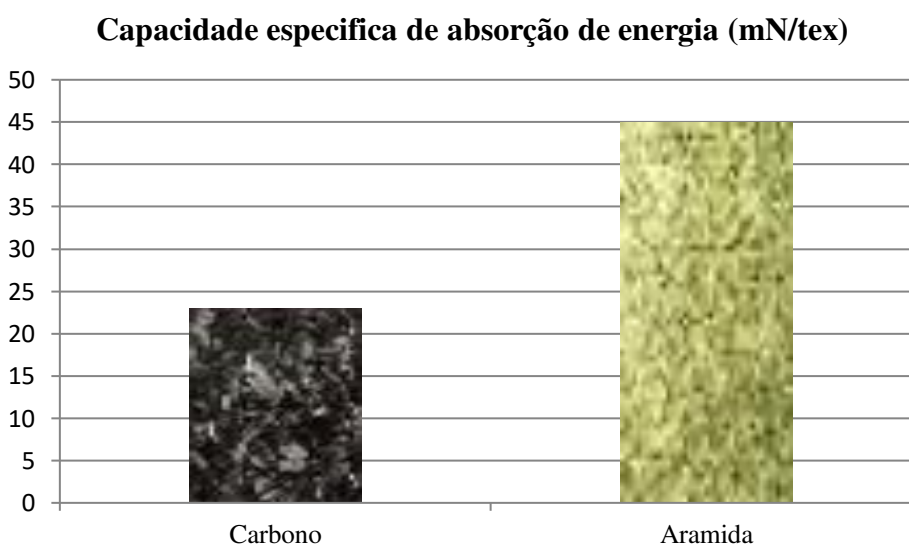
Quadro 1 – Comparativa das características das fibras Carbono/Aramida

Consideração	Fibra de Carbono	Fibra de Aramida
Alcalinidade	Alta resistência	Não tolera
Expansão térmica	Próximo de zero, pode causar altas tensões de tolerância	Próximo de zero, pode causar altas tensões de tolerância
Condutividade térmica	Alta	Excelente isolamento
Tolerância ao impacto	Baixa	Alta
Fluência e Fadiga	Alta resistência	Baixa resistência

Fonte: Adaptada de Costa, 2019 *apud* Technical Report n°55, 2000.

A resistência ao impacto dos laminados depende da capacidade de absorção de energia de cada fibra (TECNOLOGIA DE MATERIAIS, 2015). Devido a isso, o gráfico 1 mostra esses valores para as fibras de carbono e aramida. Confirmando a afirmação de Costa (2019), que as fibras aramidadas são capazes de absorver uma grande quantidade de energia durante a fratura.

Gráfico 1 – Comparativo da capacidade específica de absorção de energia das fibras



Fonte: Adaptada de Tecnologia de Materiais, 2015.

A Tabela 3 apresenta um comparativo dos materiais compósitos com os ferros, tendo em vista a substituição do aço 1010 pelo compósito polimérico híbrido proposto. Neste caso, podemos constatar a alta rigidez do aço 1010, porém baixa resistência à tração comparada aos compósitos poliméricos.

Tabela 3 – Comparativo ferros x compósitos

	Densidade Volumétrica (g/cm ³)	Módulo de Young (GPa)	Resistência à Tração (Mpa)
Aço 1010	7,87	207	365
Compósito carbono +Epóxi	1,55	138	1550
Compósito aramida + Epóxi	1,38	76	1378

Fonte: Adaptada de Tecnologia de Materiais, 2013 *apud* TEXIGLASS, 2013.

2.3 Materiais Compósitos Híbridos

A norma ASTM D3878 (2007) define os materiais compósitos híbridos aqueles que contêm pelo menos dois tipos distintos de matriz ou de reforço, podendo cada tipo de matriz ou reforço ser diferente devido às propriedades físicas ou mecânicas. O processo da hibridização de reforços traz consigo os mais variados objetivos, quais sejam, a viabilização de substituição parcial dos reforços sintéticos por reforços naturais e menos prejudiciais ao meio ambiente (RODRIGUES, 2007).

O processo de hibridização nos laminados compósitos poliméricos pode ocorrer das mais diversas formas (MEDEIROS, 2016). A seguir são mostrados alguns exemplos desses tipos de processos:

- Camada constituinte de diferentes tipos de fibras, podendo apresentar formas de tecidos em diferentes gramaturas ou formas de tecelagem (MEDEIROS, 2016 *apud* RODRIGUES *et al.*, 2012).
- Sob a configuração de diferentes estruturas do tipo sanduíche, onde o núcleo pode vir na forma de particulados (RIBEIRO, 2012).
- Laminados compósitos reforçados à base de tecidos de mecha híbrida em suas camadas (FELIPE, 2012).
- Laminados compósitos reforçados à base de tecidos híbridos constituídos dos mais diferentes tipos de fibras em suas camadas (OLIVEIRA, 2013).

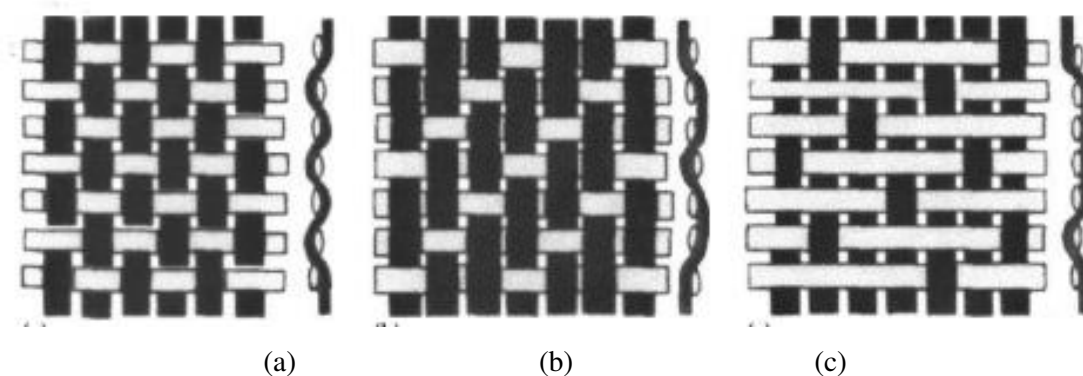
O processo de seleção dos reforços de um compósito híbrido é de extrema importância, já que se deve observar a compatibilidade entre as propriedades de cada constituinte (MEDEIROS, 2016 *apud* JAWAID e ABDUL, 2011). As propriedades físicas e mecânicas de um compósito fibroso vão depender das propriedades da fibra, teor,

comprimento e orientação, interface fibra/matriz, disposição das fibras na matriz e deformação individual até a ruptura de cada fibra (FELIPE, 2012).

O mercado atualmente dispõe de uma variedade de sistemas de fibras e resinas, o que torna possível encontrar uma diversidade de tecidos híbridos, sendo aplicados principalmente em transportes terrestres, aquáticos e aéreos, artigos esportivos e componentes ortopédicos de baixo peso (CALLISTER JR, 2012).

Com relação ao tipo de tecelagem, Gay (2014) comenta que a estrutura do tecido pode ser modificada, quando alterada o padrão de entrecruzamento dos fios da trama e da urdidura. Com isso, existem três tipos fundamentais de estruturas, que serve como base para as demais variantes. A Figura 6 mostra um esquema dessas estruturas principais – liso, sarja e cetim.

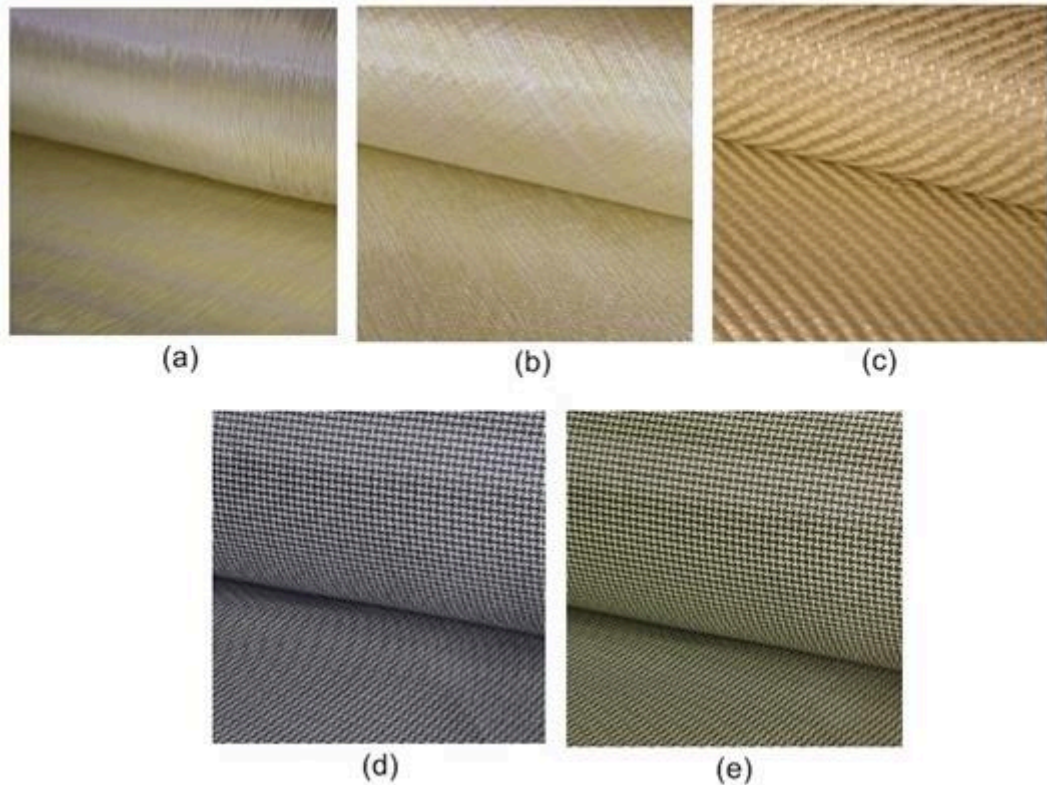
Figura 6 – Tipos de tecelagem em compósitos – Estruturas: (a) liso, (b) sarja e (c) cetim.



Fonte: GAY, 2014.

No que diz respeito aos tecidos híbridos a base de fibras sintéticas, vem se tornando crescente o seu desenvolvimento pelo setor industrial, sendo apresentados como uma nova alternativa de reforço para compósitos poliméricos (BATISTA, 2017). Dessa maneira, a Figura 7 mostra os principais tipos de tecidos híbridos encontrado no mercado.

Figura 7 – Exemplo de formas comerciais de tecidos híbridos: (a) vidro/aramida unidirecional, (b) vidro/aramida multiaxial, (c) vidro/aramida (sarja), (d) carbono/innegra (bidirecional) e (e) carbono/aramida (bidirecional)

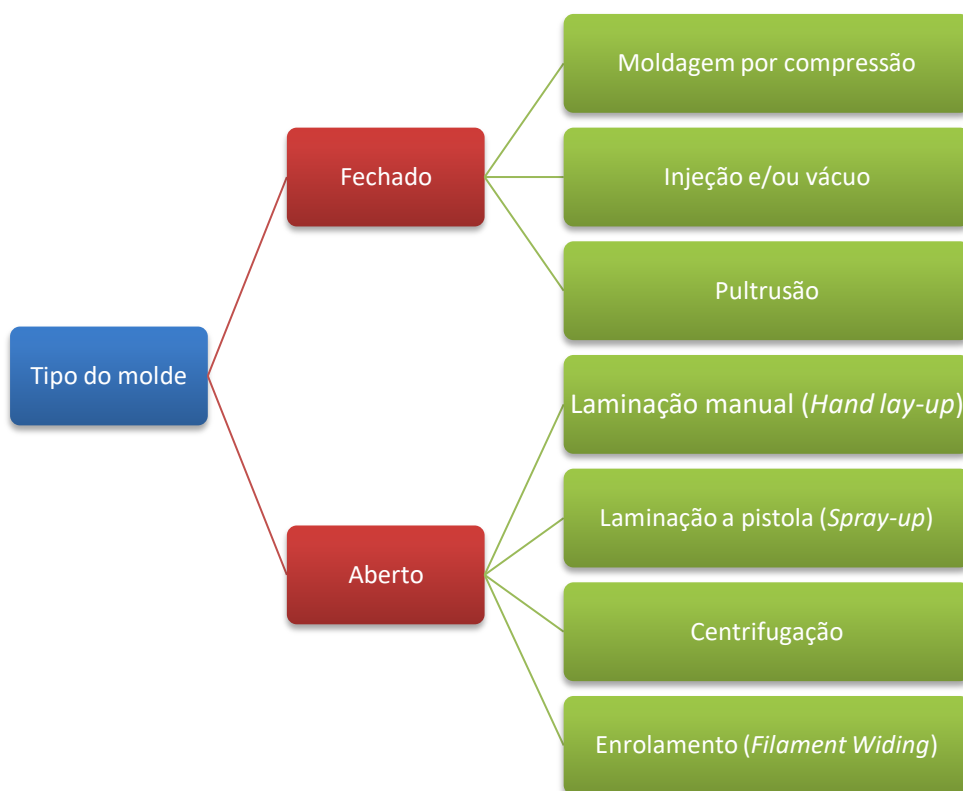


Fonte: E-COMPOSITES, 2019.

2.4 Processos de Fabricação

Atualmente o processamento dos compósitos teve um enorme desenvolvimento, onde sempre se busca técnicas economicamente mais competitiva, devido suas aplicações nas indústrias aeronáuticas, automobilística, construção civil e náutica. Sendo classificados em dois tipos de processos, sendo estes: molde aberto e molde fechado (MAZUMAR, 2002). A Figura 8 mostra as principais características dos processos de fabricação por molde fechado e aberto.

Figura 8 – Principais processos de fabricação para matrizes termofixas



Fonte: Adaptado de BATISTA, 2017.

Devido à diversidade de processos de fabricação de compósitos poliméricos, a escolha do processo adequado é em função de muitos parâmetros, tais como, tipo da resina no processo de impregnação, forma e dimensão da peça, nível de produção, qualidade superficial da peça, material e *designer* do molde, temperatura ambiente, teores de catalisadores e/ou aceleradores, cargas e aditivos (BATISTA, 2013).

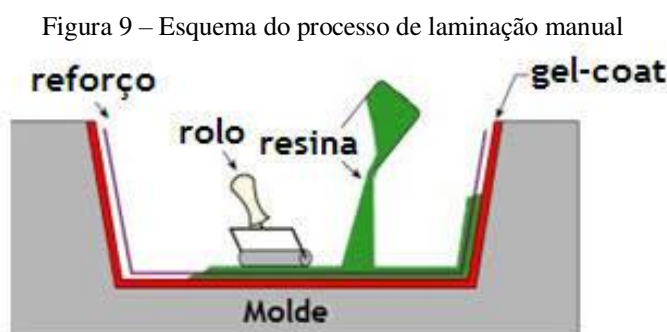
Dentre os processos de fabricação mostrados na Figura 8, a laminação manual (*Hand lay-up*) apresenta uma maior simplicidade, baixo investimento inicial e a possibilidade de se fabricar peças com geometria complexa (TAFARELLO, 2013). Com isso, o compósito laminado híbrido deste trabalho de pesquisa terá como processo de fabricação a laminação manual que será descrita a seguir.

2.4.1 Laminação Manual (*Hand lay-up*)

O processo de fabricação por laminação manual consiste basicamente no empilhamento de mantas ou tecidos de fibras sobre a superfície de um molde aberto, seguida

de aplicação da resina catalisada, com viscosidade entre 100 e 1500 mPa.s (MEDEIROS, 2016). Compactada com auxílio de rolos de configurações diferenciadas, sendo utilizada tanto para impregnar a resina no tecido de reforço quanto para auxiliar a compactação das fibras, eliminando assim possíveis formações de bolhas de ar, tendo repetições do processo de camada a cama, até a obtenção da configuração final do produto desejado (POUZADA e BERNARDO, 1983). Todo o processo ocorre à temperatura ambiente e ao final da etapa de cura da resina, tem-se a desmoldagem e retirada da peça para acabamentos.

A Figura 9 mostra um exemplo do processo de laminação manual (*Hand lay-up*).



Fonte: LOPES, 2009.

O processo apresenta como limitação a sua baixa produção, sendo uma produção inferior a 1000 peças por ano (NETO e PARDINI, 2006). A simplicidade do processo, o baixo custo inicial e a capacidade de fabricar peças com geometrias complexas são as suas principais vantagens (MOURA, MORAIS e MAGALHÃES, 2005).

2.5 Ensaio de Impacto

Bastante utilizado na avaliação do comportamento frágil dos materiais, o ensaio de impacto consiste em submeter um corpo de prova padronizado, a uma flexão provocada pelo impacto do martelo pendular, permitindo assim, determinar a energia utilizada na deformação e ruptura do corpo de prova (COSTA, 2019). Com isso, quanto maior for a energia absorvida, menos frágil será o comportamento do material àquela solicitação.

A resistência mecânica ao impacto é uma das mais importantes características do material em qualquer projeto que se queira prever as possibilidades de fratura prematura (CANTWELL *et al.*, 1991). Definida por Costa (2019) *apud* Hancox (2008) como a aplicação repentina de uma força de impulso, em um volume limitado de um material ou parte de uma estrutura. Já de acordo com Abrate e Walton (1992) a resistência mecânica ao impacto é o

estudo do dano induzido pelo impacto de um objeto em um determinado material e os fatores que afetam o impacto. De modo geral, a resistência ao impacto é definida como a aplicação repentina de uma carga a qual leva o material a fratura.

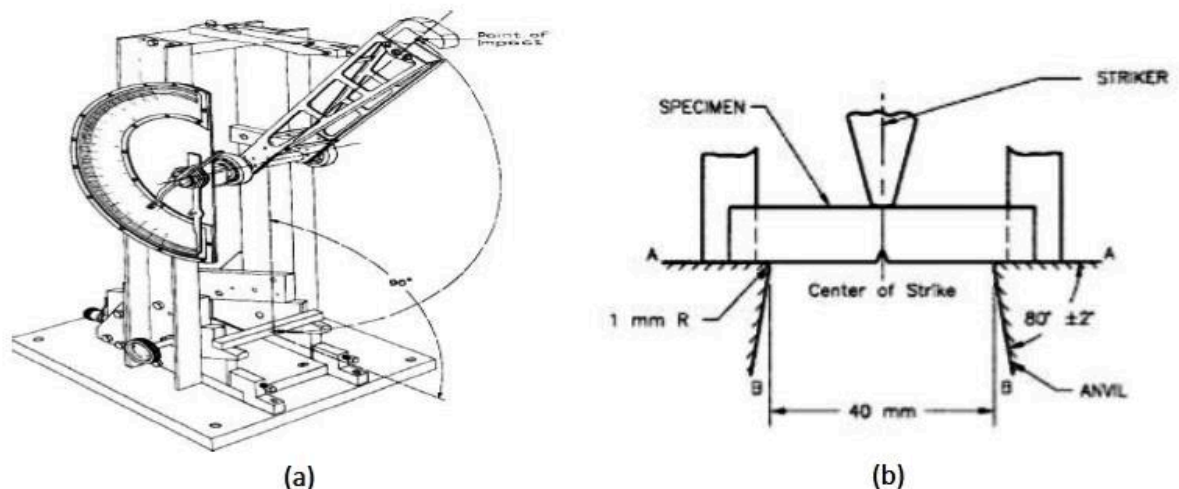
Apesar dos conhecimentos existentes, o impacto ainda é uma das propriedades menos compreendida e estudada em materiais compósitos, o que torna extremamente difícil identificar e quantificar as falhas internas induzidas pelo impacto nos materiais compósitos poliméricos, tendo em vista que as zonas danificadas são de natureza complexa (COSTA, 2019 *apud* AVERY, 1981).

2.5.1 Ensaio de Impacto Charpy

O ensaio de impacto Charpy foi um dos primeiros ensaios de impacto realizados em materiais compósitos (CANTWELL *et al.*, 1991). Escolhido devido à simplicidade do uso e instrumentação do pêndulo Charpy, no qual gera informações sobre absorção e dissipação de energia nos compósitos (COSTA, 2019). Obedecendo ao regulamento RATBSB do Baja SAE Brasil (2018), este trabalho de pesquisa terá como método o ensaio de impacto Charpy.

O corpo de prova para o ensaio de impacto Charpy apresenta um entalhe em V no sentido contrário à região de impacto, apresentando geralmente um formato de viga (ZOLIN, 2010). Com o corpo de prova posicionado na base, é liberado um martelo e uma aresta que o atinge na região do entalhe, ocorrendo assim a fratura exatamente nesta parte que é um ponto de concentração de tensões; o pêndulo continua o movimento até a altura máxima possível, sendo assim, calculada a energia absorvida através da diferença entre a altura inicial e a altura final multiplicada pelo peso do martelo (COSTA, 2019). A Figura 10 mostra a máquina utilizada no ensaio de impacto Charpy e o posicionamento do corpo de prova.

Figura 10 – Representação do ensaio de charpy: (a) máquina utilizada, (b) fixação do corpo de prova conforme a orientação da norma ASTM D 256 (2010).



Fonte: ASTM D256, 2010.

Apesar de ser bastante prático, o ensaio de impacto Charpy apresenta algumas desvantagens como: a curva força vs tempo conter oscilações harmônicas devidas à resposta natural do operador (CANTWELL *et al.*, 1991).

2.5.2 Ensaio de Impacto Izod

Com o objetivo de avaliar a fratura frágil dos materiais a partir de sua capacidade de absorver energia, o ensaio de impacto Izod apresenta bastante simplicidade (COSTA, 2019). Com isso, o ensaio consiste na fixação dos corpos de provas na máquina de testes, onde o pêndulo é solto de uma determinada altura, atingindo assim o corpo de prova. Desta maneira, a energia imposta ao material é dada em função da diferença da altura do martelo, antes e após o impacto, multiplicado pelo seu peso (SOUZA, 1982).

A diferença entre os dois ensaios de impactos citados está na fixação do corpo de prova, sendo o ensaio de charpy apoiado em batentes e o de Izod em extremidades engastadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do estudo proposto foi necessário o conhecimento das propriedades mecânicas obtidas por meio da realização do ensaio de impacto Charpy. Segundo Costa (2019), vários fatores influenciam a resposta ao impacto, dentre eles, destacam-se o tipo do material, métodos de fabricação e confecção dos corpos de prova, configuração do laminado compósito, alinhamento dos corpos de prova, ambiente onde o teste é realizado e velocidade de ensaio

Diante de todos estes dados necessários, de acordo com as normas ASTM e o regulamento RATBSB Baja SAE Brasil (2018), são descritos a seguir como os dados foram obtidos.

3.1 Materiais Utilizados no Laminado Compósito

3.1.1 Matriz

Para confecção do laminado compósito foi utilizada a resina termofixa resina 2001 Epóxi transparente (Redelease) Sialex Química. Como agente do sistema catalítico foi utilizado o endurecedor 3154 Sialex Química, proporção de 100% de resina para 50% de endurecedor em peso (composições sugeridas no boletim técnico da resina para a temperatura de 30 °C).

A importância em se conhecer algumas características da resina e também do endurecedor que se trabalha é fundamental, por serem responsáveis em garantir a qualidade do compósito, agregando resistência e homogeneidade nas camadas. Assim o Quadro 2 mostra algumas características importantes.

Quadro 2 – Características dos componentes

	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: Adaptado de Sialex química LTDA, 2019.

Para a laminação foi usado um total de 570 g de matriz epóxi, sendo, 380 g de resina e 190 g de endurecedor. Os componentes foram medidos na balança digital, sendo misturados por um bastão de vidro durante um minuto, antes do início do processo de laminação.

3.1.2 Reforço

O reforço utilizado para a confecção do compósito laminado híbrido foi o tecido constituído de fibras de Carbono/Aramida tipo sarja 2x2 (Figura 11) definido como Tecido híbrido carbono/aramida, destacando que o tipo de fibra na trama é a fibra de aramida do tipo Para-Aramida (Twaron).

Figura 11 – Reforço utilizado no laminado proposto: tecido híbrido sarja 2x2



Fonte: Autor, 2019.

O tecido é fabricado pela Fibertex e algumas de suas informações técnicas são descritas na Tabela 4.

Tabela 4 – Informações técnicas do tecido híbrido

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 ($\pm 5\%$)
Espessura	0,27 mm

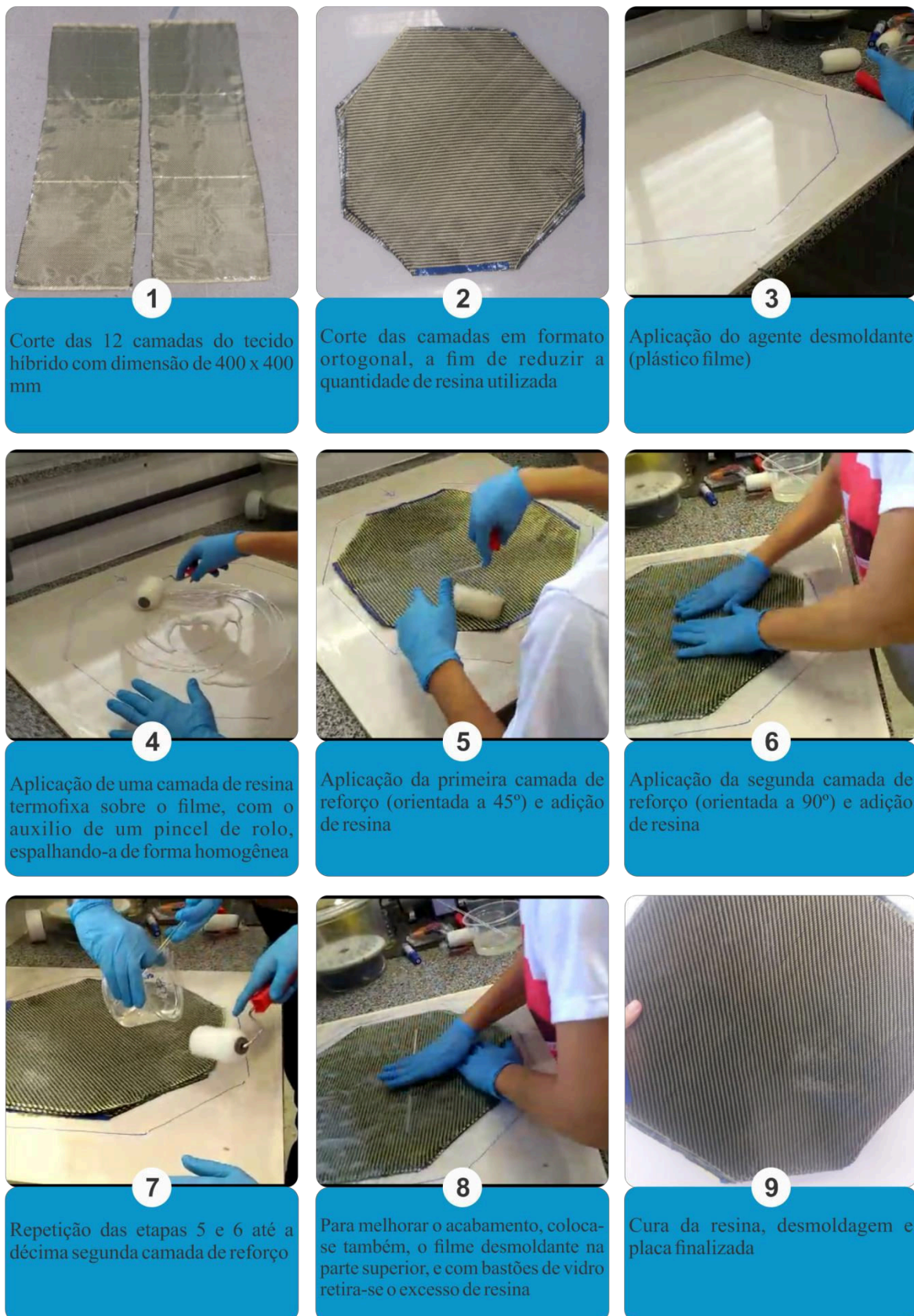
Fonte: Adaptado da Ficha técnica Fibertex, 2017.

3.2 Fabricação do Laminado Compósito

O processo de fabricação utilizado neste trabalho de pesquisa para a confecção do laminado híbrido carbono/aramida foi o de moldagem manual (*Hand lay-up*), sendo este confeccionado no Laboratório de Ensaios mecânicos e Metalografia no núcleo de laboratórios

da UFRSA *campus* Caraúbas. A Figura 12 mostra as etapas utilizadas no processo de confecção do laminado híbrido.

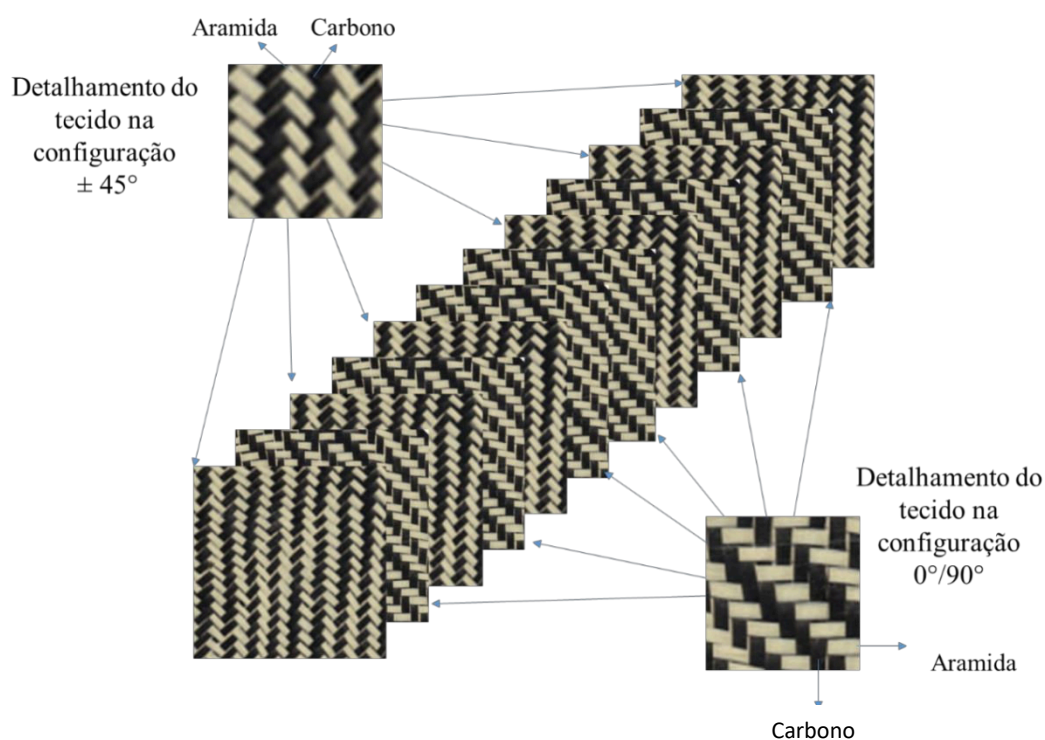
Figura 12 – Etapas do processo de confecção do laminado



Fonte: Autor, 2019.

O laminado foi confeccionado contendo doze camadas de tecido, apresentando alternância na direção das fibras de $\pm 45^\circ$ e $0^\circ/90^\circ$, formando assim uma placa bidirecional (Figura 13). Pela figura 13 pode-se perceber que o laminado apresenta simetria e destaca-se que nas camadas a $\pm 45^\circ$ todas elas a orientação das fibras foram iguais e o mesmo aconteceu para as camadas a $0^\circ/90^\circ$. A espessura referente ao laminado proposto foi de aproximadamente $4,3 \pm 0,08$ mm, atendendo as exigências do regulamento RATBSB do Baja SAE Brasil (2018). Destaca-se que a configuração do laminado foi escolhida baseada nos resultados obtidos por Mazarim e Sarleno (2018), onde dentre as configurações estudadas, a configuração de $\pm 45^\circ$; $0^\circ/90^\circ$ foi a que apresentou o melhor resultado para a absorção de energia. Indicando o efeito positivo de se utilizar camadas alternando sua angulação $0^\circ/90^\circ$ e $\pm 45^\circ$.

Figura 13 – Configuração do laminado proposto



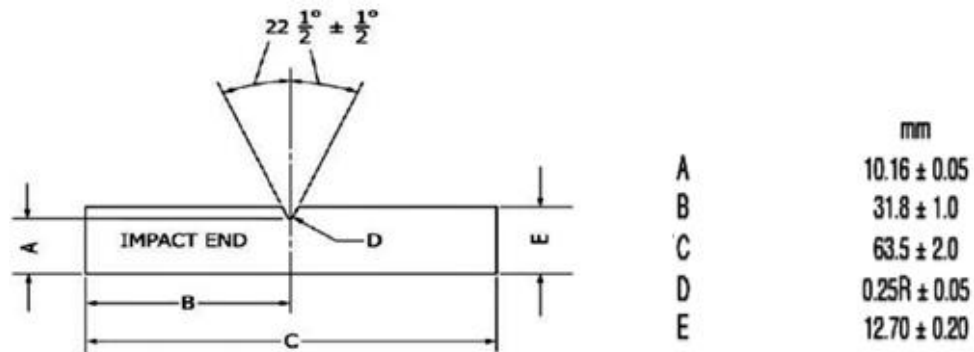
Fonte: Autor, 2019.

3.3 Confeção dos Corpos de Provas

Os corpos de prova foram confeccionados de forma manual com ajuda de ferramentas e equipamentos do próprio laboratório de soldagem e usinagem, baseado na norma ASTM D256 (2010), apresentando dimensões de $63,5 \pm 2,0$ mm de comprimento, $12,7 \pm 0,20$ mm de

largura e entalhe em “V” com 2,54 mm de profundidade com abertura de $45^\circ \pm 1^\circ$, demonstrado na Figura 14.

Figura 14 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de impacto Charpy conforme a ASTM D256 (2010)

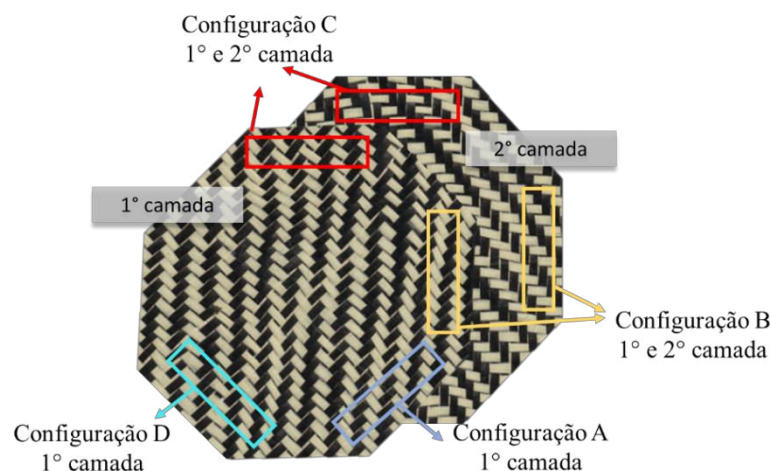


Fonte: ASTM D256, 2010.

Os corpos de provas apresentaram modificações referente a norma ASTM D256 (2010), isto foi necessário visando obedecer o que se pede no regulamento RATBSB do BAJA SAE Brasil (2018), que determina, quando utilizados materiais compósitos, estes devem possuir no mínimo o dobro da espessura, com absorção de energia equivalente ao material padrão (aço SAE 1010), ou seja, deve ser maior que 3 mm. Neste caso, a espessura adotada nos CP's foi à mesma do laminado proposto de 4,3 mm.

Para este trabalho de pesquisa se fez necessário a obtenção dos corpos de prova nos diferentes sentidos da fibra, sendo confeccionados CP's nas direções A, B, C e D. A Figura 15 mostra como foram realizados os corpos de prova nessas direções para o laminado proposto.

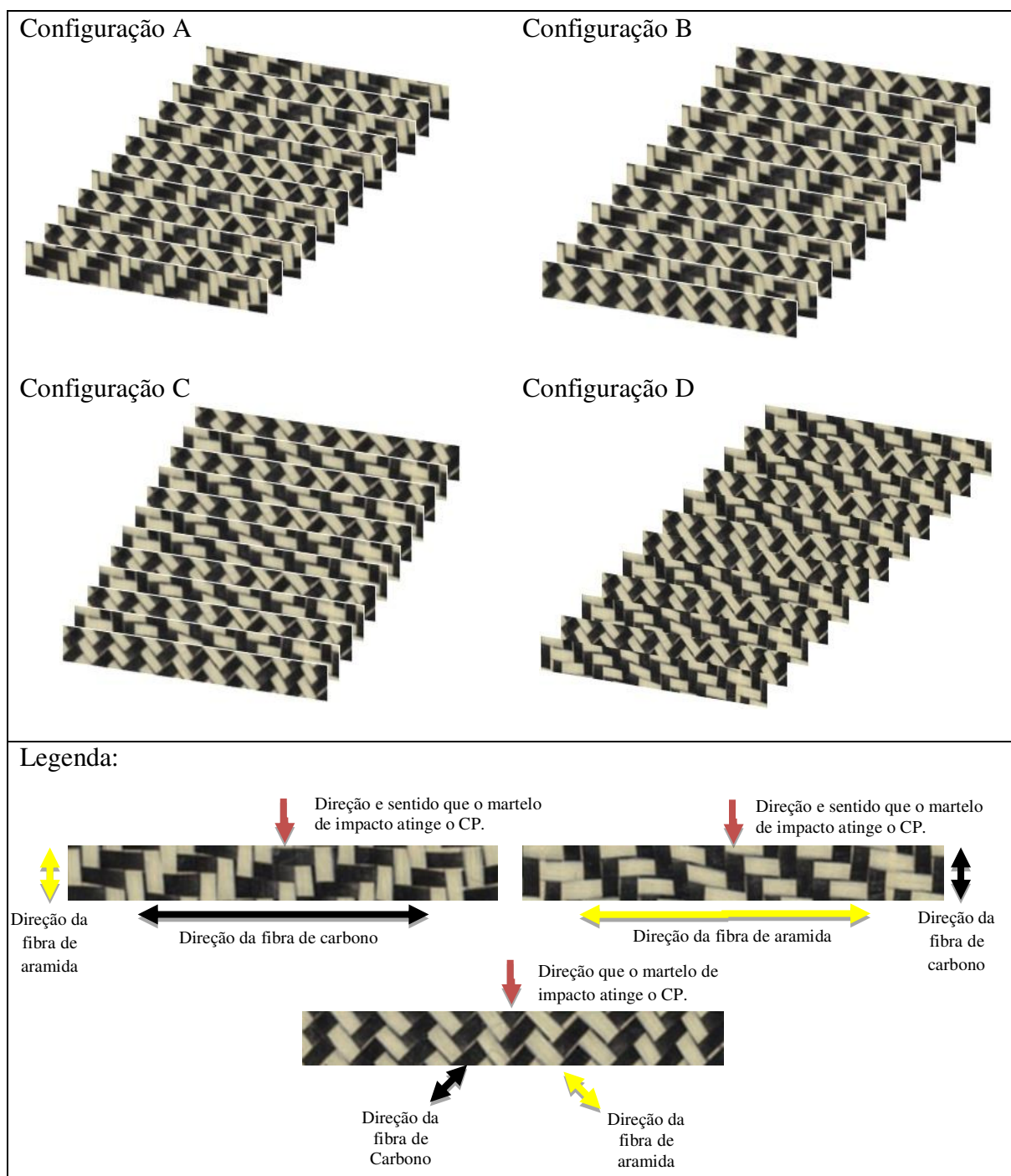
Figura 15 – Orientação dos CP's



Fonte: Autor, 2019.

As direções do CP foram determinadas com base na primeira camada do laminado proposto e o sentido da fibra longitudinal (onde o martelo do ensaio atinge transversalmente). Com isso, as configurações A e B apresentam a fibra de carbono atuando perpendicular ao impacto e as configurações C e D têm a fibra de aramida atuando perpendicular ao impacto. Figura 16 mostra como ficaram as doze camadas para as 4 direções.

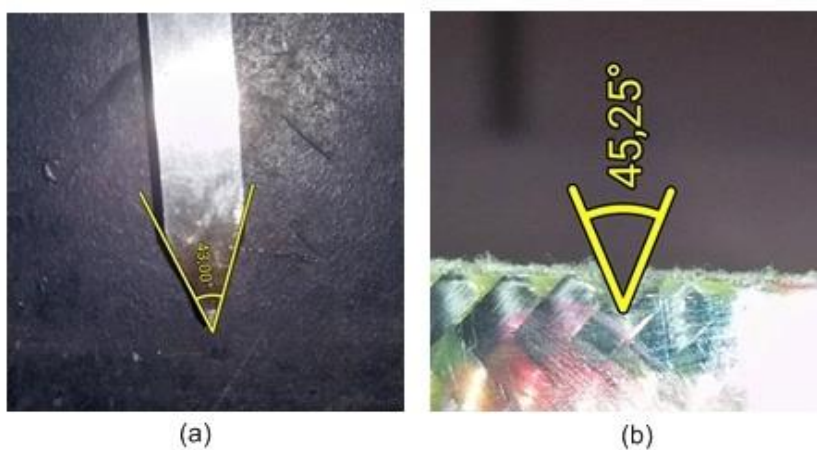
Figura 16 – Direções das 12 camadas para as 4 configurações propostas.



Fonte: Autor, 2019.

Definida as orientações, realizou-se o processo se deu continuidade com os corte dos CP's, com o auxílio da serra tico-tico manual o laminado foi cortado nas dimensões desejadas, tendo o seu acabamento realizado inicialmente no esmeril e posteriormente utilizaram-se lixas d'água com granulometria de 80, 180 e 220. O entalhe foi realizado de forma manual utilizando uma ferramenta adaptada (mostrada na Figura 17-a), que apresentava uma angulação aproximadamente de 43° , sendo o mesmo acoplado a lixas de desbaste de granulometria de 80. A angulação da ferramenta menor que o recomendado pela norma se dá devido à necessidade de sua utilização com uma lixa, o que gera uma angulação final do CP por volta de $45,25^\circ$ (Figura 17-b), dentro do limite permitido pela norma ASTM D256 (2010). Ressalta-se que as angulações da Figura 17 foram realizadas através do aplicativo ImageMeter.

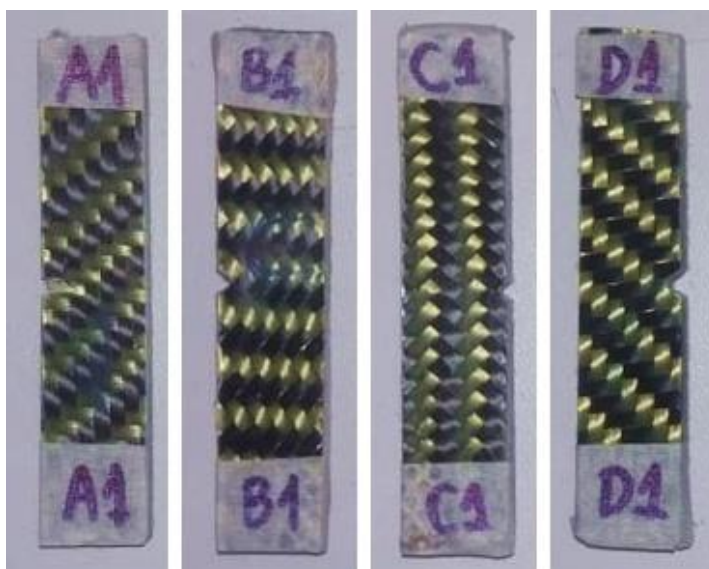
Figura 17 – Realização do entalhe no CP: (a) ferramenta utilizada, (b) angulação final do entalhe nos CP's



Fonte: Autor, 2019.

Contudo, foram confeccionados 8 corpos de prova para cada conjunto de configuração, sendo selecionados 5 válidos como indica a norma. A Figura 18 mostra os CP's fabricados para as direções A, B, C e D.

Figura 18 – Corpo de prova compósito polimérico para o ensaio de impacto charpy



Fonte: Autor, 2019.

3.4 Ensaio de Impacto Charpy

O ensaio de impacto Charpy conduzido no laminado foi realizado no laboratório de ensaios mecânicos da Universidade Federal de Campina Grande em uma temperatura ambiente de 23°C, podendo variar em $\pm 2^\circ\text{C}$ conforme o descritivo da norma ASTM D256 (2010). Os corpos de prova foram posicionados na máquina de ensaio, de tal forma que ficassem centralizados no dispositivo de apoio direcionando o pêndulo a impactar a região entalhada. Após o posicionamento, o pêndulo foi acionado, o martelo do tipo “C”, foi erguido e travado no ponto máximo, para que alcance a energia de 300J, o que gera uma velocidade de impacto entre 3 e 6 m/s.

Com essas condições padronizadas, a norma recomenda que a velocidade do martelo no momento do impacto esteja entre 5 e 6 m/s. A parte que fará o choque com o corpo de prova é o cutelo, que deve possuir um ângulo de 30° e um raio de curvatura de 2 mm a 2,5 mm e a distância entre apoios é de 40 mm.

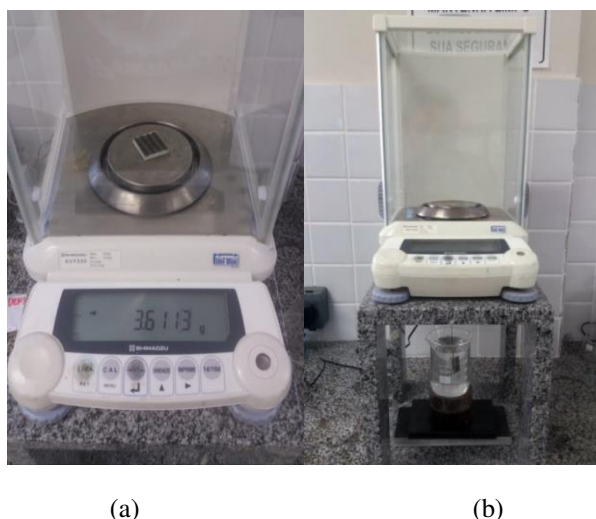
3.5 Ensaio de Densidade Volumétrica

O ensaio de densidade volumétrica foi realizado no laboratório de Ensaaios Mecânicos e Metalografia da UFERSA *Campus* Caraúbas. Para o ensaio foram confeccionados 5 CP's nas dimensões aproximadas de 25 mm x 25 mm.

Antes da realização do ensaio, os corpos de prova foram colocados na estufa de secagem ao atingir 100°C, para a retirada de toda umidade dos CP's, permanecendo por 1 hora na estufa, posteriormente colocou-se os CP's dentro do dessecador de vidro para o processo de esfriamento.

Após a secagem e esfriamento, as amostras foram pesadas em uma balança digital da marca Shimadzu com capacidade máxima de 220g. Como parte final do ensaio, obteve o peso do afundador parcialmente imerso em água e o peso das amostras imersas com o afundador, conforme recomendado pela norma ASTM D792 (2008). A Figura 19 mostra parte do procedimento realizado para a determinação da densidade volumétrica.

Figura 19 – Parte do procedimento para determinação da densidade: (a) Pesagem da amostra seca, (b) Pesagem da amostra imersa com o afundador.



Fonte: Autor, 2019.

A densidade volumétrica do laminado foi calculada usando o método de teste para plásticos sólidos em água, com corpos de provas de 1 g até 25 g, utilizando a equação 1 (ASTM D792, 2008). O mesmo método foi utilizado por Batista (2017) e Fontes (2013) em seus trabalhos.

$$D = \frac{an}{a+w-b} \quad (1)$$

Na qual: D é a densidade volumétrica do compósito (g/cm³); a é o peso da amostra seca (g); n é a densidade da água na temperatura do ensaio a 23° (0,9975 g/cm³); w é o peso do afundador parcialmente imerso em água (g); e b é o peso da amostra imersa com o afundador em água (g).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta sessão do trabalho serão mostrados os resultados da caracterização mecânica a impacto do compósito híbrido carbono/aramida, como também realizar sua comparação ao aço SAE 1010, atendendo os quesitos exigidos pelo Baja SAE Brasil (2018). Seguido de uma análise da possível redução da massa, de acordo com a densidade dos materiais e projeto do anteparo de proteção do CVT. Os desvios padrões foram calculados utilizando o Excel através da função “DESVPAD”.

4.1 Fabricação dos Corpos de Provas

Diante do processo de fabricação dos corpos de provas, a Tabela 5 mostra a espessura média atingida após sua fabricação.

Tabela 5 – Espessura média dos CP's fabricados

Material	Espessura Média (mm)
A	$4,29 \pm 0,08$
B	$4,29 \pm 0,13$
C	$4,23 \pm 0,19$
D	$4,34 \pm 0,05$

Fonte: Autor, 2019.

Na confecção dos corpos de prova em ambas as configurações, utilizou-se o mesmo número de camadas de tecido híbrido, sendo todos confeccionados da mesma placa. A variação do tamanho das espessuras nos CP's (ver Tabela 5) é atribuída ao fato do tecido utilizado para a fabricação não possuir uma planicidade. Além disso, a concentração maior de resina em algumas regiões pode ter causado os desníveis de espessura entre os CP's.

4.2 Ensaio de Impacto Charpy

Com relação ao ensaio de impacto charpy realizado no material compósito, a Tabela 6 mostra os valores de energia absorvida para as quatro configurações, bem como seus respectivos desvios padrões.

Tabela 6 – Resultado do ensaio de impacto charpy para o laminado

CP	Configuração A		Configuração B		Configuração C		Configuração D	
	Esp (mm)	Energia Absorvida (J)	Esp (mm)	Energia Absorvida (J)	Esp (mm)	Energia Absorvida (J)	Esp (mm)	Energia Absorvida (J)
1	4,33	12	4,30	12	4,40	27	4,30	20
2	4,20	32	4,44	12	4,00	16	4,40	21
3	4,34	14	4,22	15	4,15	24	4,30	22
4	4,24	36	4,38	15	4,15	33	4,34	22
5	4,38	12	4,12	12	4,45	30	4,30	34
Média	4,30	21,2	4,29	13,2	4,23	26	4,33	23,8
Desvio Padrão	0,08	11,80	0,13	1,64	0,19	6,52	0,04	5,76

Fonte: Autor, 2019.

Analizando a Tabela 6, pode-se observar que não houve uma relação linear entre a espessura específica e a energia absorvida de cada corpo de prova, apresentando alguns casos de CP's de diferentes espessuras absorvendo a mesma quantidade de energia, e também casos onde corpos com menor espessura absorveu uma quantidade de energia maior que corpos mais espessos.

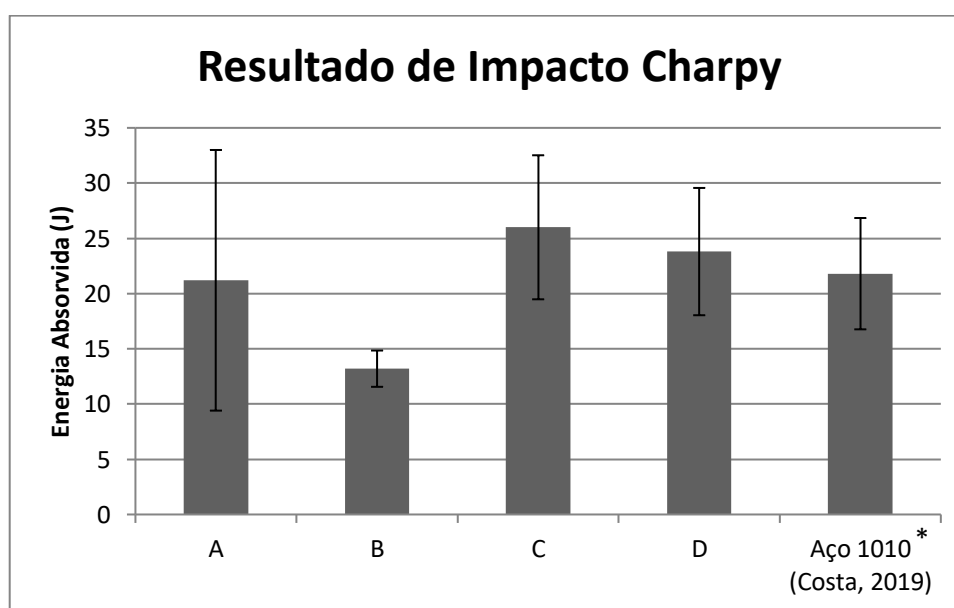
Realizando um comparativo com as quatro configurações, pode-se perceber ainda através da Tabela 6 a influência da orientação da fibra e da sequência de empilhamento. Avaliando a influência da fibra que está perpendicular ao martelo de impacto, percebe-se que as configurações C e D apresentaram o melhor resultado, mostrando que quando o impacto atua no sentido da perpendicular aramida o resultado obtido foi melhor devido a suas propriedades. Como esperado pela literatura e destacado por Moura, Morais e Magalhães (2005), a aramida apresenta uma excelente resistência ao impacto, bem como, resistência mecânica, estabilidade dimensional, resistência à abrasão.

Levando em consideração a sequência do empilhamento, o melhor resultado se tem com a configuração C, onde apresenta a primeira camada das fibras orientada à $\pm 45^\circ$ e na segunda camada e as duas camadas centrais com a fibra de aramida perpendicular ao martelo de impacto, obtendo um valor médio de 26 J. Devido o CVT apresentar uma geometria complexa, deve-se levar em consideração a direção do carbono com a primeira camada das fibras orientada à $\pm 45^\circ$ (Configuração B), onde o valor do impacto apresentou um valor médio de 13,2 J, sendo este, inferior ao do Aço SAE 1010 encontrado por Costa (2019) de 21,8 J, em seus ensaios, tornado-se inviável a fabricação do anteparo de proteção com a primeira camada das fibras orientadas à $\pm 45^\circ$.

Ao analisar as configurações que contava com a primeira camada $0^\circ/90^\circ$, tendo a configuração A o carbono perpendicular ao impacto gerado pelo martelo de impacto e a Configuração D a aramida, e ambas as configurações com duas camadas centrais orientadas a $\pm 45^\circ$, apresentou valores superiores para direção da aramida e dentro do limite do desvio padrão para a direção do carbono, ao serem comparadas pela energia absorvida pelo Aço SAE 1010 de Costa (2019).

Destaca-se que a energia absorvida pelo Aço nos ensaios de Mazarim e Sarleno (2018), que foi de 15,8 J e Costa (2018) obteve 21, 8 J e desvio padrão de 5,04 J. Ressaltando-se que ambos os autores realizaram o impacto charpy com o aço 1010 apresentando em seus corpos de provas uma espessura de 1,5 mm. Apesar do valor encontrado por Costa (2018) ser levemente superior ao da configuração A, percebe-se que pelos desvios padrões, podemos descartar que essa diferença não é significativa. O gráfico 2 mostra os resultados de todos os ensaios de impacto com um comparativo com os valores do Aço SAE 1010 encontrados por Costa (2019) e seus respectivos desvios padrões.

Gráfico 2 – Resultado do ensaio de impacto charpy



Fonte: Autor, 2019 e *Costa, 2019.

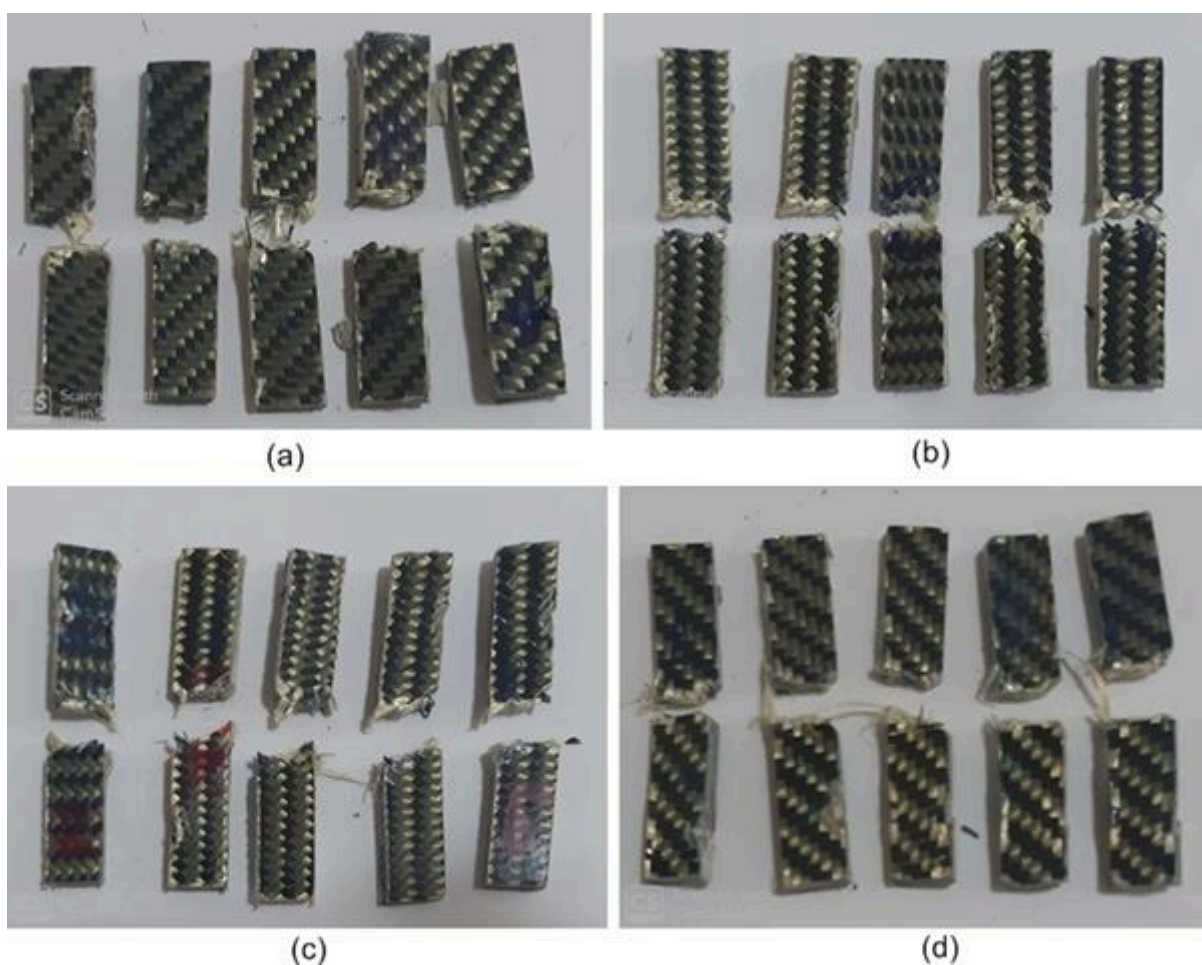
Visando a substituição do Aço SAE 1010 pelo material compósito proposto, podemos confirmar que devido o bom desempenho das configurações A e D, tornando-se possível a substituição do aço, sendo está à configuração a ser adotada na confecção do anteparo de proteção do CVT, tendo em vista que durante o processo de laminação do produto final, tais configurações se encontrariam na parte superior, inferior e lateral da proteção e um possível

rompimento da correia que conecta as polias não ocasionaria problemas, podendo ocorrer impacto tanto na primeira camada tendo a direção carbono, quanto à direção aramida.

Costa (2019) em seu trabalho apresentou os valores médios de 9,1 J para a configuração $0^\circ/90^\circ$ para direção de impacto no sentido do carbono, 9,3 J para configuração $0^\circ/90^\circ$ para direção de impacto no sentido da aramida e 11,6 J para $\pm 45^\circ$, em todas as configurações foi utilizado um laminado híbrido carbono/aramida com 9 camadas unidirecionais. Mazarim e Sarleno (2018) em seu laminado de 12 camadas de fibra de carbono obtiveram uma energia absorvida de 17,90 J para as fibras direcionadas em uma configuração bidirecional ($0^\circ/90^\circ; \pm 45^\circ$), obtendo nas configurações unidirecionais de $\pm 45^\circ$ e $0^\circ/90^\circ$ os valores médios de 16,70 J e 10,44 J, respectivamente.

Contudo, a Figura 20 mostra os corpos de prova utilizados nesse projeto de pesquisa fraturados.

Figura 20 – Corpos de provas fraturados: (a) Configuração A, (b) Configuração B, (c) Configuração C e (d) Configuração D



Fonte: Autor, 2019.

4.3 Ensaio de Densidade Volumétrica

A densidade volumétrica do laminado híbrido carbono/aramida é apresentada na Tabela 7. Por estes resultados, percebe-se que o mesmo possui uma densidade volumétrica baixa, o que o torna excelente para aplicações leves. Como esperado para materiais compósitos poliméricos reforçados tecidos de fibras sintéticas.

Tabela 7 – Densidade volumétrica do laminado proposto.

	Valor Médio	Desvio Padrão
Densidade Volumétrica (g/cm ³)	1,22	± 0,01

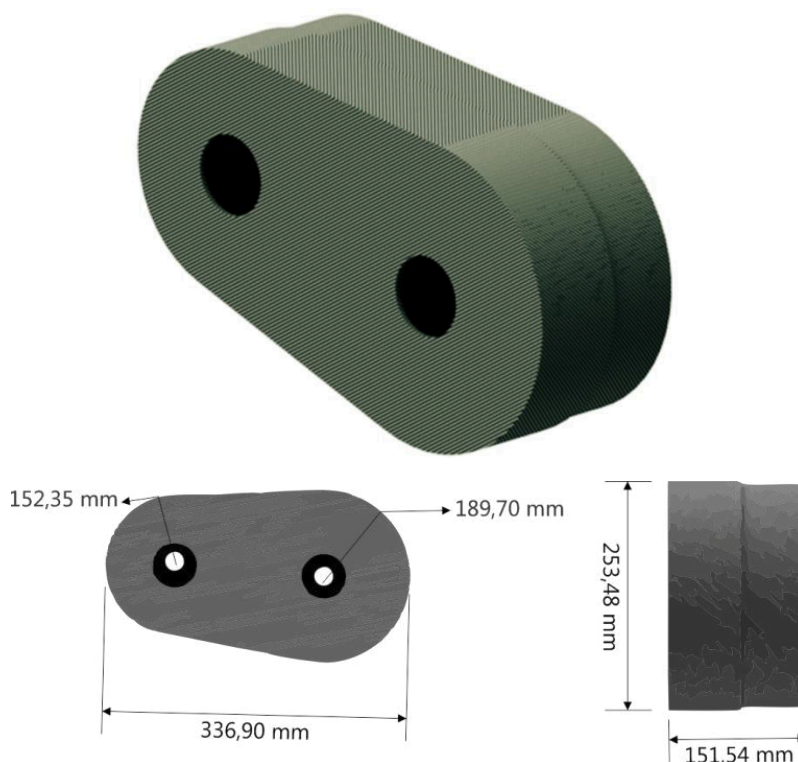
Fonte: Autor, 2019.

No estudo de Batista (2017), em que foram utilizadas 10 camadas de tecidos unidirecionais de fibra de carbono e aramida e resina epóxi éster Vinílica, foi obtida uma densidade volumétrica de 1,29 g/cm³.

4.4 Projeto da Proteção do CVT

O projeto da nova proteção do CVT consiste em fabricar um anteparo de proteção que envolva o sistema de câmbio do veículo, tendo como função de impedir a entrada de impurezas que possam comprometer o funcionamento do CVT, deixando-a com baixo rendimento. Outro fator importante é a segurança, devido à alta temperatura que esse sistema atinge e rompimento da correia que conecta as polias. A Figura 21 mostra uma renderização do projeto em CAD da nova proteção do CVT da equipe Caraubaja SAE.

Figura 21 – Projeto do anteparo de proteção



Fonte: Autor, 2019.

Com isso, a redução de massa no veículo se torna primordial, tendo em vista que a adição de massa ao protótipo influencia diretamente em mais esforços dos componentes, uma resposta de arrancada maior e um maior tempo para frenagem.

Visando a otimização dos seus componentes e garantia de uma maior eficiência veicular foram calculadas as massas do anteparo de proteção para ambos os materiais através da equação 2 e os dados fornecidos pelo Tabela 8. Ressalta-se que o volume de cada material levou em consideração a espessura mínima do Aço SAE e a espessura média do laminado.

$$D = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Tabela 8 – Propriedades físicas do Aço SAE 1010 e laminado

Material	Área (m ²)	Espessura (mm)	Volume (cm ³)	Densidade Volumétrica (g/cm ³)
Aço SAE 1010	0,67	1,50	728,81	7,87
Laminado	0,67	4,30	1441,75	1,22

Fonte: Autor, 2019.

A Tabela 9 demonstra a massa esperada da produção do anteparo de proteção para ambos os materiais. Com tudo, podemos notar uma redução de massa em 69,33% quando fabricada com o compósito polimérico híbrido carbono/aramida/epóxi, em relação a sua produção em aço SAE 1010.

Tabela 9 – Massa do anteparo de proteção em relação ao material de fabricação

Material	Massa (kg)
Aço SAE 1010	5,74
Laminado	1,76

Fonte: Autor, 2019.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir de todos os dados obtidos, pode-se concluir que:

O processo de fabricação do laminado compósito apresentou uma grande influência nas características dimensionais e funcionais, tendo em vista que o aumento da espessura não está atrelado à quantidade de energia absorvida, e seu incremento confere uma maior probabilidade dos corpos de provas possuírem defeitos, aumentando também a variância dos resultados.

A configuração C foi a que obteve o melhor resultado, configuração que tem primeira camada a $\pm 45^\circ$ e a segunda camada com a fibra de aramida perpendicular ao sentido martelo de impacto. Para a mesma sequência de empilhamento do laminado, a configuração B, com a segunda camada com a fibra de carbono recebendo o impacto, valor obtido no ensaio foi inferior ao do Aço SAE 1010 encontrado por Costa (2019) em seus ensaios, o que tornaria inviável a fabricação do anteparo de proteção com a direção das fibras a $\pm 45^\circ$ na primeira camada, tendo em vista um possível rompimento da correia que conecta as polias pode ocorrer tanto na direção das fibras de carbono, quanto nas fibras de aramida (nas camadas 0/90°).

Dessa forma, visando à substituição do aço SAE 1010 por um material de maior capacidade em absorver energia e com menor densidade, a melhor escolha seria as configurações A e D, que contava com a primeira camada 0°/90°, por apresentar valores superiores tanto na direção da aramida e dentro do limite do desvio padrão na direção da fibra de carbono, novamente comparados aos valores de Costa (2019) para o aço SAE 1010. Demonstrando uma eficiência do resultando, possibilitando a substituição do aço pelo laminado compósito híbrido carbono/aramida, com uma espessura média de 4,3 mm, atendendo o regulamento RATBSB (2018).

Além disso, o laminado híbrido carbono/aramida apresentou uma densidade volumétrica baixa, tornando-se ideal para aplicação no anteparo de proteção do CVT, onde com a fabricação desse material será obtido uma redução em 69,33% de massa em relação ao Aço, diminuindo assim os esforços do veículo para sair da inércia e tempo de frenagem.

REFERÊNCIAS

- ABRATE, S.; WALTON, D. A. Macining of composite materials. Part I; Traditional methods. **Composites Manufacturing**. 3(2), 1992.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3878: **Standard terminology of high-modulus reinforcing fibers and their composites**. 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D256: **Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**. 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D792: **Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement**. 2008.
- BAJA SAE BRASIL – **REGULAMENTO ADMINISTRATIVO E TÉCNICO BAJA SAE BRASIL (RATBSB)** – Emenda 02, 2018. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil/regras>> Acesso em 15 de Mai. 2019
- BATISTA, A. C. M. **Envelhecimento ambiental em compósitos poliméricos à base de tecidos de reforço híbridos**. 2013. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio grande do Norte, 2013.
- BATISTA, A. C. M. **Comportamento Mecânico de compósitos poliméricos híbridos: Estudos experimentais, analíticos e numéricos**. 2017. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio grande do Norte, 2017.
- CALLISTER JR, W. D. **Ciências e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 8.ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2012.
- CANTWELL, M.; MORDEN, G.; RUBATZKY,V.; CHEN, P. **Tests to monitor carro tcracking and breaking susceptibility**. Eucarpia Meeting on Breeding of Carrots, 1991
- COSTA, L. C. A. **Avaliação da resistência ao impacto dos compósitos poliméricos (carbono/aramida) em relação ao aço SAE 1010**. 2019. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Caraúbas, RN, 2019.
- CUPERTINO, L. F. **Modelagem do módulo de Young em nanocompósitos através da inteligência computacional**. 2009. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- DuPont**. Disponível em: <<http://www.dupont.com.br/produtos-e-servicos/tecidos-fibras-e-nao-tecidos/fibras/marcas/kevlar/produtos/fibras-de-kevlar.html>> Acesso em 22 de Agosto de 19.

E-COMPOSITES. Disponível em: <<https://www.e-composites.com.br/categoria/2384530/TECIDOS/>>. Acesso em 22 de Agosto de 19.

FELIPE, R. C. T. S. **Envelhecimento ambiental acelerado em PRF a base de tecidos híbridos kevlar/vidro: propriedades e instabilidade estrutural.** 2012. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2012.

FIBERTEX. Tecendo Tecnologia. Disponível em: <<http://www.fibertex.com.br/Produtos.html>>. Acesso em: 02 Jun. 19

FONTES, R. S. **Compósito Polimérico Híbrido: Comportamento Mecânico, Descontinuidade Geométrica e Resistência Residual.** 2013. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2013.

GAY, Daniel. *Composite Materials: Design and Applications.* United States of America: CRC Press, 2014. 624 p.

LOPES, I. A. F. **Estudo do processo de infusão a vácuo em materiais compósitos.** 2009. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2009.

MARIOTO, V. R.; NEGRETTI, V.. **Estudo histórico e origens do mini baja.** Resumo – Universidade de Taubaté. 9 f. 2018.

MAZARIM, G. C; SALERNO. G. **RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO E RESINA EPÓXI EM COMPARAÇÃO AO AÇO SAE 1010,** 2018. Centro Universitário da FEI, Departamento de Engenharia de Materiais, São Bernardo do Campo, SP, Brasil.

MAZUMAR, S.K. **Composites Manufacturing – Materials, Product and Process Engineering.** CRC Press, 2002.

MEDEIROS, R. J. **Laminado compósito a base de tecido híbrido: anisotropia, furo concêntrico, fratura mecânica e análise por MEF.** 2016. 141 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Natal, RN, 2016.

MOURA, M. F. S.F., MORAIS, A. B, MAGALHÃES, A. G. **Materiais Compósitos: Materiais, Fabricação e Comportamento Mecânico.** Publindústria, 2ed. 2005.

NETO, F. L., PARDINI, L.C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2006.

NOSSA, T. S. **Estudo Comparativo das tensões na interface de compósitos e de resina epóxi reforçados com fibras de carbono, aramida e vidro.** 2011. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Federal de São Carlos, *Campus* Sorocaba, 2011.

OLIVEIRA, J. F. S. **Plásticos reforçados à base de tecidos híbridos: efeito da anisotropia e geometria normativa na caracterização mecânica e da fratura**. 2013. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2013.

PORTAL SAE BRASIL. **Baja SAE Brasil**. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil>>. Acessado em 15 de Mai. 19.

POUZADA, A. S.; BERNARDO, C. A. **Introdução à engenharia dos polímeros**, Área de Engenharia de Polímeros, Universidade do Minho, 1983.

RIBEIRO, K. C. A., **Biocompósitos poliméricos: envelhecimento ambiental, integridade estrutural e processo de reciclagem**. 2012. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2012.

RODRIGUES, L. P. S. **Efeitos do envelhecimento ambiental acelerado em compósitos poliméricos**. 2007. 127 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.

RUBIO, J. C. C. **Usinabilidade de materiais compósitos poliméricos para aplicações automotivas**. Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. Polímeros, vol. 24, n. 6, p. 711-719, 2014. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/html/470/47032912009/>>. Acesso em 18 de Abril de 2019.

Sialex química LTDA. Disponível em <<http://www.silaex.com.br/datasheet/2001e3154.pdf>>. Acesso em 22 de Agosto de 19.

SILVA, L. J. **Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos laminados com fibras vegetais**. 2011. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2011.

SOARES, V. P. **Revestimentos poliméricos condutores à base de resina epóxi**. 2018. VII, 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro/Escola Politécnica. Rio de Janeiro, RJ, 2019.

SOBRINHO, L. L. **Desenvolvimento de matriz polimérica para material compósito visando o reforço de dutos de aço**. 2005. 137 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. 5ª Edição. Editora Edgard Blucher. São Paulo. 1982.

TAFARELLO, I. G. **Processamento de peças em materiais compósitos para o projeto BAJA SAE**. 2013. 56 f. Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.

TECNOLOGIA DE MATERIAIS. Tecnologia de Materiais – Composites, Poliuretano e Plásticos de engenharia. **Quadro comparativa de produtos**. 2015. Disponível em: <<http://www.tecnologiademateriais.com.br/portal/noticias/composites/2015/junho/fibras.html>>. Acesso em 04 de Ago. de 2019.

TECNOLOGIA DE MATERIAIS. Tecnologia de Materiais – Composites, Poliuretano e Plásticos de engenharia. 2013. Disponível em: <http://www.tecnologiademateriais.com.br/mt/2013/cobertura_paineis/automotivo_pecas/apresentacoes/texiglass.pdf>. Acesso em 04 de Ago. de 2019.

ZOLIN, I. Curso técnico em automação industrial: ensaios mecânicos e análises de falhas 3. ed. – Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 102 f. 2010.