

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA SUSTENTABILIDADE  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS - PPGCM

GREGORY AGUILERA LOPES

**MANUFATURA E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE PAINÉIS ESTRUTURAIS  
COMPÓSITOS PARA PROJETOS DE VEÍCULOS DE COMPETIÇÃO**

Sorocaba  
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA SUSTENTABILIDADE  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS - PPGCM

GREGORY AGUILERA LOPES

**MANUFATURA E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE PAINÉIS ESTRUTURAIS  
COMPÓSITOS PARA PROJETOS DE VEÍCULOS DE COMPETIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, para obtenção do título de Mestre em Ciência dos Materiais

Orientação: Profa. Dra. Jane Maria Faulstich de Paiva

Sorocaba  
2023

Aguilera Lopes, Gregory

Manufatura e caracterização mecânica de painéis estruturais compósitos para projetos de veículos de competição / Gregory Aguilera Lopes -- 2023. 92f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba  
Orientador (a): Jane Maria Faulstich de Paiva  
Banca Examinadora: José Ricardo Tarpani, Andréa Oliveira Nunes  
Bibliografia

1. Chassi de compósito de Formula SAE.. 2. Validação de painéis estruturais compósitos.. I. Aguilera Lopes, Gregory. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -  
CRB/8 6979



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade  
Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais

---

### Folha de Aprovação

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Gregory Aguilera Lopes, realizada em 17/03/2023.

#### Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Jane Maria Faulstich de Paiva (UFSCar)

Prof. Dr. José Ricardo Tarpani (USP)

Profa. Dra. Andréa Oliveira Nunes (UFRN)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais.

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico esse estudo como parte de contribuição ao projeto que me fez evoluir muito como pessoa e como profissional, aos meus colegas da equipe de Formula SAE V8 Racing.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço aos meus familiares e colegas que me incentivaram na jornada da pós graduação, em especial à professora orientadora Jane Maria Faulstich de Paiva, com todo o conhecimento e experiência que foi me passado.*

*Aos meus incentivadores e apoiadores profissionais da Facens nessa evolução acadêmica e profissional da minha carreira.*

## RESUMO

AGUILERA LOPES, Gregory. *Manufatura e Caracterização Mecânica de Painéis Estruturais Compósitos para Projetos de Veículos de Competição*. 2023. 092 f. Dissertação de Mestrado (Pós Graduação em Ciência dos Materiais – Universidade Federal de São Carlos, *campus Sorocaba*, Sorocaba, 2023).

Com a evolução do desenvolvimento dos compósitos de alto desempenho, estes têm sido cada vez mais utilizados em componentes de carros de competição, devido a boa relação entre rigidez/massa associada aos altos níveis de risco de segurança do piloto. O chassi do veículo é um importante componente que pode contribuir com até mais da metade do peso total do carro. O chassi feito de compósito de fibra de carbono, conhecido como “monocoque”, atualmente, tem um processo de fabricação (laminação) mais caro que os convencionais feitos de chapa de aço estampadas ou de estrutura tubular, porém suas propriedades mecânicas não são facilmente substituídas por outro material mantendo uma relação de baixa densidade. Em um projeto de competição de equipes de menor orçamento, se faz necessário um estudo de viabilidade da fabricação e manutenção deste componente. Este trabalho envolveu o dimensionamento mais otimizado das placas sanduíche com a quantidade de reforço de tecido de fibras de carbono, com a correta combinação da orientação no empilhamento das camadas, a espessura e tipo de material de núcleo, utilizando-se de um processo de fabricação simples e viável para baixa escala. Neste trabalho, também visou-se combinar materiais para atender as propriedades mecânicas mínimas conforme o regulamento da categoria Formula SAE de 2022, associado ao baixo peso específico e com um processo menos oneroso. O processo de laminação utilizado foi o de bolsa de vácuo, com uso de uma mesa de vidro como “molde” dos painéis sanduíche de compósitos. As propriedades mecânicas dos painéis foram caracterizadas por ensaio de flexão do tipo 3 pontos, ensaio de cisalhamento perimetral, dureza Shore D; e a morfologia da superfície e adesão foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Através dos resultados deste trabalho, gerou-se um modelo preditivo de número de camadas em função da gramatura do tecido e a espessura do núcleo de aramida, com as propriedades mecânicas necessárias para dimensionar cada parte do chassi. Os compósitos laminados desenvolvidos apresentaram potencial para serem aplicados na fabricação de um chassi monocoque de *Formula SAE* com a utilização do processo do método sem molde, com destaque para o laminado com núcleo de espumas de baixa densidade, onde foi possível obter propriedades mecânicas equivalentes aos requisitos estruturais de um chassi tubular em aço.

Palavras-chave: Compósito. Laminados. Bolsa de Vácuo. Fibras de carbono. Aramida.  
Chassi. Espuma de PVC. Sanduíche.

## ABSTRACT

Due to evolution of development high performance composite, these have been increasingly used in racing car components, because the good trade-of between mass/stiffness incorporated to high levels of driver safety risk. The vehicle's chassis is an important part that can provide up to more than half of the car's total weight. The carbon fiber composite chassis, known as “monocoque”, currently has a more expensive manufacturing process than conventional ones made of stamped steel sheet metal or tubular structure, however, its mechanical properties cannot be replaced by another material keeping the same characteristic of low specific weight. At low budget teams, a feasibility study for the manufacture and maintenance of this component is necessary. The target of this project is to design the optimized sandwich panels, with the enough amount of carbon fiber fabric reinforcement, with the correct combination of the direction in the stacking of the layers, the thickness and kind of core material. The objectives involve maintaining the compromise to the combination of materials according to the minimum mechanical properties to comply with the Formula SAE 2022 rules category, associated with low specific weight and a cheaper process. The vacuum bag lamination process was used, using a glass table as a “mold” for the composite sandwich panels. The mechanical properties of the panels were characterized by 3-point bending test, perimeter shear test, Shore D hardness and the surface morphology and adhesion were analysed by Scanning Electron Microscopy (SEM). Through the results of the tests of this project, it is intended to generate a predictive model of the number of layers as a function of the weight of the fabric, and the thickness of the aramid core, with the mechanical properties necessary to dimension each part of the chassis. After the development of this project, it is intended to apply the composites developed in the manufacture of a Formula SAE monocoque chassis using the moldless method process. Highlighting the laminate with a low-density foam core, where it was possible to get mechanical properties equivalent to the structural requirements of a steel space frame chassis.

Keywords: Composite. Laminates. Vacuum Bag, Carbon Fiber. Aramid. Chassis, Sandwich.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– CARACTERÍSTICA ESTRUTURAL DE COMPÓSITOS LAMINADOS SANDUÍCHES.....	14
FIGURA 2	– GRÁFICOS COMPARATIVOS DE MATERIAIS DE NÚCLEO SANDUÍCHE.....	17
FIGURA 3	– EXEMPLOS DE MECANISMOS DE FALHA EM COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS .....	20
FIGURA 4	– COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE UM COMPÓSITO SANDUÍCHE APOIADO .....	22
FIGURA 5	– REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO COM BOLSA DE VÁCUO.....	26
FIGURA 6	– RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ESPECÍFICA CONSIDERANDO DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS.....	27
FIGURA 7	– COMPARAÇÃO ENTRE TECIDO SEM E COM CRIMPAGEM.....	28
FIGURA 8	– CHASSI TUBULAR TEÓRICO DE FORMULA SAE POR CLASSIFICAÇÃO DE TUBOS .....	35
FIGURA 9	– REPRESENTAÇÃO DOS TUBOS DA ESTRUTURA .....	37
FIGURA 10	– CONFIGURAÇÕES DE EMPILHAMENTO: A) CONFIGURAÇÕES PARA TECIDOS UNIDIRECIONAIS E B) CONFIGURAÇÕES PARA TECIDOS BIAXIAIS. ....	41
FIGURA 11	– FOTOGRAFIA DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO POR BOLSA DE VÁCUO ( <i>VACCUM BAG</i> ).....	42
FIGURA 12	– ILUSTRAÇÃO DO TESTE DE FLEXÃO .....	45
FIGURA 13	– FOTOGRAFIAS DA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE FLEXÃO. ....	45
FIGURA 14	– DESENHOS DO CUTELO USINADO NESTE TRABALHO .....	46
FIGURA 15	– DESENHOS DO DISPOSITIVO DE APOIO DE FLEXÃO CONFECCIONADO NESTE TRABALHO.....	46
FIGURA 16	– CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA COMPARAÇÃO DE EQUIVALÊNCIA DO CHASSI TUBULAR.....	48
FIGURA 17	– DESENHO DO PUNÇÃO CONFECCIONADO NESTE TRABALHO.....	49
FIGURA 18	– DESENHOS DA BASE DO CISALHAMENTO PERIMETRAL .....	50
FIGURA 19	– FOTOGRAFIA DO ENSAIO DE CISALHAMENTO PERIMETRAL .....	50
FIGURA 20	– REPRESENTAÇÃO DO GRÁFICO DEFORMAÇÃO X FORÇA .....	51
FIGURA 21	– MEDIÇÃO COM DURÔMETRO SHORE D.....	52
FIGURA 22	– ILUSTRAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO DA DUREZA SHORE D .....	53
FIGURA 23	– FOTOGRAFIA DA REGIÃO ONDE FORAM RETIRADAS AS AMOSTRAS.....	54

FIGURA 24	– GRÁFICO FORÇA X DEFLEXÃO DO TUBO DE AÇO .....	56
FIGURA 25	– FOTOGRAFIA DA FRATURA NO CORPO DE PROVA <i>LAYUP 1</i> .....	56
FIGURA 26	– GRÁFICO FORÇA X DEFLEXÃO DO <i>LAYUP 1</i> .....	57
FIGURA 27	– GRÁFICO FORÇA X DEFLEXÃO DO <i>LAYUP 2</i> .....	57
FIGURA 28	– IMAGEM DA FRATURA NO CORPO DE PROVA DO <i>LAYUP 2</i> .....	57
FIGURA 29	– IMAGEM DE MEV DA FRATURA DO CORPO DE PROVA <i>LAYUP 2</i> .....	59
FIGURA 30	– GRÁFICO FORÇA X DEFLEXÃO DO LAMINADO <i>LAYUP 3</i> .....	60
FIGURA 31	– IMAGEM DA REGIÃO FRATURADA DA AMOSTRA <i>LAYUP 3</i> .....	60
FIGURA 32	– GRÁFICO FORÇA X DEFLEXÃO DO LAMINADO <i>LAYUP 4</i> .....	61
FIGURA 33	– IMAGEM DA FRATURA DA AMOSTRA DO <i>LAYUP 4</i> .....	62
FIGURA 34	– IMAGEM DE MEV DA REGIÃO FRATURADA NA INTERFACE DO LAMINADO .....	63
FIGURA 35	– IMAGEM DE MEV DA REGIÃO FRATURADA NA INTERFACE DA <i>HONEYCOMB</i> .....	63
FIGURA 36	– GRÁFICO FORÇA X DEFLEXÃO DO <i>LAYUP 5</i> .....	64
FIGURA 37	– FOTOGRAFIA DA FRATURA DA AMOSTRA <i>LAYUP 5</i> .....	65
FIGURA 38	– IMAGEM DE MEV DAS FIBRAS DA REGIÃO FRATURADA DO <i>LAYUP 5</i> .....	65
FIGURA 39	– GRÁFICO FORÇA X DEFLEXÃO DO <i>LAYUP 6</i> .....	66
FIGURA 40	– IMAGEM DO CORPO DE PROVA FRATURADO DO <i>LAYUP 6</i> .....	66
	.....	67
FIGURA 41	- IMAGEM DA FRATURA DA AMOSTRA <i>LAYUP 6</i> .....	67
FIGURA 42	– IMAGEM DE MEV DA REGIÃO FRATURADA DO LAMINADO DO <i>LAYUP 6</i> .....	68
FIGURA 43	– IMAGEM DE MEV DA REGIÃO DE INTERFACE NÚCLEO E TECIDO DA REGIÃO FRATURADA .....	68
FIGURA 44	– GRÁFICO DE PESO DA AMOSTRA X FORÇA DE RUPTURA À FLEXÃO.....	69
FIGURA 45	– GRÁFICO FORÇA X DESLOCAMENTO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DO <i>LAYUP 1</i> .....	71
FIGURA 46	– GRÁFICO FORÇA X DESLOCAMENTO DO <i>LAYUP 2</i> .....	72
FIGURA 47	– FACE DE TOPO À DIREITA E FACE INFERIOR À ESQUERDA DA FRATURA <i>LAYUP 2</i> .....	72
FIGURA 48	– GRÁFICO FORÇA X DESLOCAMENTO DO <i>LAYUP 3</i> .....	73
FIGURA 49	– IMAGEM DA FRATURA DO LAMINADO <i>LAYUP 3</i> .....	73
FIGURA 50	– IMAGEM DE MEV DA FRATURA DO CORPO DE PROVA .....	74
FIGURA 51	– GRÁFICO FORÇA X DESLOCAMENTO DO LAMINADO <i>LAYUP 4</i> .....	75

<b>FIGURA 52</b>	<b>– GRÁFICO FORÇA X DESLOCAMENTO DO LAMINADO <i>LAYUP 5</i> .....</b>	<b>75</b>
<b>FIGURA 53</b>	<b>– FOTOGRAFIAS DA AMOSTRA <i>LAYUP 5</i> FRATURADA.....</b>	<b>76</b>
<b>FIGURA 54</b>	<b>– IMAGEM DE MEV DAS FIBRAS FRATURADAS POR CISALHAMENTO DO <i>LAYUP 5</i> .....</b>	<b>76</b>
<b>FIGURA 55</b>	<b>– GRÁFICO FORÇA X DESLOCAMENTO DO LAMINADO <i>LAYUP 6</i> .....</b>	<b>77</b>
<b>FIGURA 56</b>	<b>– FOTOGRAFIAS DA AMOSTRA <i>LAYUP 6</i> FRATURADA.....</b>	<b>77</b>
<b>FIGURA 57</b>	<b>– IMAGEM DE MEV DA REGIÃO DA FRATURA DE CISALHAMENTO DO <i>LAYUP 6</i> .....</b>	<b>78</b>

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

BSE - Elétrons Retroespalhados

CAD – Computer Aided Design

CRFC - Carbono Reforçado com Fibras de Carbono

DGEBA - Diglicidil éter do bisfenol-A

FIA - Federação Internacional do Automobilismo

EDS - Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

SAE - Society of Automotive Engineers

SES - Structural Equivalency Spreadsheet

PVC – Policloreto de vinila

Tg - Temperatura de Transição Vítrea

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>12</b>
2.1	PAINÉIS SANDUÍCHE.....	13
2.2	TIPOS DE MATERIAL DE NÚCLEO.....	15
2.3	COMPÓSITOS COM NÚCLEO DE ARAMIDA .....	17
2.4	COMPÓSITOS COM NÚCLEO DE PVC .....	18
2.5	PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS SANDUÍCHES .....	19
2.6	MOLDAGEM POR LAMINAÇÃO COM BOLSA DE VÁCUO.....	23
2.7	FIBRAS DE CARBONO .....	26
2.8	ADESIVO .....	29
2.9	RESINA EPÓXI.....	29
2.10	MECANISMO DE CURA .....	31
2.11	APLICAÇÃO DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS EM CHASSI.....	32
2.12	FÓRMULA SAE.....	34
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA/MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>39</b>
3.1	MATERIAIS .....	39
3.1.1	SELEÇÃO DOS MATERIAIS .....	39
3.1.2	OBTENÇÃO DAS PLACAS SANDUÍCHE.....	41
3.1.3	NOMENCLATURA E IDENTIFICAÇÃO DOS LAMINADOS .....	43
3.2	ENSAIOS MECÂNICOS.....	44
3.2.1	ENSAIO DE FLEXÃO .....	44
3.2.2	ENSAIO DE CISALHAMENTO PERIMETRAL.....	49
3.2.3	ENSAIO DE DUREZA SHORE D .....	52
3.2.4	ANÁLISES DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	53
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>55</b>
4.1.	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS PAINÉIS.....	55
4.2.	RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO .....	55
4.3.	RESULTADOS DE DUREZA SHORE D .....	69
4.4.	EQUIVALÊNCIAS.....	70
4.5.	RESULTADOS DO ENSAIO DE CISALHAMENTO.....	71
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>80</b>
5.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	80

## 1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos têm uma excelente aplicação em projetos que demandam alta eficiência estrutural, muito utilizados em satélites, aeronaves, helicópteros e veículos de competição. A capacidade de combinação de propriedades entre matriz e reforço nos compósitos permitem um bom dimensionamento para se atingir os requisitos de engenharia do projeto. De acordo com Trzepieciński *et al.* (2021), nos últimos anos, os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras contínuas tornaram-se um dos materiais mais promissores em muitos setores da engenharia, especialmente nas indústrias automotiva e aeroespacial. Por exemplo, na aeronave Airbus A350 53% do seu peso total corresponde à peças fabricadas em material compósito.

O compósito de carbono reforçado com fibras de carbono (CRFC) combina bom desempenho estrutural com baixa densidade e boa resistência à corrosão. Características estas que se aplicam bem aos chassis de veículos de competição. Um monocoque feito de CRFC é muito comum em carros de corrida e a combinação de camadas de reforço e material de núcleo sempre são confidenciais (KANKETR, 2014).

Usualmente é utilizada a combinação de Carbono/Epóxi em veículos do tipo Fórmula, que possuem uma célula de sobrevivência no habitáculo do piloto. No caso com a utilização de uma correta orientação do reforço, é possível se obter bom desempenho na absorção de alta energia cinética durante um impacto em alta velocidade.

Algumas categorias, por estratégia de melhor manutenção e custo, podem combinar no mesmo chassis uma parte em compósito e uma parte em metal, conhecido como um chassi híbrido (KANKETR, 2014).

Pode-se fabricar um chassi de compósito através de dois tipos diferentes de processos, com molde ou sem molde. No processo com molde, podemos ter um molde com a geometria interna ou externa da peça, neste processo está inerente a fabricação de um molde sólido e rígido o suficiente para fabricar ao menos uma peça, onde este tem a maior parte do custo de todo processo de fabricação. Em uma equipe com baixo volume de fabricação de chassis a partir do mesmo molde, torna o processo caro.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e caracterizar amostras de placas laminadas em um processo de fabricação sem molde, buscando se atender aos requisitos de uma determinada categoria de competição automobilística, que permite a utilização de chassi, feitos em compósitos, o chassi monocoque.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O desenvolvimento de novos materiais compósitos vem crescendo ao decorrer dos anos, pois permite uma alta gama de diversificação e estudo de novas combinações entre matriz e reforço.

De acordo com Lubin (1982) o compósito é definido como um material criado e moldado sinteticamente de dois ou mais componentes selecionados, constituído de um agente de reforço e uma matriz compatível, a fim de se obter propriedades e características específicas. Gay (1991) define como materiais contendo fibras fortes, contínuas ou não, incorporados em um material mais fraco ou matriz. A matriz mantém o arranjo geométrico das fibras e transmite as cargas que agem no material. O material compósito resultante tem um desempenho mecânico intermediário, superior ao da matriz, mas inferior ao do reforço de fibra.

A partir deste conceito é possível se maximizar características desejáveis e minimizar as indesejáveis, produzindo um material mais eficiente.

Os compósitos são amplamente utilizados em aplicações de alta resistência mecânica aliado a baixa massa específica e baixa corrosão. Permite um fácil dimensionamento com número de camadas e espessura do núcleo.

As propriedades específicas dos compósitos dependem das propriedades do material de matriz e reforço individualmente e de sua compatibilidade interfacial.

O comprimento das fibras contínuas em um compósito também é fundamental para seu comportamento mecânico, pois as fibras têm propriedades melhores ao longo do comprimento em comparação com a largura. Isso resulta em propriedades anisotrópicas dos compósitos, portanto é fundamental conhecer os caminhos de carga e intensidade em um projeto de compósito para o seu correto dimensionamento (GURIT, 2017).

De acordo com Neto e Pardini (2016), os materiais compósitos apresentam um grau de complexidade maior que os metálicos, que apresentam propriedades e processo de fabricação bem definidos. As propriedades dos compósitos são influenciadas por um número significativo de fatores e variáveis. Materiais compósitos poliméricos que requerem excelente desempenho mecânico, utilizados em aeronaves, carros de competição, barcos e etc, são conhecidos como compósitos avançados.

## 2.1 PAINÉIS SANDUÍCHE

Estruturas de painéis sanduíche estão sendo amplamente utilizadas em uma variedade de aplicações com solicitações estruturais, nas indústrias aeroespacial, civil e marítima, devido à sua alta resistência específica e rigidez à flexão (NARESH *et al.*, 2021).

Um painel sanduíche estrutural é composto de duas camadas externas (revestimentos), que são relativamente finas e de alta resistência, que revestem um núcleo relativamente espesso e leve que possui rigidez adequada na direção normal às faces do sanduíche (DAVIES, 2001).

As estruturas de painéis sanduíche de compósito são muito utilizadas em aplicações que requerem peças em formato de placa com alta rigidez, resistência à flexão e baixo peso específico. Os painéis sanduíche são muito utilizados na indústria aeronáutica, pois nela o projeto estrutural de uma aeronave analisa criteriosamente o peso da estrutura e também devido a algumas características como o isolamento térmico e acústico. Há alguns anos, este tipo de painel também tem sido utilizado em outros segmentos, como construção civil. Outro fator importante nessas considerações é que a crescente falta de matéria-prima e o rápido esgotamento das fontes de energia convencional aumentam a necessidade de estruturas leves, eficientes e de baixo custo (GAGLIARDO e MASCIA, 2010).

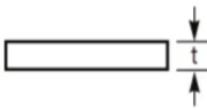
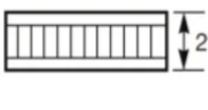
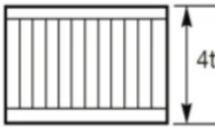
A escolha dos materiais constituintes do sanduíche é vasta. Até mesmo o número de núcleos disponíveis aumentou nos últimos anos. Assim, a seleção dos materiais é um tanto quanto crítica no projeto de estruturas sanduíche quanto a questão do dimensionamento. O grande número de opções de materiais pode parecer uma complexidade adicional, mas é realmente uma das principais características do uso de construções em sanduíche; os materiais mais adequados para uma aplicação específica podem ser utilizados e alguns inconvenientes podem ser superados por dimensionamento geométrico. As propriedades dos materiais geralmente possuem uma dispersão grande, especialmente dados para compósitos de fibra, pois são muito dependentes do processo de fabricação e do método de teste usado (ZENKERT, 1995).

Este tipo de estrutura apresenta adequadas características em transferência de cargas de flexão e compressão. Por este motivo também são muito utilizados em fuselagens e chassis de veículos de competição, onde o chassi pode ser considerado uma célula de sobrevivência do piloto. Assim, os possíveis impactos frontais ou laterais devem se deformar de maneira a dissipar o máximo da energia cinética sem causar piores danos ao condutor.

O laminado sanduíche tem uma correlação exponencial entre espessura do núcleo e resistência e rigidez resultante. Os compósitos sanduíche se comportam de maneira análoga aos conceitos de viga I, onde a parte de cima e a de baixo da seção, suportam a maior parte da carga da estrutura e o núcleo simplesmente os segura com uma distância fixa para que possa suportar de forma eficaz (WANBERG, 2010).

Quanto maior a distância entre o topo e a parte inferior da seção, mais rígido o compósito se torna (Figura 1). Por exemplo, comparando-se um laminado com 4 camadas e separando as duas metades por um núcleo da mesma espessura do laminado original, obteremos 7 vezes mais rigidez e 3,5 vezes mais resistência. Com o núcleo de espessura igual ao dobro do original, obtemos 37 vezes mais rigidez e 9,25 vezes mais resistência, com um relativo pequeno aumento de massa.

FIGURA 1 – Característica Estrutural de Compósitos Laminados Sanduíches

	Placa Metálica	Construção Sanduíche	Sanduíche Espesso
			
Rigidez Relativa	100	700 7 vezes mais rígido	3700 37 vezes mais rígido
Resistência Relativa	100	350 3,5 vezes mais forte	925 9,25 vezes mais forte
Peso Relativo	100	103 3% aumento de peso	106 6% aumento de peso

Fonte: SAE International (2013)

Em aplicações de *crashworthiness* (o grau de proteção do veículo aos ocupantes sob efeito de impacto), se o painel sanduíche for projetado para ser comprimido de forma plana, o núcleo desempenha um papel crucial na absorção de energia quando comparado com as faces do laminado (TARLOCHAN, 2021). Segundo Patil (2010), um material tem boa resistência a *crashworthiness* se tiver alta absorção de energia ao impacto. A energia específica de absorção (EEA), é dada pela energia que é absorvida pela estrutura por flambagem dividida pelo produto do volume do material pela sua densidade. O valor de EEA para o alumínio é cerca de 25 KJ/kg

e para o aço 35KJ/kg. Para compósitos contendo Fibras de Vidro/Epóxi é de 75 KJ/kg e compósitos contendo Fibras de Carbono/Epóxi é de 125KJ/kg. Isso comprova que uma estrutura construída em compósito é de 6 a 8 vezes mais segura do que uma estrutura de materiais metálicos.

De acordo com Savage (2010), a fragilidade inerente dos compósitos gera uma dissipação de energia com maior progressividade durante a falha, garantindo que não sofra o processo de escoamento característico dos metais dúcteis, que quando sob a aplicação de carga, deformam-se elasticamente até o ponto de fratura. Diversos modos de deformação ocorrem para materiais compósitos multifásicos complexos, diferentes dos materiais metálicos onde apresentam um pico de força inicial durante uma fratura por impacto, depois se atenua conforme a energia é dissipada no corpo gerando deformações plásticas.

## 2.2 TIPOS DE MATERIAL DE NÚCLEO

A principal função de um núcleo em estruturas sanduíche é estabilizar os revestimentos e transportar a maior parte das cargas de cisalhamento através da espessura. A fim de realizar este trabalho de forma eficiente, o núcleo deve ser o mais rígido e leve possível, além de fornecer propriedades uniformemente previsíveis no ambiente no qual a peça acabada deve ser aplicada (LUBIN, 1982).

Dependendo da aplicação, muitos materiais podem ser utilizados como núcleo, os polímeros e metais leves exercem bem esta função. A aplicação de painéis de compósitos em locais que exigem alta rigidez com pouca massa, são muito utilizados os materiais de núcleo em estrutura de células hexagonais, triangulares ou quadradas perpendiculares à face de adesão do tecido, formato este que remete ao formato dos favos de mel das colmeias de abelha. Nesta configuração de “favos de mel” ou “colmeia” são encontrados materiais como aramida e alumínio, muito utilizados em estruturas de carros de corrida (MCBEATH, 2016).

Alguns outros pontos a serem levados em conta no projeto de sanduíche estrutural, são os seguintes: temperatura de trabalho, moldabilidade, inflamabilidade, hidroscofia, resistência a impacto e etc.

De acordo com McBeath (2016), a colmeia de alumínio tem uma das melhores relações entre resistência e peso. A maleabilidade do alumínio depende da circunstância de uso, por não ter uma propriedade elástica, um pequeno impacto pode causar uma deformação permanente, podendo criar regiões aparentemente intactas onde as camadas laminadas, apresentam

delaminação em relação ao núcleo, deixando sem um suporte de apoio e reduzindo a resistência e a rigidez. Por outro lado, é uma excelente escolha para absorção de impacto.

O alumínio tem excelentes propriedades mecânicas de compressão ao cisalhamento e é mais rígido que aramida, no entanto ele é mais pesado e perde em relação à resistência a impacto e fadiga, além disto, está sujeito à oxidação (NASSEH, 2007).

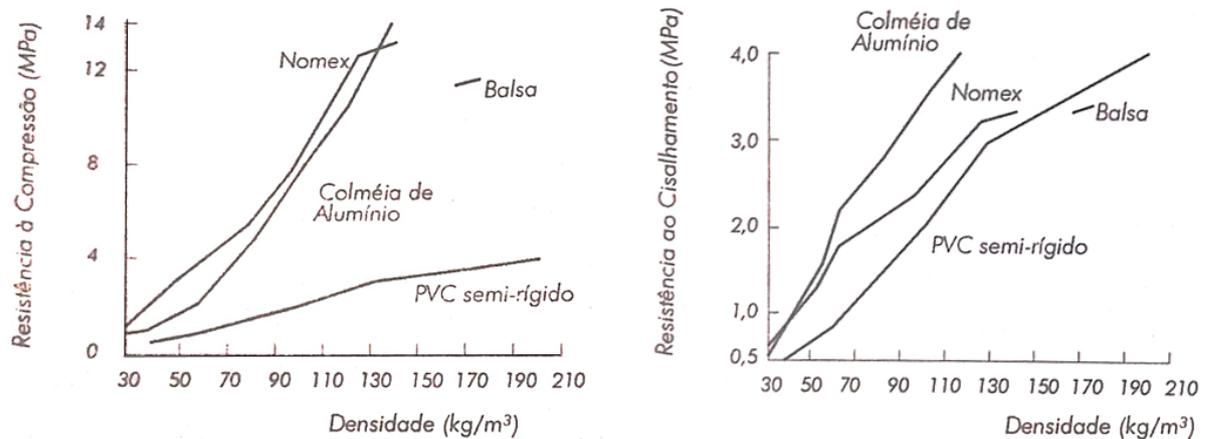
A colmeia de aramida tem uma relação peso/resistência melhor que um alumínio de grau comercial. Em geral, este tipo de colmeia apresenta baixa densidade, possui boa estabilidade, boa resistência a chama, melhor resistência a fadiga, trabalha bem em altas temperaturas. No entanto, a colmeia de aramida tem menos rigidez específica que a colmeia de alumínio (MCBEATH, 2016).

As espumas de materiais poliméricos sintéticos são amplamente utilizadas como materiais de núcleo, devido à baixa densidade e boas propriedades mecânicas, podendo ser de Policloreto de Vinila (PVC), Poliestireno (PS), Poliuretano (PU), Polieterimida (PEI) e Estireno Acrilonitrilo (SAN). Estes materiais podem ter densidades de  $30\text{kg/m}^3$  até mais de  $300\text{kg/m}^3$ , e encontram-se em placas de espessuras de 5mm a 50mm (GURIT, 2017).

As espumas poliméricas possuem um custo razoavelmente inferior aos demais tipos de material de núcleo e têm uma maior disponibilidade comercial nacional devido a sua grande utilização na indústria eólica e naval.

Na Figura 2 estão apresentados gráficos comparativos de alguns materiais que, geralmente, são utilizados em núcleo de painéis sanduíche. De acordo com a Figura 2, pode ser observado que tanto *Nomex* (aramida) quanto a colmeia de alumínio apresentam boas relações entre baixa densidade e alta resistência; entretanto, a colmeia de alumínio apresenta certa vantagem na propriedade de resistência ao cisalhamento. Já a espuma de PVC, possui resistência ao cisalhamento pouco inferior aos materiais *honeycomb*, mas perde substancialmente quando comparamos suas características mecânicas de resistência à compressão.

FIGURA 2 – Gráficos Comparativos de Materiais de Núcleo Sanduíche



Fonte: Nasseh (2011)

### 2.3 COMPÓSITOS COM NÚCLEO DE ARAMIDA

O núcleo em colmeia (*honeycomb*) de aramida, é um núcleo oco e leve, possui estrutura com um grande número de células hexagonais dispostas bidimensionalmente em uma seção plana. Devido à baixa densidade, resistência à chama, resistência à corrosão, estabilidade térmica e excelente eficiência estrutural, a colmeia de aramida tem sido amplamente utilizada como um material estrutural leve em aeronaves, trens de alta velocidade, navios e em muitos outros setores (SUN, *et al.*, 2021).

A *honeycomb* de aramida comercial utilizada é fabricada a partir de papel de fibras de meta-aramida (conhecido como *Nomex*®) e revestido com resina fenólica resistência com temperatura máxima de operação próximo a 150°C. Algumas características das propriedades deste material são: boa relação de resistência/peso, resistência a corrosão, alta tenacidade, boa moldabilidade e alta compatibilidade com resina epóxi. As densidades mais usuais das colmeias do tipo *Nomex* são 32, 48, 64 e 96 kg/m<sup>3</sup> com células hexagonais, que podem ter as seguintes dimensões: 1/8, 1/16 e ¼ de polegadas (NASSEH 2007).

A limitação de resistência da construção em sanduíche, de acordo com Wanberg (2012), é dada pela resistência à compressão do núcleo, sua ligação adesiva às camadas laminadas e a própria resistência do laminado. Um núcleo espesso com alta resistência à compressão evitará que o laminado se deforme no núcleo, minimizando a flexão. Uma boa conexão adesiva entre o núcleo e o laminado fortalecerá ainda mais a estrutura de flexão, evitando a separação do laminado do núcleo. A resistência direcional das faces laminadas de fibras na construção em

sanduíche também pode ser utilizada de forma mais eficiente, dando à construção em sanduíche maior resistência e rigidez contra cargas de flexão.

Nasseh (2007) recomenda que a resina no processo de colagem deve ser capaz de molhar as paredes das células da colmeia rapidamente, além de possuir um fluxo controlado para que ela não escorra para o interior das células ocasionando uma colagem fraca sem resina na superfície da interface. Para o uso em colmeia, o adesivo ou a resina de laminação devem ter viscosidade mais elevada para ser consistente com o tempo de impregnação das camadas internas e possuir um curto tempo de gel .

## 2.4 COMPÓSITOS COM NÚCLEO DE PVC

As espumas de policloreto de vinila, conhecidas popularmente como espumas de PVC são matrizes poliméricas muito utilizadas como material de núcleo para construção de barcos, e existem diversas densidades com variações nas suas propriedades mecânicas.

Em comparação com materiais colmeia, a partir do núcleo de PVC também se obtém sanduíches estruturais de alta performance, porém ele tem uma densidade relativamente maior, contudo, é mais barato e de maior oferta no mercado nacional (MEDEIROS, 2018).

De acordo com Nasseh (2007), alguns tipos de espuma PVC oferecem um desempenho estrutural muito próximo aos materiais *honeycomb*, com a facilidade de ser uma estrutura macroscopicamente sólida de células fechadas, o que facilita no processo de laminação, pois pode ser feito diretamente sobre sua superfície. Muitas espumas de PVC também são utilizadas no processo de infusão, pois permitem que a resina tenha uma boa permeabilidade e não incorpore peso na estrutura.

As espumas de PVC variam suas séries entre: a série HCP, muito utilizada em situações de grande compressão como alguns minissubmarinos, a série HD, que são semirrígidas e foram criadas para suportar grandes deformações sem reduzir sua resistência à temperatura e produtos químicos, HP e HT que podem suportar até uma temperatura de 160°C e 180°C, respectivamente, e a série de espuma do tipo H, que pode ser fabricada variando a densidade de 45 a 250 kg/m<sup>3</sup>, e com variação de suas espessuras de 3 até 75mm. Esta seleção de espumas de PVC conhecidas como semirrígidas, possuem uma alta resistência química, resistências à compressão, ao cisalhamento e trabalha em uma faixa ampla de temperatura (entre -200°C e 84°C) (NASSEH, 2007).

## 2.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS SANDUÍCHES

Conforme a SAE International (2013) as propriedades mecânicas dos compósitos sanduíche são determinadas pelas seguintes causas.

- Resistência à Flexão, determinada pela espessura e resistência de tração/compressão das placas que estão separando o núcleo.
- Rigidez à Flexão, determinada pela espessura e módulo de rigidez à tração/compressão das placas que separam o núcleo.
- Resistência ao cisalhamento fora do plano, determinada pela espessura e resistência ao cisalhamento do núcleo.
- Rigidez ao cisalhamento fora do plano, determinada pela espessura e o módulo de rigidez ao cisalhamento do núcleo.

O comportamento sob cisalhamento interlaminar é uma importante característica do compósito que pode ser medida através dos resultados de resistência em ensaios mecânicos. De acordo com Costa (2002), o ensaio de cisalhamento interlaminar realizado em amostras de diferentes porosidades, confirma que o maior número de vazios tem relação direta com a menor resistência mecânica.

A resistência ao cisalhamento interlaminar é uma propriedade que depende muito da performance da resina e, por sua vez, da sua resistência mecânica e poder de adesão. A resistência ao cisalhamento interlaminar é a medida de quanto a resina adere às camadas de reforços adjacentes (NASSEH, 2007).

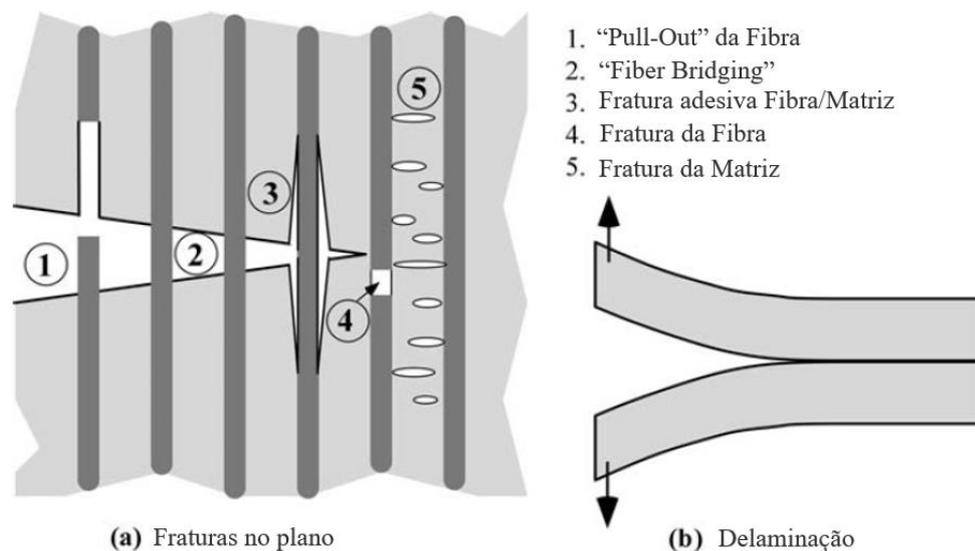
Huang et al (2021) descreve que a interface é a região limite entre a matriz e a fibra, região a qual a carga pode ser transferida com base em uma deformação compatível. Se a interface falhar prematuramente, a deformação da matriz não é compatível com a da fibra, o que faz com que a carga do componente matricial (matriz) não seja transferida para o reforço (fibra). Portanto, a compatibilidade de resistência na interface é essencial para materiais CRFC.

De acordo com Anderson (2005), os mecanismos de falha na interface podem ser ilustrados conforme a Figura 3, onde está demonstrada a propagação de uma trinca em um compósito laminar sob tração. Nota-se que caso haja uma forte interação fibra-matriz, haverá provavelmente o rompimento da fibra que acarretará em seguida no mecanismo de "*Pull-Out*" como evidencia (mecanismo 1). Tal mecanismo caracteriza-se pelo arrancamento da fibra de dentro da matriz que geralmente ocorre após a propagação de uma fissura.

Antes da ocorrência do "Pull-Out" pode haver a formação do mecanismo de "Fiber Bridging" (mecanismo 2), desde que o compósito possua fibras frágeis de alta resistência, matrizes dúcteis e interface forte. Sendo assim, a trinca se propaga pela matriz e a fibra forma uma ponte interligando as duas superfícies da matriz fraturada. Por outro lado, a fronteira da trinca dá origem a regiões com concentração de tensão, até mesmo fora do plano de propagação.

Caso a interface não seja suficientemente forte, ocorrerá "Fratura Adesiva" entre a fibra e matriz (mecanismo 3). Dessa forma, a trinca continuará se propagando sem romper a fibra, no entanto, caso a próxima fibra seja muito frágil ocorrerá a "Fratura da Fibra" (mecanismo 4) e, em seguida, a "Danificação da Matriz" (mecanismo 5). Já tensões de tração fora do plano podem causar falhas entre as camadas, a Delaminação, como ilustra a Figura 3(b).

FIGURA 3 – Exemplos de mecanismos de falha em compósitos reforçados com fibras



Fonte: Anderson (2005)

A diferença de propriedades mecânicas dos materiais de matriz e reforço pode gerar grandes tensões cisalhantes na interface dos materiais, gerando assim falhas por delaminações. Segundo Cunha *et al.* (2017), as fraturas podem ser do tipo coesiva, podendo ter como característica uma fratura angular na ponta da fibra e adesiva, onde há uma desaderência ou descolamento na interface fibra e matriz. A delaminação é definida como a separação entre as camadas internas do compósito, sendo esta evidenciada pela presença de uma abertura.

A abertura é formada entre duas camadas no plano do laminado. Pode-se encontrar esse modo de falha facilmente onde a tensão de cisalhamento entre as camadas é alta e, geralmente,

sem material de reforço na camada. Embora a delaminação possa começar em qualquer lugar em um compósito, as bordas de uma camada ou laminado são particularmente vulneráveis. Quando duas camadas têm valores de rigidez muito diferentes (ou sua maior rigidez está em duas direções diferentes, por exemplo), o laminado será mais sensível à delaminação. Este é basicamente o caso dos materiais sanduíche, onde geralmente há uma grande diferença na rigidez entre o núcleo e as camadas. Se a camada de um sanduíche se soltar do núcleo, isso é considerado descolamento (NIJSSEN, 2015).

A falha adesiva é a falha interfacial entre o adesivo em um dos aderentes e tende a indicar a existência de uma fraca interface adesivo/ aderente , frequentemente advinda de uma preparação imprópria. A falha coesiva, por sua vez, ocorre quando a fratura resulta numa camada de adesivo que permanece unida em ambas as superfícies dos aderentes, ou mais raramente, quando o aderente falha antes do adesivo, com a fratura totalmente contida no aderente. Este último mecanismo é conhecido como falha coesiva do aderente (BUENO, 2002).

Pode-se evitar a fratura adesiva garantindo a rugosidade superficial correta, pois ela fornece uma superfície de contato maior. Já a rugosidade em excesso causa bolhas de ar (vazios). A falha adesiva pode ser evitada quando a região de interface for porosa, devido ao efeito de ancoragem do adesivo nos poros (NIJSSEN, 2015).

De acordo com Davies (2001) a adesão entre núcleo e tecido tem grande importância gerando força de cisalhamento e prevenindo o escorregamento entre os materiais quando submetido a forças axiais. O núcleo precisa ter módulo de cisalhamento suficiente para não sofrer deformação por falta de rigidez.

Com a face superior do sanduíche em compressão, uma função importante da adesão entre os materiais é restringir a deformação da face superior para não sofrer flambagem. A flambagem é um fenômeno também conhecido como “enrugamento”. Esta falha depende principalmente das propriedades de rigidez do núcleo.

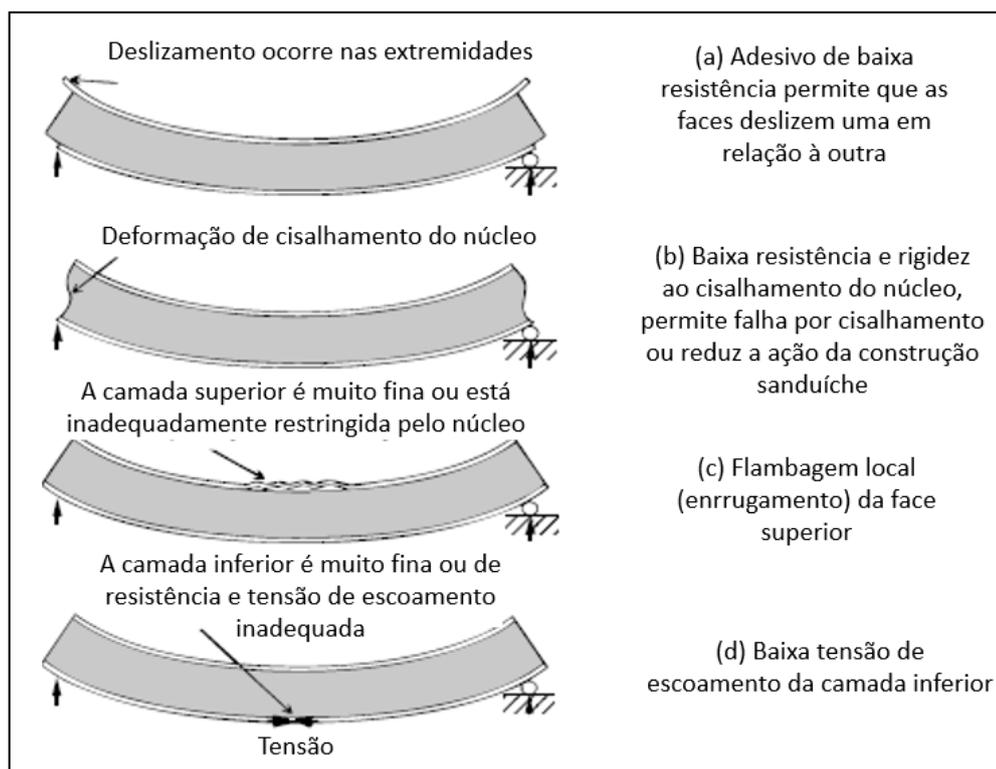
O modo de falha relacionado ao escoamento por tração da face inferior do sanduíche é menos provável, porém ocorre quando a tensão do material da face inferior chega no limite de escoamento (DAVIES, 2001).

Uma função essencial do material de núcleo e sua cola adesiva é evitar que a face superior deslize em relação à face inferior. A figura 4 (a) indica o deslizamento causado pelo uso de um adesivo com resistência ao cisalhamento muito baixo, enquanto a Figura 4 (b) ilustra as consequências do uso de um material de núcleo com resistência ao cisalhamento ou rigidez insuficientes (DAVIES, 2001).

Como a face superior do painel está em compressão, outra função importante do material de núcleo é a cola adesiva conter a face superior para que não sofra flambagem na região da compressão fenômeno geralmente denominado de “enrugamento”. Este comportamento é ilustrado na Figura 4 (c) A tensão na qual ocorre a falha por enrugamento depende principalmente das propriedades de rigidez do núcleo e esta é outra razão pela qual as propriedades mecânicas do núcleo desempenham um papel importante no projeto estrutural. O modo de falha, que é mostrado na Figura 4 (d), é o escoamento por tração da face inferior. Este é geralmente o menos provável dos modos alternativos mostrados na Figura 4.

Para o projeto estrutural de um painel sanduíche, é necessário considerar todos esses modos de falha potenciais.

FIGURA 4 – Comportamento Estrutural de um Compósito Sanduíche Apoiado



Fonte: Davies (2001)

O projeto de sanduíches multicamada, assim como os sanduíches duplos, permitem superar o modo de falha frágil. Em princípio, estruturas multicamadas podem transferir carga progressivamente e retardar a propagação de trincas e o esmagamento de um único núcleo (NARESH *et al.*, 2021).

No compósito estrutural é muito importante mitigar os defeitos de fabricação que comprometem a resistência do laminado, e um dos defeitos mais impactantes em suas propriedades mecânicas são os vazios. Segundo Wanberg (2012), os vazios podem ser causados pelo ar que se mistura na resina durante o processo de moldagem, pela pouca resina entre as fibras e as camadas de tecido ou por pouca pressão na fabricação do compósito. A porosidade é um conjunto de vazios em determinado material.

Os ensaios mecânicos têm um papel significativo tanto no projeto quanto no controle de qualidade dos laminados. Principalmente devido a variabilidade das propriedades dos materiais, vários parâmetros que aparecem em equações só podem ser determinados de maneira confiável com base em um número significativo de testes (DAVIES, 2001).

## 2.6 MOLDAGEM POR LAMINAÇÃO COM BOLSA DE VÁCUO

Idealmente para a moldagem das placas se utiliza tecido pré-impregnado (*prepreg*), porém este material não é de boa comercialização nacional e em baixas escalas de produção se torna inviável a aquisição dele.

Quando se utiliza o processo de infusão a vácuo a junta adesiva é formada por uma quantidade de resina líquida que consolida as faces e o núcleo durante a injeção da matriz. Essa quantidade de resina varia em função da natureza do núcleo, do tamanho das células de sua microestrutura e de sua densidade. O núcleo *honeycomb* que possui células abertas têm seu volume vazio preenchido por resina durante o processo de infusão, resultando num peso excessivo da peça final (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

O processo mais recomendado para a fabricação de placas sanduíche em baixa escala seria o de laminação manual com bolsa de vácuo, que é capaz de conferir ao compósito boa resistência mecânica e bom acabamento. Em comparação com o processo de laminação manual, a placa final apresenta mais homogeneidade na quantidade de resina na placa toda, diminui os espaços vazios e compacta melhor o sanduíche, conferindo melhor adesão entre as camadas e núcleo, resultando num compósito mais resistente.

De acordo com Zenkert (1995), a reticulação da matriz bem-sucedida normalmente requer um controle preciso da temperatura e pressão do compósito em função do tempo. A reticulação mais simples pode ser feita com resinas para trabalho em condições ambiente, ou seja, temperatura ambiente e nenhuma pressão aplicada externamente. As resinas que começam a ligação cruzada à temperatura ambiente e à medida que aquecem o processo de reticulação

exotérmica progride, alimentando ainda mais a reação, que é suficiente para garantir a reticulação adequada. No entanto, muitas resinas requerem uma temperatura elevada para o início da reticulação e, muitas vezes, também requerem que uma relação temperatura e tempo específico seja seguida ao longo da reticulação. Mesmo com os requisitos específicos de temperatura para a reticulação adequada da resina, é improvável que a qualidade do laminado seja muito boa, a menos que uma pressão aplicada externamente seja usada para compactar o laminado enquanto ele endurece, ou seja, até que a ligação cruzada esteja praticamente completa. Além disso, o vácuo é muitas vezes usado para minimizar os vazios.

A utilização de laminação com bolsa de vácuo utiliza a pressão atmosférica para compactar o compósito durante o processo de polimerização da resina. Com a aplicação de vácuo nos laminados se obtém uma compactação uniforme das camadas e simultaneamente extrai-se voláteis, solvente e umidade, evitando a formação de porosidades ou vazios, e remove-se o excesso de resina para evitar a presença de bolsas de resina pura (CÂNDIDO, *et al.* 2000).

Em comparação com o método de laminação manual, Vison e Sierakowski (2002) afirmam que o método a vácuo proporciona maior concentração de reforço e melhor adesão entre as camadas.

Componentes de automóveis F1 relativamente complicados só podem ser operados manualmente. Quando as primeiras duas ou três camadas são colocadas, é necessário garantir que elas estejam compactadas e firmemente presas à superfície do molde. Esse processo é chamado de “combinação”, realizado usando plástico de vácuo cuidadosamente cortado e colocando as peças de trabalho em autoclave com vácuo e temperatura média. Uma camada de fibra polimérica semelhante ao algodão e lã é colocada entre a camada externa de material pré-embestado e plástico de vácuo, que pode remover as bolhas através da exaustão de ar. Quando todas as camadas são colocadas e combinadas, as peças são seladas no plástico de vácuo (YIN; LANG e ZHAO 2013).

De acordo com Wanberg (2010), o vácuo remove o ar dentro do compósito e também na interface com o molde. Os vazios em uma matriz de resina criam pontos de menor resistência mecânica, a partir dos quais fraturas podem se formar e causar delaminação falhando o compósito.

O plástico de vácuo usa a pressão atmosférica para fechar e manter o laminado junto. O laminado é selado por um envelope hermético, e pode ser selado no próprio molde (WEST SYSTEM, 2010).

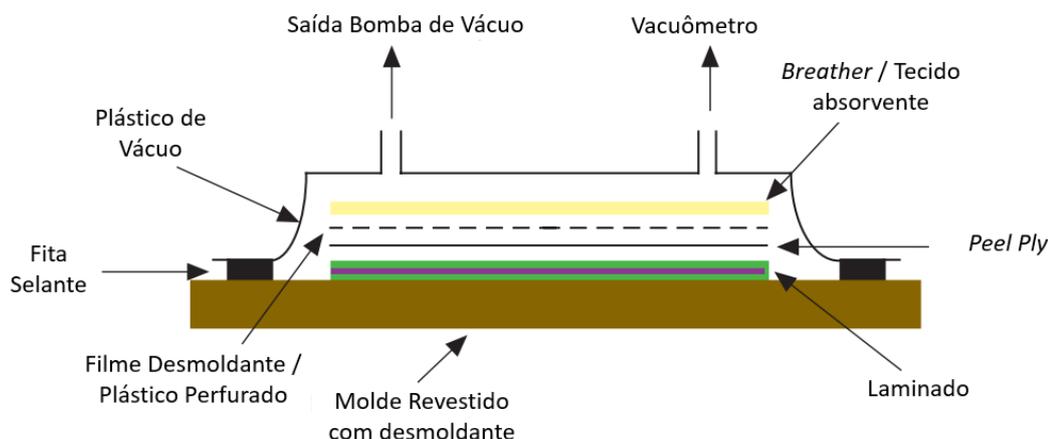
Através deste processo pode ser feita a colagem do reforço diretamente no material de núcleo das placas sanduíche. Para iniciar o processo, Nasseh (2011), recomenda que se aplique desmoldante sobre o molde, ou sobre a superfície da mesa que será utilizada de molde, assim facilitando a remoção do compósito do molde e dos materiais descartáveis.

Em seguida, impregnar manualmente o tecido de reforço com resina, podendo se utilizar trincha ou rolinho para aplicação e fazer a compactação manual entre camadas e material de núcleo. Depois são adicionadas algumas tiras de um tecido de poliamida conhecido como “*peel ply*”, posicionado em contato direto no laminado.

O *Peel ply* é um tecido liso e macio que não adere à resina e tem a função de separar o laminado dos demais materiais que serão posicionados na sequência (WEST SYSTEM, 2010). Acima do *peel ply* é colocada uma camada de um filme perfurado, usado para deixar passar o excesso de resina, já que se utiliza neste processo uma quantidade de resina pouco maior que a necessária para facilitar a impregnação inicial, depois é transferida aos materiais consumíveis pelo vácuo (Figura 5).

Conforme Nasseh (2011), a utilização de plástico perfurado é opcional, porém também facilita na desmoldagem e o destacamento dos consumíveis da peça curada. Em seguida adiciona-se um material absorvente, conhecido como “*breather*”, o qual tem a função de absorver o excesso de resina que passa pelo filme perfurado e acaba distribuindo de forma mais homogênea a quantidade por toda a área do compósito. Após isso, vem a última camada com o plástico de vácuo que faz o fechamento de toda a área do laminado com plástico suficiente para se moldar as diferenças de espessura da peça e que ainda sobre uma aba para ser usada no fechamento e selagem da bolsa de vácuo. Para fechar e selar utiliza-se uma fita emborrachada dupla face (*tacky tape*) que tem a função de vedar completamente a atmosfera interna do sistema de envelope junto a mangueira da bomba de vácuo.

FIGURA 5 – Representação do Processo de Laminação com Bolsa de Vácuo.



Fonte: (GURIT, 2017)

A resina a ser utilizada já deve estar misturada com a proporção correta do agente de cura. Para este processo, necessita-se de tempo de gel (*gel time*) suficiente para se executar toda a operação de impregnação manual e fechamento da bolsa evitando o início da polimerização da matriz.

De acordo com West System (2010), para o vácuo podem ser utilizadas pressões relativas de 2,5 a 3 psi para uma boa ligação entre as camadas. Já para processos onde exige a compactação e colagem de tecido com núcleo de materiais sanduíche, Nasseh (2007) recomenda a utilização de pressões 4,5 a 11,8 psi.

## 2.7 FIBRAS DE CARBONO

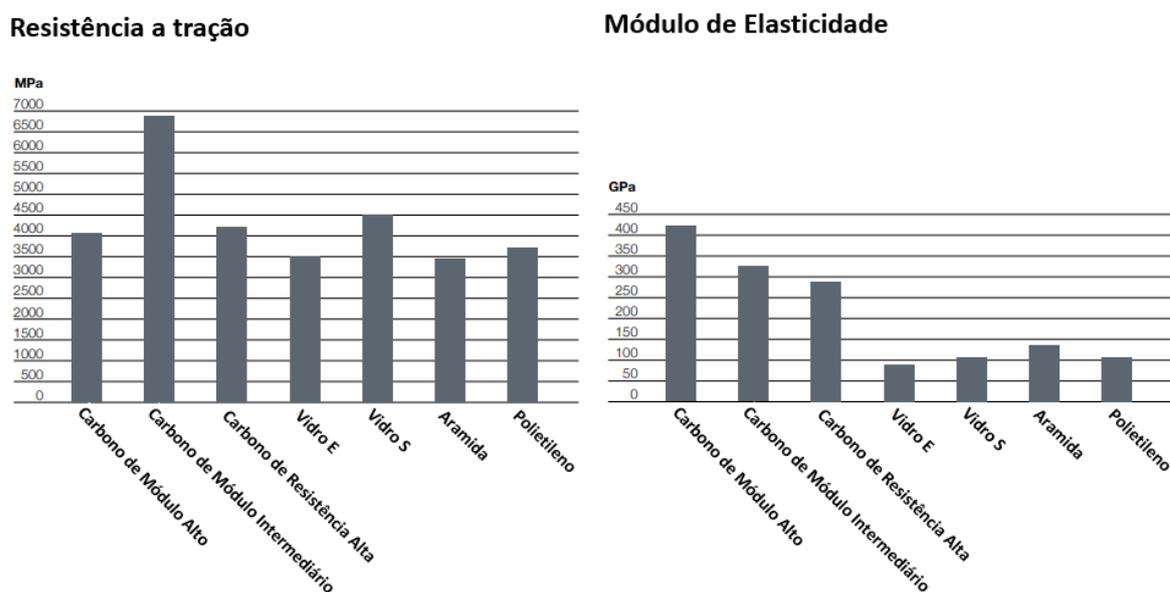
As fibras de carbono são produzidas pela oxidação controlada, carbonização e grafitação de precursores orgânicos de carbono, sendo que dentre todos eles a poliácridonitrila é o mais usual, pois fornece boa média de propriedades mecânicas de tração, compressão e módulos de elasticidade (NIJSSEN, 2015).

As fibras de carbono são obtidas a partir de fibras “precursoras”, geralmente a fibras de celulose (viscose rayon, algodão), fibras de PAN (poliacridonitrila), e piches de petróleo e alcatrão de hulha; e que passam pelos processos de estiramento, oxidação, carbonização e grafitação. Esse processo organiza os átomos de carbono em uma ordenada estrutura cristalina gráfica ao longo do comprimento dos filamentos (NETO e PARDINI, 2016).

Como os filamentos dos tecidos são arranjados em direções precisas, o resultado é uma resistência superior, quando comparados com as mantas de direção aleatória. Os tecidos são mais fáceis de utilizar pela facilidade de colocá-los no molde. Eles são compostos de fibras, ou *rovings*, correndo em duas direções, usualmente em ângulos de 90 graus uma em relação a outra (NASSEH, 2007).

As fibras de carbono apresentam alta resistência à tração e alto módulo de elasticidade quando comparada às demais fibras de outros materiais, conforme podemos observar no gráfico da Figura 6. A rigidez de uma estrutura é definida como o produto do módulo de elasticidade do laminado pelo momento de inércia de sua seção transversal. Quando se aumenta a espessura do laminado aumenta-se exponencialmente o momento de inércia; por conta da densidade menor, a espessura final de um laminado de fibra de carbono é menor do que um construído com outras fibras.

FIGURA 6 – Resistência à tração específica considerando diferentes tipos de fibras



Fonte: HEXCEL(2018)

A ondulação do tecido está relacionada ao grau com que o tecido aceita a diminuição do volume de resina durante a cura. A drapeabilidade está relacionada com a facilidade com que um tecido assume uma forma imposta. Quanto mais maleável for um tecido, menos suscetível ele será a vincos e maiores serão as possíveis mudanças de direção que o tecido pode ter no molde. No entanto, isso diminui a quantidade de controle que você tem sobre a direção das fibras no tecido drapeado durante o manuseio. A trama tem uma grande influência nas

propriedades de um tecido. Em geral, tecidos mais soltos, como sarja e cetim, apresentam melhor drapeabilidade e permeabilidade do que um tecido liso, que por sua vez fornece um tecido mais estável (NIJSSEN, 2015).

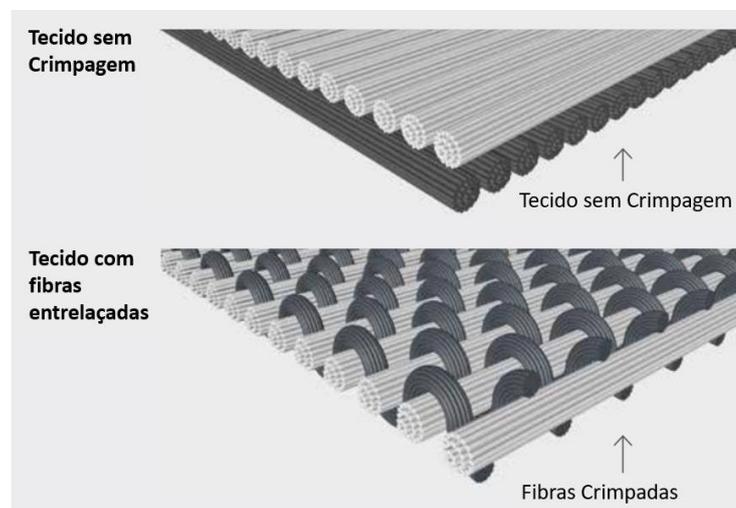
Os tipos de trama de tecido mais utilizadas na aplicação de painéis para chassis são as multiaxiais devido a sua melhor capacidade de resistência nos diferentes sentidos de aplicação de carga.

De acordo com Hexcel (2018), o tecido de trama do tipo sarja ou *Satin* apresenta alto nível conformabilidade e drapeabilidade, permitindo boa adesão às geometrias curvas dos chassis quando comparado com a configuração tela plana. Essa trama também possibilita um tecido de fácil manuseio para operações manuais no processo.

Os tecidos não crimpados são tecidos que possuem as fibras retas sem entrelaçamento, podendo ser unidas por camadas individuais através de uma costura de fios de poliéster. Em comparação com as fibras crimpadas, as fibras retas (não crimpadas) têm a maior capacidade de carga possível (Figura 7). Componentes compostos fabricados a partir de tecidos não crimpados permitem a transmissão ideal ao componente das forças geradas na direção do carregamento, ajustando especificamente a orientação da fibra (SAERTEX, 2017).

De acordo com Nasseh (2007), os tecidos não crimpados são formados de 2 a 4 camadas de tecidos unidirecionais que não se cruzam, ligados por uma fina trama de poliéster. Como os fios ficam extremamente alinhados com a direção principal das tensões, sua resistência é aproximadamente 40% maior que os tradicionais tecidos tramados. Tendo uma diminuição de por volta de 25% do peso de fibra.

FIGURA 7 – Comparação entre tecido sem e com crimpagem.



Fonte: Saertex, 2017

## 2.8 ADESIVO

Para uma melhor eficiência estrutural de uma placa sanduíche, deve se ter uma boa adesão do material de núcleo e às duas faces do polímero reforçado com carbono. Os adesivos estruturais são responsáveis pela ligação química entre os dois materiais, e uma de suas propriedades mais importantes é a resistência ao cisalhamento.

As resinas poliéster possuem as propriedades adesivas inferiores em comparação com vinil éster e epóxi. Os sistemas epóxis oferecem o melhor desempenho, e são frequentemente encontrados em muitos adesivos de alta resistência. Isso se deve à sua composição química e à presença de grupos polares hidroxila e éter. Como os epóxis curam com baixa contração, os vários contatos de superfície estabelecidos entre a resina líquida e os aderentes não são perturbados durante a cura. As propriedades adesivas do epóxi são especialmente úteis na construção de laminados com núcleo em colmeia, onde a pequena área de superfície de ligação significa que é necessária a máxima adesão (GURIT, 2017).

De acordo com Nasseh (2007) os materiais da interface devem ser compatíveis com o adesivo, em situações extremas o material de núcleo deve se romper antes do adesivo. É fundamental garantir que o adesivo ou a resina de laminação não ataque o núcleo. Este tipo de ataque pode ocorrer devido ao tempo de cura ou pela temperatura gerada durante o processo.

Camadas adesivas são intercaladas entre as camadas de fibra e o núcleo, durante o processo todo o empilhamento é submetido a temperatura e pressão elevadas conforme exigido pela resina adesiva. Para aplicações de alto desempenho, o processo de colagem geralmente ocorre usando uma bolsa a vácuo e uma autoclave, enquanto para aplicações menos exigentes a bolsa a vácuo e/ou pesos que não danifiquem o núcleo são suficientes (ZENKERT, 1995).

Zenkert (1995) afirma que ao colar em núcleos colmeia, o adesivo deve ter exatamente a combinação certa de impregnação da superfície e fluxo controlado para que o adesivo não escorra pela parede celular. É preferível que o adesivo flua até certo ponto pela parede celular, aumentando assim a área de contato com o núcleo.

## 2.9 RESINA EPÓXI

Resinas Epóxi são uma das mais importantes classes de polímeros utilizados como matriz, muito presentes em aplicações estruturais ou como adesivos, pois mostram alta resistência e módulo de elasticidade, fácil processamento, além de resistências química e

térmica. Os sistemas epóxi apresentam pequena contração após a cura, em média na ordem de 2%, indicando um baixo grau de rearranjo molecular. Após a cura, o sistema epóxi apresenta boa estabilidade dimensional e é um dos termorrígidos ou termofixos mais inertes. A alta adesão apresentada por estes polímeros é consequência da polaridade dos grupos éteres e hidroxilas alifáticas que, frequentemente, constituem a cadeia da resina pré e pós cura. A polaridade desses grupos serve para criar forças de interação entre a molécula epóxi e a superfície adjacente a ela, otimizando o seu uso como adesivo (CABRAL *et al.*, 2018).

A função da resina epóxi como matriz polimérica de acordo com Huang (2021) é manter os reforços juntos, transferir e distribuir cargas uniformemente, suportar cisalhamento interlaminar e evitar que as fibras entrem em contato direto com as condições ambientais.

De acordo com (Nijssen, 2015), os epóxios funcionam de maneira diferente dos poliésteres e vinilésteres. O polímero é formado pela fusão de dois componentes, geralmente uma molécula de epóxi e uma amina. A reação é iniciada pela mistura, o que resulta na formação de uma rede fechada de moléculas de epóxi e aminas com estrutura mais regular que a dos ésteres vinílicos.

As resinas epóxi mais utilizadas têm como base o diglicidil éter do bisfenol-A (DGEBA) e são sintetizadas a partir de uma reação entre a epicloridrina e o bisfenol-A (ALVES *et al.*, 2018).

Segundo Nasseh (2007) e Neto e Pardini (2016) a relação molar epicloridrina/bisfenol-A pode variar podendo produzir resinas líquidas e sólidas. A estrutura de uma matriz epóxi consiste em grupos epóxi terminais e de uma unidade de repetição no meio. Como as unidades de repetição, que podem ser incorporadas às moléculas variam entre cada tipo de formulação, elas influenciam nas propriedades da matriz final de resina.

De acordo com CABRAL *et al.* (2018) a resina epóxi se mantém estável sem sofrer degradação até a temperatura de 250 °C, apresentando uma perda de massa inexpressiva (se tratando do material puro). Este valor pode aumentar se associado a outro material.

A resina epóxi é dominante no mercado de resinas de alto desempenho, e tem como desvantagem seu custo e sua necessidade de aquecimento externo durante a fase de gel. Possui pouca contração após a cura, quando comparada com as resinas poliéster e estervinílicas. Essa baixa contração reduz as tensões internas dentro do laminado, o que faz com que os compósitos de resina epóxi tenham uma maior resistência a fadiga. Uma outra grande vantagem em relação à propriedade mecânica da resina epóxi é sua alta capacidade de alongamento, permitindo

escoar o compósito até o limite de ruptura da fibra e somente assim gerando a fratura do compósito (TALREJA, VARNA, 2016).

Uma importante característica da resina é a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ). De acordo com Nijssen (2015) é a temperatura na qual uma resina passa do estado 'vítreo' (rígido e quebradiço, ou seja, pouca deformação plástica) para o estado 'borrachoso' (flexível e dúctil). Não é recomendado usar um compósito próximo ou acima dessa temperatura. O efeito de exceder a transição vítrea é muito mais significativo com termoplásticos do que com termofixos, mas ambos são reduzidos quando combinado ao material de reforço.

A temperatura de transição vítrea para termofixos depende das circunstâncias durante a cura. Uma temperatura de transição vítrea mais alta pode ser alcançada por cura em temperaturas mais altas e com períodos mais longos de aquecimento.

Nasseh (2007) considera que os dois critérios mais importantes em relação ao desempenho da resina são a capacidade de adesão e o alongamento sob carregamento. Se estas propriedades não forem satisfatórias, as fibras se soltarão da matriz de resina em um nível de tensão muito baixo. Nasseh (2011) também afirma que o alto poder de colagem das resinas epóxi reduz a possibilidade de uma falha por cisalhamento interlaminar. As resinas epóxi apresentam boa resistência a abrasão e baixa absorção de água.

## 2.10 MECANISMO DE CURA

A cura da resina epóxi é um processo exotérmico, o que impulsiona a reação, portanto, há uma janela de cura (*pot life*) limitada, para que aconteça a polimerização após iniciada a catálise. Depois da mistura do agente de cura, o calor é gerado acelerando a taxa de cura e reduzindo a viscosidade com o decorrer da catálise. A temperatura ambiente tem grande influência no tempo de cura, altas temperaturas encurtam o tempo de polimerização da resina. Para diferentes tempos de cura, existem diferentes tipos de catalisadores, que retardam ou aceleram o processo. Utilizar uma proporção de resina e catalisador fora do especificado pode comprometer as propriedades poliméricas da resina epóxi (MCBEATH 2016).

Existem diversos tipos de endurecedores que controlam o tempo de gel ou gelificação (gel time) da resina e as propriedades finais do laminado, assim como a cinética de cura e o ciclo de processamento da resina (viscosidade em função do tempo). Os agentes de cura de resina epóxi geralmente são compostos amínicos e os anidros (NETO; PARDINI, 2016).

Os agentes amínicos são divididos em aminas alifáticas e aminas aromáticas. As aminas alifáticas são altamente reativas e se encontram em estado líquido e volátil em temperatura ambiente, onde apresentam tempo de gel curto, inferior a 60 minutos. Já as aminas aromáticas são endurecedores de cura a quente, bem menos reativos e que precisam de temperaturas entre 150°C e 180°C, permitindo um maior tempo de processamento. Como podem formar estágios de cura parcial, as aminas aromáticas são adequadas para a manufatura de *prepregs* (NETO; PARDINI, 2016).

Os agentes de cura anidros possuem reatividade ainda menor que as aminas aromáticas, possibilitando um longo tempo de processamento e possuem baixa exotermia e, por isso, eles normalmente são utilizados em conjunto com aceleradores (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

## 2.11 APLICAÇÃO DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS EM CHASSI

O chassi é a maior peça de um veículo, sendo responsável por suportar todos os esforços da suspensão e aerodinâmicos. O chassi ainda tem a importante função de se conectar a todos os sistemas do carro e servir de proteção a impactos contra o piloto. O chassi é considerado como a espinha dorsal de qualquer veículo, que suporta várias peças como motor, conjuntos de eixos, direção etc. Muitas peças são parafusadas ao chassi para unir diferentes peças de automóvel (SHREEPATHI *et al*, 2015).

DAS (2001) cita algumas vantagens da utilização de termoplásticos reforçados com fibras na indústria automotiva. Os termoplásticos reforçados com fibras têm as vantagens típicas dos compósitos de matriz polimérica, como economia de peso, alta resistência, alta rigidez, resistência à corrosão, integração de peças, e absorção de energia. Além disso, eles têm vida útil indefinida, são recicláveis e são viáveis para processamento automatizado de alto volume, com potencial de fabricação rápida e de baixo custo. No entanto, o uso de termoplásticos é muito limitado devido à falta de estabilidade dimensional e baixas temperaturas de distorção térmica, não adequadas para fornos. Os termoplásticos mais utilizados são os termoplásticos com fibras de vidro em várias aplicações, desde coletores de admissão até tampas de motor e em menor grau para partes da carroceria.

Através da redução de peso, o consumo de combustível também pode ser reduzido. Com a redução de 10% no peso, o consumo de combustível diminui cerca de 7%, o que também

significa que a redução do peso em cerca de 1kg reduzirá significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> (PATIL, 2010).

Chassis convencionais ou de menor custo costumam ter uma estrutura tubular metálica treliçada. Estes chassis possuem uma construção e projeto mais simples, já os chassis mais modernos onde as categorias permitem, temos os chassis de compósitos, conhecidos como monocoques. Estes monocoques possuem diversas combinações de placas sanduíches, podendo combinar melhor a relação de baixo peso com alta rigidez torcional porém sua fabricação demanda técnicas mais avançadas com um custo maior de material (EURENIUS *et al*, 2013).

Veículos de competição comumente buscam maior desempenho nas pistas, alguns parâmetros como menor peso dos veículos e maior rigidez são diretamente ligados a um menor tempo de volta, os materiais compósitos de alto desempenho, são altamente empregados nestes veículos por atingirem esse compromisso permitindo um dimensionamento mais otimizado das peças que compõem o veículo. Os componentes do carro devem ser rígidos e resistentes o suficiente para atender aos requisitos de carregamento e resistência ao impacto, contendo o menor peso possível. As estruturas de compósito são projetadas para ter uma quantidade definida de fibras na posição e orientação corretas, juntamente com o mínimo de matriz polimérica, para fornecer resistência suficiente a estrutura (SAVAGE, 2010).

De acordo com O'Rourke (1990), dois motivos principais podem justificar a eficiência estrutural do chassi monocoque. Em primeiro lugar, eles são inerentemente de maior módulo específico do que a maioria dos metais de engenharia e, em segundo lugar, a capacidade de adaptar direcionalmente as propriedades mecânicas do chassi pode levar a uma solução de projeto mais eficaz. As restrições de peso impostas pelo regulamento significam que um ganho na rigidez do componente pode ser obtido sem aumentar sua massa. Alternativamente, economias de peso, se necessário, podem ser feitas sem sacrificar a rigidez. Com uma seção maior de material sendo usada, as margens de resistência podem ser melhoradas simultaneamente. O estado da arte atual em chassi de competição é encontrado na categoria Fórmula 1 (F1), a principal competição automobilística mundial organizada pela FIA (Federação Internacional do Automobilismo). Estes carros possuem chassis dimensionados para atingir altíssima rigidez e resistência a colisões. Construídos com painéis de sanduíche de fibra de carbono com núcleo de colmeia de alumínio, de espessura e camadas variáveis.

Atualmente, cerca de 85% do volume de um veículo de F1 são compostos de fibras de carbono. A capacidade de absorção de energia de compósitos reforçados com fibras de carbono contribuiu muito para a melhoria da segurança das corridas (YIN; LANG E ZHAO 2013).

O chassi híbrido, é uma combinação de um chassi monocoque de compósito e uma estrutura tubular traseira. O monocoque contribui com seu baixo peso e alta rigidez torcional, enquanto a estrutura tubular oferece uma traseira fácil de construir, na maioria dos casos proporcionando melhor acesso ao motor. No entanto, algumas complicações que podem aparecer ao usar um chassi híbrido são conseguir uma integração suficientemente boa entre as duas seções e a capacidade de prever os caminhos de carga entre elas (EURENIUS *et al*, 2013).

A primeira etapa da manufatura de um chassis em compósitos é a produção do modelo de molde, o qual será uma cópia do modelo real fabricado em madeira ou resina. Moldes fêmeas feitos de fibras de carbono são fabricados a partir da geometria externa do molde, geralmente separados em duas metades, a superior e a inferior, os quais são unidos no processo de moldagem (SEWARD, 2014).

De acordo com Savage (2010), o processo de fabricação de construções sanduíche de um F1 são curadas em duas ou três etapas, sendo a primeira camada curada em autoclave a uma pressão de 7 bar. A construção sanduíche empregada nos carros de F1 é moldada em duas etapas, a primeira camada sendo curada em autoclave pressurizada (7 bar ou 100 lbf/in<sup>2</sup>) e as camadas subsequentes, núcleo de *honeycomb*, os insertos e as camadas internas são curadas a uma pressão suficiente para o núcleo aderir, normalmente 3,5 bar (50 lbf/in<sup>2</sup>). Nas regiões onde os parafusos e fixadores passam pelo material de núcleo são reforçados localmente usando insertos metálicos, com a função de reduzir a concentração de tensões. A camada de alumínio ou aramida de núcleo varia a espessura conforme a região de acordo com o projeto estrutural, e um filme adesivo é aplicado entre as camadas de núcleo e as faces laminadas de compósito garantindo uma forte adesão quando curado.

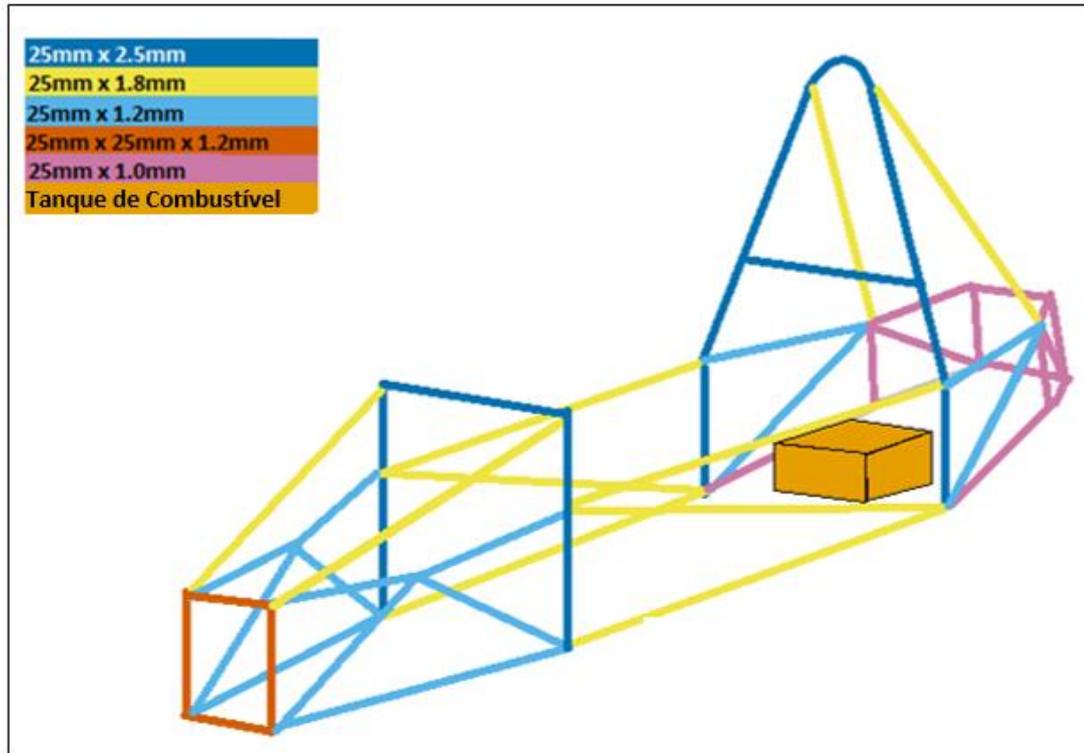
## 2.12 FÓRMULA SAE

A Fórmula SAE é uma competição estudantil de engenharia, organizada pela SAE (*Society of Automotive Engineers*) onde os alunos desenvolvem e constroem um projeto completo protótipo de competição do tipo Fórmula que deve seguir um regulamento internacional da categoria (SAE BRASIL, 2022).

O regulamento de 2022, estabelece que podem ser utilizados chassis tubulares, compósito ou híbridos. Para garantir a segurança dos pilotos, o chassi tubular pode ser feito com pré-determinadas triangulações nas treliças e com determinados tubos e seções em cada região. Esse chassi tubular (Figura 8) também é utilizado como uma referência para a validação

estrutural do chassi de compósito. Caso o chassi de compósito não seja equivalente ou superior nos testes requeridos, o chassi não é apto para competir (SAE INTERNATIONAL, 2022).

FIGURA 8 – Chassi Tubular Teórico de Formula SAE por Classificação de Tubos



Fonte: SAE INTERNATIONAL. 2022-FSAE-Structural-Equivalency\_Monocoque-Hybrid-Non-Ferrous\_V1.4. Acesso em: 04 abril. 2022.

Além do regulamento que é atualizado periodicamente, a SAE também fornece duas planilhas para o preenchimento das características do chassi e os resultados de eventuais testes. *Structural Equivalency Spreadsheet* (SES), uma delas para chassis tubulares e outra para de materiais alternativos. A planilha facilita a verificação dos parâmetros que aprovam ou não os materiais.

Com a intenção de isolar o comportamento mecânico das placas laminadas, o regulamento aprova apenas as placas que sejam equivalentes aos tubos de aço em alguns requisitos (Tabelas 1 e 2). Porém o regulamento obriga a utilização de alguns tubos dos arcos principais em aço. Uma boa solução é acoplar ao chassi de compósito um chassi tubular traseiro. Essa configuração híbrida deve resultar em redução de peso significativa e aumento da rigidez torcional em comparação a um chassi tubular convencional (HAMILTON *et al*, 2013).

Existem três testes exigidos pela SAE em relação ao laminado do chassi: o teste de flexão de 3 pontos, teste de cisalhamento perimetral e teste de destacamento, todas as amostras devem ter as mesmas composições das peças do carro e o mesmo processo de fabricação. O laminado obrigatoriamente deve ter características quasi-isotrópicas (SAE International, 2022).

Tabela 1 – Requisitos Mínimos dos Tubos

Aplicação	Tubo de aço precisa ter dimensões conforme	É permitido tubo de material alternativo?
a. Anteparo Frontal	Tamanho B	Sim
b. Suporte do Anteparo Frontal	Tamanho C	Sim
c. Arco Frontal	Tamanho A	Sim
d. Braço do Arco Frontal	Tamanho B	Sim
e. Estrutura de Impacto Lateral	Tamanho B	Sim
f. Dobra/ Membro Superior da Estrutura de Impacto Lateral	Tamanho D	Sim
g. Arco Principal	Tamanho A	Não
h. Braço do Arco Principal	Tamanho B	Não
i. Suporte do Braço do Arco Principal	Tamanho C	Sim
j. Ancoragem do Cinto	Tamanho B	Sim
k. Barra de Montagem do Cinto do Ombro	Tamanho A	Não
l. Braço da Barra de Montagem do Cinto do Ombro	Tamanho C	Sim
m. Estrutura de proteção do acumulador	Tamanho B	Sim
n. Proteção de Componente	Tamanho C	Sim
o. Outro tubo estrutural	Tamanho C	Sim

Fonte: SAE INTERNATIONAL. Formula SAE Rules 2022. (2022)

Tabela 2 – Requisitos Mínimos para Tubos de Aço

Tubo	Área Mínima de Momento de Inércia	Área Mínima de Seção Transversal	Diâmetro Externo Mínimo	Espessura mínima	Exemplos de tamanhos de tubos redondos
a. Tamanho A	11320 mm <sup>4</sup>	173 mm <sup>2</sup>	25.0 mm	2.0 mm	1.0" x 0.095" 25 x 2.5 mm
b. Tamanho B	8509 mm <sup>4</sup>	114 mm <sup>2</sup>	25.0 mm	1.2 mm	1.0" x 0.065" 25.4 x 1.6 mm
c. Tamanho C	6695 mm <sup>4</sup>	91 mm <sup>2</sup>	25.0 mm	1.2 mm	1.0" x 0.049" 25.4 x 1.2 mm
d. Tamanho D	18015 mm <sup>4</sup>	126 mm <sup>2</sup>	35.0 mm	1.2 mm	1.375" x 0.049" 35 x 1.2 mm

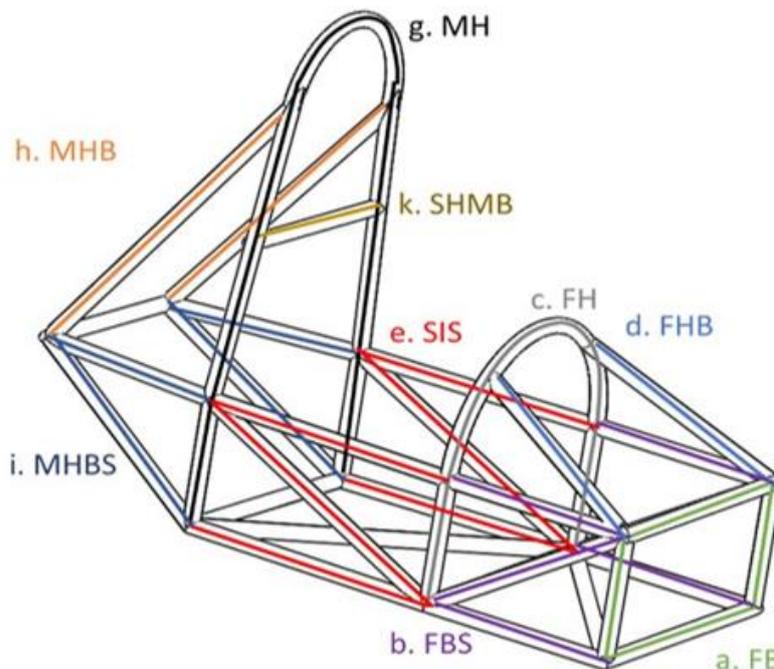
Fonte: SAE INTERNATIONAL. Formula SAE Rules 2022. (2022)

O regulamento da Fórmula SAE define como estrutura primária os tubos conforme especificados a seguir e detalhados na Figura 9.

- *FB e FBS - Front Bulkhead e Front Bulkhead Support (Anteparo Frontal e Suporte do Anteparo Frontal).*
- *FH, FHB, MH, MHB, RHB e Supports - Front Hoop, Front Hoop Bracing, Main Hoop, Main Hoop Bracing, Roll Hoop Braces e Supports (Arco Frontal, Braço do Arco Frontal, Arco Principal, Braço do Arco Principal, Braço do Arco de Rolagem e Suportes)*
- *Side Impact Structure (Estrutura de impacto Lateral).*
- Qualquer tubo do chassi, guia ou suporte que transfira carga dos cintos.

Adicionalmente, para ser feita a equivalência de um chassi inteiramente confeccionado em compósito, exceto onde os tubos são obrigatórios, deve se seguir os critérios de validação de algumas características conforme o regulamento vigente da competição, que pode ser visto em resumo na tabela 3.

FIGURA 9 – Representação dos Tubos da Estrutura



Fonte: Design Judges. Chris Bachman. <https://www.designjudges.com/articles/overall-vehicle-priorities>. Acesso em: 05 abril de 2022.

Tabela 3 – Requisitos de equivalência para chassi monocoque

<b>Tubo</b>	<b>Regra</b>	<b>Propriedades</b>	<b>Equivalência</b>
<i>FHB</i>	F.6.3	Módulo de Flambagem	1 tubo (b)
		Força de Ruptura	
		Deformação	
		Flexão	
		Energia dissipada	
<i>FBS</i>	F.7.4	Módulo de Flambagem	3 tubos (b)
		Força de Ruptura	
		Deformação	
		Energia dissipada	
		Flexão	
		Cisalhamento perimetral	$\geq 4\text{KN}$
<i>SIS Vertical</i>	7.6.3.b	Módulo de Flambagem	2 tubos (b)
		Força de Ruptura	
		Deformação	
		Energia dissipada	
		Flexão	
<i>SIS Assoalho</i>	F.7.6.2	Módulo de Flambagem	3 tubos (b)
		Força de Ruptura	
		Deformação	
		Energia dissipada	
		Flexão	
		Cisalhamento perimetral	$\geq 7.5 \text{ KN}$
<i>MHBS</i>	F.3.1.1i	Módulo de Flambagem	2 tubos (c)
		Força de Ruptura	
		Deformação	
		Energia dissipada	
		Flexão	

Fonte: Autor

O chassi híbrido, que mistura um chassi dianteiro de compósito e o traseiro tubular de aço, não requer a equivalência dos tubos da MHBS (*Main Hoop Bracing Structure*).

### 3. METODOLOGIA/MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais de núcleo utilizados neste trabalho foram: a colmeia de fibras de aramida PN1 de grade comercial, e a espuma de PVC Divinycell H80 em função das suas características mecânicas e disponibilidade nacional.

De acordo com o *DataSheet* da fornecedora Plascore do material (Tabela 3), a colmeia de aramida de grau comercial PN1 é fabricado com papel DuPont Nomex® (ou equivalente) e revestido com uma resina fenólica resistente ao calor. Tamanho de célula 3mm e densidade 48 kg/m<sup>3</sup>. As espessuras encontradas comercialmente no Brasil foram a de 10 mm e de 7 mm.

Tabela 3 – Folha de dados (*dataSheet*) da colmeia PN1 Nomex

Propriedade	Unidade	Típico	Mínimo
Resistência à Compressão	MPa	1.93	1.31
Resistência ao Cisalhamento "L"	MPa	1.34	0.92
Módulo de Cisalhamento "L"	MPa	44	-
Resistência ao Cisalhamento "W"	MPa	0.66	0.48
Módulo de Cisalhamento "W"	MPa	23	-

Fonte: E-Composites

A espuma de PVC utilizada possui o nome comercial *Dinivnycell H80*, fabricada pela Diab Group e comercializada pela *E-composites*. Foi utilizada a placa na espessura de 20mm com as propriedades especificadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de propriedades da espuma Divinycell H80

Propriedade	Teste	Unidade	Nominal	Mínimo
Resistência à Compressão <sup>1</sup>	ASTM D 1621	MPa	1.40	1.15
Módulo de Compressão <sup>1</sup>	ASTM D1621-B-73	MPa	90	80
Resistência à tração	ASTM D 1623	MPa	2.5	2.2
Módulo de tração	ASTM D 1623	MPa	95	85
Resistência ao Cisalhamento	ASTM C 273	MPa	1	1
Módulo de Cisalhamento	ASTM C 273	MPa	27	23
Deformação de cisalhamento	ASTM C 273	MPa	30	-
Densidade	ISO 845	MPa	80	-

<sup>1</sup> Propriedades medidas perpendicularmente ao plano.

Fonte: E-Composites

Os materiais de reforço utilizados na laminação dos compósitos foram:

- Tecido de fibras de carbono do tipo biaxial [0°/90°] CCS 200, sarja 2x2 de gramatura 200 g/m<sup>2</sup>, 3K, com espessura de 0,29mm e o tecido biaxial [0°/90°] CCS320, tela gramatura 320 g/m<sup>2</sup>, 3K com espessura de 0,55mm, ambos fornecidos pela empresa Texiglass Indústria e Comércio Têxtil, da marca TeXtreme® *Spread Tow*.

- Tecido de fibras de carbono biaxial [45°/-45°], X-C-306g/m<sup>2</sup> não crimpado, costurado com fio de poliéster, espessura de 0,3mm, fibra ZOLTEK PANEX 35 50K, fornecidos pela empresa Saertex.

Para composição da matriz foi escolhida a resina epóxi LR635 do tipo DGEBA, fornecida pela empresa HEXION. As resinas epóxi apresentam resistência ao cisalhamento interlaminar muito superior às demais. Conforme a tabela 5, as propriedades mecânicas combinadas com os agentes de cura se mostraram adequadas para aplicação.

Tabela 5 – Propriedades Físicas e Mecânicas da Resina epóxi curada

<b>Propriedade</b>	<b>Unidade</b>	<b>LH633</b>	<b>LH634</b>	<b>LH635</b>	<b>LH636</b>	<b>LH637</b>
Densidade curada	g/cm <sup>3</sup>	1.15 - 1.20				
<b>Módulo de resistência</b> DIN EN ISO 527-2	GPa	3.2 - 3.6	3.2 - 3.6	3.4 - 3.8	3.4 - 3.8	3.0 - 3.4
<b>Limite de escoamento</b> DIN EN ISO 527-2	MPa	80 - 85	80 - 85	85 - 90	84 - 88	68 - 72
<b>Alongamento de Ruptura</b> DIN EN ISO 527-2	%	6 - 8	6 - 8	5 - 7	5 - 8	7 - 9
<b>Módulo de Flexão</b> DIN EN ISO 178	GPa	3.1 - 3.5	3.3 - 3.7	3.6 - 4.0	3.3 - 3.7	3.1 - 3.5
<b>Resistência a Flexão</b> DIN EN ISO 178	MPa	130 - 135	125 - 135	135 - 145	135 - 145	110 - 120
<b>Cura</b>		3h 70°C	5h 70°C	5h 70°C	3h 70°C	5h 70°C

Fonte: Hexion (2019).

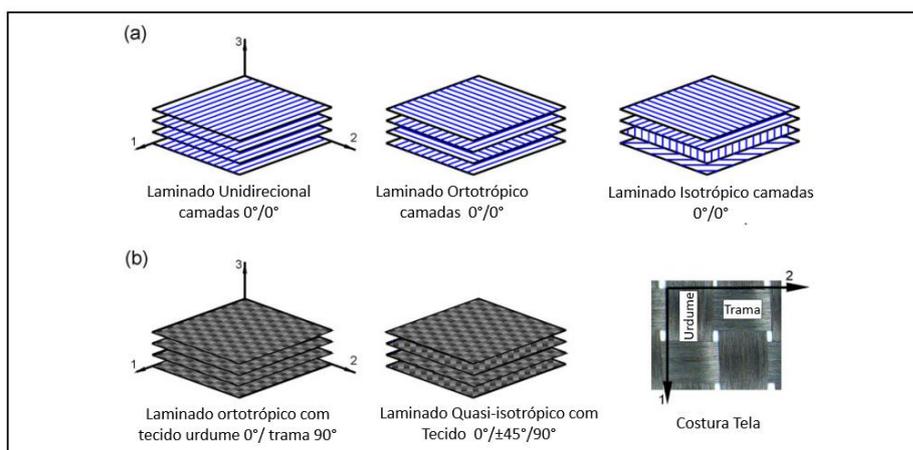
A catálise da resina foi realizada utilizando o agente de cura a base de amina alifática LH 637 do mesmo fornecedor, misturados na proporção em peso 100:30, proporcionando a viscosidade e gel time adequado para o processo de laminação com bolsa de vácuo.

A cola utilizada para gerar adesão dos laminados ao núcleo, é também do tipo epóxi DGEBA, a partir da mistura da resina epóxi 2001, com o agente de cura SQ 3180, em proporção

de volume 1:1, da marca *Redelease*. Essa cola tem como característica a cura rápida e alta viscosidade.

Para se obter um laminado com configuração quase-isotrópica, foi utilizada a estratégia de utilizar o empilhamento do tecido biaxial, fazendo rotações a  $45^\circ$  conforme a Figura 10 ilustra.

FIGURA 10 – Configurações de Empilhamento: a) configurações para tecidos unidirecionais e b) configurações para tecidos biaxiais.



Fonte: Bergant Z. et al (2019)

Um laminado quase-isotrópico tem a mesma resistência e rigidez da fibra ao longo de qualquer orientação no plano do laminado. Quando o mesmo possui propriedades de fibra e massa iguais nas direções  $0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ$ , o laminado pode ser considerado quase-isotrópico. (SAE International 2022).

Foi estudada a utilização de uma combinação assimétrica de número de camadas na parte superior e inferior da placa. Onde, de acordo com Castani (2002), a face que suporta as maiores cargas de compressão exerce uma função de camada de trabalho e a face onde possui menos material se comporta como a face de estabilização. As cargas de compressão e cisalhamento são suportadas pelo material de núcleo.

### 3.1.2 OBTENÇÃO DAS PLACAS SANDUÍCHE

O processo de laminação das placas de sanduíche simples foi feito simulando o mesmo processo de fabricação para um chassi monocoque, porém utilizando uma mesa plana como

molde para se obter as placas retas. Inicialmente foi aplicada uma camada de desmoldante em cera sobre a mesa para facilitar o descolamento dos materiais consumíveis após a cura. Na primeira etapa, as camadas externas de tecido foram impregnadas com resina, de acordo com a sequência de empilhamento e em seguida o núcleo foi adicionado por cima. Deste modo, a própria resina epóxi fez a função adesiva das fibras com o material de núcleo.

Para colagem do núcleo nos tecidos não foi colocada resina adicional, a fim de se obter apenas resina na interface a ser colada, após esta primeira etapa do empilhamento foi realizada a laminação das camadas internas. Para evitar o excesso de resina no núcleo, a impregnação de resina nas camadas de tecido foi feita numa mesa externa e o tecido foi posicionado na peça com uma leve compactação manual e com um auxílio de um rolo de laminação. Após finalizar o empilhamento dos tecidos impregnados, foi feito o fechamento com *vaccum bag* (Figura 11), criando a condição de vácuo no sistema com -12 psi e foi feita a cura por 5h em temperatura de 70°C.

FIGURA 11 – Fotografia do processo de laminação por bolsa de vácuo (*vaccum bag*).



Fonte: Autor

No caso do sanduíche duplo, para obter uma boa adesão do núcleo com o laminado teve um processo similar ao simples, porém inicialmente foram laminados uma camada de tecido sobre o tecido *peel ply*, utilizando a mesa como molde, coberto por uma camada de núcleo *honeycomb*. Após a cura, foi feita a colagem com cola epóxi de secagem rápida e em seguida foi realizado o empilhamento e a laminação do empilhamento completo.

O *peel ply* foi utilizado com a função de gerar uma superfície rugosa, com melhores características para ancoragem da cola na superfície de adesão.

O cálculo de quantidade de resina levou em consideração apenas a quantidade de massa de tecido em cada etapa do processo. Foi utilizada uma proporção de massa entre fibra e resina de 100:65. O compósito fibra e matriz das faces laminadas resultante teve um volume de fibras de 0,66 e densidade de 1,51g/cm<sup>3</sup>.

### 3.1.3 NOMENCLATURA E IDENTIFICAÇÃO DOS LAMINADOS

Para facilitar o entendimento dos corpos de prova apresentados, a nomenclatura segue um padrão por configuração de empilhamento (Tabela 6). Onde C, é a letra referente a uma camada de fibra de carbono e N uma camada de núcleo de *honeycomb* de aramida.

Tabela 6 – Exemplo de Orientação de camadas de laminados.

<b>Orientação das Camadas (Laminados Assimétricos)</b>			
<b>Layup</b>	[C0/C45/C-45/C90/C45/C-45/C0/N/C0/C45/C90/C-45/C0]		
<b>Identificação das camadas</b>	<b>Material</b>	<b>Orientação [°]</b>	<b>Nº de camadas</b>
C0	Carbono Biax	0	1
C45	Carbono Biax	45	1
C-45	Carbono Biax	-45	1
C90	Carbono Biax	90	1
C45	Carbono Biax	45	1
C-45	Carbono Biax	-45	1
0	Carbono Biax	0	1
N	Honeycomb Aramida	0	1
C0	Carbono Biax	0	1
C45	Carbono Biax	45	1
C90	Carbono Biax	90	1
C-45	Carbono Biax	-45	1
C0	Carbono Biax	0	1

Fonte: Autor

As configurações de *layup* e tipos de materiais utilizados podem ser observados na tabela 7.

Tabela 7 – Configurações dos *layups* dos laminados e respectivos corpos de prova.

Configuração	Gramatura Camada Superior [g/m <sup>2</sup> ]	Gramatura Camada Inferior [g/m <sup>2</sup> ]	Núcleo	Espessura média final (mm)	Tecidos utilizados
<b>Layup 1</b> [C0/N/C45]	305	305	Honeycomb 7mm	7,48	X-C-306
<b>Layup 2</b> [C0/C45/C-45/C90/C45/C-45/C0/N/C0/C45/C90/C-45/C0]	1400	1000	Honeycomb 10mm	12,24	CCS 200
<b>Layup 3</b> [C0/C45/N/C0/N/C-45/C0]	400	400	Honeycomb duplo 10mm	21,48	CCS 200
<b>Layup 4</b> [C0/C45/C-45/C90/N/C0/C90/N/C90/C45/C-45/C0]	800	800	Honeycomb duplo 10mm	22,72	CCS 200
<b>Layup 5</b> [C0/C45/N/C90/C45/C0]	880	640	PVC 20mm	21,28	X-C-306 / CCS320
<b>Layup 6</b> [C0/C45/C90/C-45/C0/C45/C0/N/C45/C90/C-45/C0/C45]	2198	1558	PVC 20mm	23,22	X-C-306 / CCS320

Fonte: Autor

## 3.2 ENSAIOS MECÂNICOS

### 3.2.1 ENSAIO DE FLEXÃO

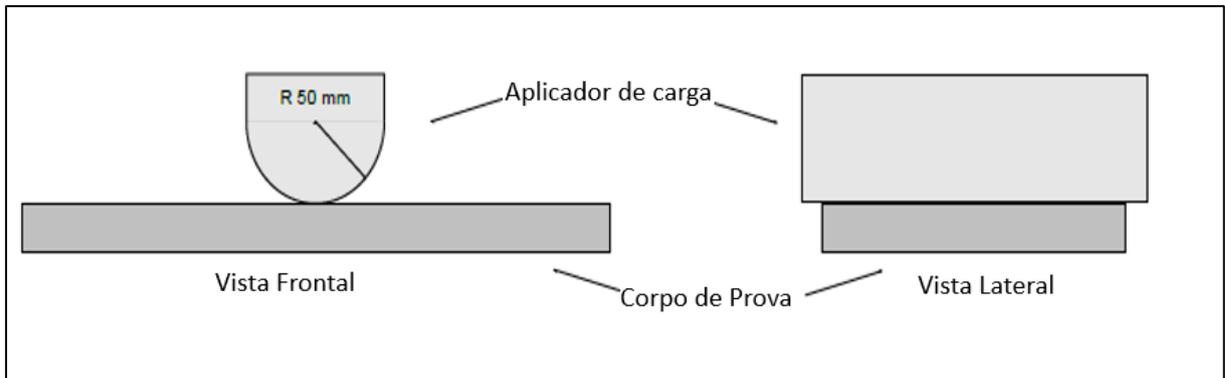
Conforme o regulamento SAE International (2022) o ensaio de flexão (Figura 12), deve ser realizado em corpos de prova que representam as regiões do chassi.

O corpo de prova deve ter as dimensões de 138 mm x 500 mm ou 275 mm x 500 mm. Deve ser apoiado por um dispositivo de vão com 400mm, possuir áreas da superfície de cima e embaixo iguais e ter as bordas descobertas de material das camadas.

Os resultados da placa de teste devem ser usados para determinar rigidez, resistência ao escoamento, limite de ruptura a tração e propriedades de energia absorvida pela formulação do regulamento mantendo a equivalência dos painéis correspondentes às regiões da Estrutura Primária do chassi.

O teste de comparação deve usar dois tubos de aço respeitando os requisitos mínimos do tamanho B, equivalente ao utilizado na *Side Impact*. Os tubos de aço devem ser testados com um deslocamento mínimo de 19,0 mm. O cálculo da energia absorvida deve usar a integral da força vezes o deslocamento desde o início da carga até um deslocamento de 19,0 mm. O dispositivo aplicador de carga do ensaio deve ser metálico e com um raio de 50mm e o aplicador de carga deve ser mais largo que a amostra.

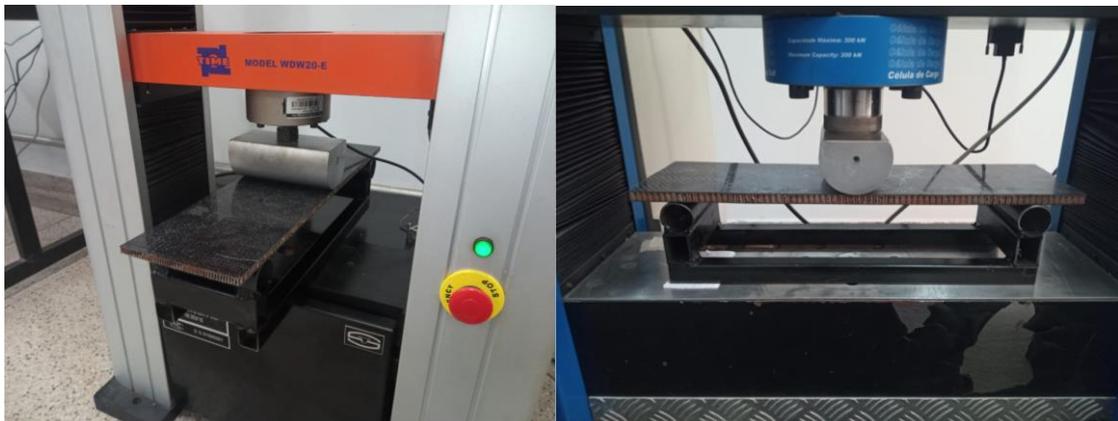
FIGURA 12 – Ilustração do Teste de Flexão



Fonte: SAE INTERNATIONAL. Formula SAE Rules 2022. (2022)

Para realização dos ensaios foram utilizadas duas máquinas universais, uma da marca TIME modelo WDW-2E, com célula de carga de capacidade de 2 toneladas da marca Transcell Technology e a segunda da marca EMIC, com célula de carga de 300 kN (Figura 13). Os ensaios foram realizados a velocidade constante de deslocamento do travessão de 5mm/min.

FIGURA 13 – Fotografias da realização dos ensaios de flexão.



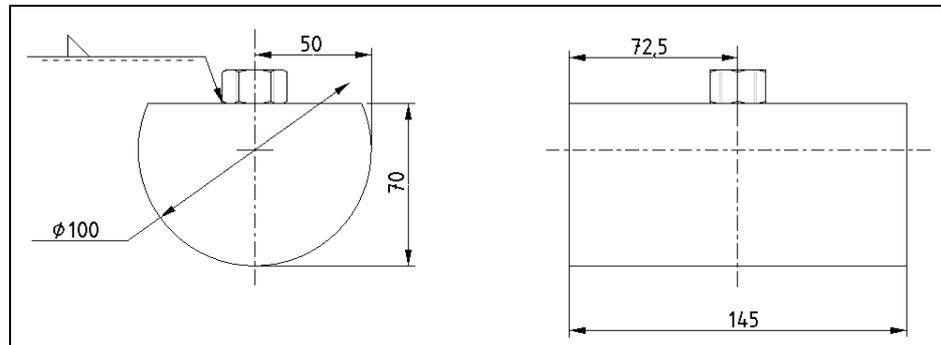
Fonte: Autor

Todos os dispositivos foram fabricados para se adaptarem a máquina e assim atingir as os requisitos dos ensaios conforme o regulamento.

Os resultados das propriedades mecânicas obtidos através de cálculos levaram em conta as mesmas equações utilizadas na planilha de equivalência utilizada pelo regulamento vigente Formula SAE Rules (2022).

Para o ensaio de flexão, o cutelo foi usinado em aço SAE 1045 para ser adaptado nas duas máquinas, conforme a Figura 14.

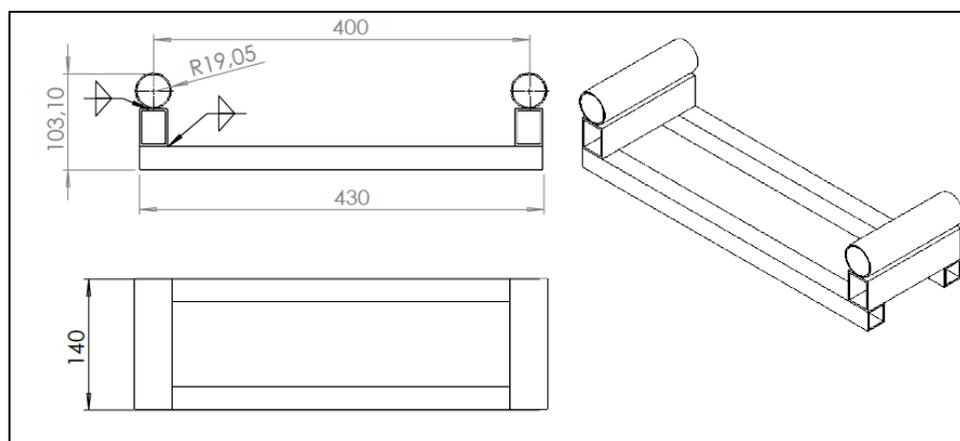
FIGURA 14 – Desenhos do cutelo usinado neste trabalho



Fonte: Autor

O dispositivo de apoio com distância de apoio conforme o regulamento da SAE foi fabricado com tubos de aço soldados conforme o modelo da Figura 15.

FIGURA 15 – Desenhos do dispositivo de apoio de flexão confeccionado neste trabalho



Fonte: Autor

Dos parâmetros utilizados para as comparações de equivalência foram o gradiente de rigidez, energia absorvida até 19mm de deflexão, módulo de flambagem e força de ruptura.

O gradiente de rigidez ao dobramento ( $G_s$ ) foi calculado de acordo com a equação (1).

$$G_s = \frac{F_{S2} - F_{S1}}{y_{S2} - y_{S1}} \quad (\text{equação 1})$$

Onde  $F_s$  são valores máximos e mínimos de força e  $Y_s$  valores máximos e mínimos da região elástica da curva de força por deformação.

Para utilizar no cálculo de equivalência os corpos de prova de compósito de 138x500mm, foi necessária fazer uma correção no valor da rigidez de flexão dividindo por 2, devido as dimensões da amostra serem compatíveis com apenas o valor de um tubo ensaiado.

De acordo com o regulamento a energia absorvida deve ser medida até o a deflexão de 19mm. A energia absorvida ( $U$ ) durante a deformação foi calculada conforme a equação 2.

$$U = \sum_{i=0}^n (y_i - y_{i-1}) \cdot F_i \quad (\text{equação 2})$$

Onde,  $y_i$  é a deflexão do painel até a carga  $F_i$ .

De acordo com os critérios de aprovação do regulamento 2022, alguns parâmetros como o módulo de flambagem e a força de ruptura são calculados a partir das equações 3 e 4 a seguir.

Módulo de Flambagem:

$$M_f = E * I \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

$E$  – Módulo de elasticidade

$I$  – Momento de inércia da seção

Força de Ruptura

$$F_r = A * LRT \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

$A$  – Área da seção

$LRT$  – Limite de Resistencia à tração

O Módulo de Elasticidade é calculado de acordo com a equação 5.

$$E = \frac{y_2 - y_1 * l^3}{48 * I * x_2 - x_1 - Fc} \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

$y_1$  – Força mínima

$y_2$  – Força máxima da região elástica

$x_1$  – Deslocamento mínimo

$x_2$  – Deslocamento máximo da região elástica

$l$  – Distância entre apoios

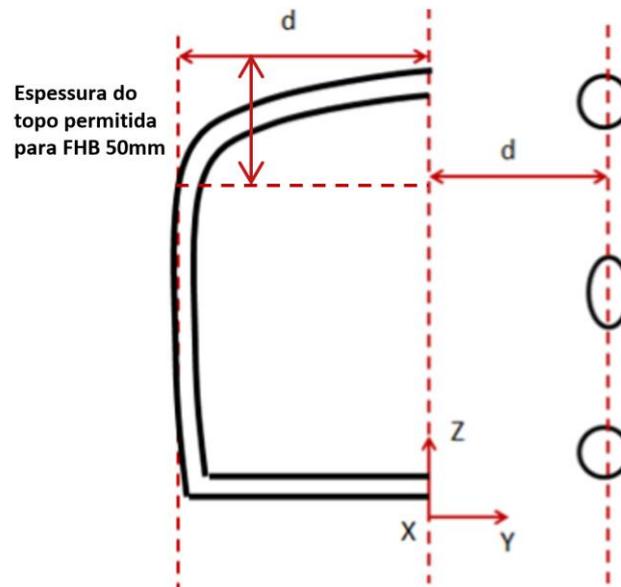
O Fator de correção é calculado de acordo com a equação 6.

$$Fc = RD * (y_2 - y_1) \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

RD – Rigidez do dispositivo

FIGURA 16 – Configuração utilizada para comparação de equivalência do chassi tubular.



Fonte: Adaptada SAE INTERNATIONAL. 2022-FSAE-Structural-Equivalency\_Monocoque-Hybrid-Non-Ferrous\_V1.4. Acesso em: 05 maio. 2022.

Área da secção do chassi tubular é calculada de acordo com a equação 7.

$$A = 3 * \frac{\pi}{4} * (d_o^2 - d_i^2) \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

$d_o$  – diametro externo

$d_i$  – diametro interno

Momento de inércia da secção do chassi tubular

$$I_{loc} = 3 * \frac{\pi}{64} * (d_o^4 - d_i^4) \quad (\text{equação 8})$$

Caso atenda a condição a técnica a seguir (equação 9), o teste de equivalência é aprovado:

$$I_{zz} \geq I_{loc} + A * d^2 \quad (\text{equação 9})$$

$I_{zz}$  – Momento de inércia da secção do carro em compósito.

Para os cálculos foi utilizado a secção cortada pelo sistema de CAD. O Izz da metade do carro foi obtido com a referência do sistema de coordenadas na linha de centro do veículo, conforme ilustrado na Figura 16.

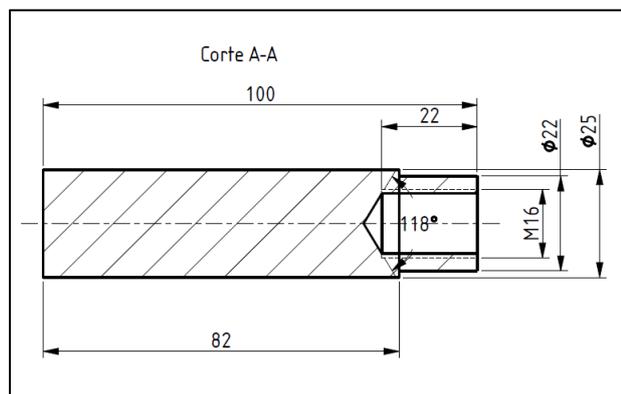
### 3.2.2 ENSAIO DE CISALHAMENTO PERIMETRAL

O ensaio de cisalhamento perimetral deve medir a força necessária para empurrar ou puxar um punção de face plana de 25 mm de diâmetro através de uma amostra de laminado plano.

A amostra deve medir no mínimo 100 mm x 100 mm, ter espessuras de núcleo e camadas idênticas às usadas na placa real e ser fabricado com os mesmos materiais e processos. O dispositivo deve suportar toda a amostra, exceto um orifício de 32 mm alinhado coaxialmente com o punção. A amostra não deve ser fixada ao dispositivo. A borda do punção e o furo no dispositivo podem incluir um filete opcional de raio mínimo de 1mm.

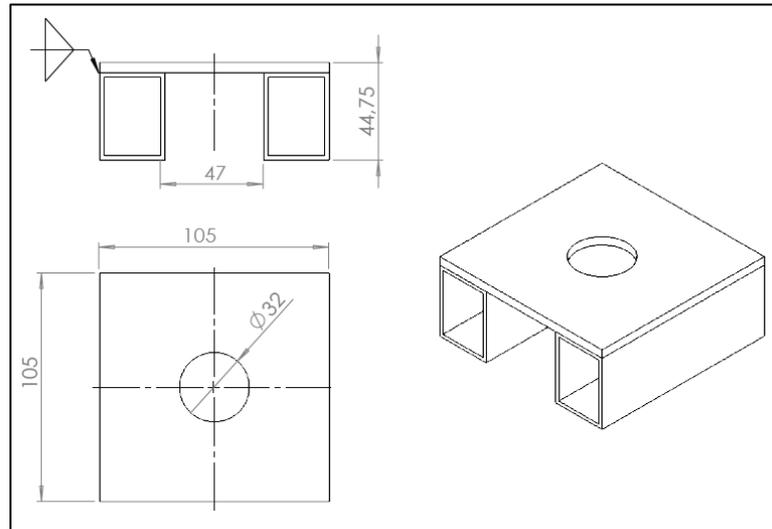
Para adequar a máquina universal de ensaios foram fabricados os dispositivos conforme as Figuras 17 e 18.

FIGURA 17 – Desenho do Punção confeccionado neste trabalho



Fonte: Autor

FIGURA 18 – Desenhos da base do cisalhamento perimetral



Fonte: Autor

A força máxima atingida deve ser 4,5 kN e 7 kN para região da *Side Impact* e *Front Bulkhead* respectivamente.

FIGURA 19 – Fotografia do ensaio de cisalhamento perimetral

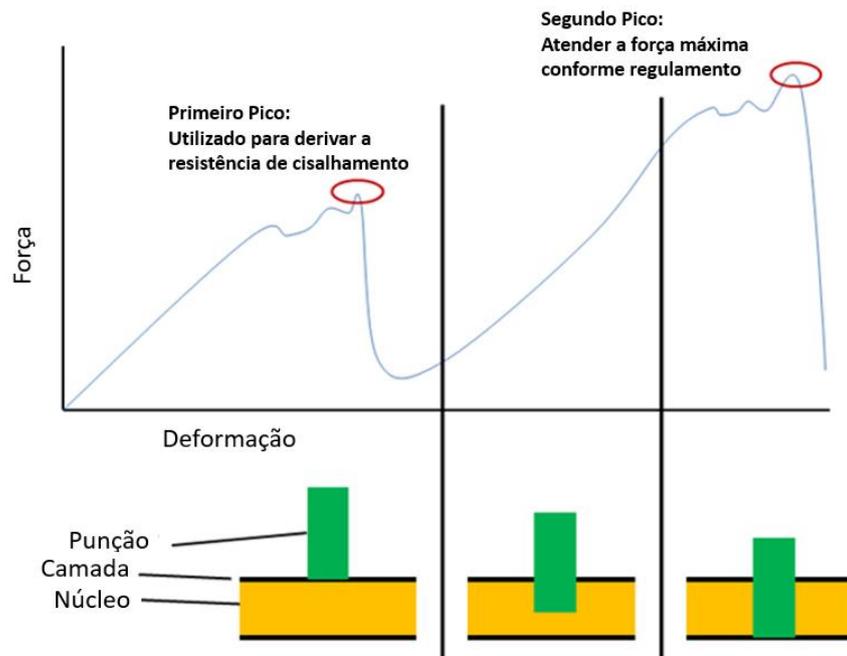


Fonte: Autor

Como característica, a curva de deformação por força gerada por esse ensaio gera dois picos. Conforme ilustrado na Figura 20, o primeiro onde ocorre a perfuração da camada superior

e o segundo da camada inferior do sanduíche, o maior valor de força encontrado tanto no primeiro quanto no segundo pico deve ser considerado para atender as forças máximas. O primeiro pico na curva força x deformação deve ser usado para determinar o cisalhamento da camada de fibra.

FIGURA 20 – Representação do Gráfico Deformação x Força



Fonte: SAE INTERNATIONAL. 2022-FSAE-Structural-Equivalency\_Monocoque-Hybrid-Non-Ferrous\_V1.4. Acesso em: 05 maio. 2022.

A resistência ao cisalhamento é calculada conforme a equação 10.

$$\sigma_{\text{Cisalhamento}} = \frac{F_{1^\circ}}{\pi * e * d} \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

$F_{1^\circ}$  - Força do primeiro pico

$e$  – Espessura da camada

$d$  – Diâmetro do punção

### 3.2.3 ENSAIO DE DUREZA SHORE D

A partir dos corpos de prova de flexão foram feitas medidas de dureza na superfície das duas faces do laminado.

De acordo com Vinay et al. (2016), a dureza é definida pela resistência a deformação elástica da superfície, pode ser medido com o perfurador, arranhões, corte ou flexão. Dentre os mais comuns estão os métodos a partir de medições de durômetros. Para determinar os valores foi utilizado um durômetro analógico da marca Zorn Stendal, com escala de 30 a 100 Shore D. A dureza Shore D é amplamente utilizada para polímeros de alta resistência e reforçados.

As amostras foram colocadas em uma superfície plana e rígida. Foram anotados os maiores valores de dureza exibidos dentro de um segundo.

FIGURA 21 – Medição com Durômetro Shore D

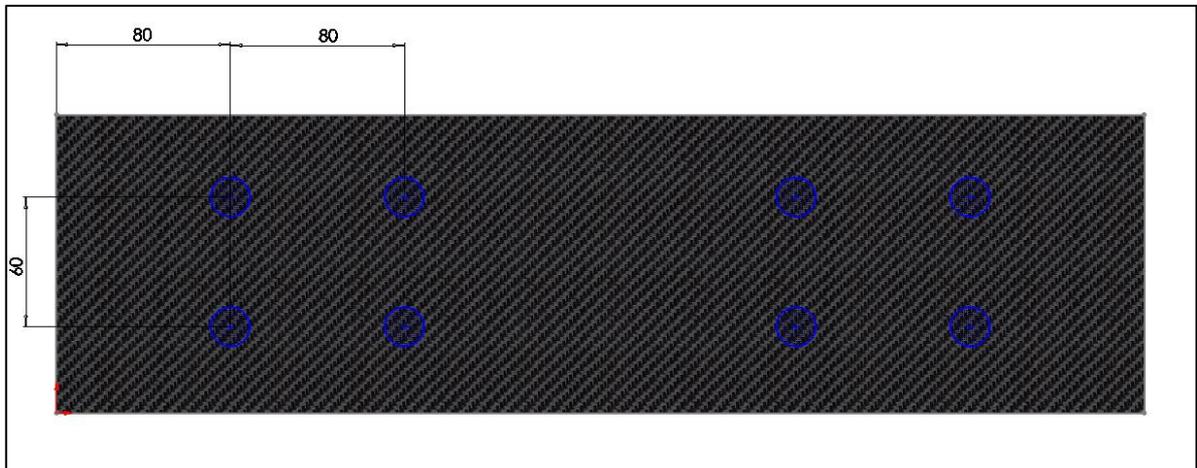


Fonte: Autor

Foram feitas 8 medidas na superfície da amostra, conforme ilustrado na imagem (Figura 22) divididas em duas medições centralizadas a 60mm uma da outra e a 80mm da borda lateral, de cada borda e duas a 160mm, repetindo o processo para as duas faces de cada corpo de prova. Essas regiões de medição não estavam comprometidas pelo local onde o laminado sofreu a fratura por terem um espaçamento seguro para garantir a propriedade superficial. A partir das

medições pontuais em cada face foi determinada a dureza média de cada face de cada corpo de prova.

FIGURA 22 – Ilustração dos pontos de medição da dureza Shore D



Fonte: Autor

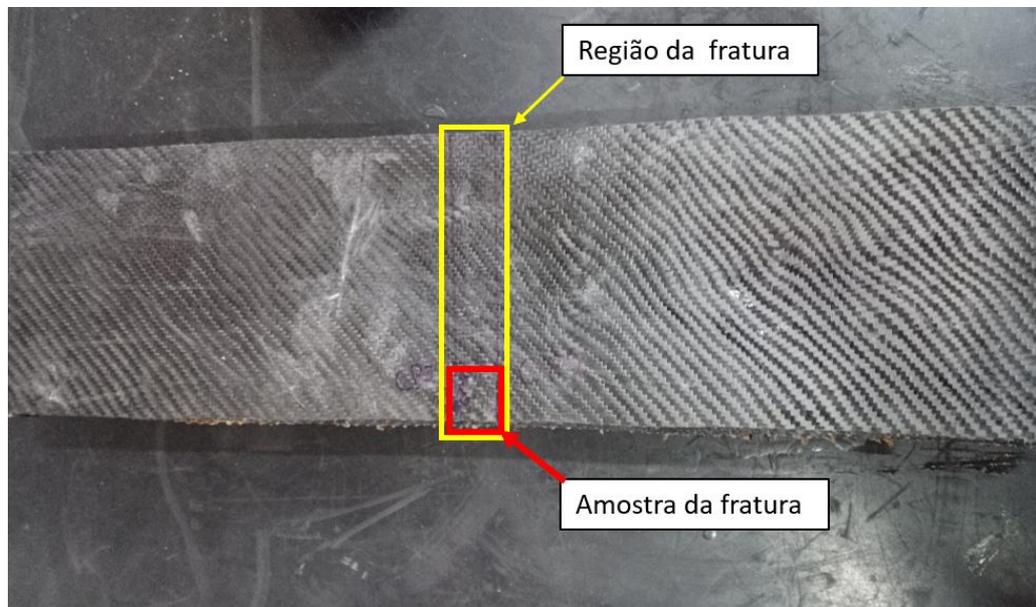
Para realizar a medição foram escolhidas regiões do laminado onde não houvessem interfaces de entrelaçamento na última camada de fibra, pois as regiões onde existe entrelaçamento da fibra biaxial, gera menor resistência ao perfurado e conseqüentemente valores menores de dureza.

#### 3.2.4 ANÁLISES DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Para caracterizar e analisar a morfologia da superfície do material e a adesão das amostras moldadas e após as falhas foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), marca Hitachi modelo TM3000, tensão de operação 5 e 15 kV, com análise de emissão de Raios-X por energia (EDS) e imagem por elétrons retro-espalhados (BSE), sendo as imagens capturadas com resolução de 1280 x 1040 pixels e aumentos de 30 a 600 vezes. O contraste do modo BSE é determinado pela diferença de pesos atômicos entre os elementos constituintes do material.

As amostras dos corpos de prova utilizados no MEV foram retiradas de regiões de fratura da placa de ensaio de flexão. No caso, foram obtidas amostras com largura de 25mm e comprimento de 30mm conforme a região destacada na Figura 23. Da placa de cisalhamento perimetral foram obtidas as amostras com o diâmetro circular de 25mm.

FIGURA 23 – Fotografia da região onde foram retiradas as amostras



Fonte: Autor

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS PAINÉIS

Através do processo utilizado foi possível observar uma distribuição de resina equivalente em todo o volume das faces laminadas, porém ainda por conta da ação da gravidade foi possível notar que a resina tende a descer e a face laminada na primeira etapa gerou um maior acúmulo de resina quando comparada com a laminada na segunda etapa. Nas faces onde foi utilizado o *peel ply* em contato com o laminado foi possível notar uma rugosidade superficial superior em relação as faces onde não foi utilizado.

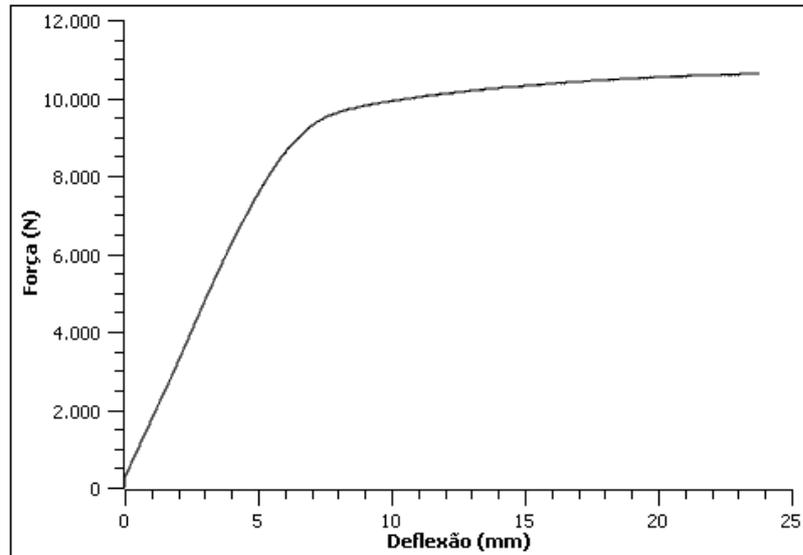
Foram obtidas poucas variações na espessura e foi possível notar uma maior dificuldade com o manuseio do tecido do tipo tela, pois a trama do mesmo permite muita mobilidade dos cabos de fibras, o que dificulta a obtenção de empilhamentos sem as pontas do tecido se soltarem.

### 4.2. RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO

O primeiro ensaio requerido por regulamento para ser utilizado como base para os parâmetros de equivalência é o dos dois tubos de aço em flexão. O tubo redondo analisado foi de diâmetro externo de 25,4mm e espessura 2mm, material SAE 1020 com costura.

Com a realização do ensaio do tubo foi obtido o gráfico força x deformação, conforme mostrado na Figura 24.

FIGURA 24 – Gráfico Força x Deflexão do Tubo de Aço



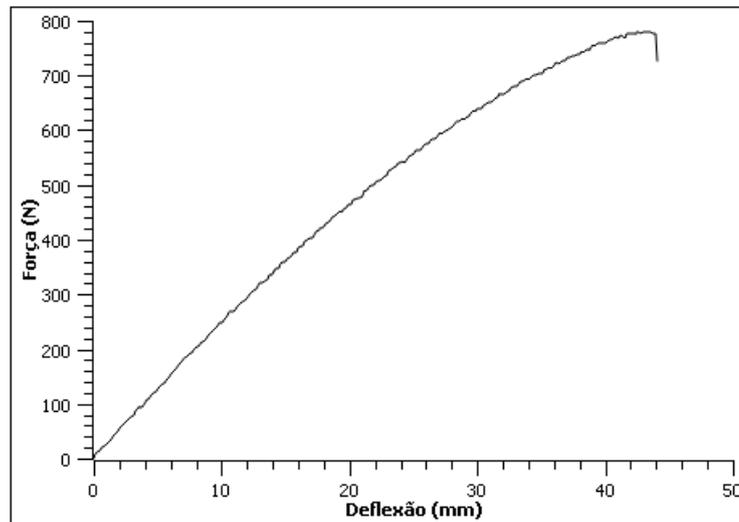
Fonte: Autor

Com o objetivo de conhecer as propriedades e orientar um melhor dimensionamento foram obtidos os parâmetros de equivalência das amostras dos diferentes *layups*.

A primeira amostra moldada e ensaiada foi a partir do *layup* 1, a falha do sanduíche *layup* 1 foi por compressão nas camadas de fibra na parte superior do sanduíche, como pode ser visto na Figura 25, resultando no gráfico da Figura 26.

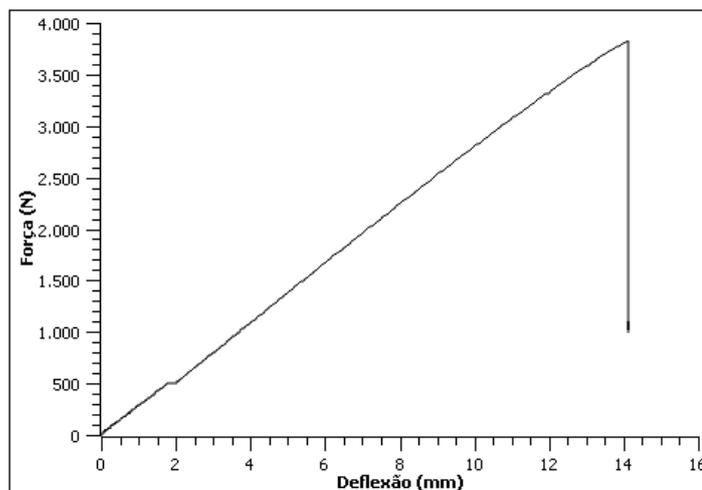
FIGURA 25 – Fotografia da Fratura no Corpo de Prova *Layup* 1

Fonte: Autor

FIGURA 26 – Gráfico Força x Deflexão do *Layup 1*

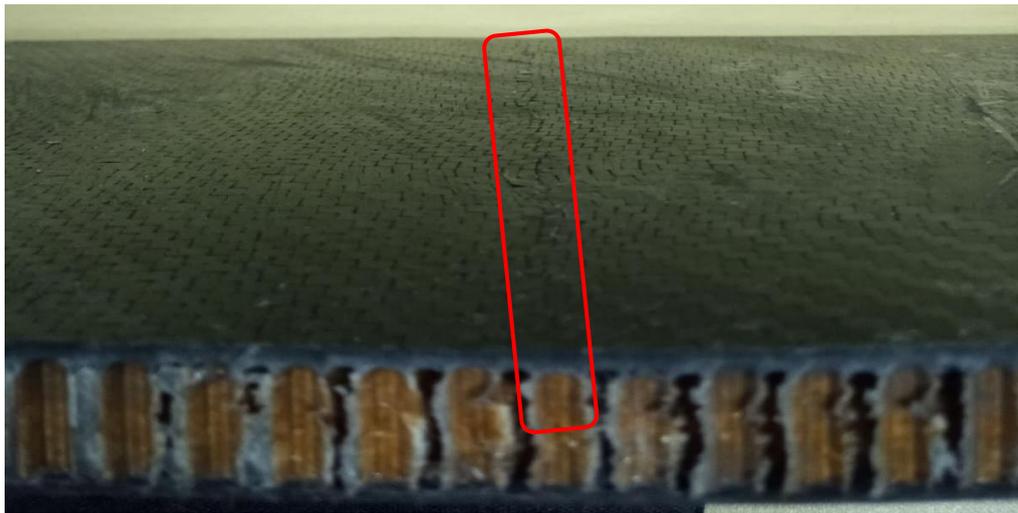
Fonte: Autor

Devido à pouca espessura, o sanduíche tem pouco momento de inércia e o material se mostrou pouco rígido, conforme o gráfico gerado (Figura 26). Com o intuito de aumentar a rigidez e resistência, foi dimensionado o *layup 2*, utilizando mais camadas de fibras e o núcleo de 10mm de espessura ao invés de 7mm, utilizado no *layup 1*. O ensaio do *layup 2*, resultou, conforme a Figura 27, em uma curva característica de resistência de compósitos sanduíche, com valores mais altos de resistência e rigidez.

FIGURA 27 – Gráfico Força x Deflexão do *Layup 2*

Fonte: Autor

FIGURA 28 – Imagem da Fratura no Corpo de Prova do *Layup 2*



Face Superior



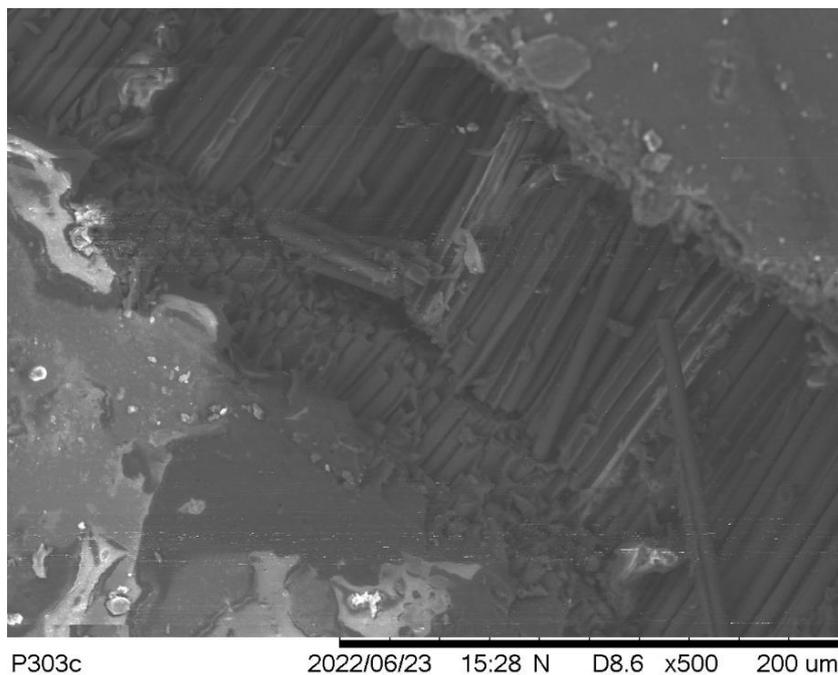
Face Inferior



Fonte: Autor

Conforme ilustrado na Figura 28, a fratura ocorreu apenas na camada superior abaixo da região onde o aplicador de carga flexiona a placa, a camada a qual sofre a carga de compressão nas fibras. Não foi possível observar fratura no núcleo e na camada inferior do sanduíche.

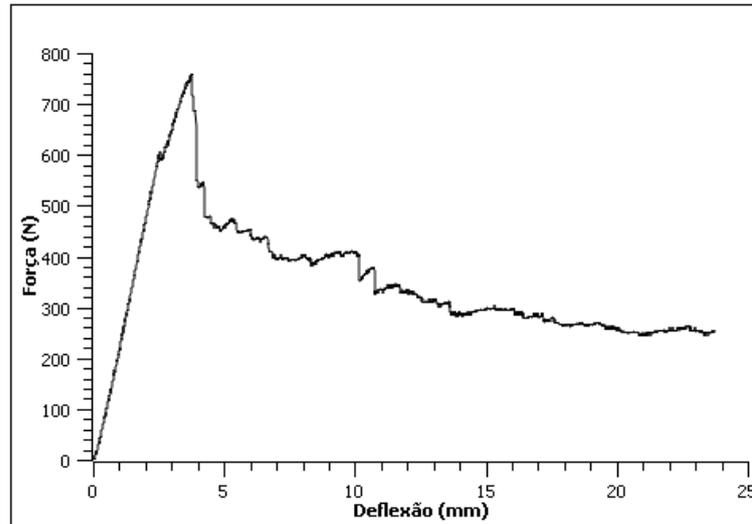
Conforme a imagem da fratura (Figura 29), é possível observar a falha interfacial no rompimento das fibras contínuas, característica de falha catastrófica por compressão das fibras gerando faixas de torção (*kink bands*), que são resultados da falha com micro flambagens nas fibras, juntamente com liberação de energia (GREENHALGH, 2009).

FIGURA 29 – Imagem de MEV da Fratura do Corpo de Prova *Layup 2*

Fonte: Autor

Com o objetivo de aumentar o momento de inércia, conseqüentemente a rigidez, e diminuir o peso específico, uma segunda amostra com um terceiro *layup* foi laminada combinando duas camadas de núcleo *honeycomb* unidas por uma camada de fibras de carbono. Foi adotado o seguinte *layup* [C0/C45/N/C0/N/C-45/C0]. A colagem das colmeias foi feita utilizando a própria resina que fica impregnada nas camadas de tecido, utilizando o processo similar ao da amostra anterior.

Os valores de força resultantes do ensaio da amostra (Figura 30) foram inferiores ao esperado para a nova combinação com maior espessura de núcleo e maior momento de inércia.

FIGURA 30 – Gráfico Força x Deflexão do Laminado *Layup 3*

Fonte: Autor

A partir da Figura 31 foi possível notar o descolamento da região da face laminada interna com o material de núcleo, por baixa adesão entre os materiais, pois tanto na parte superior quanto na parte inferior do laminado interno houve falha por adesão. Este resultado com fenômeno de falha semelhante foi observado também nas amostras de Carvalho (2019) quando submetidas ao ensaio de flexão.

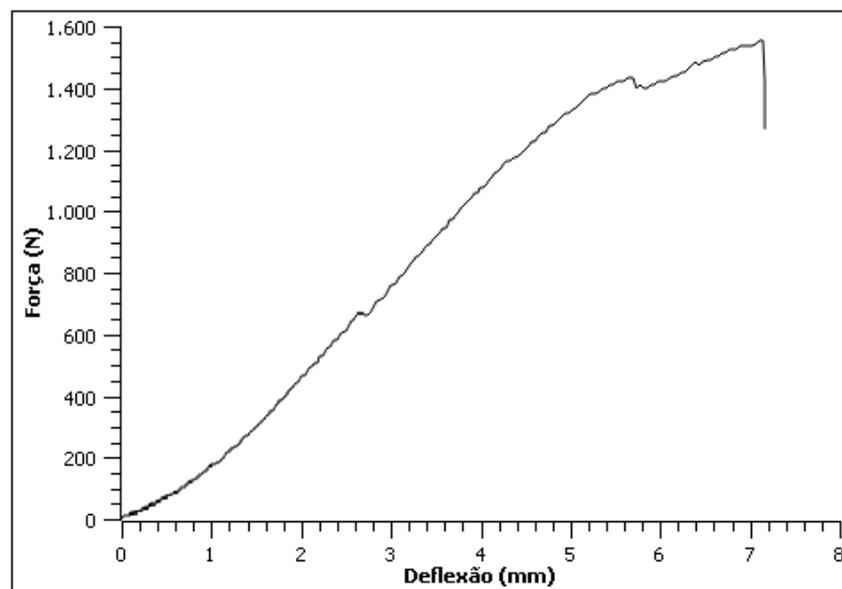
FIGURA 31 – Imagem da Região Fraturada da Amostra *Layup 3*

Fonte: Autor

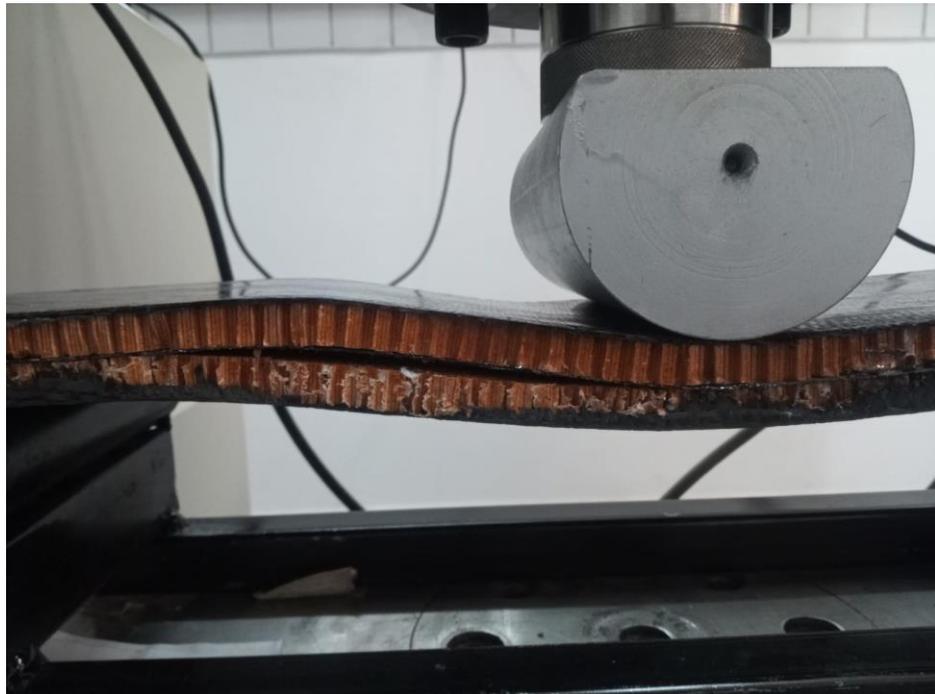
A partir do resultado da amostra *layup* 3 (Figura 30), foi fabricada uma nova amostra com uma alteração no processo de fabricação de colagem da *honeycomb* com o laminado, adicionando uma etapa ao processo, onde a colagem foi feita sob vácuo das duas *honeycombs*, separadamente, sobre uma camada de tecido impregnado com resina. Após a cura foi feita a colagem das duas faces laminadas com adesivo epóxi. O empilhamento do *layup* 4 (Figura 32) seguiu a configuração [C0/C45/C-45/C90/N/C0/N/C0/C45/C-45/C90].

O resultado de força foi mais satisfatório em relação à força atingida até a falha, porém a amostra também apresentou descolamento da interface entre o material de núcleo e as camadas laminadas (Figura 33), resultante da falta de resistência ao cisalhamento do adesivo na interface dos materiais, semelhante aos resultados obtidos por Carvalho (2019).

FIGURA 32 – Gráfico Força x Deflexão do Laminado *Layup* 4



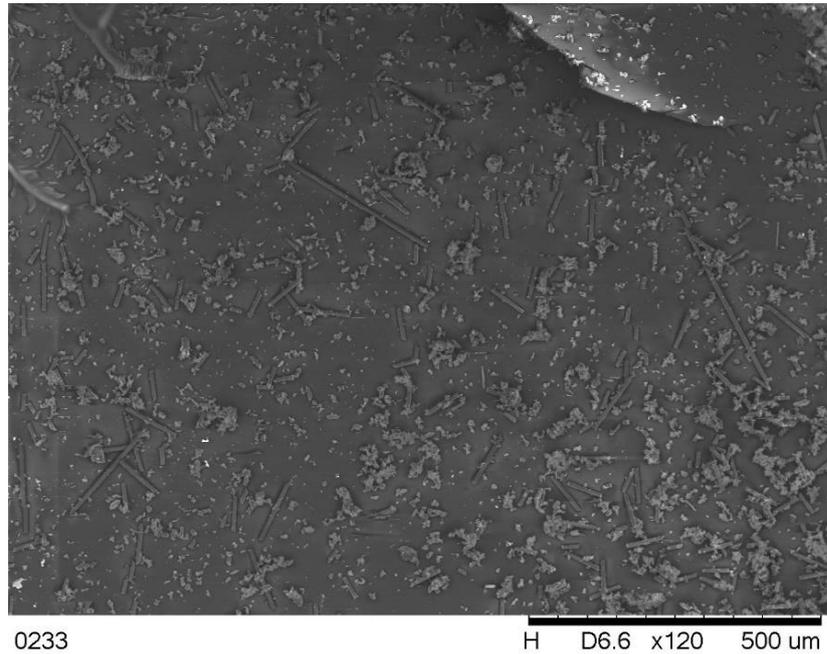
Fonte: Autor

FIGURA 33 – Imagem da Fratura da Amostra do *Layup* 4

Fonte: Autor

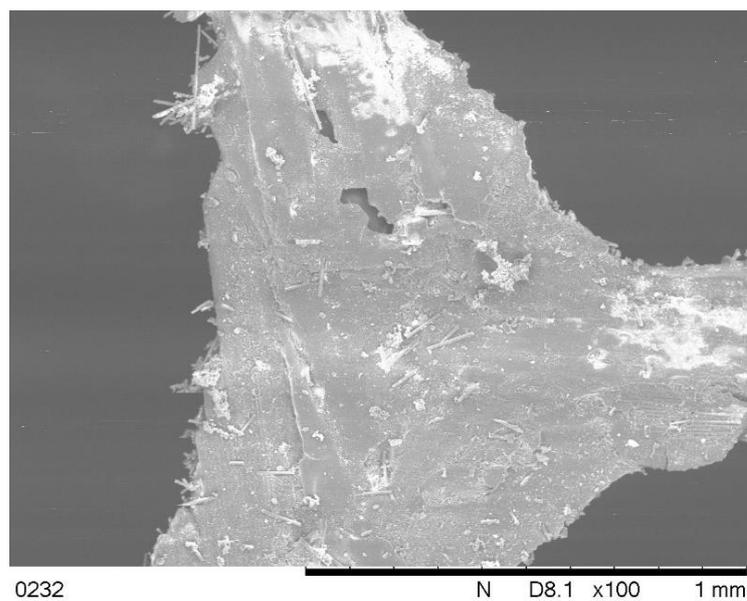
A partir das imagens de MEV (Figuras 34 e 35) foi possível observar a falha por fraca adesão na interface entre o laminado de fibras e o material de núcleo, devido ao intenso cisalhamento interlaminar na interface do honeycomb, gerando uma falha de modo 2 com escorregamento das faces em sentidos opostos. Ocorreram arrancamentos de fibras (mecanismo *pull-out*), gerando fibras curtas coladas à superfície que sofreram maior tensão da superfície de adesão. Este tipo de falha na interface do núcleo também foi observada por Shi *et al* (2014), gerando pequenas fibras cortadas, e espécies de “pontes de fibra” (“fiber-bridging”) que se romperam, podendo ser explicada pela variação das propriedades adesivas em toda a interface. Nestes locais, existem pontos de maior adesão, pois são pontos mais próximos da parede do *honeycomb* com a face do laminado e pontos mais distantes nos interstícios das células hexagonais.

FIGURA 34 – Imagem de MEV da região fraturada na interface do laminado



Fonte: Autor

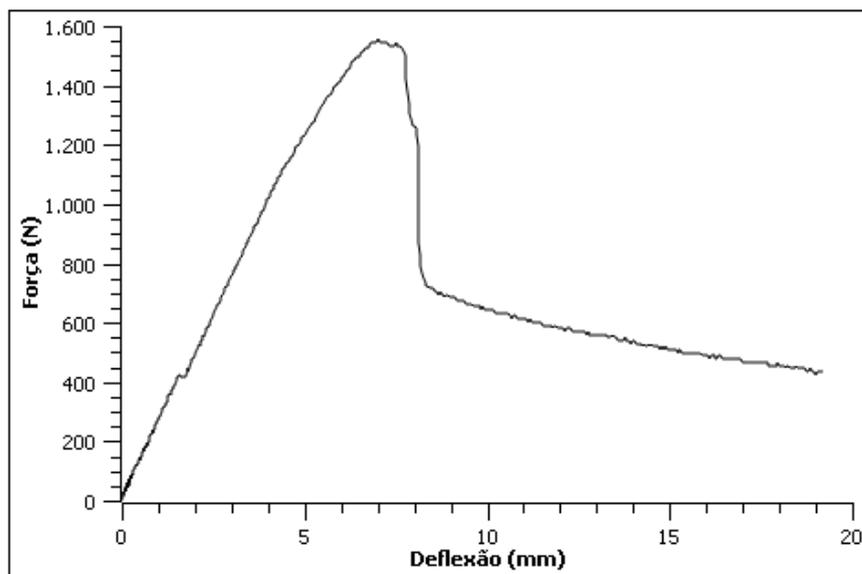
Através da imagem de MEV (Figura 35) da face do material *honeycomb*, notou-se a presença de interstícios de arrancamento de fibras do carbono que se romperam da camada do laminado.

FIGURA 35 – Imagem de MEV da região fraturada na interface da *honeycomb*

Fonte: Autor

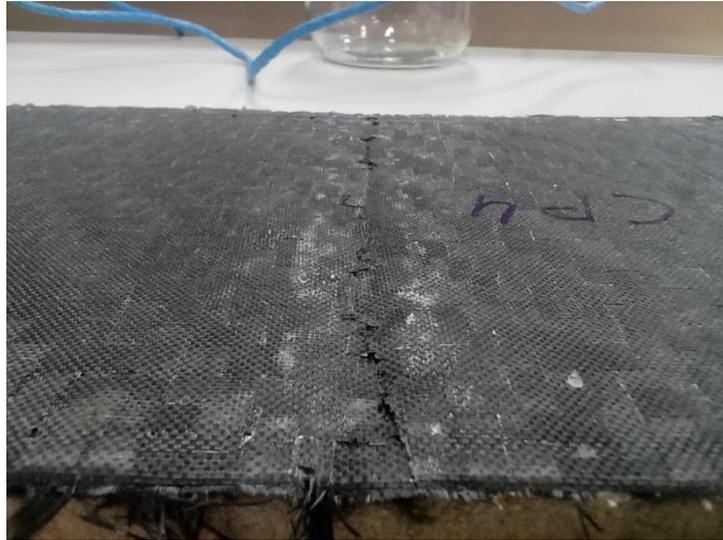
Para se obter uma boa adesão entre material de núcleo e as camadas de fibras, foram realizados os próximos *layups* utilizando como material de núcleo uma única espuma de PVC H80 com 20mm de espessura. Esse material possui uma maior superfície de contato na região da interface com o laminado de fibras, facilitando e melhorando a adesão. O *layup* 5 (Figura 36) teve a seguinte configuração: [C0/C45/N/C90/C45/C0].

FIGURA 36 – Gráfico Força x Deflexão do *Layup* 5



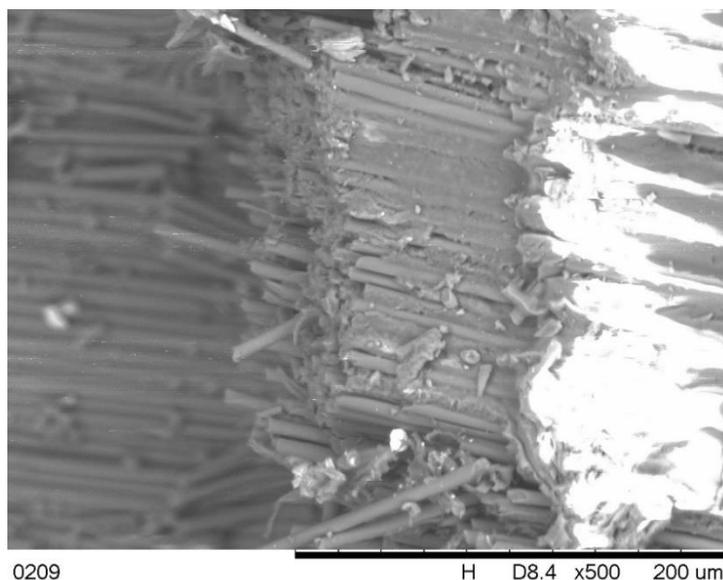
Fonte: Autor

O *layup* 5 apresentou boa adesão entre os materiais de núcleo e as camadas de fibras (Figura 37), resultando em um compósito com resistência e rigidez satisfatórios aos valores teóricos.

FIGURA 37 – Fotografia da fratura da amostra *Layup 5*

Fonte: Autor

A partir das imagens de MEV (Figura 38), foi possível observar no *layup 5* falha por compressão nas fibras e na região de fratura que apresentaram certa uniformidade e poucas variações de ângulo na seção fraturada, indicando uma fratura frágil por alta tensão nas fibras. Foi possível notar também regiões onde houve falha por adesão na matriz por deslocamento (descolamento) na interface com as fibras. Essas falhas são similares às observadas nos estudos de Huang *et al.* (2021).

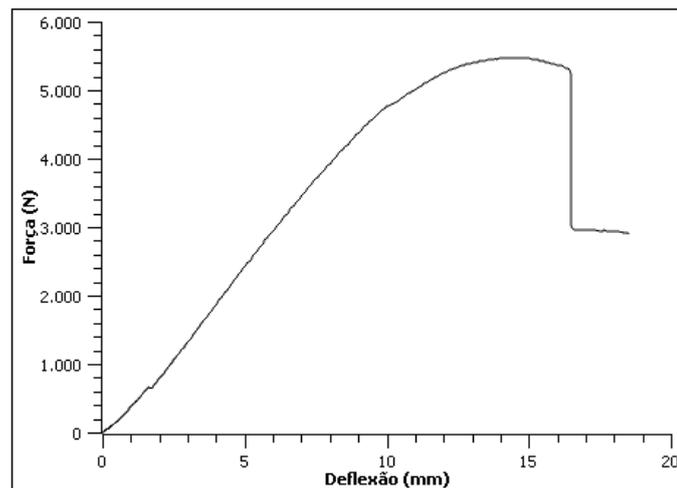
FIGURA 38 – Imagem de MEV das fibras da região fraturada do *Layup 5*

Fonte: Autor

Com o objetivo de aumentar a rigidez e a resistência foi fabricado o corpo de prova do *layup* 6 com um melhor dimensionamento na quantidade de fibras de carbono, seguindo a configuração [C0/C45/C90/C-45/C0/C45/C0/N/C45/C90/C-45/C0/C45].

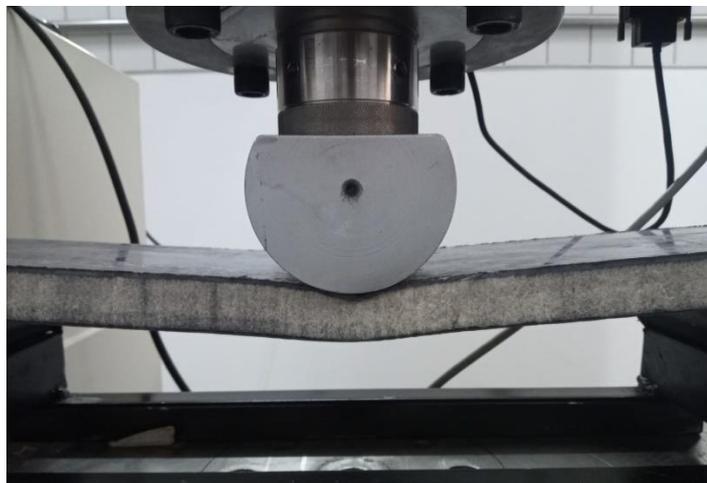
A curva de força por deflexão do ensaio de flexão do *layup* 6 (Figura 39) apresentou uma região não linear, que pode ser explicada como uma fase do ensaio onde o material de núcleo começou a sofrer esmagamento, resultante da alta tensão de compressão na região após a falha da face superior do laminado. Também notou-se a presença de outra região de resistência que pode ser explicada pelas cargas resistivas à flexão do material de núcleo e da face laminada inferior, esse instante pode ser observado na imagem da Figura 40.

FIGURA 39 – Gráfico Força x Deflexão do *Layup* 6



Fonte: Autor

FIGURA 40 – Imagem do corpo de prova fraturado do *Layup* 6



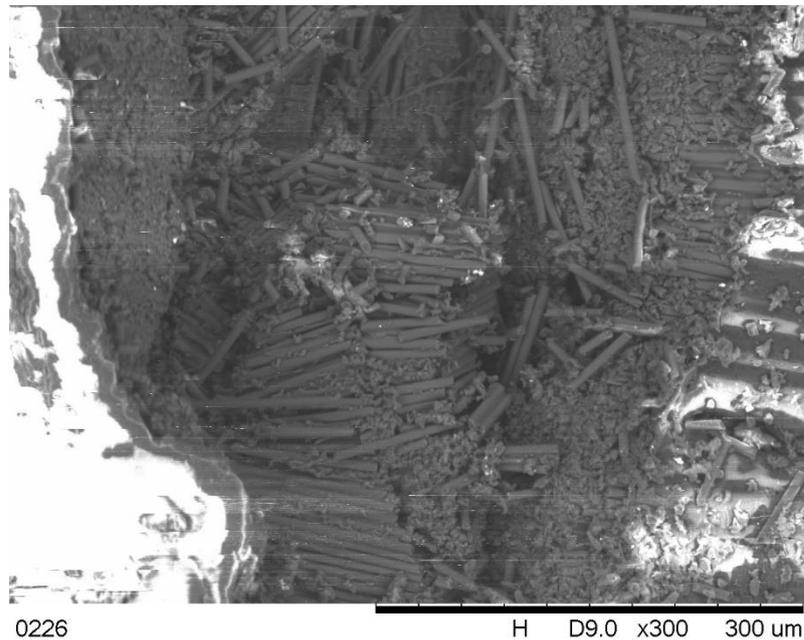
Fonte: Autor

FIGURA 41 – Imagem da fratura da amostra *Layup 6*

Fonte: Autor

A partir das imagens de MEV foi possível notar, conforme a Figura 41, um contínuo padrão de fratura nas fibras, com seções retas e bem definidas, indicando boa uniformidade de características mecânicas, obtendo-se a falha por alta tensão de compressão das fibras. Fibras curtas resultantes da fratura podem ser observadas (Figura 42), resultado de falhas em mais de um local no comprimento da fibra por excesso de tensão de compressão. Tais características são semelhantes às obtidas por falhas de compressão no trabalho de Sun *et al* (2017), sendo também possível de se observar as faixas de torção (*kink bands*) formadas após o rompimento das fibras contínuas (Figura 42).

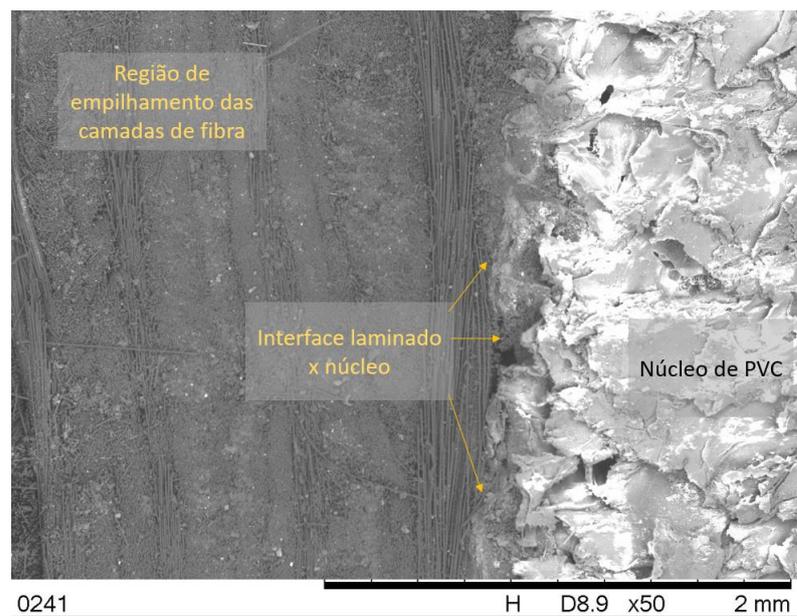
FIGURA 42 – Imagem de MEV da região fraturada do laminado do *layup* 6



Fonte: Autor

Conforme indica a imagem de MEV da Figura 43, é possível observar mesmo na região fraturada por compressão das fibras, poucos vazios na interface do laminado de fibras com a espuma, indicando um bom e eficiente processo de colagem.

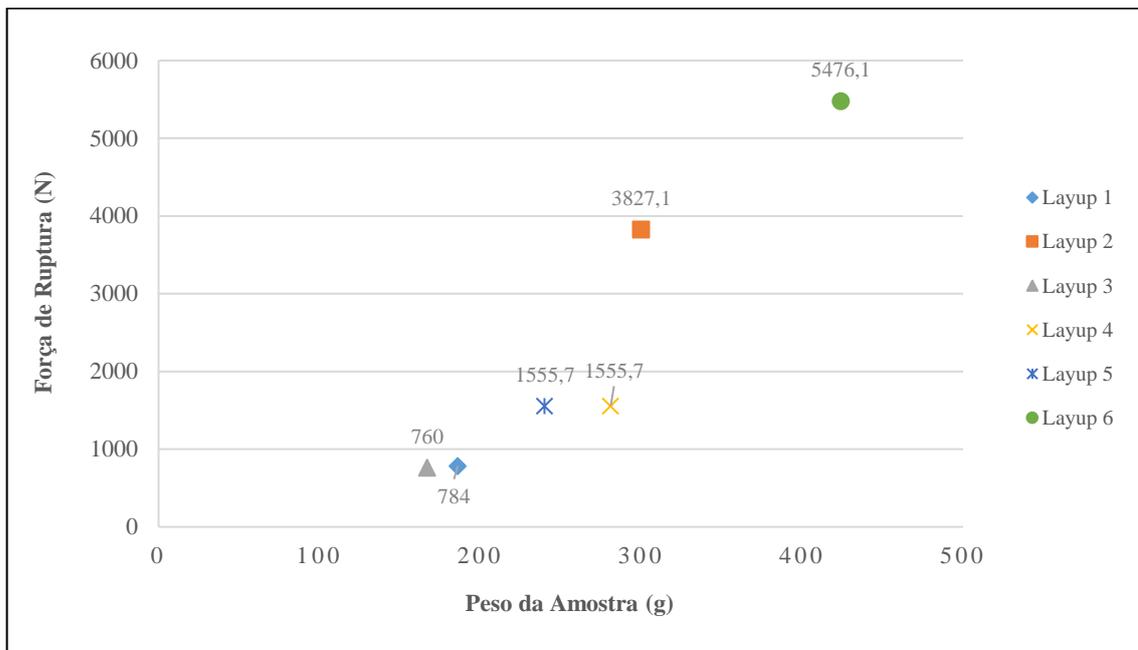
FIGURA 43 – Imagem de MEV da região de interface Núcleo e tecido da região fraturada



Fonte: Autor

Quando comparamos as forças de ruptura das amostras aos seus pesos, conforme o gráfico da Figura 44, é possível notar que a estrutura do *layup* 6 gerou um compósito com uma eficiência estrutural similar às outras amostras, porém com um relativo maior dimensionamento nas suas camadas. Levando em conta que os *layups* 3 e 4 não se comportaram como o esperado por serem sanduíches duplos, os resultados apontam uma certa tendência onde existe uma correlação próxima a linearidade entre a massa da estrutura sanduíche e sua força máxima de ruptura à flexão. O *layup* 2 também atingiu uma satisfatória eficiência estrutural, quando comparada às demais combinações, indicando uma boa característica da utilização do sanduíche com *honeycomb* única.

FIGURA 44 – Gráfico de Peso da Amostra x Força de Ruptura à Flexão



Fonte: Autor

#### 4.3. RESULTADOS DE DUREZA SHORE D

Através dos dados obtidos de dureza das duas superfícies de cada placa, foi calculada a dureza média para cada superfície, e os valores anotados na Tabela 7.

Tabela 7 –Valores obtidos de dureza Shore D dos corpos de prova.

Configuração	Gramatura	Gramatura	Núcleo	Dureza	
	Camada Superior [g/m <sup>2</sup> ]	Camada Inferior [g/m <sup>2</sup> ]		Sup.	Média (Shore D)
<b>Layup 1</b> [C0/N/C45]	305	305	Honeycomb 7mm	Sup.	<b>87</b>
				Inf.	<b>87</b>
<b>Layup 2</b> [C0/C45/C-45/C90/C45/C-45/C0/N/C0/C45/C90/C-45/C0]	1400	1000	Honeycomb 10mm	Sup.	<b>90</b>
				Inf.	<b>89</b>
<b>Layup 3</b> [C0/C45/N/C0/N/C-45/C0]	400	400	Honeycomb duplo 10mm	Sup.	<b>88</b>
				Inf.	<b>85</b>
<b>Layup 4</b> [C0/C45/C-45/C90/N/C0/C90/N/C90/C45/C-45/C0]	800	800	Honeycomb duplo 10mm	Sup.	<b>89</b>
				Inf.	<b>92</b>
<b>Layup 5</b> [C0/C45/N/C90/C45/C0]	880	640	PVC 20mm	Sup.	<b>88</b>
				Inf.	<b>88</b>
<b>Layup 6</b> [C0/C45/C90/C-45/C0/C45/C0/N/C45/C90/C-45/C0/C45]	2198	1558	PVC 20mm	Sup.	<b>92</b>
				Inf.	<b>89</b>

Fonte: Autor

De acordo com Vinay *et al.* (2016), os compósitos reforçados com fibras apresentam maior dureza quando se obtém uma boa colagem adesiva entre fibras e matriz. Os valores médios obtidos das amostras para fibras de carbono entre 88 e 90 Shore D são equivalentes aos obtidos por Vinay *et al.* (2016) e Mohamed *et al.* (2016). Tais valores comprovam a adequada adesão fibras-matriz dos materiais na superfície das amostras.

#### 4.4. EQUIVALÊNCIAS

O painel onde se exige a maior dificuldade para equivalência é o utilizado na SIS vertical. Mesmo tendo apenas que equivaler a 2 tubos conforme o tamanho B, essa região é considerada uma placa na vertical sem a contribuição da rigidez de outras partes ligadas a ela; diferente do assoalho (painel horizontal) da SIS, que no cálculo do regulamento contabiliza a contribuição da rigidez dos painéis verticais para os valores de equivalência.

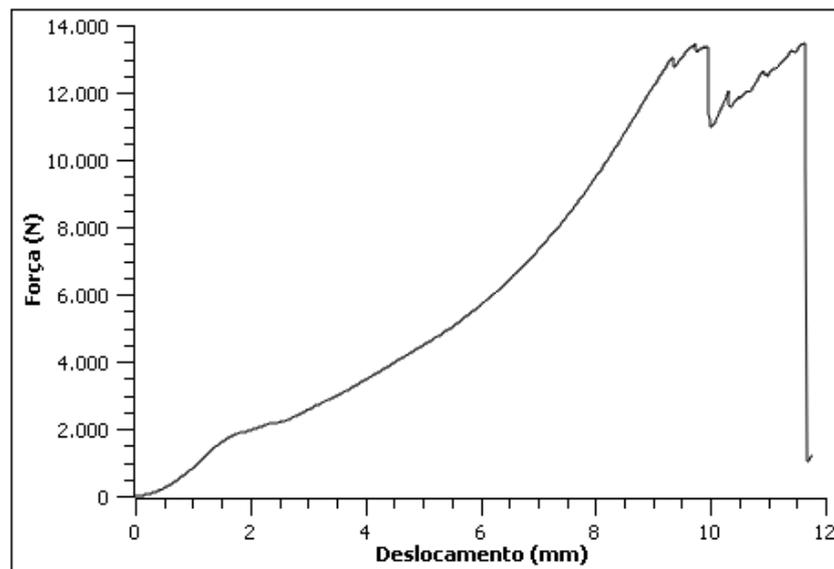
Para otimizar o processo de validação dos painéis foi estudado o caso mais crítico de equivalência (SIS vertical), e a partir deste resultado é possível se orientar para desenvolvimentos mais otimizados nas outras regiões.

Inicialmente, comparamos a rigidez a flexão dos 2 tubos de carbono com a placa de compósito. O resultado da amostra com melhores propriedades mecânicas, o *layup* 6 [C0/C45/C-45/C90/C45/C-45/C0/N/C0/C45/C90/C-45/C0] comparado ao tubo de aço, orienta que para aproximar os valores é necessário aumentar o momento de inércia da placa e consequentemente a rigidez.

#### 4.5. RESULTADOS DO ENSAIO DE CISALHAMENTO

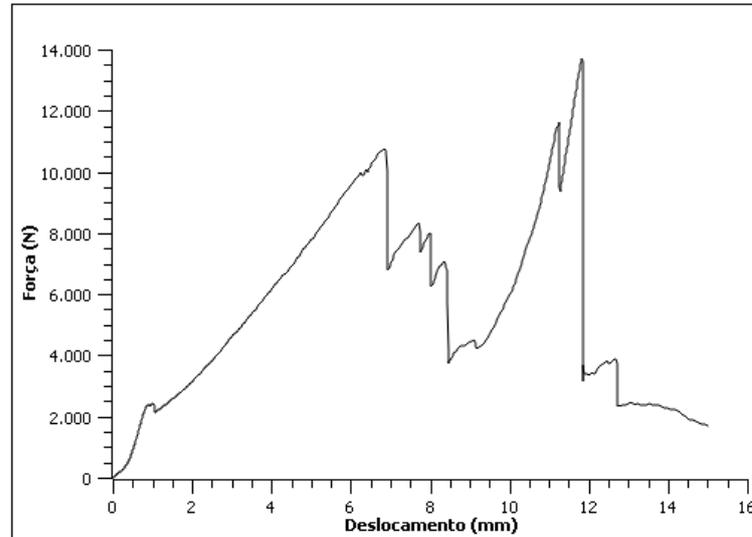
A amostra a partir do *layup* 1, com o objetivo de orientar os primeiros dados de força foram conforme a Figura 45.

FIGURA 45 – Gráfico Força x Deslocamento do Ensaio de Cisalhamento do *Layup* 1



Fonte: Autor

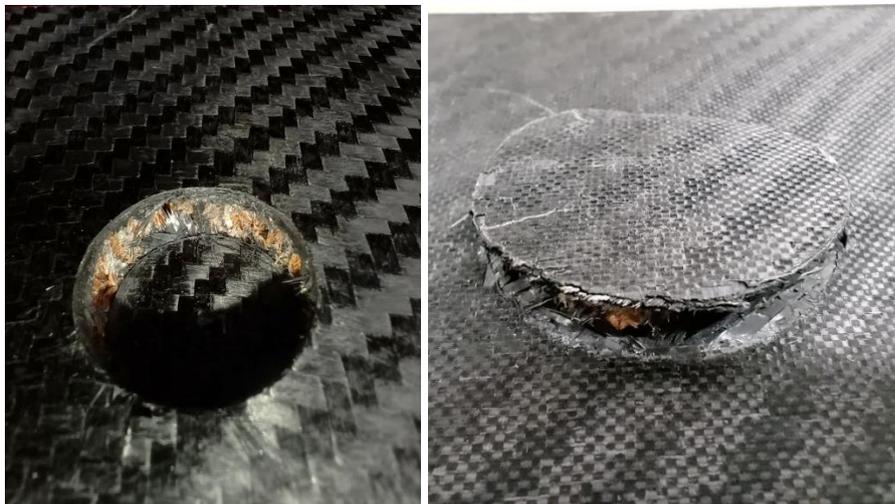
<b>Força do primeiro pico</b>	13460,0	N
<b>Força do segundo pico</b>	13472,0	N
<b><math>\sigma</math> Cisalhamento</b>	227,9	MPa

FIGURA 46 – Gráfico Força x Deslocamento do *Layup 2*

Fonte: Autor

<b>Força do primeiro pico</b>	10651,0	N
<b>Força do segundo pico</b>	13721,0	N
<b><math>\sigma</math> Cisalhamento</b>	205,5	MPa

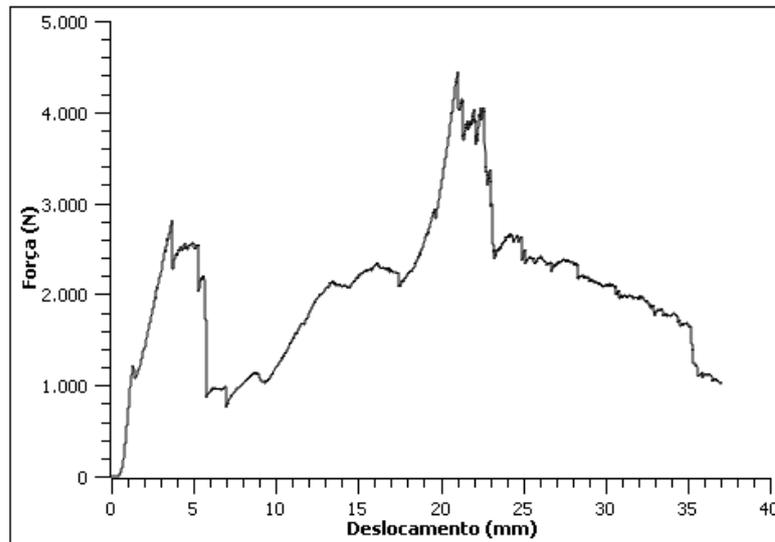
O resultado para a amostra do *layup 2* foi satisfatório (Figura 46), pois descreve bem os pontos onde ocorre a perfuração das camadas de fibras e os valores de força se adequam com certa folga aos requisitos do regulamento da SAE 2022. A fratura demonstrou um cisalhamento perimetral praticamente completo (Figura 47) exibindo uma distribuição da carga pela superfície da amostra.

FIGURA 47 – Face de topo à direita e face inferior à esquerda da fratura *Layup 2*

Fonte: Autor

O laminado [C0/C45/N/C0/N/C-45/C0] *layup* 3 (Figuras 48 e 49) que apresentou falha por adesão entre as camadas, também apresentou falha no ensaio de cisalhamento perimetral. No caso, o substrato de fibra e matriz entre as camadas *honeycomb* se delaminou nas duas interfaces com o *honeycomb*, gerando valores de força do ensaio inferiores ao esperado.

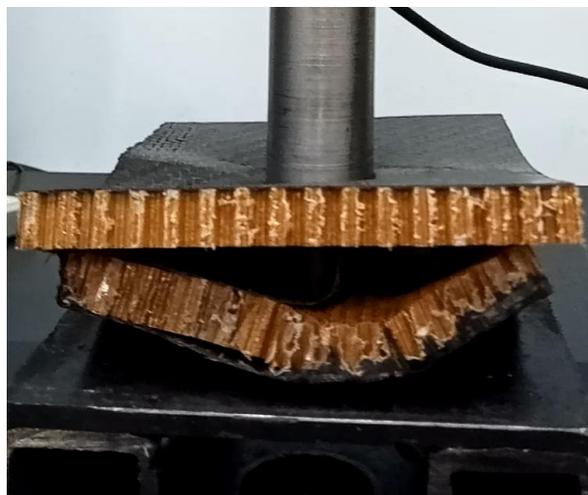
FIGURA 48 – Gráfico Força x Deslocamento do *Layup* 3



Fonte: Autor

<b>Força do primeiro pico</b>	2800,0	N
<b>Força do segundo pico</b>	4452,0	N
<b><math>\sigma</math> Cisalhamento</b>	47,4	MPa

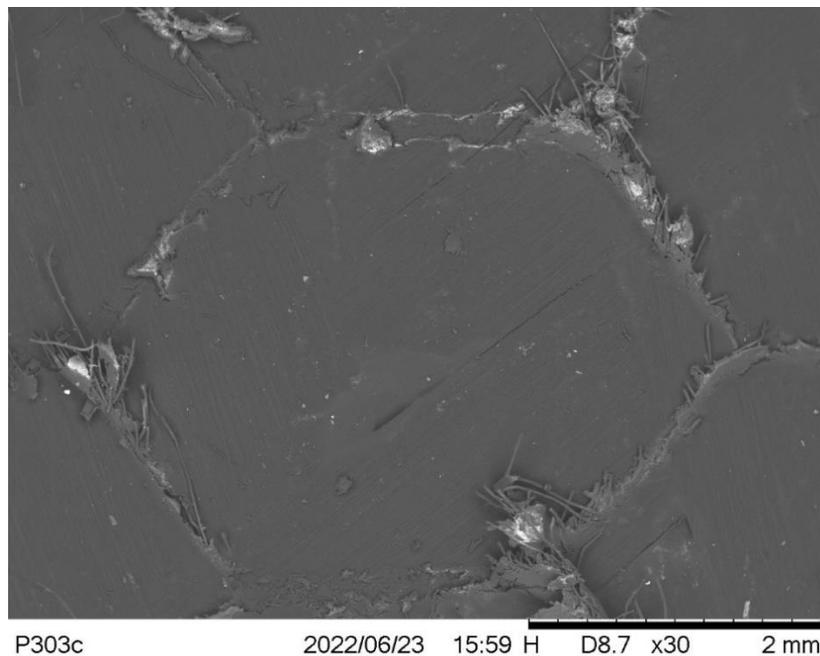
FIGURA 49 – Imagem da Fratura do Laminado *Layup* 3



Fonte: Autor

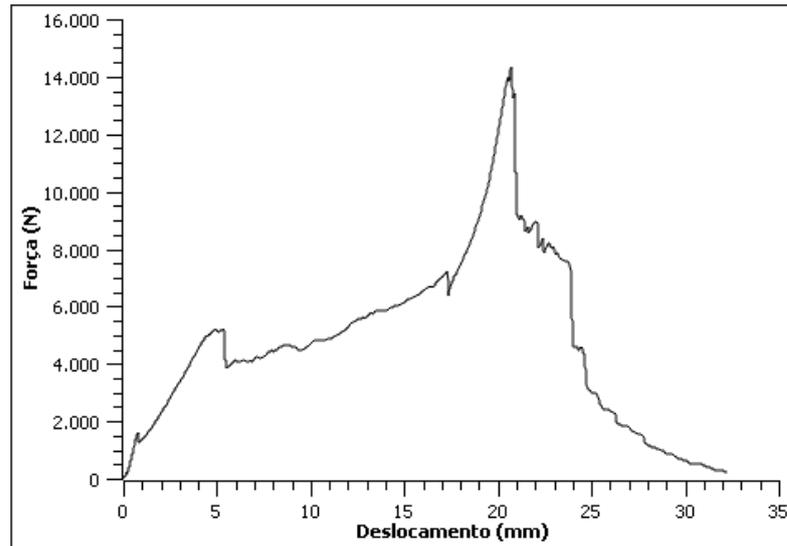
De acordo com as imagens de MEV (Figura 50) foi possível concluir que a fratura se deu predominantemente por uma falha adesiva com alguns pontos de falha coesiva e com evidências do mecanismo de arrancamento de fibras pela interface do laminado. As imagens das fraturas revelaram regiões de maior força de adesão da cola adesiva e regiões de menor adesão, onde não houve a mesma força de adesão para gerar o arrancamento (Figura 49). Estas imagens e respectivas características foram similares às encontradas no estudo de Sun *et al* (2021).

FIGURA 50 – Imagem de MEV da fratura do corpo de prova



Fonte: Autor

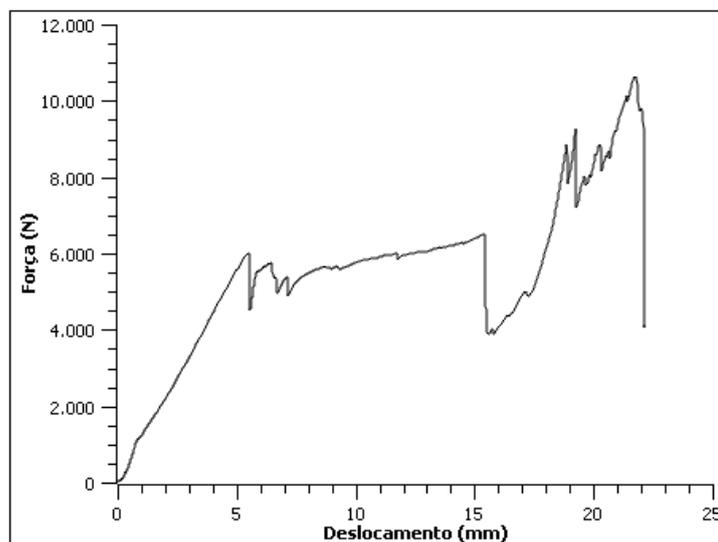
Na configuração do *layup* 4 os valores de pico de força na ruptura (Figura 51) das camadas atingidas aprovaram a amostra para as duas regiões do chassi de FSAE. Estes valores resultantes maiores comprovam que o *layup* 4 teve uma ligação adesiva mais forte entre as camadas quando comparado ao *layup* 3.

FIGURA 51 – Gráfico Força x Deslocamento do Laminado *Layup 4*

Fonte: Autor

<b>Força do primeiro pico</b>	5206,5	N
<b>Força do segundo pico</b>	14323,0	N
<b><math>\sigma</math> Cisalhamento</b>	47,98	MPa

Conforme o gráfico do ensaio do *layup 5* da Figura 52, os valores de pico encontrados aprovaram a amostra conforme os requisitos do regulamento do FSAE. Esta amostra apresentou um longo deslocamento até a ruptura total da primeira face laminada quando comparado aos demais.

FIGURA 52 – Gráfico Força x Deslocamento do Laminado *Layup 5*

Fonte: Autor

<b>Força do primeiro pico</b>	6513,3	N
<b>Força do segundo pico</b>	10641,0	N
<b><math>\sigma</math> Cisalhamento</b>	127,54	MPa

As imagens da Figura 53 apresentam uma fratura com relativa distribuição da trinca gerada na face superior e a partir da vista lateral pode-se observar predominância de fratura por cisalhamento da amostra, sem fratura na interface entre o compósito e a espuma de PVC.

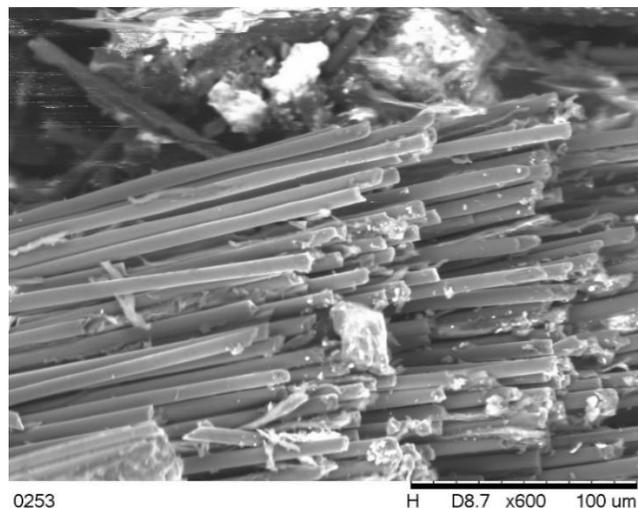
FIGURA 53 – Fotografias da amostra *Layup 5* fraturada



Fonte: Autor

Pode se observar pela fractografia da Figura 54 que a fratura ocorreu em regiões de diferentes comprimentos das fibras, e as seções apresentam certo ângulo na secção fraturada, indicando a falha por cisalhamento.

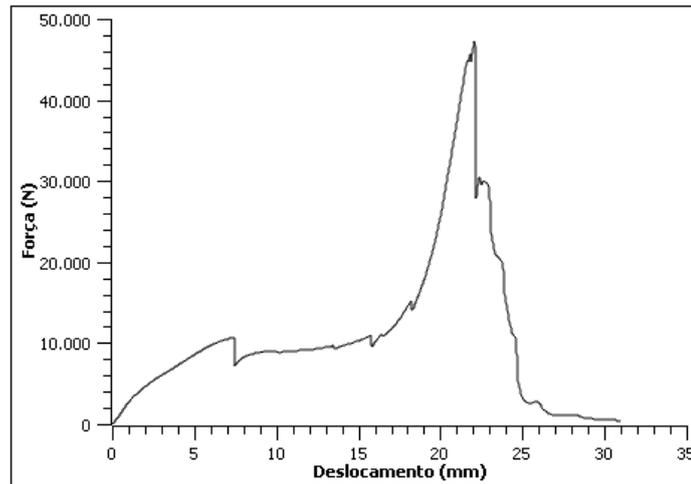
FIGURA 54 – Imagem de MEV das Fibras Fraturadas por Cisalhamento do *Layup 5*



Fonte: Autor

Conforme pode ser observado no gráfico obtido do *layup* 6 (Figura 55), o valor de força de ruptura da face laminada inferior apresentou um valor muito superior as outras amostras, comprovando uma boa capacidade de resistência ao cisalhamento nesta região da amostra.

FIGURA 55 – Gráfico Força x Deslocamento do Laminado *Layup* 6



Fonte: Autor

<b>Força do primeiro pico</b>	10662,0	N
<b>Força do segundo pico</b>	47221,0	N
<b><math>\sigma</math> Cisalhamento</b>	70,3	MPa

Com observações nas fotografias da Figura 56, pode se concluir que as fraturas apresentam boa distribuição da trinca, resultado de um compósito capaz de distribuir as tensões de forma mais homogênea, muito similar a fratura do *layup* 5.

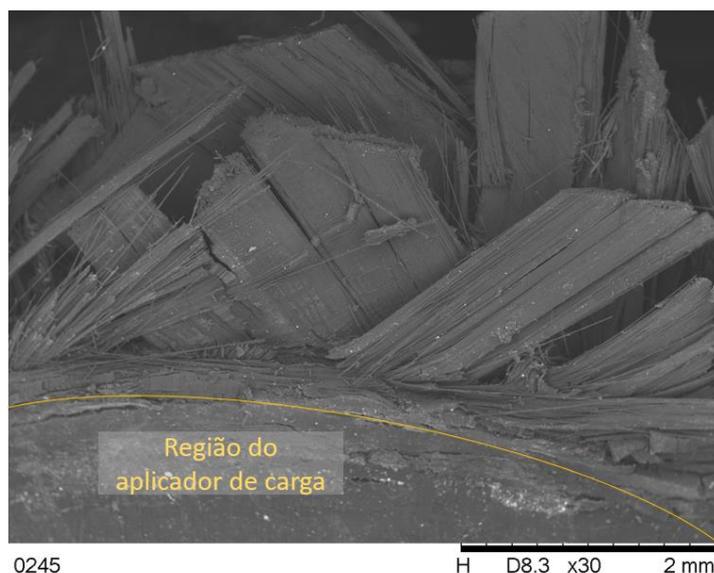
FIGURA 56 – Fotografias da amostra *Layup* 6 fraturada



Fonte: Autor

A partir da imagem de MEV da Figura 57, foi possível observar que a fratura ocorreu em diferentes regiões conforme se aumenta a profundidade do corte, apresentando maiores estiramentos das fibras da região do topo (primeiras a fraturarem) em comparação com as fibras da região inferior.

FIGURA 57 – Imagem de MEV da Região da Fratura de Cisalhamento do *Layup 6*



Fonte: Autor

Os resultados dos corpos de prova ensaiados que apresentaram os melhores resultados nos ensaios mecânicos podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados dos cálculos de equivalência

	<b>Gradiente de rigidez (N/mm)</b>	<b>E (MPa)</b>	<b>I (mm<sup>4</sup>)</b>	<b>Módulo de Flambagem</b>	<b>Energia absorvida até 19mm (J)</b>	<b>Massa do corpo de prova (g)</b>
Tubo de 25,4 x 2mm/ 1 tubo	731,0	18622,1	10137,0	2,18E+09	158,3	578,0
<i>Layup 1</i>	18,39	3029,9	8142,0	2,47E+07	20,6	186,0
<i>Layup 2</i>	270,98	42500,1	9328,0	3,96E+08	27,7	300,0
<i>Layup 3</i>	226,38	14835,6	21973,0	3,26E+08	8,2	167,0
<i>Layup 4</i>	262,30	8923,1	42872,0,0	3,83E+08	6,3	281,0
<i>Layup 5</i>	242,00	18619,8	18819,0	3,50E+08	13,8	240,0
<i>Layup 6</i>	480,72	15118,6	50303,0	7,61E+08	64,2	424,0

Fonte: Autor

Apesar do melhor compósito gerado, o *layup* 6 (Tabela 8) ter as propriedades específicas inferiores às do tubo (conforme o regulamento), a partir dos resultados das caracterizações realizadas e utilizando as equações de equivalência do regulamento da categoria, através de alterações no momento de inércia do sanduíche foi possível prever melhores propriedades mecânicas quando se utiliza uma maior espessura de material de núcleo.

O *layup* 2 apresenta grande potencial de melhoria da suas propriedades mecânicas com o aumento da espessura para o atendimento total do regulamento. Os resultados obtidos dos mesmos, aprovam as amostras para determinadas regiões do veículo onde se exigem menos esforços mecânicos, podendo ser utilizado em combinação com o *layup* 6

Comparando a massa de todos dos corpos de prova, percebe-se um aumento de peso dos corpos de prova com utilização de espuma PVC (*layup* 5 e 6) no núcleo em relação aos de *honeycomb* de aramida (*layup* 1, 2, 3 e 4), porém pelas boas propriedades atingidas se justifica sua utilização.

Estes estudos permitiram a estimativa do peso de um chassi monocoque completo, utilizando a combinação dos *layups* 2 e 6, sendo o *layup* 2 a configuração mais leve. A partir dessa combinação, pôde-se fazer uma otimização da massa levando em consideração as regiões onde cada um dos *layups* estariam aprovados (conforme a tabela 3); desta maneira, estimou-se o peso de um chassi monocoque de aproximadamente 23kg. Este tipo de chassi monocoque quando comparado a um chassi típico chassi tubular de aço, otimizado e também conforme o regulamento, possibilita uma redução de 5,4 kg, ou seja, aproximadamente 24%. Esta redução de peso proporcionará melhor desempenho dinâmico e eficiência energética do veículo.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho desenvolveu estudos preliminares de equivalência das combinações de *layup* dos diferentes materiais para fabricação de compósitos para a Formula SAE na temporada de 2022. Através dos resultados das combinações de *layup* obtidos foi possível observar que o *layup* 6 se apresentou indicado para a maioria das regiões do chassi do automóvel de competição, apenas sendo necessário otimizar a rigidez e deformação para a região da SIS.

Os resultados obtidos do *layup* 2, também, resultaram em possíveis configurações para a utilização em chassis de Formula SAE. Através dos cálculos de equivalência, sua utilização estaria aprovada parcialmente para o uso na região da FBHS e aprovada para se utilizar nas regiões da FHB e MHBS.

Utilizando a planilha de equivalência, com base nos dados dos ensaios e alterações no momento de inércia do sanduíche foi possível prever as propriedades mecânicas. Fazendo os cálculos com um aumento no momento de inércia para uma amostra de 30mm de espessura de núcleo, obteve-se a rigidez necessária sem a necessidade de ensaiar mais combinações de *layup*.

Este trabalho trouxe algumas diferentes combinações de matriz e reforço, com diferentes espessuras e materiais de núcleo, permitindo uma grande variabilidade de parâmetros. Esta versatilidade no dimensionamento do laminado sanduíche ocasiona certa complexidade na otimização, mas também permite otimizações em propriedades específicas.

Não se obteve os resultados esperados inicialmente com o material *honeycomb* de núcleo (*layup* 3 e 4), devido à fraca adesão nas interfaces com os materiais disponíveis ao estudo. Porém, o material de espuma se mostrou mais adequado para fabricação utilizando o método descrito nesse trabalho, atingindo bom desempenho na interface de colagem e se adequando bem em projetos que demandam um menor custo, apesar da sua densidade ser pouco maior que dos materiais *honeycomb*.

### 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do conhecimento gerado em relação às propriedades combinadas dos compósitos submetidos aos ensaios de equivalência, novos ensaios com combinações de outros materiais de núcleo podem se obter painéis com menor peso específico.

A partir do processamento das amostras foi notado que pelo aumento da quantidade de reforço e matriz nas faces laminadas, é altamente recomendado a utilização de tecidos com

gramaturas maiores para diminuir o manuseio manual e o tempo de processamento das placas, uma vez que se utilizaria menos camadas para atingir um teor de fibra e matriz equivalente.

No caso deste trabalho, as combinações de tipo de material de núcleo e tipo de tecido tiveram grandes restrições orçamentárias e de disponibilidade logística e comercial; assim outros materiais de alto desempenho importados podem ser avaliados em projetos com maior orçamento.

Estudos mais avançados com os resultados dos *layups* obtidos neste trabalho, se forem realizados através de cálculo estrutural com modelo de elementos finitos, resultarão nas estimativas dos valores da rigidez, da resistência e dos níveis de *crashworthines* do chassi monocoque, quando comparado a um chassi tubular para se avaliar os ganhos de desempenho nestes requisitos.

As dificuldades encontradas em relação à adesão do material *honeycomb* com as camadas de fibras possibilitam novos estudos sobre a influência do tipo material adesivo na interface e a utilização de materiais em filmes adesivos, com o objetivo de se obter compósitos mais leves que atendam os requisitos de equivalência, É sempre importante ressaltar que os estudos devem estar de acordo com o regulamento vigente, pois o mesmo vem sendo atualizado ano após ano, porém com algumas pequenas alterações quanto aos requisitos de equivalência.

## REFERÊNCIAS

ALVES, J. L. C., PRADO. K. S. e PAIVA J. M. F. Compressive and Interlaminar Shear Strength Properties of Biaxial Fiberglass Laminates Hybridized with Jute Fiber Produced by Vacuum Infusion, Journal of Natural Fibers. 18:11, 1772-1787, DOI: 10.1080/15440478.2019.1697996. 2018.

ASTM. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates, 2006.

ASTM. American Society for Testing and Materials, D 3039/D 3039M – 08 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, 1997.

ASTM. American Society for Testing and Materials, D 790 – 02 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, 2017.

ANDERSON, T. L. Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications, 3ª ed, CRC Press, Boca Raton, 640p, 2005.

BACHMAN, C. Design Judges. 13 abr de 2021. <https://www.designjudges.com/articles/overall-vehicle-priorities> Acesso em: 05 de abril de 2022.

BARCELOS, M. F. P. Ensaio tecnológico, bioquímico e sensorial de soja e guandu enlatados no estado verde e maturação de colheita. Tese (Doutorado em Nutrição) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade de Campinas, Campinas, 1998. 160p.

BARRACUDA COMPOSITES. Resin Uptake em Materiais Sandwich Disponível em: < <https://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/resin-uptake-em-materiais-de-nucleo/> >. Acesso em 08 abr. 2022.

BARRACUDA COMPOSITES. Cura de Resinas Termofixas. Disponível em: <<https://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/cura-de-resinas-termofixas>>. Acesso em: 05 de abr. 2022.

BENDOUBA, MOSTEFA, ABDELKRIM AID, AND MOHAMED BENGUEDIAB, 2014, Fatigue Life Prediction of Composite Laminates under Two Block Loading, Applied Mechanics and Materials 4(1):587–90.

BERGANT, Z., SAVIN, A. e GRUM, J. Effects of manufacturing technology on static, multi-frequency dynamic mechanical analysis and fracture energy of cross-ply and quasi-isotropic carbon/epoxy laminates. Polymers and Polymer Composites, 358–370, <https://doi.org/10.1177/0967391118798266>. 2018.

BUENO, P. de Oliveira. Análise Comparativa entre Juntas “Single-lap” e “Wavylap” de Compósitos Unidas por Adesivos, 2002, 136 p. Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

CABRAL, R. F.; CICCHELLI, P. P. M. B.; ALVARENGA, C. F. A.; ARAUJO, F. A.; ROSA, V. V. S.; LEITE, B. F. Estudo da Resistência Mecânica e Análise Térmica da Resina Epóxi v. 11 n, 2: Revista de Teccen v11 n2, 2018.

CÂNDIDO, G. M. e ALMEIDA, S. F. M. Processamento de Laminados de Compósitos Poliméricos Avançados com Bordas Moldadas, Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 10, nº 1, p, 31-41, 2000.

CARVALHO, L. R. Fabricação e Caracterização de Estruturas Sanduíche Tipo Colmeia com Núcleo Impresso por Fusão e Deposição de Material Termoplástico. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Aeroespacial), Universidade de Brasília, Brasília, 2019. 147p.

CASTANIÉ, B., BARRAU, J. J. e JAOUEN, J. P. Theoretical and Experimental Analysis of Asymmetric Sandwich Structures, Composite Structures, Volume 55, P, 295-306, ISSN 0263-8223. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00156-8](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00156-8), 2002.

COSTA, M. L.; ALMEIDA, S. F. M. e Rezende, M. C. Resistência ao Cisalhamento Interlaminar de Compósitos com Resina Epóxi com Diferentes Arranjos das Fibras na Presença de Vazios. Vol. 11, nº 4, p. 182-189, 2001, Nov 2002.

CUNHA, R. A. D.; SANTOS, J. K. D.; FELIPE, R. C. T. S. e FELIPE R, N. B. Comportamento Mecânico do Compósito PRFV Quando Imerso em Água do Mar Por Tempo Prolongado. HOLOS, Ano 33, Vol, 04, Set. 2017.

DAS, Sujit. The Cost of Automotive Polymer Composites: a Review and Assessment of doe's Lightweight Materials Composite Research, Oak Ridge National Laboratory, Jan. 2001.

DAVIES, J. M. Lightweight Sandwich Construction, Oxford, United Kingdom: Blackwell Science Ltd, 2001, 384 p.

E-COMPOSITES. Divinycell H60. Disponível em: [http://www.marinecomposites.com.br/wp-content/uploads/datasheets/divinycell\\_h80.pdf](http://www.marinecomposites.com.br/wp-content/uploads/datasheets/divinycell_h80.pdf). Acesso em 14 de Julho de 2022.

EURENIUS, C. A.; DANIELSSON, N.; KHOKAR, A.; KRANE, E.; OLOFSSON, M.; WASS, J. Analysis of Composite Chassis. Chalmers University Of Technology Göteborg, Sweden, 2013.

GAGLIARDO, D. P.; MASCIA, N. T. Análise De Estruturas Sanduíche: Parâmetros de Projeto, Ambiente Construído, Porto Alegre, v, 10, n, 4, p, 247-258, out./dez, 2010,

GAY, Daniel. Composite Materials, Design and Applications, 3ª Ed, 6000 Broken Sound Parkway, NW Suite 300, Boca Raton, FL 33487, CRC Press, 2015, 598p.

GOMES, M. N. Tratamento térmico pré e pós-cura de diferentes compósitos: análise térmica, resistência à flexão e grau de conversão, Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008.

GREENHALGH, E. S. Failure Analysis and Fractography of Polymer Composites, Woodhead Publishing, 2009.

GURIT. Guide to Composites. Abril, 2017. Disponível em <<https://www.gurit.com/-/media/gurit/datasheets/guide-to-composites.pdf>> . Acesso em 14 de Julho de 2022.

HAMILTON, L., JOYCE, P., FORERO, C. e MCDONALD, M. Production of a Composite Monocoque Frame for a Formula SAE Racecar, 2013-01-1173 SAE International, Aug 2013.

HEXCEL. HexForce® and HexPly® Industrial Selector Guide, 2018 <[https://www.hexcel.com/user\\_area/content\\_media/raw/IndustrialSelectorGuide\\_2018.pdf](https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/IndustrialSelectorGuide_2018.pdf)> . Acesso em 20 abr. 2022.

HEXION, Technical Data Sheet EPIKOTE™ Resin MGS® LR 635 e EPIKURE™ Curing Agent MGS® LH 633, 634, 635, 636 and 637. Mar, 2019.

HUANG, S., FU, Q., YAN, L. e KASAL, B. Characterization of Interfacial Properties Between Fibre and Polymer Matrix in Composite Materials – A critical review, Journal of Materials Research and Technology. V.13. P. 1441-1484, 2021.

HYER, M. W. Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials WCB McGraw-Hill Book Co Singapura, Boston, 1997, 627 p.

KANKETR, T., PHONGPHINNITTANA, E. e PATAMAPROHM, B. Design of a CFRP composite monocoque: simulation approach, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 501, 2019, Abril, 2019.

LUBIN, George. Handbook of Composites, 135 West 50<sup>th</sup> Street, New York, NY, 10020, Van Nostrand Reinhold Company Inc, 1982, 786p.

MALLICK, P. K. Fiber Reinforced Composites - Materials, Manufacturing, and Design, 3<sup>a</sup> Edição. Boca Raton, CRC Press, 2007, 432 p.

MCBEATH, Simon. Competition Car Composites: A Practical Handbook. Dorset, United Kingdom: Veloce Publishing Ltd. 2016, 197p.

MIRACLE, D. B.; DONALDSON, S. L. ASM Handbook: Composites, Vol, 21, 10th ed, ASM International, 2001.

MEDEIROS, M. A.; LIMA, R. O. C. L.; PEREIRA, A. K. Estudo Comparativo das Propriedades Mecânicas do Honeycomb e Divinycell® Aplicados em Compósitos Sanduíches, Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, 2018.

MOHAMED, A. S.; IBRAHIM, H. K.; MOHAMED, O. K.; ZAYED, A. A. Experimental Determination of Mechanical Properties of Chopped Fiber Composite Materials. International Journal of Engineering Research & Technology. ISSN: 2278-018, Volume 5 -2. Fev. 2016.

MULA, S. N. Estudo sobre Falha e Fadiga em Materiais Compósitos Laminados 2020. 150 f, Teste de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa). 2020.

NARESH, K., CANTWELL, W. J., KHAN, K. A. e UMER, R. Single and Multi-layer Core Designs for Pseudo-Ductile Failure in Honeycomb Sandwich Structures. Composite Structures, 113059, 2021.

NASSEH, J. Barcos, Métodos Avançados de Construção em Composites. P,O,Box 5214, Rio de Janeiro, RJ, WMF Martins Fontes, 2007, 371p.

NASSEH, J. Manual de Construção de Barcos. 4ª Ed, Rio de Janeiro, Barracuda Advanced Composites, 2011, 660 p.

NETO, F. L. e PARDINI, L. C. Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia. Blucher; 2ª edição, 2016, 416p.

NIJSSEN, R. P. L. Composite Materials an Introduction. Inholland University of Applied Sciences, 2015, 149 p.

OLSEN, E. e LEMU, H. Mechanical Testing of Composite Materials for Monocoque Design in Formula Student Car, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, v10, 2016.

O'ROURKE, B. P. The uses of composite materials in the design and manufacture of Formula 1 racing cars. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 204(1), 41-48, 1990.

PAIVA, J. M. F.; MAYER, S.; REZENDE, M. C. Comparison of tensile strength of different carbon fabric reinforced epóxi composites, Materials Research, Vol, 9, No, 1, 83-89, 2006.

PAIVA, J. M. F.; SANTOS, A. D. N.; REZENDE, M. C. Comparação da Resistência ao Cisalhamento Interlaminar de Compósitos Epóxi/Carbono de Aplicação Aeronáutica, ANAIS DO 90 CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 2007, Campina Grande, PB.

PATIL, Praveengouda. University Visvesvaraya College of Engineering - A seminar on: Applications of Composite materials in the Automobile industry, Jun 2010, <<http://www.scribd.com/doc/32475280/Composites-in-theAutomobile-Industry>> , Acesso em: 08 abr, 2022.

SAE BRASIL. Fórmula SAE. Disponível em: <https://saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil> . Acesso em: 07 abr, 2022.

SAE INTERNATIONAL, 2022-FSAE-Structural-Equivalency\_Monocoque-Hybrid-Non-Ferrous\_V1.4. 16 de Novembro de 2021, <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DownloadDocument.aspx?DocumentID=9b074325-ddb4-496f-8f52-c05ef7ba44e5>. Acesso em 4 de Abril de 2022.

SAE INTERNATIONAL. Formula SAE Rules 2022. 21 Dez 2021.

SAE INTERNATIONAL. Structural Sandwich Composites: Volume 6, Warrendale, Pa, : SAE International e CMH-17, 2013, 352p.

SAERTEX. Multiaxial Fabrics Made of Glass, Carbon and Aramid, <  
[https://www.saertex.com/en/support/downloads/file/5409c4f644d7b7a000155b8056c0e513/0143-17-003\\_Flyer\\_Multiaxiale\\_Gelege\\_EN\\_Ansicht.pdf](https://www.saertex.com/en/support/downloads/file/5409c4f644d7b7a000155b8056c0e513/0143-17-003_Flyer_Multiaxiale_Gelege_EN_Ansicht.pdf)>. Acesso em 13 Jul, 2022.

SAVAGE, G. Formula 1 Composites Engineering, Engineering Failure Analysis. 17, 92-115, 2010.

SEWARD, D. Race Car Design. Suffolk, Inglaterra: Palgrave, 284 p; 2014.

SCHWARTZ, M. M. Composite Materials. Volume 1: Properties, Nondestructive Testing, and Repair, 1ª edição, Prentice Hall, New Jersey, 1996, 432 p.

SHI, S.; SUN, Z. e CHEN, H. Carbon-fiber and Aluminum-honeycomb Sandwich Composites With and Without Kevlar-fiber Interfacial Toughening. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 67, 102–110, 2014.

SHREEPATHI, K.; GURUPRASAD, H. L.; PRAKASH, J. N. e MARUTHI, B. H. Static Structural Analysis of Monocoque Chassis, International Journal For Technological Research In Engineering Volume 2, 2347-4718, Jul. 2015.

SUN, G.; ZHANG, J.; ZHANG, H.; WANG, J.; HAN, S. Research on Acoustic Absorption Properties of Aramid Honeycomb Composite Material Reinforced by Polyimide Foam, Advanced Engineering Materials, v, 24, 2101158, Mar 2022.

SUN, W., GUAN, Z., LI, Z., ZHANG, M., HUANG, Y. Compressive failure analysis of unidirectional carbon/epoxy composite based on micro-mechanical models. Chinese Journal of Aeronautics, Volume 30-6, 1907–1918, 2017.

SUN, Z.; SONG, H. C. Z.; LIU, H., CUI, R.; GUO, X.; SHI, S. Three-Point Bending Properties of Carbon Fiber/Honeycomb Sandwich Panels with Short-Fiber Tissue and Carbon-Fiber Belt Interfacial Toughening at Different Loading Rate. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 143, 106289, 2021.

TALREJA, R.; VARNA, J. Modeling Damage, Fatigue and Failure of Composite Materials, 80 High Street, Sawston, Cambridge, CB22 3HJ, UK Woodhead Publishing, 2016, 472 p.

TARLOCHAN, F. Sandwich Structures for Energy Absorption Applications: A Review. Materials, 14, 4731, 2021.

TRZEPIECIŃSKI, T.; NAJM, S. M.; SBAYTI, M.; BELHADJSALAH, H.; SZPUNAR, M.; LEMU, H. G. New Advances and Future Possibilities in Forming Technology of Hybrid Metal–Polymer Composites Used in Aerospace Applications. J. Compos, Sci, 5, 217, 2021.

VISON, J. R.; SIERAKOWSKI, R. L.; The Behavior of Structures Composed of Composite Materials, 2 ed, New York: Kluwer Academic Publishers, 16-17 p, ISBN 0-306-48414-5, 2002.

VINAY, H. B., GOVINDARAJU, H. K., e BANAKAR, P. Evaluation of Glass/Carbon Reinforced Polymer Composites, Polymers and Polymer Composites, 469–472, Set, 2016. <https://doi.org/10.1177/096739111602400704>.

WANBERG, John. Composite Materials : Fabrication Handbook #2, Stillwater, MN55082: Wolfgang Publications Inc, 2010, 143 p.

WANBERG, John. Composite Materials : Fabrication Handbook #3, Stillwater, MN55082: Wolfgang Publications Inc, 2012, 144 p.

WEST SYSTEM. Vacuum Bagging Techniques, P. O, Box 908 Bay City, MI 48707, 866-937-8797, Gougeon Brothers Inc, 2010, 56 p.

YIN, H. T., LANG, M. M. e ZHAO, Y. N. Research on Carbon Fiber Composite Materials and F1 Racing Automobile Design, Applied Mechanics and Materials, Applied Mechanics and Materials 454, 263–2676, Trans Tech Publications, Switzerland. Out. 2013.

ZENKERT, D. An Introduction to Sandwich Construction, Engineering Materials Advisory Services. 1995, 277 p.