



INSTITUTO POLITÉCNICO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CAMPUS MACAÉ
PROFESSOR ALOÍSIO TEIXEIRA



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO POLITÉCNICO**

Hugo Firmino Rodrigues

**MODELAGEM MULTIESCALA DE UM VOLANTE SANDUÍCHE DE FIBRA DE
CARBONO COM NÚCLEO DE ARAMIDA**

**Macaé
JULHO DE 2023**

Hugo Firmino Rodrigues

**MODELAGEM MULTIESCALA DE UM VOLANTE SANDUÍCHE DE FIBRA DE
CARBONO COM NÚCLEO DE ARAMIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Politécnico da Universidade Federal do Rio de Janeiro Campus Macaé, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Lisbôa Vignoli

**Macaé
JULHO DE 2023**

CIP - Catalogação na Publicação

R696

Rodrigues, Hugo Firmino

Modelagem multiescala de um volante sanduíche de fibra de carbono com núcleo aramida / Hugo Firmino Rodrigues - Macaé, 2023.

62 f.

Orientador(a): Lucas Lisbôa Vignoli.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, Bacharel em Engenharia Mecânica, 2023.

1. Volante (automóvel) . 2. Projeto estrutural. 3. Materiais compósitos .
4. Engenharia mecânica. I. Vignoli, Lucas Lisboa, orient. II. Título.

CDD 620.1

Hugo Firmino Rodrigues

**MODELAGEM MULTIESCALA DE UM VOLANTE SANDUÍCHE DE FIBRA DE
CARBONO COM NÚCLEO DE ARAMIDA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus Macaé, Instituto Politécnico.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Lucas Lisbôa Vignoli

Orientador

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Rudineli Demarque

Membro

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Ranulfo Martins Carneiro Neto

Membro

Universidade Federal do Rio de Janeiro

*Dedico este e todos os futuros esforços à
minha mãe, que conquistou junto a mim
este título que custou muita saudade e
dedicação. A glória é toda nossa, Lelita!*

AGRADECIMENTO

Gratidão inicialmente a Deus que permitiu que eu chegasse nesta fase com saúde e pessoas maravilhosas ao meu lado.

À minha mãe, Cida Firmino, que foi uma força da natureza na vida das pessoas que viviam ao seu redor, e por ter me atingido com tanto amor e confiança. Que no início do ano disse que um dos objetivos de 2023 era me ver engenheiro mecânico. Obrigado por cada ligação feita, por cada esforço despendido e por renunciar à minha presença ao seu lado para que eu começasse a abraçar o mundo. Quero que daí de cima, ao lado de Deus, você possa ver a continuidade da minha força. Espero poder viver por você e para você, Lelita!

À minha tia, Delena Firmino, por ter sido tão importante na minha e na vida da minha mãe quando estive longe fazendo o que eu achava melhor para atingir o objetivo de orgulhar minha família. Você foi fundamental nesta conquista!

À minha avó, Anésia Firmino, por ser tão sábia e por me amar tanto e incondicionalmente. Eu não “desacorçoei”, vó! O diploma também é seu!

Ao meu pai, Hildo Rodrigues, que mesmo sem querer me ensinou muito como viver um dia de cada vez, com paciência e pensando no longo prazo. Às minhas irmãs, Nathalia Rodrigues e Gabriely Menezes, pelo amor e apoio emocional prestados. Aos meus primos, Amanda Gabrielly, Arthur de Menezes, Tulio Humenigh e Bruno Lino, pela irmandade e parceria. Aos meus tios, Edvaldo Firmino, Marcia Firmino, Divino Firmino e Regina Firmino pelo apoio, bondade e incentivo prestados. Goiás não seria tão bom sem vocês!

Aos membros da equipe Ali Babaja que me treinaram para uma boa vida e que dividiram os momentos mais valiosos da minha formação, montando e desmontando o Camelo 2, aprendendo e suando a engenharia na prática. O meu muito obrigado em especial ao Ricardo e ao Breno, capitães que cederam conhecimentos valiosos de liderança e engenharia. E também ao amigo Newton, pela cautela, apoio e esforço entregues enquanto fui capitão da equipe Ali Babaja.

Aos meus amigos que fiz nos percalços da engenharia, que espero levar para vida: João Pedro Rabello, que inclusive auxiliou na geometria deste trabalho, Christian Gibaldi, Murilo Morette, Luiz Gustavo, Gabriele Rand, Huberdann Nantet, Lucas Antônio e Eduardo Garcia pela resenha, debates e momentos divididos.

À companhia muito valiosa de Shayanne Barreto durante os tempos em que nem sabia que precisava de apoio, mas que se fez mais do que suficiente. E às

conversas descontraídas e à amizade persistente que tive o privilégio de dividir com Juliana Oliveira durante essa fase.

Aos meus ex-colegas de Engenharia de Instalações da TechnipFMC, onde adquiri valiosos conhecimentos de vida e de engenhosidades. Em especial, a minha gratidão a Verônica Cortez, Clecielle Rocha, Gabriel Gomes, Bruno Gondim, Carla Vasques, Ricardo Santos, Rafael Rodrigues e Jael Nascimento. Obrigado pela oportunidade de aprender coisas excepcionais com vocês. Vocês foram muito valiosos na minha vida. *Legacy Forever!*

Aos meus professores que se desempenharam muito para ensinar com cautela e afincado tudo que aprendi neste tempo de curso. Em especial a bondade e profissionalismo diferenciados de Jefferson Nogueira, Thiago Gomes, Allan Cormack e Flávia Villela.

Aos membros da banca pela paciência, entrega e conhecimentos divididos ao longo das aulas e conversas. Ao meu orientador, Lucas Vignoli, pelo empenho nas reuniões e sabedoria compartilhada ao longo deste trabalho.

RESUMO

O desenvolvimento de um novo projeto de veículo requer uma cuidadosa escolha e dimensionamento do volante utilizado. Diversos aspectos devem ser considerados, incluindo a segurança oferecida, o esforço necessário para realizar mudanças de direção e o conforto percebido pelo piloto. Em ambientes de competição, é ainda mais crucial realizar estudos detalhados que levem em conta as regulamentações e os diferentes tipos de carregamentos encontrados ao longo do percurso. a competição Baja, organizada pela SAE (*Society of Automotive Engineers*) os estudantes são desafiados a projetar protótipos *off-road* monopostos que apresentem um bom comportamento dinâmico, segurança na condução e conforto para o piloto. No contexto deste trabalho, são realizadas análises numéricas por meio do método dos elementos finitos para um volante de competição Baja, utilizando materiais compósitos como a fibra de carbono e a *honeycomb* de aramida. O objetivo principal dessa análise é avaliar os resultados obtidos para diferentes modelos de volantes, considerando adição no número de lâminas de fibra de carbono numa estrutura sanduíche, em uma condição crítica simulada. Esses materiais compósitos são amplamente utilizados devido à sua capacidade de reduzir a densidade de uma peça de veículo, contribuindo para a melhoria do desempenho geral.

Palavras-chave: Projeto Estrutural; Volante; Materiais Compósitos; Método dos Elementos Finitos; Baja SAE.

ABSTRACT

The development of a new vehicle project requires careful selection and sizing of the steering wheel used. Several aspects must be considered, including the safety offered, the effort required to perform steering changes, and the comfort perceived by the driver. In competitive environments, it is even more crucial to conduct detailed studies that take into account regulations and the different types of loads encountered along the track. In the Baja competition, organized by the Society of Automotive Engineers (SAE), students are challenged to design single-seat off-road prototypes that exhibit good dynamic behavior, driving safety, and driver comfort. In the context of this work, numerical analyses are performed using the finite element method for a Baja competition steering wheel, using composite materials such as carbon fiber and aramid honeycomb. The main objective of this analysis is to evaluate the results obtained for different steering wheel models, considering variations in the number of carbon fiber layers, under a simulated critical condition. These composite materials are widely used due to their ability to reduce the density of a vehicle component, contributing to overall performance improvement.

Keywords: *Structural Project; Steering Wheel; Composites Materials; Finit Element Method; Baja SAE.*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	TEMA E HISTÓRIA.....	12
1.2	MOTIVAÇÃO E OBJETIVO.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS	17
2.1.1	Reforços.....	18
2.1.1.1	Fibra de Carbono	18
2.1.2	Matriz	20
2.1.2.1	Resina Epóxi	20
2.1.3	Estrutura sanduíche	21
2.1.3.1	<i>Honeycomb</i> de aramida	22
2.2	BAJA SAE.....	22
2.2.1	O volante do protótipo Baja.....	23
2.3	ERGONOMIA	25
2.4	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	26
3	MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	29
3.1	METODOLOGIA	29
3.2	GEOMETRIA DO VOLANTE.....	30
3.3	MATERIAIS UTILIZADOS	31
3.3.1	Fibra de carbono.....	31
3.3.2	<i>Honeycomb</i> de aramida.....	32
3.4	TENSÕES, RELAÇÃO CONSTITUTIVA E DANO	33
3.5	CRITÉRIOS DE FALHA	36
3.5.1	Critério de Falha de Estruturas Sanduíche	36
3.5.2	Critério de tensão máxima	37
3.6	PRÉ-PROCESSAMENTO MEF	38
3.6.1	Determinação das propriedades da <i>honeycomb</i> de aramida.....	38
3.6.1.1	Condições de Contorno.....	40
3.6.1.2	Malha.....	41
3.6.1.3	Resultados da homogeneização da <i>honeycomb</i> de aramida	43
3.6.2	Pré-processamento MEF do volante.....	46
3.6.2.1	Condições de contorno.....	48
3.6.2.2	Malha.....	49
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	51
4.1	VOLANTE A (4 LÂMINAS DE FIBRA DE CARBONO)	51
4.2	VOLANTE B (6 LÂMINAS DE FIBRA DE CARBONO)	52
4.3	VOLANTE C (8 LÂMINAS DE FIBRA DE CARBONO)	53
4.4	VOLANTE D (10 LÂMINAS DE FIBRA DE CARBONO)	54
4.5	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	54
5	TRABALHO DE CONTINUIDADE	59
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Panhard Levassor 1893, primeiro carro com volante (BONHAMS, 2015).	12
Figura 2: a) carroceria e c) volante do b) McLaren P1 - modificado de (MCLAREN, 2015).	13
Figura 3: Protótipo 2 da equipe Ali Babaja (acervo Ali Babaja, 2019)	14
Figura 4: Volante do protótipo 2 da equipe Ali Babaja	15
Figura 5: Comparação entre materiais convencionais e compósitos (modificado de CHAWLA, 2012).	17
Figura 6: Estrutura típica de compósito sanduíche (ALMEIDA, 2009)	21
Figura 7: <i>Honeycomb</i> de aramida	22
Figura 8: Exemplos de volantes aceitáveis e inaceitáveis (SAE, 2021)	24
Figura 9: Perfil frontal do volante modelado.....	26
Figura 10: Passos do MEF - adaptado de (FISH, 2009)	27
Figura 11: Fluxograma representativo das fases tomadas	30
Figura 12: a) vista frontal volante em fibra, b) <i>honeycomb</i> e c) isométrica da <i>honeycomb</i>	30
Figura 13: Vista isométrica do volante em montagem.....	31
Figura 14: Estado plano de tensões em um elemento diferencial – (modificado de HIBBELER, 2010)	33
Figura 15: Modos de falha de estruturas sanduíche (OLIVEIRA, 2020).....	36
Figura 16: (a) RVE alterado por material homogêneo equivalente (b) estrutura completa sem o RVE alterado por material homogêneo equivalente – (modificado de BARBERO, 2018).	39
Figura 17: Geometria para obtenção das propriedades homogeneizadas.....	40
Figura 18: Condições de Contorno para compressão da <i>honeycomb</i> de aramida...41	
Figura 19: Condições de contorno para cisalhamento da <i>honeycomb</i> de aramida ...41	
Figura 20: Estudo de convergência – <i>honeycomb</i> homogeneizado	42
Figura 21: Malha considerada para <i>honeycomb</i>	42
Figura 22: Comparação experimental e por MEF da <i>honeycomb</i> em compressão...43	
Figura 23: Comportamento sobre deslocamento cisalhante da <i>honeycomb</i>	45
Figura 24: Arranjo do volante C no Ansys	48
Figura 25: Condições de contorno consideradas	49
Figura 26: Estudo de convergência – volante 4 lâminas	50
Figura 27: a) malha gerada para o modelo de 4 lâminas e b) vista da região crítica	50
Figura 28: Força resultante até a falha da fibra de carbono para o volante de 4 lâminas.....	52
Figura 29: Força resultante até a falha da fibra de carbono para o volante de 6 lâminas.....	53
Figura 30: Força resultante até a falha da fibra de carbono para o volante de 8 lâminas.....	53
Figura 31: Força resultante até a falha da fibra de carbono para o volante de 10 lâminas.....	54
Figura 32: Comparação das respostas dos modelos de volante.....	55
Figura 33: Mapa de início de falha da <i>honeycomb</i>	56
Figura 34: Mapa de início de falha na fibra de carbono	56

Figura 35: Comparação entre o número de lâminas de fibra de carbono e a força para a falha total.....57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Algumas propriedades físicas e aplicações da fibra de carbono (SCHMIDL, 1992)	19
Tabela 2: Pontuações da competição (SAE, 2021)	23
Tabela 3: Propriedades mecânicas da fibra de carbono (ANSYS, 2023)	32
Tabela 4: Propriedade do papel de aramida, adaptado de (SHAN, XU, <i>et al.</i> , 2019)	40
Tabela 5: Propriedades obtidas para a <i>honeycomb</i> homogeneizada	46
Tabela 6: Modelos de volantes considerados	47
Tabela 7: Massa dos modelos considerados	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema e História

Os volantes de veículos de competição têm uma longa história que passa por melhorias significativas implementadas por conta da segurança, ergonomia e resistência que o automobilismo exige a cada temporada. Muitos desses veículos são protótipos que, durante uma competição, experimentam situações propositalmente adversas para que quando fabricados em série forneçam o conforto e segurança aos veículos de passageiros.

Os primeiros veículos fabricados já contavam com um dispositivo responsável por direcionar o caminho que o motorista percorreria. O primeiro carro tem registro de 1769, inventado pelo francês Nicolas-Joseph Cugnot e a mudança de direção neste veículo era feita por meio de uma barra horizontal de madeira ligada verticalmente às rodas dianteiras, ainda não considerado um volante, mas sim um leme (STEIN, 1973).

Mais de 100 anos depois, Alfred Vancheron, equipou seu veículo de corrida, um Panhard 1893, com um volante. Essa era a Paris-Rouen, a primeira corrida de carros da história, realizada em 1894, e é uma das primeiras ocorrências do uso de um dispositivo em forma de roda sendo usada para guiar um carro. A partir de 1898, todos os modelos Panhard já contavam com um volante. E não demorou até que outros fabricantes seguissem o exemplo, assumindo este item como parte fundamental, e às vezes de luxo, do design automotivo (HOLM, 2022). A Figura 1 mostra o Panhard 1893.



Figura 1 – Panhard Levassor 1893, primeiro carro com volante (BONHAMS, 2015).

No início, os volantes eram confeccionados com uma base metálica coberta por madeira. Com o passar do tempo, a madeira foi substituída por materiais plásticos, como a baquelite, não somente por questões de custo de fabricação, mas também

para evitar possíveis acidentes causados pelo risco de quebra da madeira. Na década de 1950, tornou-se comum o revestimento dos volantes com couro, oferecendo aos motoristas um maior conforto (VOLKSWAGEN GROUP, 2023).

Atualmente, os volantes são largamente estudados para que os condutores tenham segurança em caso de colisão e conforto dos dedos e mãos durante a condução. Além disso, algumas outras funções de multimídia e computador de bordo foram adicionadas aos volantes, bem como airbags incorporados como medida de proteção. Há também considerações que num futuro não muito distante os carros dispensarão o uso de volantes para os seus condutores (WILLIAMS, 2020).

Um exemplo atual de veículo que faz uso avançado da tecnologia de materiais é o McLaren P1. A estrutura completa deste veículo é fabricada utilizando materiais compósitos, incluindo o seu volante. O uso desses materiais vai além do luxo, pois traz várias justificativas, já que seu desempenho é consideravelmente superior em comparação com carros fabricados com materiais metálicos. Além disso, a utilização de materiais compósitos resulta em um peso reduzido em até 10%, o que, por sua vez, contribui para uma economia de combustível de aproximadamente 7% em termos de quilômetros por galão (CHEAH, 2010). Essa combinação de leveza e eficiência na performance faz do McLaren P1 um exemplo de como a aplicação adequada de materiais pode otimizar o desempenho e a economia de combustível em veículos modernos. A Figura 2 mostra o monocoque e o volante, feitos em fibra de carbono, do McLaren P1.



Figura 2: a) carroceria e c) volante do b) McLaren P1 - modificado de (MCLAREN, 2015)

1.2 Motivação e Objetivo

Em ambiente de competição o volante assume o dever de garantir confiabilidade ao ser acionado, ao mesmo tempo que precisa ter massa otimizada: tanto para garantir a resistência necessária em casos de colisão ou capotamento, quanto para oferecer menor momento de inércia na dinâmica longitudinal e ao esterçar o sistema de direção do veículo. Isso permite que o piloto faça manobras rápidas e

precisas com menos esforço e desgaste. A resistência e a massa dos volantes de competição dependem dos materiais e da geometria utilizados na sua fabricação.

O principal objetivo do trabalho aqui apresentado é descrever a tomada de decisão, como condições de contorno e materiais utilizados, para o dimensionamento computacional do volante do terceiro protótipo da equipe Ali Babaja de competição Baja, organizada pela *Society of Automotive Engineers* (SAE), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) Macaé. A Figura 3 mostra o segundo protótipo da equipe, conhecido como Camelo 2.



Figura 3: Protótipo 2 da equipe Ali Babaja (acervo Ali Babaja, 2019)

O terceiro protótipo, conhecido como Camelo 3, durante a elaboração deste trabalho estava em fase de projeto e utiliza de forma sistemática os acertos e limitações dos 2 primeiros protótipos. A cada etapa, os protótipos foram aprimorados com base no *feedback* dos juízes da competição e pilotos da equipe durante testes realizados. Portanto, é notado a importância dos protótipos veiculares para o aprendizado contínuo de uma universidade, para a análise de riscos e custos, e efetiva comunicação com os *stakeholders*.

A redução de massa em volantes de direção é uma estratégia importante para melhorar o desempenho e a eficiência dos veículos. A motivação principal para o presente trabalho assume essa estratégia. Ao diminuir a inércia do volante, é possível reduzir o esforço necessário para girá-lo e aumentar a sensibilidade da direção. Além disso, a redução de massa contribui para diminuir o consumo de combustível e as emissões de poluentes. Uma das formas de alcançar essa redução é a utilização de

materiais mais leves, como ligas metálicas de alta resistência e fibras de materiais compósitos. Esses materiais também apresentam vantagens como maior durabilidade, menor corrosão e maior facilidade de moldagem.

O volante dos dois primeiros protótipos foi repetido e é feito de material metálico com propriedades desconhecidas, adquirido de um veículo tipo *buggy*. Além disso, possui acabamento em couro sintético e boa empunhadura, segundo os pilotos da equipe e juízes da competição. Entretanto sua massa é de 1220 g, colaborando com cerca de 27% do peso total do sistema de direção do Camelo 2. A Figura 4 mostra o volante do Camelo 2.



Figura 4: Volante do protótipo 2 da equipe Ali Babaja

É também buscado incentivar aos atuais e futuros membros da equipe Ali Babaja a produção de peças de materiais compósitos para os protótipos a virem, bem como criar autonomia e referência para produção intelectual voltada a competição Baja SAE.

Os materiais escolhidos para substituir o volante atual serão os compósitos, mais especificamente a fibra de carbono e a aramida. A fibra de carbono é conhecida por sua capacidade de suportar cargas elevadas sem deformação significativa e apresenta uma alta resistência específica. Por outro lado, a aramida, também conhecida como Kevlar, na forma de *honeycomb*, é um material sintético com alta resistência à compressão. Ela é amplamente reconhecida por sua notável capacidade de absorção de energia e resistência a impactos. Essa seleção, com melhor descrição

na seção 2.1, se deve a boa relação de resistência/peso dos materiais aplicados no modo sanduíche.

O progresso do trabalho é realizado de forma sistemática e suas fases procuram compilar as decisões tomadas e informações bibliográficas úteis para atingimento dos objetivos de estudo de resposta de acordo com a variação das camadas de fibra de carbono, da redução de massa e conforto do piloto. Assim são propostas as fases:

- i. Apresentação dos conceitos mecânicos atrelados às estruturas sanduíche e as relações de comportamento dos materiais compósitos.
- ii. Dimensionamento e modelagem computacional levando em conta a ergonomia, regras da competição Baja SAE e quantidade de lâminas de fibra de carbono;
- iii. Simulação e validação numérica de elementos finitos no software Ansys, considerando relações mecânicas, para cada um dos modelos considerados;
- iv. Discussão sobre os resultados e comportamento de cada um dos modelos contabilizados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos utilizados durante as etapas de desenvolvimento deste trabalho. Foram feitas compilações sobre os materiais do volante, as regras da competição Baja SAE e os requisitos ergonômicos para atingir o conforto esperado.

2.1 Materiais Compósitos

Um material compósito é formado pela combinação de dois ou mais materiais distintos para criar um elemento com propriedades aprimoradas que não podem ser obtidas pelos materiais separadamente. Os estudos mais concentrados em compósitos iniciaram na década de 1960 muito por conta das exigências tecnológicas do campo aeroespacial, eficiência energética e construção civil (CHAWLA, 2012).

Alguns dos principais fatores que impulsionam o uso de compósitos nas diversas áreas onde ele é aplicado são a redução de peso, a resistência à corrosão e a redução do número de peças. Outras vantagens incluem transparência eletromagnética, endurecimento para impacto, resistência à erosão e desgaste, isolamento acústico e de vibração, maior resistência à fadiga, isolamento térmico, baixa expansão, baixa ou alta condutividade térmica, auto recuperação, baixa ou alta permeabilidade, resistência ao fogo e retardamento e proteção contra descargas atmosféricas (BARBERO, 2018). A Figura 5 compara algumas propriedades dos materiais metálicos convencionais e materiais compósitos.

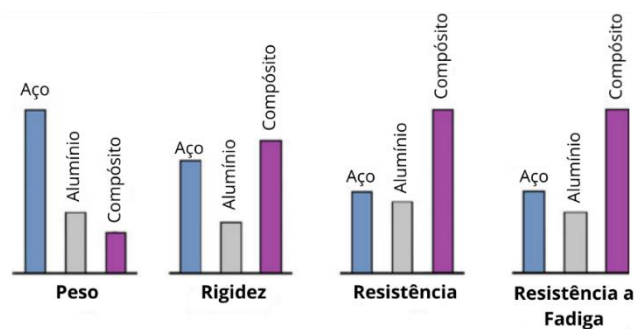


Figura 5: Comparação entre materiais convencionais e compósitos (modificado de CHAWLA, 2012)

Os materiais compósitos na aviação, por exemplo, têm tido uma participação estrutural cada vez maior. Nos anos 1970, em média, 5% do peso da estrutura de um avião era material compósito. Nos anos 2000 este valor passou para 25% devido ao grau de confiança e consistentes testes realizados em protótipos. No ano de 2014, um dos aviões fabricados pela Airbus contava com 53% da estrutura feita de materiais

compósitos, o que contribui para menor queima de combustível e 50% menos tarefas de manutenção comparado com outras aeronaves (AIRBUS, 2017). Isso mostra a importância econômica e de sustentabilidade dos compósitos, que tendem a assumir uma presença estrutural maior a cada dia.

Os materiais compósitos são agrupamentos entre materiais que fazem função de matriz e materiais que fazem função de reforço. A maior parte da rigidez e resistência vem do reforço, comumente encontrados como fibras de vidro ou de carbono. A matriz, encontrada como resina, tem como função estabilizar o reforço, aglutinar e protegê-lo, de forma que o reforço consiga distribuir melhor as cargas homogeneamente pela sua estrutura final. (BARBERO, 2018).

2.1.1 Reforços

A fase de reforço de um material compósito pode ser de fibras contínuas ou curtas ou partículas de várias geometrias. Os compósitos devem suas principais características de resistência às fibras usadas como reforço (MOURA et al., 2010).

Reforço de fibra é preferido porque a maioria dos materiais é mais resistente em sua forma de fibra do que em sua forma monolítica. Isso se deve a uma redução acentuada no número de defeitos nas fibras em comparação com aqueles na forma monolítica. A alta resistência de fibras poliméricas, como a aramida, é atribuída ao alinhamento ao longo da fibra em oposição ao arranjo emaranhado aleatório no polímero monolítico (BARBERO, 2018).

2.1.1.1 Fibra de Carbono

A fibra de carbono é caracterizada na terminologia têxtil como contendo pelo menos 90% de carbono durante seu processo de fabricação por pirolise, e a fibra obtida por grafite atinge uma estrutura com 99% de carbono. O diâmetro dos filamentos da fibra de carbono geralmente varia de 5 a 15 μm . É um material de engenharia amplamente utilizado como reforço em matrizes poliméricas de materiais compósitos, devido ao seu alto módulo e força específica (a relação entre resistência à tração e densidade específica de um material) (CALLISTER, 1999). O compósito reforçado com fibra de carbono (CRFC) é leve, flexível, resistente à fadiga e ao calor, praticamente inerte, possui propriedades de isolamento de radiação eletromagnética, baixa expansão térmica e alta resistência mecânica (WAZIR e KAKAKHEL, 2009). Em comparação, é dez vezes mais resistente e cinco vezes mais leve que o aço (ZOLTEK, 2021).

As propriedades mecânicas das fibras de carbono são determinadas pela configuração atômica das cadeias de carbono e suas conexões, que são semelhantes à estrutura cristalina do grafite. A força da fibra de carbono é controlada orientando as estruturas atômicas de carbono com suas conexões atômicas mais fortes ao longo da direção da fibra (CHAWLA, 2012).

As fibras de carbono apresentam algumas limitações, incluindo baixa resistência ao impacto devido à sua rigidez e fragilidade. A corrosão galvânica pode ocorrer quando os compósitos de fibra de carbono entram em contato com metais, devido à sua boa condutividade elétrica. Para evitar esse problema, é necessário criar uma barreira isolante entre os compósitos de fibra de carbono e as peças metálicas na mesma estrutura. Uma abordagem comum para isso é adicionar uma camada fina de compósito reforçado com fibra de vidro. Outro fator limitante para a aplicação de fibra de carbono é o custo, que pode ser justificado por meio da economia de peso, resistência à corrosão e fadiga e disponibilidade de parcerias em forma de patrocínio ou desconto no valor investido (BARBERO, 2018). A Tabela 1 mostra algumas propriedades da fibra de carbono e aplicações relacionadas.

Tabela 1: Algumas propriedades físicas e aplicações da fibra de carbono (SCHMIDL, 1992)

Propriedades Físicas	Aplicação
Força, resistência específica, peso leve	Aeronáutica: asas, superfícies de controle; automotivo: molas, cabos de pneus; artigos esportivos: esquis, raquetes de tênis
Elevada estabilidade dimensional, baixo coeficiente de expansão térmica, e baixa abrasão	Mísseis, freios de aeronaves, aeroespacial antena e estruturas de apoio, telescópios grandes, bancos ópticos, guias de onda para estável de alta frequência (GHz) quadros de medição de precisão
Bom amortecimento de vibrações, força e tenacidade	Equipamentos de áudio, alto-falantes, bobinas, braços de coleta, instrumentos musicais, braços robóticos
Condutividade elétrica	Capuzes de automóveis, carcaças e bases para equipamentos eletrônicos, pincéis, papéis e plásticos condutores, eletrodos, elementos de aquecimento, cabos supercondutores
Filtros biológicos	Filtros de sangue, dispositivos protéticos, cirúrgicos e equipamentos de raios X, implantes, tendão/ligamento reparação
Resistência à fadiga, auto lubrificação, alto amortecimento	Máquinas têxteis, engenharia geral, rolamentos de alta tensão, volantes
Inércia química, resistência à corrosão	Indústria química; campo nuclear; válvulas, selos, juntas e componentes de bombas em plantas de processos
Propriedades eletromagnéticas	Anéis geradores de contenção grandes, equipamentos radiológicos

2.1.2 Matriz

A matriz do compósito desempenha o papel fundamental de preservar a integridade estrutural do laminado, protegendo as fibras contra danos superficiais externos, distribuindo as cargas entre as fibras e também contribuindo para certas propriedades, como ductilidade ou isolamento elétrico. As matrizes são classificadas em duas categorias principais: termoplásticas e termorrígidas (GIBSON, 2016).

As matrizes termoplásticas são principalmente compostas por plásticos técnicos e suportam maiores temperaturas. Já as matrizes termorrígidas, que são os tipos mais predominantes dos sistemas compósitos, consistem em polímeros que formam estruturas rígidas. Nas matrizes termorrígidas as resinas passam por um processo de polimerização e reticulação durante a cura, utilizando um agente endurecedor e aquecimento. Essas resinas não derretem quando aquecidas novamente, mas se decompõem termicamente em temperaturas elevadas. Os materiais termorrígidos mais frequentemente empregados incluem poliésteres insaturados, epóxis, poliamidas e ésteres vinílicos. É essencial que a matriz e a fibra sejam quimicamente compatíveis em uma estrutura composta, a fim de evitar reações indesejadas. (DANIEL e ISHAI, 2006).

2.1.2.1 Resina Epóxi

As resinas epóxi são amplamente utilizadas devido à sua versatilidade, resistência mecânica e alta resistência à corrosão. Com menor contração volumétrica e excelentes propriedades de aderência como adesivos, elas são preferidas em aplicações aeroespaciais, automobilismo e indústria de construção. Sua capacidade de cura em uma ampla faixa de temperatura, de 5°C a 150°C, torna-as adequadas para diversas necessidades. Na indústria aeronáutica, são utilizadas para adesão de estruturas *honeycomb* e como resinas laminadas, enquanto na construção civil desempenham papéis essenciais como compostos de calafetagem, vedação e revestimento de concreto, oferecendo alta resistência química e mecânica (BARBERO, 2018).

O processo de cura da resina epóxi em materiais compósitos, em especial as fibras de carbono, consiste na polimerização da resina com um agente endurecedor, que pode ser uma amina ou um anidrido, sob a ação de calor e pressão positiva. A cura da resina epóxi é um processo irreversível e colabora para que as propriedades mecânicas e físicas do material compósito sejam melhoradas, bem como a aparência

mais transparente ou fosca. A escolha do método mais adequado depende das características do sistema polimérico em estudo e dos parâmetros de processamento desejados (COSTA, REZENDE e PARDINI, 1999).

2.1.3 Estrutura sanduíche

Núcleos são comumente usados em estruturas do tipo sanduíche em materiais compósitos e são camadas de material de baixa densidade que separam as lâminas do material fibroso. O núcleo tem a função de aumentar o volume sem comprometer a densidade do item fabricado, bem como aumentar a rigidez à flexão e a resistência ao cisalhamento da estrutura (VERAS, 2019). A análise correta de estruturas sanduíche requer uma compreensão completa do comportamento mecânico das fibras e do núcleo. Uma estrutura sanduíche é constituído por faces finas da fibra utilizada como reforço, unidas a um núcleo por meio de um adesivo polimérico. A Figura 6 mostra este conceito.

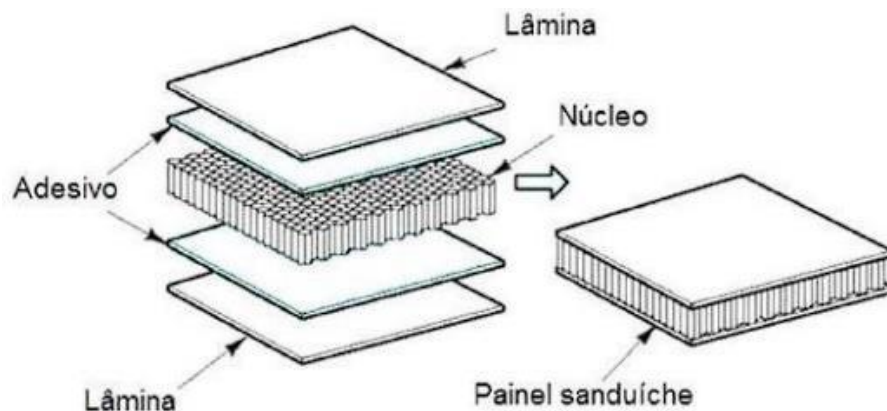


Figura 6: Estrutura típica de compósito sanduíche (ALMEIDA, 2009)

O projeto de estruturas sanduíche deve considerar critérios estruturais, como espessura adequada das faces para suportar esforços mecânicos e evitar modos de falha. A resposta dinâmica depende de parâmetros como espessura do núcleo, massa e frequência vibratória. O núcleo deve resistir às tensões de cisalhamento, evitando deslizamentos entre as faces e garantindo a integridade global da estrutura. A modelagem mecânica do material do núcleo, especialmente para espumas ou *honeycomb*, é menos direta. É necessário entender como o núcleo responde a carregamentos de cisalhamento e carregamentos normais ao plano das fibras. O comportamento depende dos materiais usados no núcleo e os materiais que estão em contato (S. MONDAL e S. CHAKRABORTY, 2015).

2.1.3.1 *Honeycomb* de aramida

Os núcleos de *honeycomb*, também conhecidos como favos de mel, devem ser considerados em estruturas onde a redução de peso é um fator crítico. Esses núcleos são amplamente utilizados em diversas aplicações e existem diferentes tipos disponíveis no mercado, sendo um deles a *honeycomb* de aramida, vista na Figura 7. Esse tipo de *honeycomb* é conhecido por sua resistência a compressão e leveza, tornando-a uma escolha popular em setores como aeroespacial e automotivo, onde a otimização de peso é essencial. Além disso, a *honeycomb* de aramida possui excelente resistência ao impacto e boas propriedades de absorção de energia, o que a torna uma opção ideal para aplicações que exigem alta resistência e segurança (YANG, ZHANG e YANG, 2020).



Figura 7: *Honeycomb* de aramida

Esses núcleos de *honeycomb* são fabricados a partir de lâminas finas de papel aramida, também conhecida como Kevlar, que são dispostas em formato de colmeia. Essa estrutura hexagonal proporciona uma combinação ideal de resistência a compressão interessantes para aplicações em estruturas que possam sofrer impactos e vibrações. A *honeycomb* de aramida possui propriedades mecânicas que são diferentes em cada um dos eixos, fazendo com que seja um material ortotrópico (DIAS, PINTO e BRITO, 2019).

2.2 Baja SAE

A competição Baja SAE é um evento de engenharia voltado a aplicações de conceitos dinâmicos, de componentes de máquinas, gestão de projetos, e aplicações de tecnologias de inovação para a construção de um veículo *off-road* monoposto. Esses veículos são protótipos que reúnem características combinadas da engenharia

de forma que são projetados para superar obstáculos e terrenos irregulares frente a avaliação de conforto e desempenho por parte dos juízes da competição.

A competição possui um extenso regulamento, conhecido como RATBSB (Regulamento Administrativo e Técnico Baja Sae Brasil), que reúne, por exemplo, os requisitos mínimos quanto a materiais utilizados na estrutura do veículo, ensaios de validação e condições dinâmicas e estáticas do veículo. Durante o desenvolvimento do protótipo, há uma exigente pesquisa e trabalho colaborativo entre os membros da equipe e busca por apoio de patrocinadores e professores. É uma experiência desafiadora para os membros de forma que, a depender do resultado, atrai novos apoiadores para a universidade e contribuições para pesquisa e desenvolvimento de novas soluções automobilísticas e formação das habilidades do engenheiro.

As disputas são anuais e ocorrem em etapas regional e nacional, geralmente espaçadas de 6 meses. O comitê organizador é formado por engenheiros ex-bajeiros e que atuam no mercado de trabalho envolvidos ou não com o automobilismo, além de contar com representantes de diversas empresas apoiadoras do evento, como por exemplo Embraer e Bosch. A competição leva de 3 a 4 dias e é dividida conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Pontuações da competição (SAE, 2021)

Avaliação de projeto – 320 pontos	
Relatório de Projeto	120 pontos
Avaliação de Projeto Dinâmico	20 pontos
Apresentação de Projeto	180 pontos
Eventos dinâmicos – 280 pontos	
Aceleração	30 pontos
Velocidade Máxima	30 pontos
Frenagem	20 pontos
Tração	50 pontos
Super Prime	30 pontos
Suspensão	70 pontos
Manobrabilidade	50 pontos
Enduro de Resistência – 400 pontos	
Pontuação Total 1000 pontos	

2.2.1 O volante do protótipo Baja

No primeiro dia, a etapa de avaliação de projeto, é apresentado os conceitos de engenharia usados para cada um dos componentes fabricados ou escolhidos do protótipo. É feita uma explanação dos materiais e métodos de validação utilizados para adequação de desempenho e conforto. O volante é, então, apresentado aos

avaliadores nesta fase, ainda com o veículo parado. Podem ser apresentados os métodos estruturais e de ergonomia utilizados para se obter o que é exibido.

Nas etapas seguintes há o evento de validação dinâmica: algum juiz da competição pilota o protótipo por uma pista construída pela competição e avalia principalmente o comportamento dinâmico do carro e a segurança dos dispositivos de interface do piloto. O volante do protótipo é submetido a vibração manual enquanto empunhado pelo juiz, e girado repetidas vezes para ambos os lados de forma a analisar a segurança estrutural e posicionamento dos dedos e mãos no volante. O juiz dá, então, a sanção ou veto do uso do volante e continuidade da participação da equipe na competição. Essa avaliação também é baseada no regulamento de geometria do volante da RATBSB (2021):

- O volante não pode conter furos ou rasgos em que consiga passar um círculo de 6 mm de diâmetro, mas não um de 50 mm. Este requisito tem o objetivo de impedir que dedos fiquem presos em caso de uma força brusca virar o volante;
- O volante deve possuir um perímetro contínuo que seja aproximadamente circular ou oval, isto é, o perfil do perímetro exterior pode possuir seções retas, mas não seções côncavas. Volantes em forma de “H” ou “8” não são permitidos (Figura 8);
- Todos os volantes serão avaliados pelos Juízes Credenciados de Segurança quanto a adequação do projeto, qualidade de fabricação, robustez e fixação.



Figura 8: Exemplos de volantes aceitáveis e inaceitáveis (SAE, 2021)

2.3 Ergonomia

A ergonomia pode ser conceituada como a disciplina responsável por promover a adaptação adequada do ambiente, máquina ou posto de trabalho ao ser humano, considerando tanto as características individuais do homem quanto as demandas da atividade a ele atribuída. Nesse sentido, a aplicação da ergonomia demanda um processo de planejamento e projeto. Quando a ergonomia é incorporada desde as fases iniciais do desenvolvimento do projeto, denomina-se ergonomia de concepção (IIDA e BUARQUE, 2016).

Na indústria automobilística, a ergonomia é direcionada para a análise e otimização da interação entre o sistema composto pelo ser humano, a máquina (veículo) e o ambiente. O objetivo é tornar o veículo mais seguro e confortável, minimizando os riscos à saúde do condutor e passageiros. Nesse contexto, são consideradas as interfaces do sistema, incluindo assentos, dispositivos de acionamento e empunhadura do volante (TANABE, 2014).

Por conta da quantidade de tempo que um motorista dirige um carro, a necessidade e desejos do condutor com relação ao conforto ao empunhar o volante é assunto de alta importância. Durante a prova de enduro da competição baja, o piloto conduz o protótipo por uma pista irregular e com vários obstáculos por um período de 4 horas ininterruptas. É interessante, portanto, que o volante seja geometricamente confortável durante as provas e durante teste e avaliação do juiz da competição.

Alguns estudos de campo e com amostras significativas mostram a preferência de motoristas quanto ao posicionamento das mãos e dedos, bem como as dimensões dos aros dos volantes. Essas características influenciam diretamente a aderência das mãos, a fadiga dos músculos do punho e a segurança em caso de colisão.

A característica do posicionamento das mãos foi estudada por MOSSEY *et al.* (2014) e por ele mostrado que a maior parte dos condutores preferem a posição simétrica e/ou na metade superior do volante. A posição de referência é a do ponteiro das horas do relógio: 9 horas para a mão esquerda e 3 horas para a mão direita. O autor salienta que a amplitude das mãos podem ser confortáveis também para um posicionamento levemente acima da posição “9 e 3”.

Já para o diâmetro MOSSEY *et al.* (2014) aponta que a maioria dos participantes do estudo preferem empunhar volantes com aro de 31,75 mm de diâmetro. O volante do presente estudo leva em consideração todos os pontos aqui levantados no quesito

ergonomia e quanto as regras da competição Baja SAE. Dessa forma foi considerado, inicialmente, o perfil frontal apresentado na Figura 9.

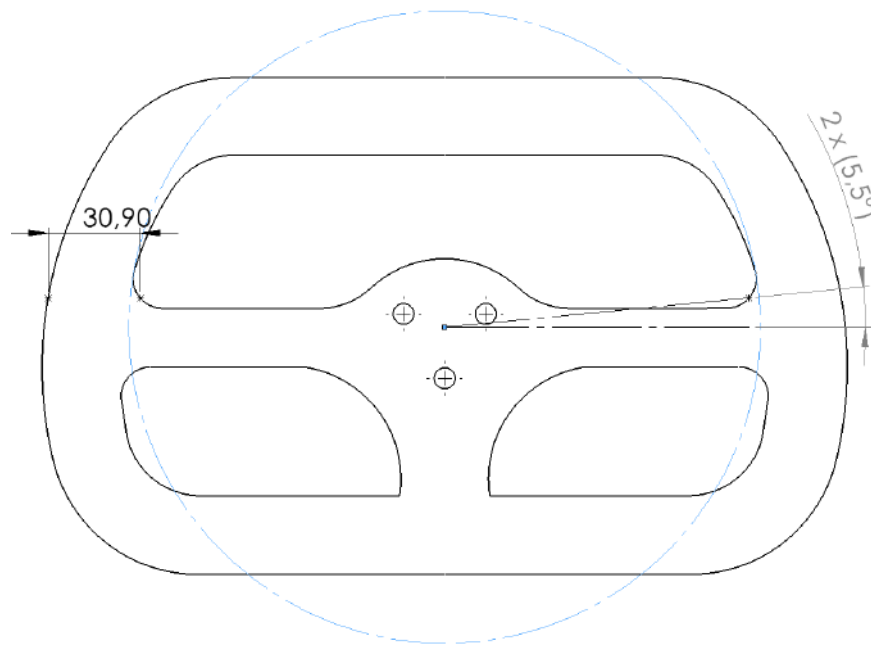


Figura 9: Perfil frontal do volante modelado

Na Figura 9 pode-se destacar a região de apoio do polegar deslocado para cima da referência de “9 e 3”, sendo a linha azul a representação do relógio, como sugerido por MOSSEY *et al.* (2014). O diâmetro da empunhadura considerado foi o de 30,90 mm devido ao adicional que o acabamento (couro sintético) que será adicionado depois da fabricação, o que permitirá chegar a um valor próximo do apontado pelo estudo, ao mesmo tempo que segue a restrição do RATBSB.

2.4 Método de Elementos finitos

A análise de um sistema complexo de engenharia requer uma modelagem do sistema em uma forma que possa ser aplicada ferramentas computacionais para estudo e atingimento do resultado. A solução numérica de problemas de estruturas é baseada na resolução de equações algébricas que modelam o comportamento mecânico do sistema. Ao utilizar o MEF (Método dos Elementos Finitos) em um computador, é possível resolver as equações de sistemas estruturais com geometria complexas de forma muito eficiente e para vários pontos diferentes do desenho modelado computacionalmente. É importante salientar que a aplicação deste método está diretamente relacionada com a capacidade de processamento do computador utilizado, bem como os recursos e versão do *software* (DIAS, CRUZ, *et al.*, 2018).

O projetista deve ter um sólido conhecimento da modelagem de elementos finitos, compreendendo os princípios fundamentais e as técnicas de discretização. É essencial entender como representar geometricamente, os contatos entre as estruturas no modelo para o MEF, capturando com precisão as propriedades mecânicas e comportamento dada uma condição inicial. É importante que o projetista esteja ciente dos métodos que podem ser errôneos ao realizar a aplicação de elementos finitos, como por exemplo a escolha inadequada das propriedades, a malha insuficiente ou excessivamente refinada e a simplificação excessiva do carregamento. Os resultados podem ser distantes da realidade, apesar da possibilidade de parecer correto aos modos do engenheiro (BATHE, 1982).

Em resumo, a modelagem e a análise de sistemas estruturais de engenharia se beneficiam significativamente do uso do MEF, sendo largamente utilizado na indústria automobilística para fazer previsões de comportamentos limítrofes antes mesmo da fabricação e investimento em uma peça. A importância desse método é crescente visto que, como citado na seção 2.1, o uso de materiais compósitos é tendência frente a preocupação com melhor eficiência energética e segurança estrutural das construções dos meios de transporte. FISH (2009) divide o MEF em 5 passos, apresentado na Figura 10.

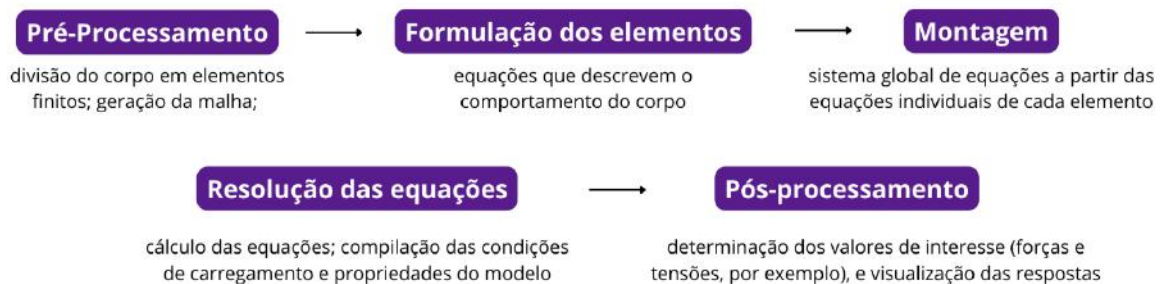


Figura 10: Passos do MEF - adaptado de (FISH, 2009)

Destaca-se a fase de pré-processamento onde há as etapas para determinar os métodos de geração da malha. A malha é a unidade básica do MEF e é a representação discretizada da geometria de uma estrutura de forma que as divisões preservam a propriedade original do material e representam, numa forma de cadeia, o domínio geométrico e de comportamento do material. Para o presente trabalho, a determinação da malha de cada um dos modelos teve um investimento de tentativas e análises que auxiliassem no melhor custo-benefício computacional. Esse custo computacional, ao mesmo tempo que não podia ser tão grande a ponto de levar muito

tempo, deveria apresentar bons resultados que retratassem a realidade da condição considerada.

O trabalho aqui apresentado faz uso dos métodos propostos por FISH (2009) para estudar: os efeitos da quantidade de lâminas de fibra de carbono, pois as dimensões da *honeycomb* já estão definidas, das propriedades celulares e homogeneizadas da *honeycomb* de aramida e visualização dos efeitos de carregamento. Todos esses resultados envolveram também os requisitos de ergonomia (seção 2.3) e do RATBSB (seção 2.2.1).

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Este capítulo é dividido de forma a facilitar a compreensão das fases de desenvolvimento, recursos utilizados e aplicação dos requisitos de cada um dos modelos de volante considerados. Serão apresentadas a metodologia aplicada, as decisões quanto a geometria, materiais utilizados e suas propriedades, os critérios de falha para os elementos, as condições de contorno e as malhas utilizadas.

3.1 Metodologia

Conforme já explicitado, o principal objetivo deste trabalho é a análise das diferentes respostas mecânicas quanto a falha da estrutura sanduíche ao variar a quantidade de lâminas de fibra de carbono dispostas em ambas as faces da *honeycomb* de aramida. Além disso, é necessário atender aos requisitos da competição Baja SAE e os requisitos de ergonomia. Para alcançar estes objetivos serão apresentados o processo de decisão de cada uma das fases de obtenção e aplicação das condições que limitam cada um dos modelos.

O primeiro passo é revisar a geometria a fim de verificar o atendimento dos requisitos geométricos. Nesta fase foi verificada as condições de montagem das lâminas de fibra com a *honeycomb*, formando assim a estrutura sanduíche.

Na fase seguinte foram dispostos os materiais utilizados, bem como as suas propriedades. Destaca-se a ausência de dados mecânicos para a *honeycomb* de aramida a qual precisou passar por um processo de MEF e simplificações geométrica e de propriedades que preservassem o seu comportamento, utilizando de fonte bibliográfica consistente.

Foram apresentadas as relações de comportamento do domínio não danificado e domínio danificado para cada um dos materiais, bem como os modos de falha adotados para representar as propriedades dos materiais após a falha.

Conhecidas as relações, foram apresentadas as condições de contorno do volante, de forma a representar um caso crítico. Por conta da presença de simetria geométrica, foi considerado somente um dos lados do plano de simetria para a aplicação dos deslocamentos.

A seguir foi realizado o estudo de convergência de malha em um dos modelos, a fim de avaliar a relação entre o número de nós gerados e a precisão das curvas obtidas para cada conjunto de malha.

Por fim foram apresentados os resultados e as discussões acerca das respostas de cada um dos modelos com números de lâminas de fibra de carbono considerado. A Figura 11 mostra as fases da metodologia abordada.

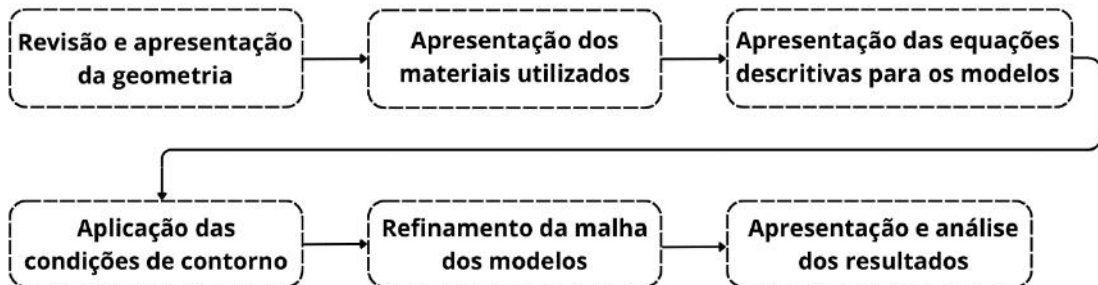


Figura 11: Fluxograma representativo das fases tomadas

Nas seções que se seguem são apresentados com detalhes cada uma das fases do método abordado neste trabalho.

3.2 Geometria do volante

A geometria do volante passou por diversas modificações e *feedbacks* dos membros da equipe Ali Babaja, além de considerar modelos de volantes de veículos inspiração para o baja, como os UTVs (*Utility Task Vehicle*), e outros volantes de outras equipes de baja. Mais importante, foram levadas em consideração os estudos diversos de ergonomia e as restrições dimensionais impostas pelo RATBSB.

Os desenhos foram feitos no *software* de modelagem *SolidWorks*, que após a definição da “silhueta” do volante em 2 dimensões, como mostrado na Figura 9, foi transformada em 3 dimensões agora considerando a *honeycomb* e as lâminas de fibra de carbono, desenhados com as mesmas restrições e furos de fixação. A Figura 12 mostra os itens separado no *SolidWorks*.

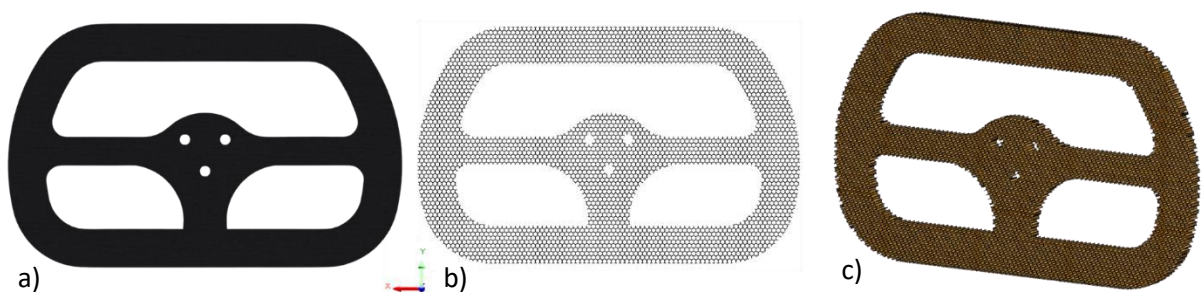


Figura 12: a) vista frontal volante em fibra, b) *honeycomb* e c) isométrica da *honeycomb*

Após os desenhos individuais, foram feitas montagens considerando 2 lâminas de fibra de carbono em cada uma das faces da *honeycomb*, e, par a par, foram feitos

arranjos de lâminas de fibra de carbono até que se obtivesse 8 lâminas em cada uma das faces da *honeycomb*. A Figura 13 mostra a montagem de uma folha de fibra de carbono em cada face da *honeycomb*.



Figura 13: Vista isométrica do volante em montagem

Um ponto a destacar é quanto aos furos centrais no volante que foram feitos considerando a fixação do componente conhecido como árvore de direção, responsável por transmitir o esforço de rotação do piloto para a caixa de engrenagem que por sua vez transfere este movimento para as rodas, por meio dos braços de direção.

3.3 Materiais utilizados

Nesta seção, foram descritas as propriedades adotadas para os materiais utilizados no volante para a simulação numérica e manobras de equivalência ou homogeneização aplicadas à *honeycomb* de aramida. Uma importante informação sobre os materiais utilizados é que estes são considerados ortotrópicos, isto é, suas propriedades mecânicas são únicas de acordo com o plano de simetria: variam de acordo com as direções dos eixos cartesianos (BARBERO, 2018).

3.3.1 Fibra de carbono

O tecido de fibra de carbono, que é unidirecional, possui propriedades iguais nos eixos paralelos às fibras (X, Y). A Tabela 3 mostra as propriedades mecânicas do tecido de carbono laminado que foram retiradas da biblioteca de materiais compósitos do Ansys.

Tabela 3: Propriedades mecânicas da fibra de carbono (ANSYS, 2023)

Propriedade	Fibra de carbono	Unidade
Densidade (ρ)	1,451	g/cm ³
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E_x)	59,16	GPa
Módulo de Elasticidade Perpendicular (E_z)	7,5	GPa
Coeficiente de Poisson Longitudinal (ν_{xy})	0,04	-
Coeficiente de Poisson Perpendicular (ν_{yz})	0,3	-
Módulo de Cisalhamento Longitudinal (G_{xy})	3,3	GPa
Módulo de Cisalhamento Perpendicular (G_{yz})	2,7	GPa
Resistência à Tração Longitudinal (S_{11}^t)	513	MPa
Resistência à Tração Transversal (S_{22}^t)	50	MPa
Resistência à Compressão Longitudinal (S_{11}^c)	437	MPa
Resistência à Compressão Transversal (S_{22}^c)	150	MPa
Resistência ao Cisalhamento plano XY (S_{12}^s)	120	MPa
Resistência ao Cisalhamento plano YZ (S_{23}^s)	55	MPa

Como objetivo principal deste trabalho, a análise ficou em volta da determinação do comportamento do volante de acordo com a quantidade de lâminas do tecido de fibra de carbono em cada uma das faces e como estas afetavam a rigidez do conjunto. Portanto, as propriedades da Tabela 3, foram mantidas independentes da quantidade de lâminas de fibra de carbono.

3.3.2 *Honeycomb* de aramida

A *honeycomb* de aramida adquirida pela equipe Ali Babaja, em sua ficha técnica, apresentou uma lacuna significativa de dados que seriam essenciais para a análise por meio do MEF. Diante dessa situação, tornou-se imperativo recorrer a fontes bibliográficas que servissem de fundamento para a determinação das propriedades da *honeycomb* de aramida.

A seleção de referências considerou aspectos como o comportamento estrutural e respostas a diferentes condições de carregamento. A partir dessas informações fundamentais, foi possível estabelecer parâmetros e dados relevantes para a modelagem no ambiente de simulação por elementos finitos. A fonte principal foi baseada por SHAN *et al.* (2019). Dessa forma, os resultados das propriedades necessárias para a montagem do conjunto seguiram a lógica sugerida por Fish (2009), Figura 10, e Barbero (2018), apresentada na seção 3.6.1.

3.4 Tensões, Relação Constitutiva e Dano

As tensões em um corpo são parâmetros utilizados para analisar como a influência de uma carga externa afeta internamente as propriedades e comportamento do material do item estudado. O estado plano de tensões é uma situação planejada de um elemento diferencial em que um dos componentes das tensões tridimensionais é igual a zero, enquanto os outros dois componentes das tensões são diferentes de zero. Essa condição bidimensional das tensões lida especificamente com os carregamentos em um plano e é útil na análise e no projeto de componentes (HIBBELER, 2010). A Figura 14 mostra um elemento diferencial sobre duas tensões normais, σ_y e σ_x , e uma tensão de cisalhamento, τ_{xy} .

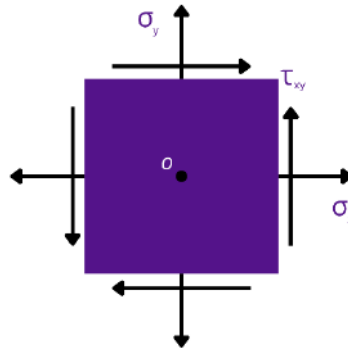


Figura 14: Estado plano de tensões em um elemento diferencial – (modificado de HIBBELER, 2010)

No contexto do estado plano de tensões, a relação entre as tensões e as deformações sofridas pelo material, considerando comportamento linear, pode ser expressa através da Lei de Hooke. De acordo com essa lei, a tensão aplicada em um material ortotrópico é proporcional à deformação resultante. Essa relação pode ser descrita matematicamente pela multiplicação da matriz de flexibilidade pelo vetor de tensões, resultando no vetor de deformações correspondente, como mostrado na equação (1)

$$[s][\sigma] = [\varepsilon] \quad (1)$$

onde σ é um vetor com as componentes do tensor das tensões normais e de cisalhamento,

$$[\sigma] = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{xz}]^T \quad (2)$$

ε é um vetor com as componentes do tensor das deformações causadas pelas tensões normais e a tensão de cisalhamento

$$[\varepsilon] = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{xz}]^T \quad (3)$$

e s a matriz de flexibilidade do material, dada por

$$[s] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde E e G são os módulos de elasticidade e cisalhamento aplicados nos planos, respectivamente. A equação (1) pode ser reescrita considerando a inversa da matriz s , $s^{-1} = C$, onde c é a matriz de rigidez do material considerado. Assim, fica

$$[\sigma] = [C][\varepsilon] \quad (5)$$

A equação (5) considera a tensão medida no domínio não danificado do material. Para isso, considerando que o objetivo do presente trabalho é conhecer os esforços externos necessários para danificar cada um dos materiais do conjunto do volante, é necessário incluir efeitos de falha e restrições para o dano após a falha. O material não danificado deve ser linearmente elástico, como proposto pela equação (5). O início do dano é determinado por meio de critérios de falha, como descrito na seção 3.5, e após o início do dano, a redução da rigidez do material ocorre imediatamente. A relação constitutiva para o domínio de dano no material é dada por

$$[\sigma]_d = [C]_d[\varepsilon] \quad (6)$$

onde o índice d indica que o domínio da matriz analisada considera, além do regime linear, o comportamento após a falha, ou seja, do material danificado e $[C]_d$ é escrita como

$$[C]_d = \begin{bmatrix} \frac{s_{11}}{(1-d_f)} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{21} & \frac{s_{22}}{(1-d_m)} & s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ s_{31} & s_{32} & \frac{s_{33}}{(1-d_m)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{s_{44}}{(1-d_s)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{s_{55}}{(1-d_s)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{s_{66}}{(1-d_s)} \end{bmatrix}^{-1} \quad (7)$$

onde os termos s_{ij} são os termos da linha i e coluna j da matriz de elasticidade s , mostrada na equação (4), e os termos d_f, d_m, d_s são os valores de dano considerados para fibra, matriz e cisalhamento, respectivamente. Os valores d assumem valores entre 0 e 1, onde $d = 0$ significa nenhum dano considerado e $d = 1$ significa perda completa de rigidez no modo.

Quatro modos de dano são contabilizados dentro deste escopo:

- tração da fibra;
- compressão da fibra;
- tração da matriz;
- compressão da matriz.

Quatro termos, um para cada modo de dano, são usados para mensurar o dano. As variáveis de dano para calcular a matriz de elasticidade danificada, $[C]_d$, são determinadas da seguinte forma:

$$d_f = \begin{cases} d_f^+, & \text{se } \lambda_f^+ > 0 \\ d_f^-, & \text{se } \lambda_f^- > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^+, & \text{se } \lambda_m^+ > 0 \\ d_m^-, & \text{se } \lambda_m^- > 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$d_s = 1 - (1 - d_f^+)(1 - d_f^-)(1 - d_m^+)(1 - d_m^-) \quad (10)$$

onde $\lambda_f^+, \lambda_f^-, \lambda_m^+, \lambda_m^-$ são termos de redução da propriedade original do material para tensão na fibra, compressão na fibra, tensão na matriz e compressão na matriz, respectivamente, calculados pela tensão σ do domínio não danificado.

Os valores d_f^+ , d_f^- , d_m^+ , d_m^- serão considerados nas etapas de pré-processamento do MEF tanto para a *honeycomb* de aramida quanto para a fibra de carbono, seguindo algumas restrições baseadas em sólidas referências bibliográficas, apresentado na seção 3.6.

3.5 Critérios de Falha

3.5.1 Critério de Falha de Estruturas Sanduíche

As propriedades dos materiais que fazem parte de uma estrutura do tipo sanduíche fazem com que as análises de falhas sejam mais complexas do que laminados simples, já que cada um dos itens do sanduíche possui geometria e comportamento diferentes, dado uma condição de carga, deslocamento e engaste, por exemplo. A Figura 15 mostra os modos de falha de estruturas do tipo sanduíche, segundo Bitzer (1997) e Oliveira (2020).

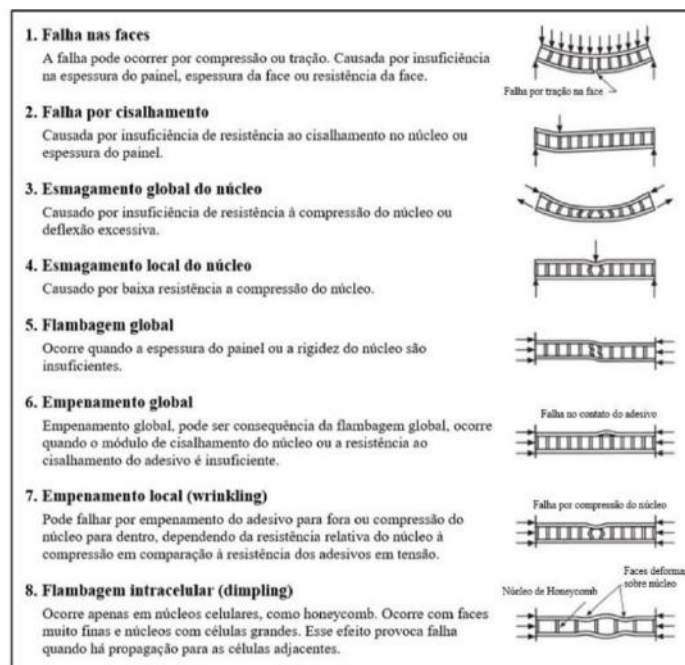


Figura 15: Modos de falha de estruturas sanduíche (OLIVEIRA, 2020)

Os modos de falha apresentados na Figura 15 consideram todos os tipos de carregamento nos planos simétricos do núcleo. No presente caso, o modo de falha considerado no núcleo de *honeycomb* é o de esmagamento global do núcleo, devido a condição de carregamento considerado. Visto que as propriedades da *honeycomb* de aramida adquirida pela equipe Ali Babaja não eram conhecidas, este modo de falha foi referência para que houvesse manobras dentro do MEF que fossem úteis para o

processo de homogeneização do núcleo. Na seção 3.6.1 este método foi utilizado como condição de contorno.

3.5.2 Critério de tensão máxima

O critério de falha utilizado para os modelos de volantes considerados foi o critério de tensão máxima que apresenta uma relação entre as tensões observadas nas direções longitudinais, transversais e de cisalhamento das fibras do material compósito analisado. Este método busca avaliar se a falha, quando ocorrida, é observada na matriz ou no reforço. As equações a seguir são a descrição do modo de falha utilizado para avaliar os modelos de volante considerado.

$$f_r = \begin{cases} \frac{\sigma_{11}}{S_{11}^t}, & \text{se } \sigma_{11} > 0 \\ \frac{|\sigma_{11}|}{S_{11}^c}, & \text{se } \sigma_{11} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$f_m^\sigma = \begin{cases} \frac{\sigma_{22}}{S_{22}^t}, & \text{se } \sigma_{22} > 0 \\ \frac{|\sigma_{22}|}{S_{22}^c}, & \text{se } \sigma_{22} < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$f_m^\tau = \frac{|\tau_{12}|}{S_{12}^s} \quad (13)$$

onde:

f_r : é a função de falha no reforço

f_m^σ : é a função de falha na matriz devido ao carregamento

f_m^τ : é a função de falha na matriz devido a tensão de cisalhamento

σ_{11} : Tensão aplicada no sentido longitudinal do reforço

σ_{22} : Tensão aplicada no sentido transversal ao reforço

S_{11}^t : Resistência à tração do material na direção longitudinal

S_{22}^t : Resistência à tração do material na direção transversal

S_{11}^c : Resistência à compressão do material na direção longitudinal

S_{22}^c : Resistência à compressão do material na direção transversal

S_{12}^s : Resistência ao cisalhamento

τ_{12} : Tensão cisalhante aplicada

Os valores f_m^t , f_m^c , f_r são utilizados para indicar se houve falha devido ao carregamento aplicado. Quando esses parâmetros assumem valor igual ou superior a 1 significa que ocorreu falha do material na categoria analisada. De forma geral, as equações (11), (12) e (13) podem ser escritas de forma combinada como

$$f = \max \left(\frac{|\sigma_{11}|}{S_{11}^{t,c}}, \frac{|\sigma_{22}|}{S_{22}^{t,c}}, \frac{|\tau_{12}|}{S_{12}^s} \right) \quad (14)$$

Esse modo é adotado por conta das condições de contorno aplicadas que visam analisar um caso crítico. Dessa forma, podem ser adotadas algumas configurações para que somente um termo de falha seja analisado, como por exemplo adotar valores de S_{12} muito altos para que sejam analisados somente o domínio de falha às condições de carregamento de tração ou compressão.

3.6 Pré-processamento MEF

O processo de importação da geometria é o primeiro passo nessa etapa do trabalho. Como mencionado na seção 3.2, a geometria é importada no software Ansys para modelar cada um dos componentes individualmente. Nesse processo, são atribuídas as condições de contorno que melhor representam as condições reais em que a estrutura será submetida. Além disso, é necessário realizar a atribuição adequada das propriedades dos materiais utilizados na construção do volante.

Outro aspecto importante é o refinamento da malha, que consiste em ajustar a densidade e qualidade dos elementos finitos que compõem a malha computacional. Esse refinamento é realizado com o objetivo de obter resultados mais precisos e reduzir erros numéricos na análise e é feito de forma sistemática e iterada, realizando observações visuais e métricas do próprio *software* para selecionar o método com melhor custo-benefício computacional.

3.6.1 Determinação das propriedades da *honeycomb* de aramida

Como explicado na seção 3.3.2, um dos desafios do presente trabalho foi a determinação das propriedades da *honeycomb* de aramida adquirida pela equipe Ali Babaja. Os conceitos utilizados para essa determinação foram baseados em ferramentas de semelhança e simplificação geométrica.

Segundo Barbero (2018), A fração volumétrica das fibras, em inglês *Representative Volume Elements* (RVE), de um material compósito pode ser aproximada por recursos de equivalência. Uma manobra pode ser utilizada para

prever as propriedades do compósito com base nas propriedades conhecidas, baseadas em testes, dos componentes: reforço e matriz. Essa análise é realizada de forma abrangente, permitindo que o projetista não precise se preocupar com alguma variação de plano de simetria durante o processo de modelagem, e também serve para economizar recursos computacionais com a geometria, como é descrito para o presente trabalho: figuras hexagonais tridimensionais transformadas para cúbicas. A Figura 16 mostra um esquema de equivalência.

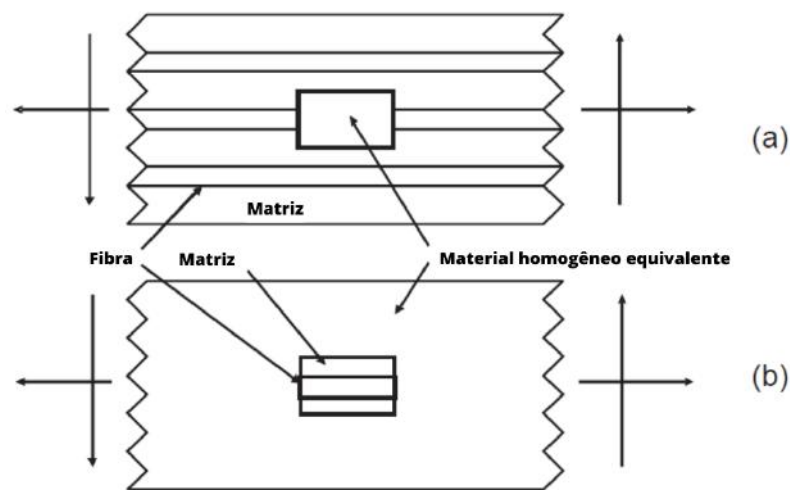


Figura 16: (a) RVE alterado por material homogêneo equivalente (b) estrutura completa sem o RVE alterado por material homogêneo equivalente – (modificado de BARBERO, 2018).

O modelo de equivalência foi adotado devido às condições de carregamento consideradas e à necessidade de otimização computacional, já que o software utilizado demandava mais poder de processamento para renderização da geometria hexagonal do volante, conforme ilustrado na Figura 12. Portanto, a utilização do modelo de equivalência se mostrou uma solução viável para simplificar o problema e reduzir a carga computacional. A homogeneização, então, considerou as propriedades micromecânicas do papel de aramida segundo SHAN *et al.* (2019) e a geometria representativa da *honeycomb* apresentada na Figura 17.

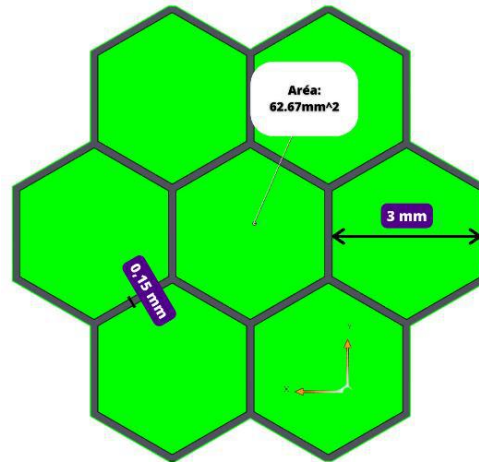


Figura 17: Geometria para obtenção das propriedades homogeneizadas

Dispondo dos dados apontados por SHAN *et al.* (2019) e seguindo o fluxo mostrado na Figura 10, o MEF realizado no Ansys usou as propriedades apresentadas na Tabela 4, para o valor do papel de aramida, obtidas de forma experimental.

Tabela 4: Propriedade do papel de aramida, adaptado de (SHAN, XU, *et al.*, 2019)

Propriedade	Valor	Unidade
Coefficiente de Poisson (ν)	0.2	-
Módulo de Elasticidade (E)	4.0	GPa
Módulo de Cisalhamento (G)	1.67	GPa
Resistência à Tração (S^t)	60	MPa
Resistência à Compressão (S^c)	180	MPa

3.6.1.1 Condições de Contorno

Dentro do ambiente do Ansys, as propriedades foram atribuídas a geometria da Figura 17 de forma que o objetivo fosse a obtenção dos valores das forças, nos três eixos, necessárias para realizar um deslocamento arbitrado aplicado na face da *honeycomb* a partir do engaste da face oposta. Esses valores seriam úteis para conhecimento do módulo de elasticidade, E , e resistência a tensão de compressão, S_c . A Figura 18 mostra as condições de contorno aplicadas nesta fase.

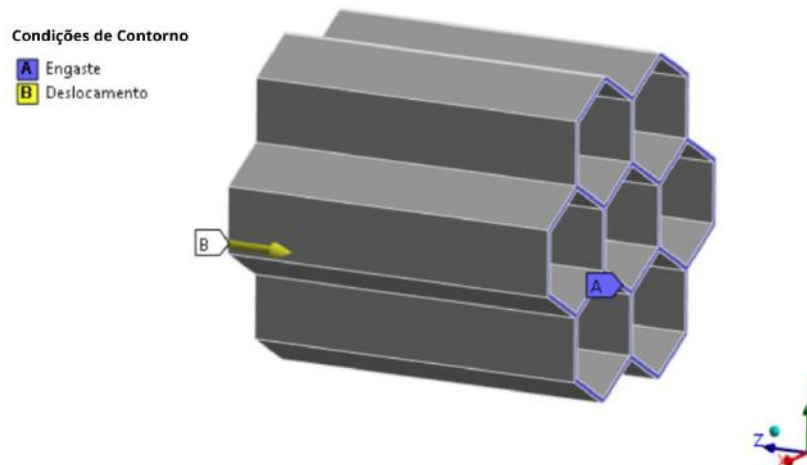


Figura 18: Condições de Contorno para compressão da *honeycomb* de aramida

De forma iterada, o deslocamento foi testado até que fosse obtido um valor onde houvesse falha do material e posterior comparação com a bibliografia de SHAN *et al.* (2019).

Foi necessário também, em outra fase de obtenção das propriedades da *honeycomb* homogeneizada, a criação de condições de contorno para as propriedades de módulos de cisalhamento, G , e tensões de cisalhamento, τ . Dessa forma, uma das faces foi engastada enquanto a outra teve um deslocamento no sentido perpendicular à espessura da *honeycomb*. As condições de contorno para essa fase são mostradas na Figura 19.

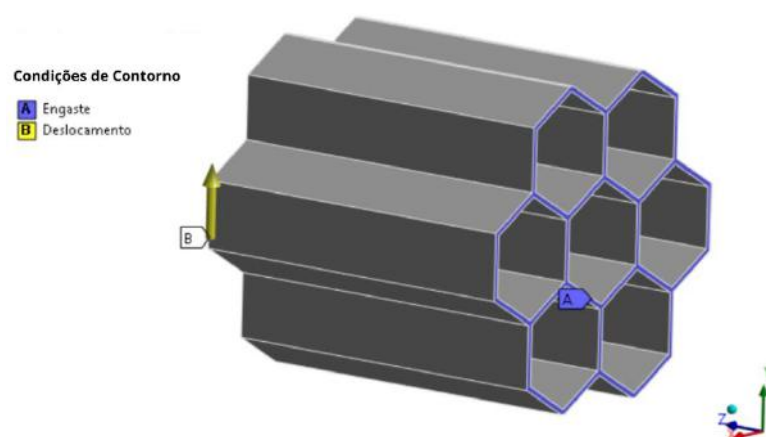


Figura 19: Condições de contorno para cisalhamento da *honeycomb* de aramida

3.6.1.2 Malha

A malha para a fase de homogeneização da *honeycomb* de aramida seguiu o critério de convergência comparando os métodos utilizados para geração da malha

cada vez mais refinados de forma que os valores de força por deslocamento, na condição de compressão, fossem sobrepostos a partir de determinada quantidade de nós na geometria. O método *sweep* foi utilizado para a geração e refinamento da malha. A Figura 20 mostra o comparativo dos dados obtidos aumentando a quantidade de divisões do método *sweep* de forma que a malha fosse refinada e a quantidade de nós fosse aumentada.

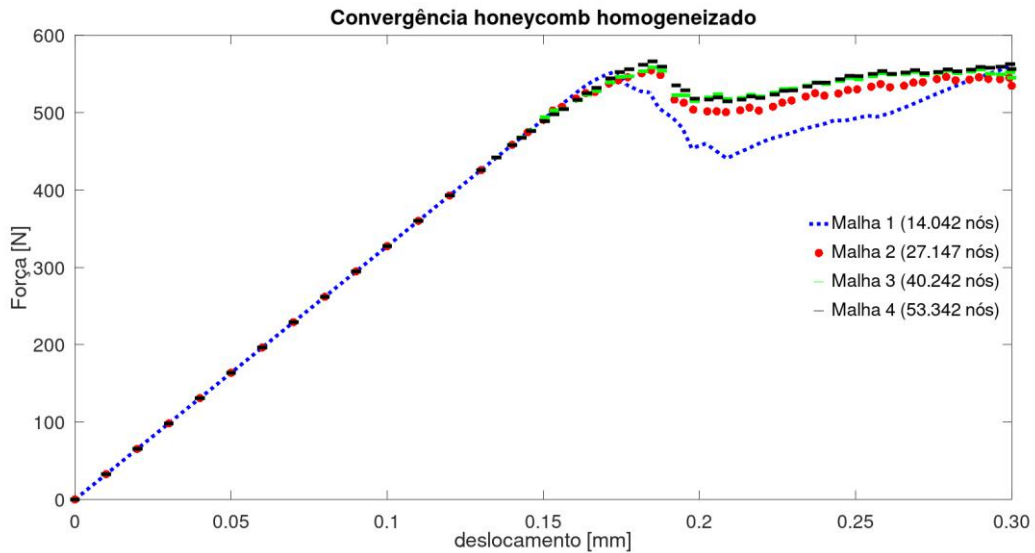


Figura 20: Estudo de convergência – *honeycomb* homogeneizado

Dessa forma, o método *sweep* com 20 divisões, malha 2 com 22.147 nós, mostrou uma convergência rente às outras iterações antes e depois da falha do material, como baixa diferença entre os pontos correspondentes, e, portanto, foi o escolhido para a aproximação do material escolhido. A Figura 21 mostra a geometria simplificada da chapa de *honeycomb* de aramida com a malha aplicada.

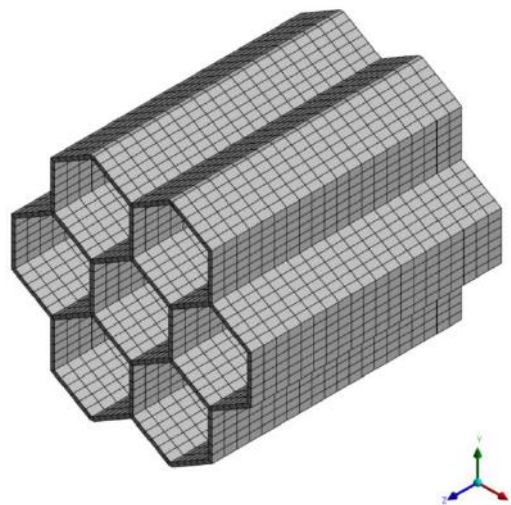


Figura 21: Malha considerada para *honeycomb*

3.6.1.3 Resultados da homogeneização da *honeycomb* de aramida

Dispondo dos resultados apresentados por SHAN *et al.* (2019), o objetivo, após a identificação do deslocamento necessário para ocasionar a falha da *honeycomb*, era a modificação da propriedade da aramida para o domínio de dano. A restrição, como apresentado nas equações (6), (7) e (8) na seção 3.4, foi iterada modificando o valor de λ_f^- , que é o termo de redução após a falha por das propriedades de compressão do material. Esse valor foi importante já que a condição de contorno considerada avaliou o modo de falha de esgamamento do núcleo por compressão.

Após algumas iterações realizadas no fator λ_f^- , utilizando comparação gráfica do resultado experimental e os resultados pela avaliação por MEF, foi possível chegar a valores consistentes que representassem a homogeneização da *honeycomb* de aramida. Para isso, o valor obtido para λ_f^- foi de 0,7, sugerindo que 70% das propriedades de compressão da aramida são preservadas após a falha. A Figura 22 mostra a comparação dos valores obtidos via experimental – SHAN *et al.* (2019) – e obtidos via MEF no Ansys.

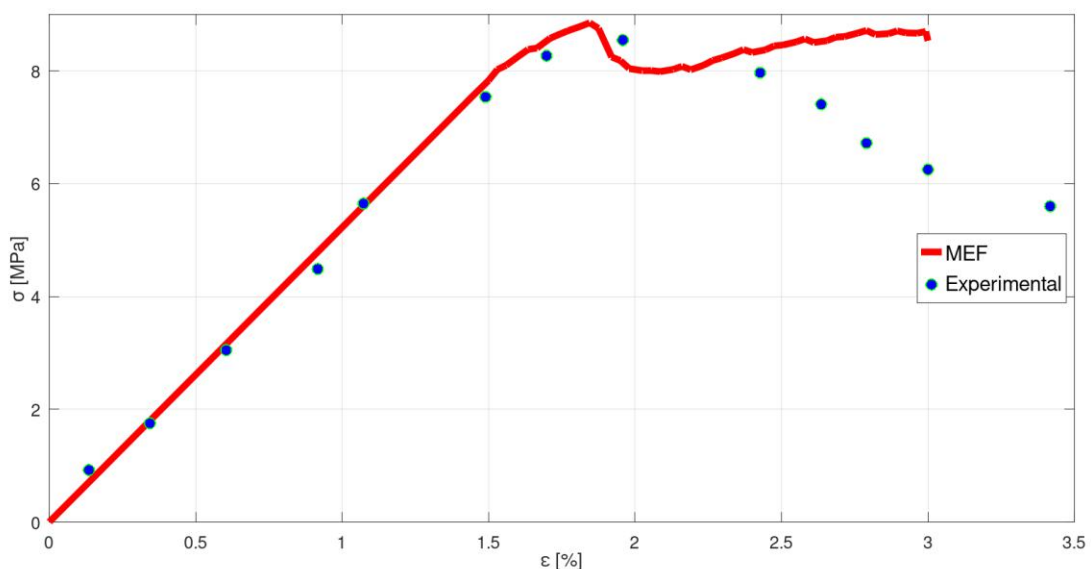


Figura 22: Comparação experimental e por MEF da *honeycomb* em compressão

Os valores da Figura 22 podem ser interpretados como bem aproximados e satisfatórios para a região linear elástica, que ocorre antes da falha da *honeycomb* antes de $\varepsilon \cong 1,75\%$. Esses valores foram obtidos por meio dos dados obtidos do gráfico de força por deslocamento dado pelo Ansys, e fazendo $\sigma = F_z/A$, onde A é a

área ocupada pela face engastada e F_z a força resultante observada na direção Z . Além disso, para obtenção da deformação perpendicular, ε , foi feito $\varepsilon = d/h$ para cada um dos pontos do gráfico, onde d é o deslocamento da face e $h = 10 \text{ mm}$ a espessura da *honeycomb*.

A região elástica fornece o valor do módulo de elasticidade no sentido de compressão da espessura da *honeycomb*, E_z , que pode ser obtido fazendo

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (15)$$

pelo gráfico e pelos resultados tabelados fornecidos pelo Ansys, $E_z \cong 510 \text{ MPa}$. Para as outras direções cartesianas, SHAN *et al.* (2019) aponta um valor 100 vezes menor do que o valor observado na componente paralela a espessura da *honeycomb*.

Dispondo dos valores principais das propriedades na direção de compressão, foi realizado o MEF para o caso de cisalhamento das faces, como mostrado na condição de contorno da Figura 19. Semelhante ao caso de compressão, foram iterados alguns valores de deslocamento da face até a obtenção dos valores de falha nesse modo. Foi aplicado um deslocamento a partir da face oposta ao engaste, na direção X , obtidos os dados de força resultante nessa mesma direção. Após essa fase, foi aplicado um deslocamento na direção Y e foram obtidos os valores da força resultante nessa direção. Assim, foi possível dispor os gráficos de tensão de cisalhamento, a partir da relação $\tau = \frac{F_{x,y}}{A}$, onde $F_{x,y}$ é a força observada nessas direções e A o valor da área ocupada pela região engastada e τ a tensão de cisalhamento. Dessa forma foi possível analisar o gráfico de τ por γ nas duas direções, mostrado na Figura 23.

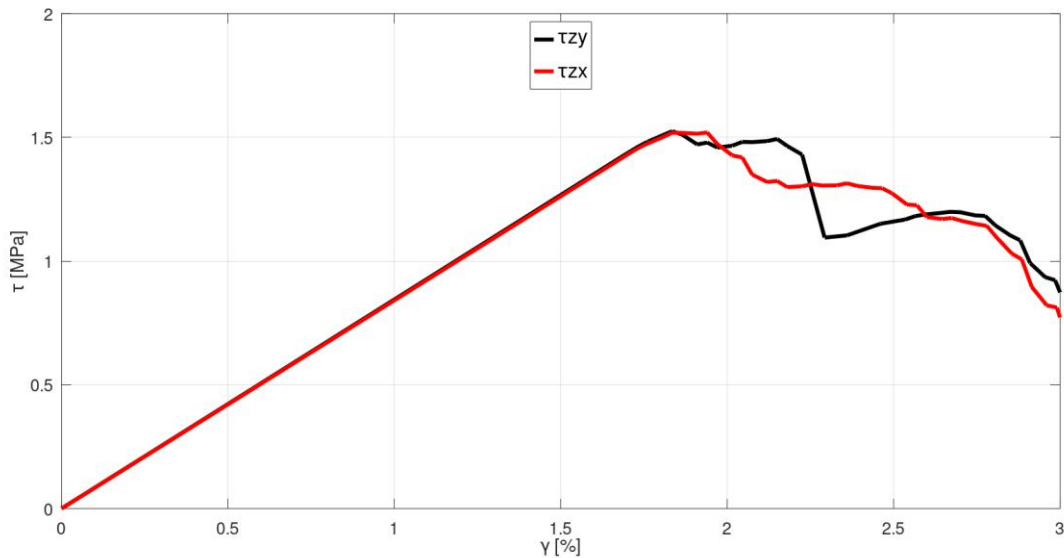


Figura 23: Comportamento sobre deslocamento cisalhante da *honeycomb*

Como esperado e visualizado por SHAN *et al.* (2019), os valores de tensão de cisalhamento τ_{zx} e τ_{zy} obtidos foram próximos um ao outro, assim foi considerado $\tau_{zx} = \tau_{zy} = 1,5 \text{ MPa}$ e 100 vezes menos para τ_{yx} . Para obtenção dos valores de módulo de cisalhamento G_{zx} e G_{zy} , por meio do gráfico e tabelas do resultado obtido, foi feito

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (16)$$

sendo γ a deformação no sentido de cisalhamento. Dessa forma o valor obtido foi $G_{zx} = G_{zy} \cong 81 \text{ MPa}$ e, como sugerido por SHAN *et al.* (2019), o valor de G_{xy} é 100 vezes menor do que os obtidos. Para observar o valor do coeficiente de Poisson, ν , foi analisado os valores de força resultante nas componentes adjacentes a direção dos deslocamentos cisalhantes aplicados. Assim, foi observados valores de força próximos a zero, indicando que o coeficiente de Poisson é zero para as condições da *honeycomb* homogeneizada. A Tabela 5 mostra as propriedades finais homogeneizadas.

Tabela 5: Propriedades obtidas para a *honeycomb* homogeneizada

Propriedade	Valor	Unidade
Coefficiente de Poisson ($\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$)	0	-
Módulo de Elasticidade perpendicular (E_z)	510	MPa
Módulo de Elasticidade longitudinal (E_y)	5,1	MPa
Módulo de Elasticidade transversal (E_x)	5,1	MPa
Módulo de Cisalhamento no plano XY, G (G_{xy})	0,81	MPa
Módulo de Cisalhamento no plano YZ, (G_{yz})	81	MPa
Módulo de Cisalhamento no plano XZ (G_{xz})	81	MPa
Resistência à Tração perpendicular (S_{11}^t)	1E+15	MPa
Resistência à Tração longitudinal (S_{22}^t)	1E+15	MPa
Resistência à Tração transversal (S_{33}^t)	1E+15	MPa
Resistência à Compressão perpendicular (S_{11}^c)	80	MPa
Resistência à Compressão longitudinal (S_{22}^c)	1E15	MPa
Resistência à Compressão transversal (S_{33}^c)	1E15	MPa
Resistência ao Cisalhamento no plano ZX (S_{12}^s)	1,5	MPa
Resistência ao Cisalhamento no plano ZY (S_{13}^s)	1E15	MPa
Resistência ao Cisalhamento no plano XY (S_{23}^s)	1,5	MPa
Redução de Rigidez à Tração da Fibra (d_f^+)	0	-
Redução de Rigidez à Compressão da Fibra (d_f^-)	0,7	-
Redução de Rigidez à Tração da Matriz (d_m^+)	0,7	-
Redução de Rigidez à Compressão da Matriz (d_m^-)	0,7	-

Os valores para resistência à tração nas três direções, resistência à compressão longitudinal e transversal e tensão de cisalhamento no plano YZ foram arbitrados valores suficientemente altos para satisfazer a condição de falha de tensão máxima, apresentada na seção 3.5.2.

3.6.2 Pré-processamento MEF do volante

Uma vez que a equivalência da *honeycomb* de aramida foi estabelecida, o próximo passo consistiu na modelagem do conjunto de forma agrupada, levando em consideração o perfil geométrico final em três dimensões para avaliação da resposta estrutural devido ao carregamento. A *honeycomb* de aramida, então, foi considerada como um sólido sem os vazios hexagonais, pela teoria proposta por Barbero (2018).

Os diferentes modelos foram considerados para que, utilizando o MEF, fosse analisado o comportamento estrutural de cada um deles de acordo com a quantidade de lâminas de fibra de carbono. Cada modelo considerado nesta fase, representa uma configuração específica, com diferentes arranjos e quantidades de lâminas de fibra de carbono. Essa variação na quantidade de lâminas permite explorar diferentes cenários

e entender como o volante responde a diferentes níveis de reforço. Dessa forma, foi possível avaliar como o aumento ou redução dessas lâminas afeta o comportamento estrutural, incluindo aspectos como resistência a forças (rigidez) e deformação, dado uma condição de contorno.

A *honeycomb* de aramida, adquirida pela equipe Ali Babaja, possui uma espessura total de 10 mm. Para o processo de laminado com resina epóxi, foi considerada uma espessura de 0,5 mm para cada lâmina de fibra de carbono. Os modelos considerados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Modelos de volantes considerados

Modelo	Lâminas de fibra	Espessura da <i>honeycomb</i> (mm)	Espessura total (mm)
Volante A	4	10	14
Volante B	6	10	16
Volante C	8	10	18
Volante D	10	10	20

A construção no Ansys, após a importação da geometria do SolidWorks, seguiu o fluxo de determinação dos materiais de cada componente, escolha do sistema de coordenadas para cada tipo de material e determinação das conexões entre os corpos e faces de contato. A geometria considerada foi minimizada a somente metade do volante completo, já que o comportamento observado é idêntico ao lado oposto devido a simetria da geometria. A Figura 24 mostra a geometria do volante C, em vista explodia, importada para o Ansys, onde o material na cor azul representa a *honeycomb* de aramida e os materiais na cor cinza representa as 8 lâminas de fibra de carbono em cada face da *honeycomb*.

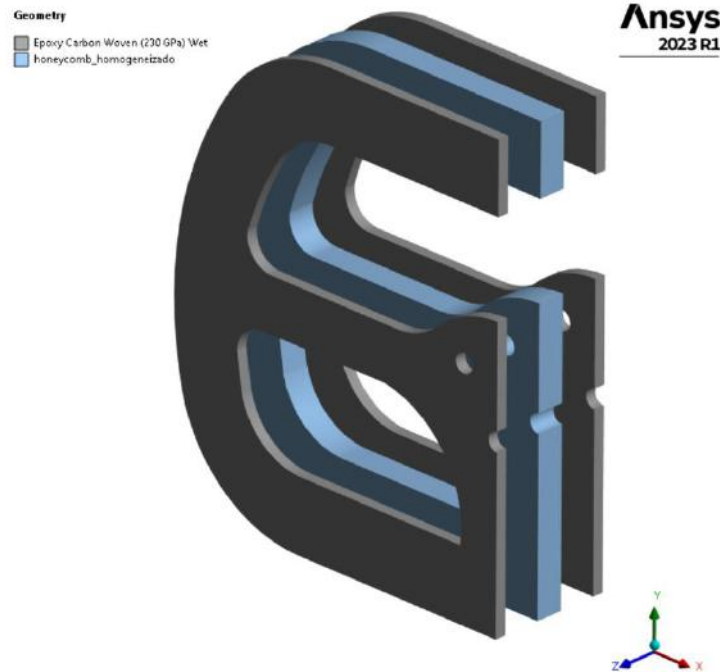


Figura 24: Arranjo do volante C no Ansys

Os outros modelos considerados somente alteram a espessura das lâminas de fibra, representado pelo material da cor cinza na Figura 24.

Nesta fase foi necessário configurar os valores de preservação das características mecânicas da fibra de carbono após a falha do reforço e da matriz. Segundo Vignoli e Castro (2021), os valores assumidos são $d_f^+ = 0,93$, $d_f^- = 0,86$, $d_m^+ = 0,93$, $d_m^- = 0,86$.

Por fim, a configuração é aplicada ao modo de análise estrutural estática no Ansys *Mechanical*, onde é realizada a aplicação das condições de contorno, o processo de refinamento da malha e o cálculo do comportamento do volante.

3.6.2.1 Condições de contorno

As condições de contorno aplicadas a geometria foram consideradas de forma que o domínio da solução considerasse uma condição próxima da realidade ao mesmo tempo que fosse a situação possível mais crítica: uma colisão frontal do protótipo onde o piloto transferisse uma força, e conseqüentemente um deslocamento, na extremidade de empunhadura do volante. Para isso, foi considerada uma superfície na folha frontal que representasse a região de contato da mão do piloto com o volante.

Assim, as condições de contorno, traduzidas na geometria mostradas na Figura 25, foram o engaste na nas faces de fixação por parafuso (região A), apoio fixo com deslocamento livre nos eixos Y e Z e movimento nulo no eixo X nas faces onde há o

plano de simetria transversal (região B) e o deslocamento arbitrado na face de empunhadura da mão do piloto (região C).

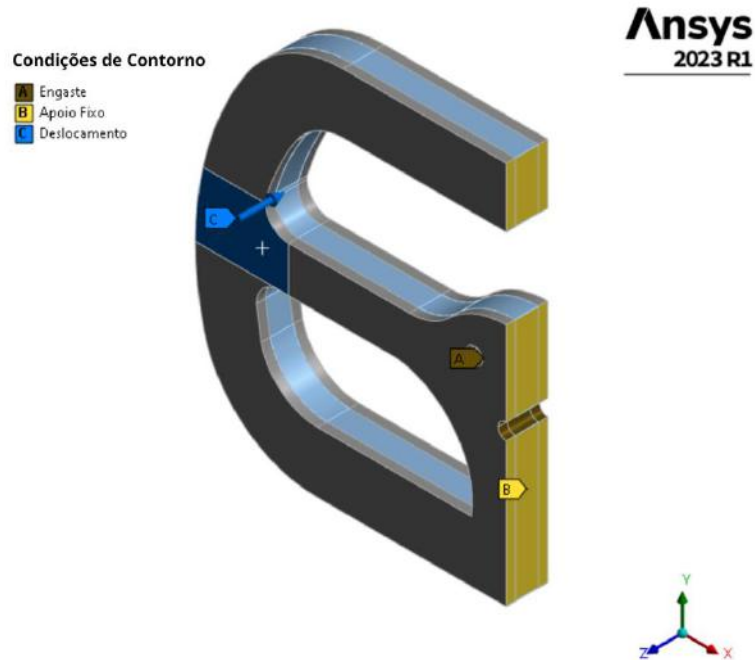


Figura 25: Condições de contorno consideradas

A partir destas condições de contorno, foi possível restringir os movimentos de rotação e translação de algumas faces do volante de forma que o caso crítico considerado fosse retratado nesta fase da modelagem por MEF. O deslocamento na face de empunhadura foi obtido de forma iterada, de forma que o valor final considerado fosse o de início de falha de uma ou ambas as camadas de fibra de carbono.

3.6.2.2 Malha

A malha dos modelos considerados foi gerada a partir do tamanho dos elementos de cada item: *honeycomb*, camada de fibra de carbono frontal e camada de fibra de carbono traseira. Dessa forma, com 50 *substeps*, foi estudada a convergência do MEF para um dos modelos e a malha que convergisse com melhor custo-benefício computacional seria aplicada para os outros modelos. O modelo considerado para o estudo foi o de 4 lâminas e a análise é mostrada na Figura 26.

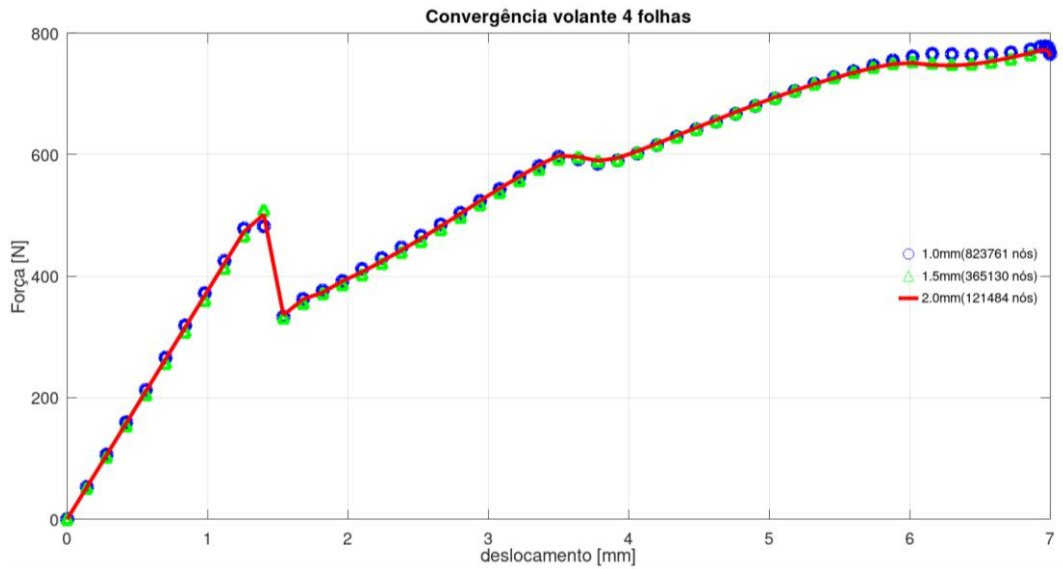


Figura 26: Estudo de convergência – volante 4 lâminas

É possível ver, portanto, que a malha com elementos de 2 mm de tamanho é suficiente para representar bem o modelo e foi a escolhida porque a quantidade de nós é significativamente menor, o que custa menos memória computacional. Este mesmo tamanho de elemento foi considerado para a obtenção dos resultados dos outros modelos, com 6, 8 e 10 lâminas de fibra de carbono. A Figura 27 mostra o detalhe da malha adotada para o volante de 4 lâminas, com destaque para a região de maior influência das condições de contorno adotadas.

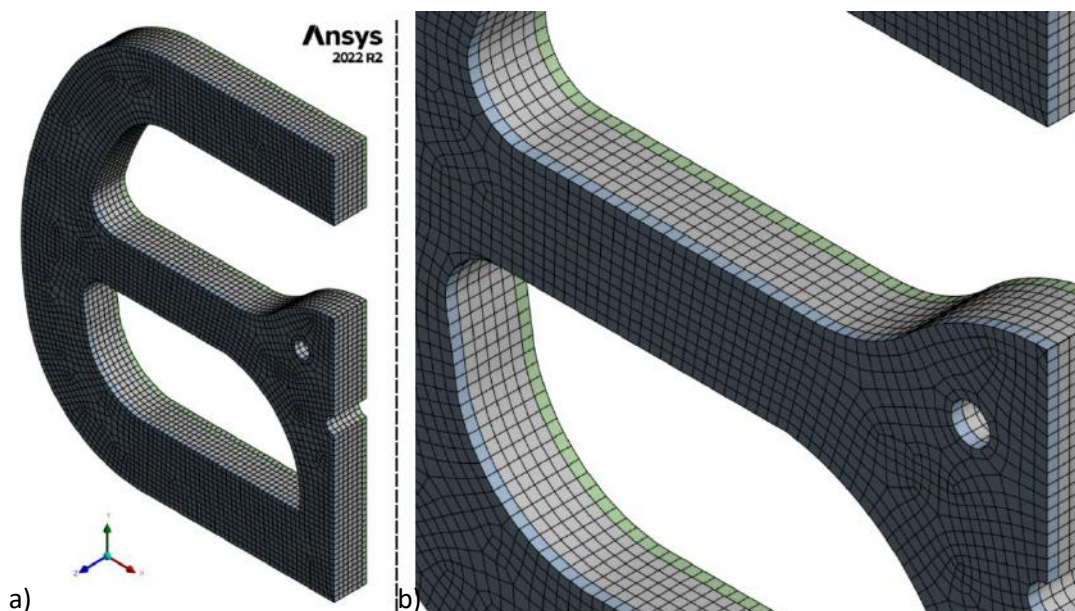


Figura 27: a) malha gerada para o modelo de 4 lâminas e b) vista da região crítica

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados de forma detalhada os resultados obtidos para cada um dos modelos considerados. Será realizada a análise e interpretação da falha ocorrida na *honeycomb*, bem como a capacidade de absorção de energia pelas lâminas de fibra de carbono, com matriz epóxi, de cada tipo de volante e a subsequente falha dessas lâminas. Serão apresentados dados quantitativos, gráficos e análises qualitativas para uma compreensão abrangente dos resultados obtidos. O objetivo é fornecer uma visão completa e fundamentada sobre o comportamento estrutural dos modelos estudados, destacando as principais características e limitações de cada um deles.

4.1 Volante A (4 lâminas de fibra de carbono)

O volante com 4 lâminas de fibra de carbono em cada face representou o volante com o menor número de lâminas em relação aos outros modelos. Considerando que cada camada tem 0,5mm de espessura, cada conjunto de fibra de carbono dispostos nas faces frontal e traseira da *honeycomb* contava com 2mm de espessura total. Após a aplicação das condições de contorno e análise de convergência da malha, foi possível analisar o comportamento de absorção e resposta a um deslocamento suficiente para a falha de toda a estrutura. Foi observado que independente do modelo, a falha ocorria primeiramente na *honeycomb* e posteriormente nas lâminas de fibra de carbono.

Feita algumas iterações, o deslocamento para falha das fibras observado para o modelo de 4 lâminas foi de $d_4 \cong 9mm$ na face de empunhadura da mão do piloto com o volante. Como mostrado nas condições de contorno da Figura 25, o objetivo era a obtenção da resposta da força dado o deslocamento aplicado. A Figura 28 mostra o resultado obtido para essa configuração.

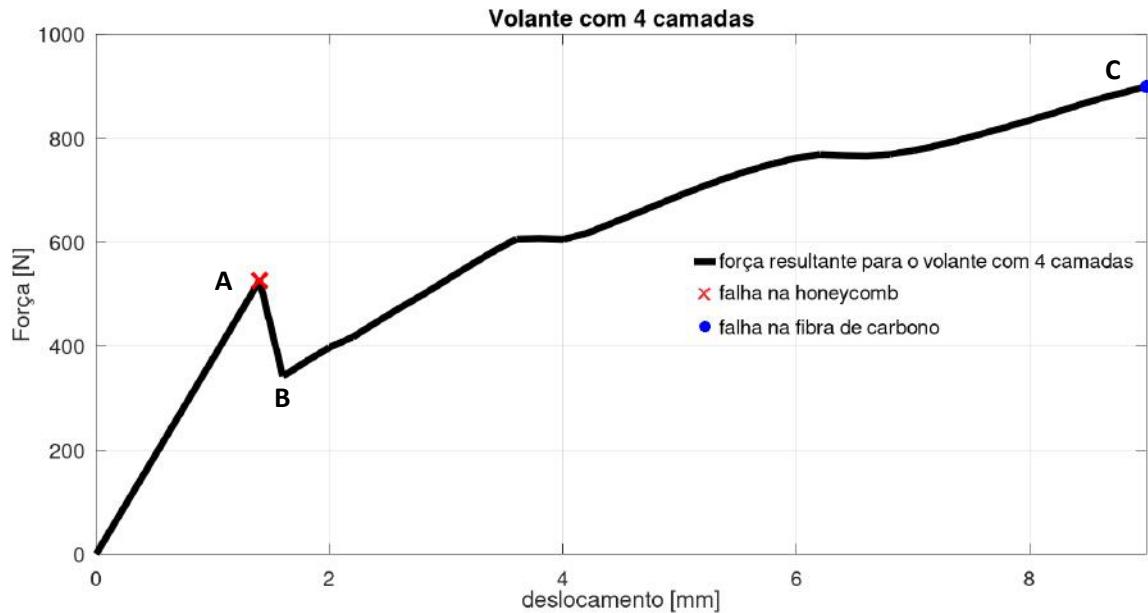


Figura 28: Força resultante até a falha da fibra de carbono para o volante de 4 lâminas

Foi observado por meio do gráfico e resultados do Ansys que a falha da honeycomb ocorre com $1,4\text{ mm}$ para uma força necessária de 526 N . Já a força necessária para ocasionar a falha das lâminas de fibra de carbono foi de 899 N . A de 0 até A contempla o comportamento linear de ambos os materiais. Na região de A até B, observa-se uma queda significativa na força, o que pode ser atribuído à perda das propriedades da honeycomb após a falha. Já na faixa entre B e C, é observado um comportamento linear das lâminas de fibra de carbono, entretanto, são evidenciadas sucessivas falhas na honeycomb, resultando em oscilações e uma linearidade não completa até a falha total.

4.2 Volante B (6 lâminas de fibra de carbono)

O modelo com 6 lâminas em cada face da *honeycomb* foi configurado da mesma forma. O deslocamento foi iterado até que fosse obtido o deslocamento necessário para a falha de uma das 6 lâminas da fibra. Assim, o deslocamento total aplicado foi de $d_6 \cong 6,20\text{ mm}$, valor menor do que o observado para o modelo com 4 lâminas, como era esperado. Entretanto a força necessária para a falha de ambos os materiais compósitos foi maior do que na configuração com menos lâminas de fibra de carbono. O resultado da força necessária para atingir esse deslocamento é mostrado na Figura 29.

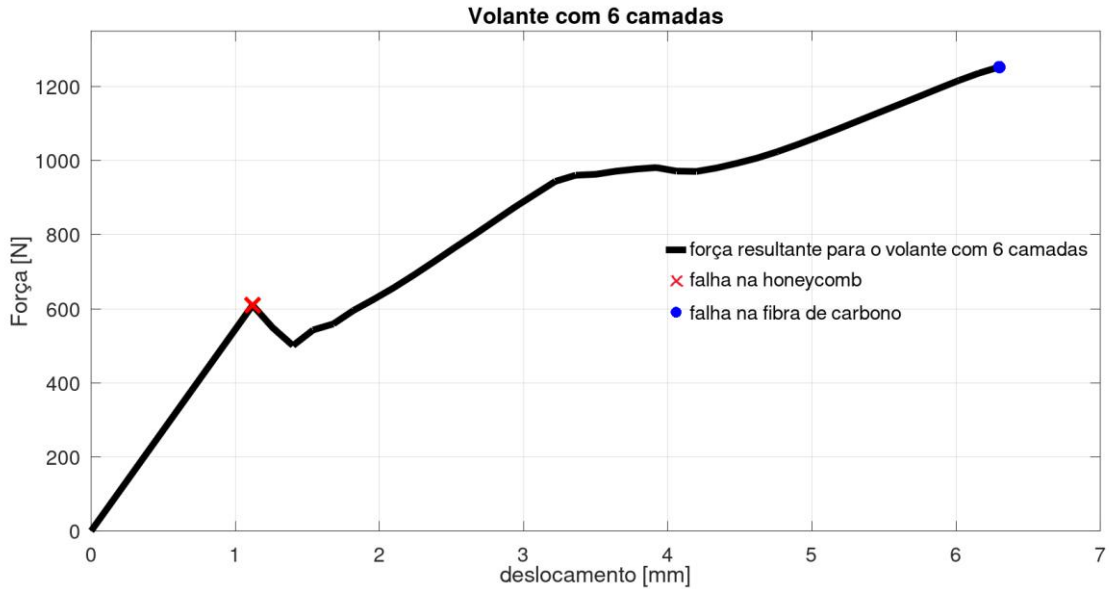


Figura 29: Força resultante até a falha da fibra de carbono para o volante de 6 lâminas

O número de nós dessa configuração foi de 148.282. O valor da força para ocasionar falha da *honeycomb* foi de 609 N a qual ocasiona um deslocamento de $1,11\text{ mm}$. A força máxima do gráfico, é a força necessária para ocasionar a falha das lâminas de fibra e tem o valor de 1254 N .

4.3 Volante C (8 lâminas de fibra de carbono)

O modelo com 8 lâminas, como esperado, apresentou uma rigidez maior e portanto uma força necessária superior aos outros 2 modelos que contém menos lâminas de fibra de carbono. O deslocamento final para a falha da fibra foi de $d_8 \cong 3,99\text{ mm}$. A Figura 30 mostra o comportamento dessa configuração.

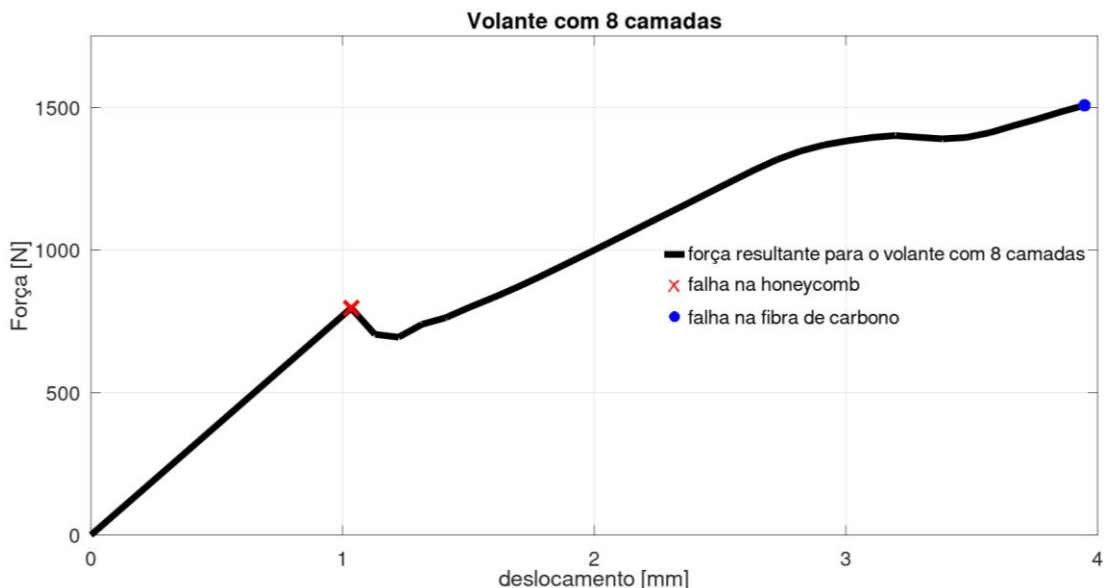


Figura 30: Força resultante até a falha da fibra de carbono para o volante de 8 lâminas

Os valores observados para falha da *honeycomb* neste modelo foram $1,02\text{ mm}$ para o deslocamento e 787 N para a força. A força para ocasionar a falha da fibra de carbono foi de 1507 N .

4.4 Volante D (10 lâminas de fibra de carbono)

Com 10 lâminas em cada face da *honeycomb* a falha da fibra de carbono ocorreu com deslocamento de $d_{10} \cong 3.30\text{ mm}$. Este foi o último modelo considerado e foi o que apresentou maior rigidez e maior força necessária para ocasionar a falha da fibra de carbono. A Figura 31 mostra o comportamento da força pelo deslocamento do volante com 10 lâminas de fibra de carbono.

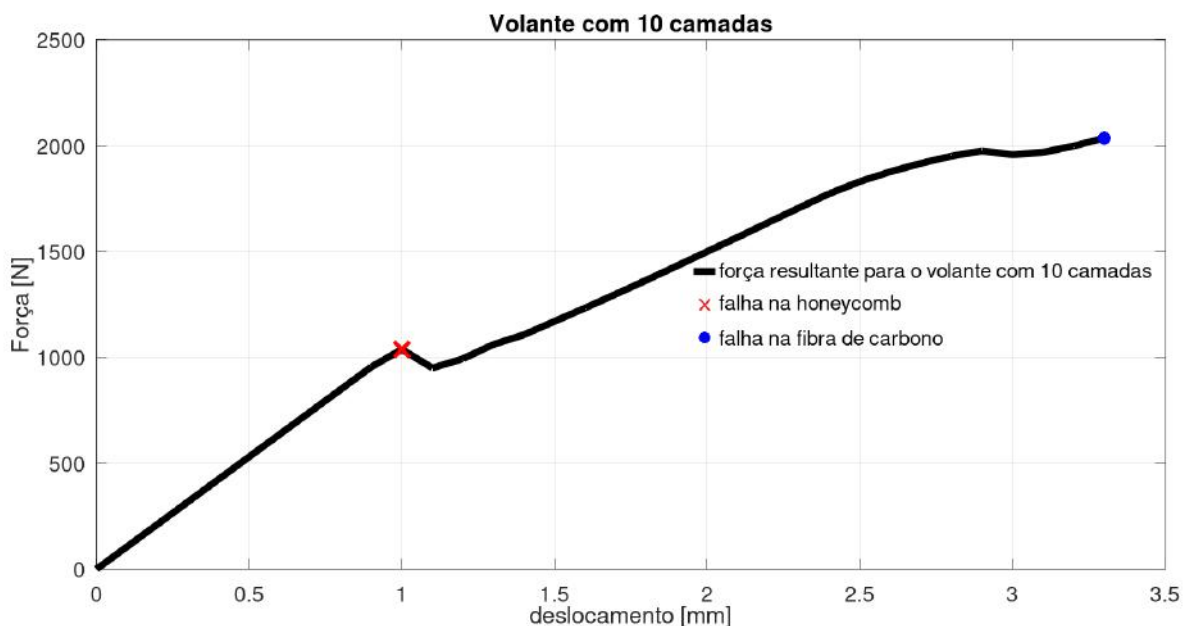


Figura 31: Força resultante até a falha da fibra de carbono para o volante de 10 lâminas

A falha da *honeycomb* no modelo de volante com 10 lâminas de fibra de carbono ocorreu com a força de 1036 N para o deslocamento atribuído de 1 mm . A falha da fibra de carbono ocorreu com uma força de 2034 N .

4.5 Discussões dos Resultados e Conclusão

Os resultados apresentados na seção anterior mostram que é significativa a rigidez que o volante experimenta com a adição de lâminas de fibra de carbono. A região entre a falha da *honeycomb* e a falha na fibra de carbono pode conter variações que são explicadas pela progressiva falha da *honeycomb*.

Neste intervalo a *honeycomb* mesmo que danificada pode continuar cumprindo a função estrutural de sustentação, o que justifica a continuação do estudo mesmo

depois da falha do núcleo da estrutura sanduíche. E mesmo nessa condição, podem ser feitos reparos localizados a fim de trocar a parcela danificada, após o volante ser fabricado. A Figura 32 sobrepõe os resultados apresentados e mostra nitidamente a progressiva força necessária para o dano completo do conjunto, mas também o deslocamento cada vez menor para o estágio completamente danificado.

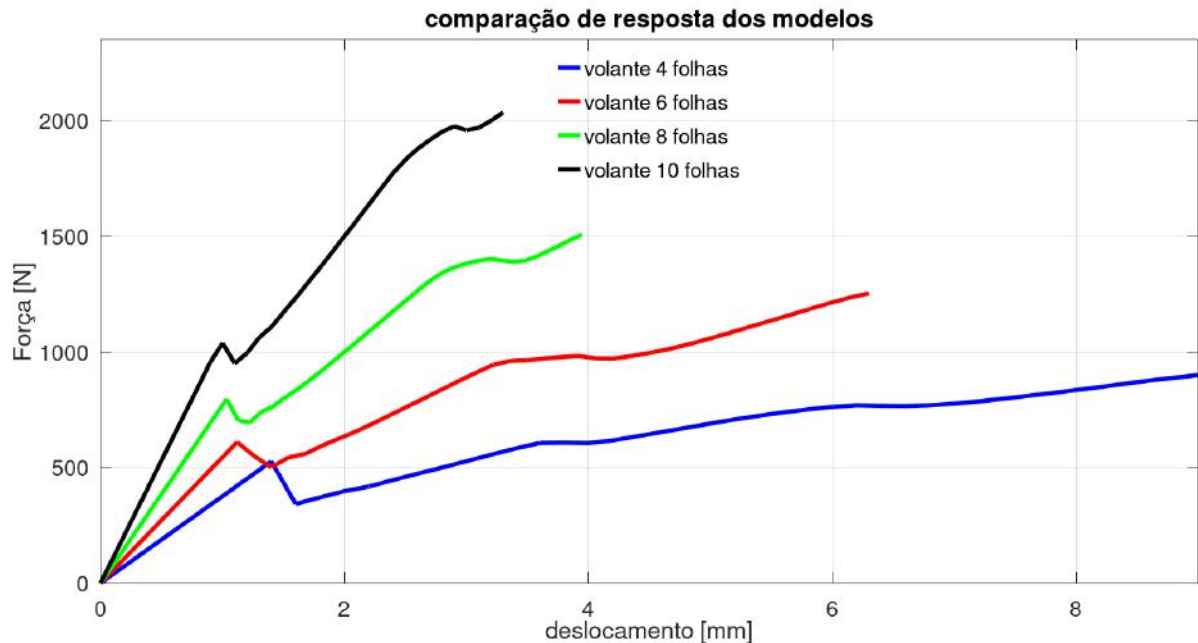


Figura 32: Comparação das respostas dos modelos de volante

As falhas observadas na *honeycomb* sempre foram na região de ligação entre o miolo do volante e a área de empunhadura da mão do piloto. Isso se deve a condição de contorno aplicada de engaste nos furos de fixação e o comportamento como braço de alavanca desta região. A Figura 33 mostra o mapa de falha ao longo do corpo da *honeycomb* limitado pelo deslocamento necessário para começo da falha da própria *honeycomb*, com 4 lâminas de fibra de carbono, mas que é bem semelhante ao mapa de falha dos outros modelos.

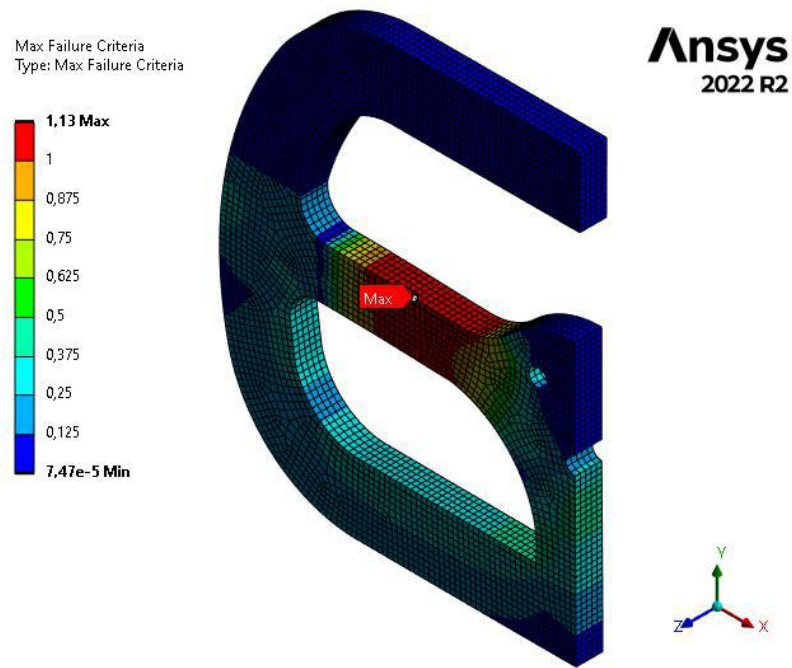


Figura 33: Mapa de início de falha da honeycomb

A falha obtida para as lâminas de fibra seguiu também a mesma característica de região danificada para todos os modelos. Mais uma vez a região de falha é na região de empunhadura e pode ser visualizada na Figura 34, para o volante de 4 lâminas.

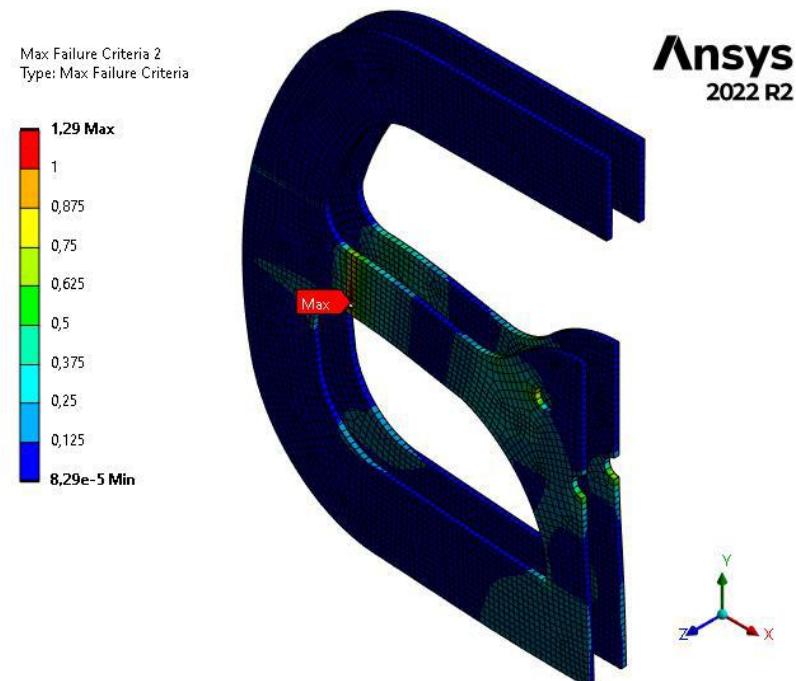


Figura 34: Mapa de início de falha na fibra de carbono

Para analisar a relação de força necessária para ocasionar a falha total do volante foi feito um estudo da relação entre essa grandeza e o número de lâminas de fibra de carbono em cada uma das faces da *honeycomb*. Essa relação é mostrada na Figura 35.

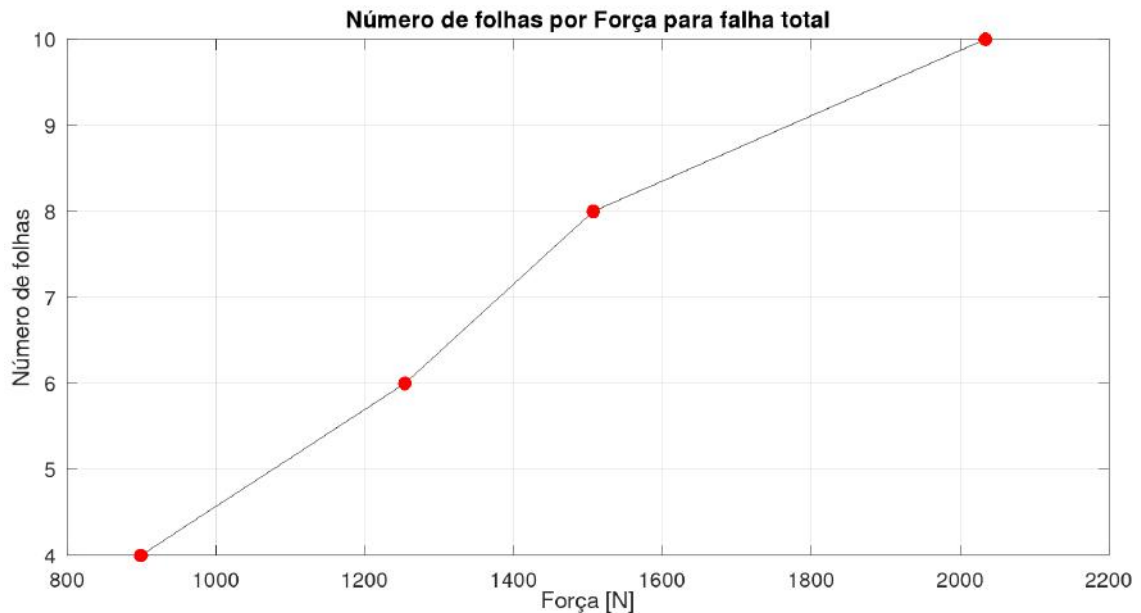


Figura 35: Comparação entre o número de lâminas de fibra de carbono e a força para a falha total

É perceptível, dessa forma, que há certa linearidade entre o número de lâminas dispostas em ambas as faces da *honeycomb* e a força necessária para ocasionar a falha total do volante. O que explica esse comportamento é a adição de rigidez linear ao comportamento elástico de cada um dos modelos quanto maior for o número de lâminas de fibra de carbono utilizado.

Neste quesito, então, é necessário identificar a aplicação das respostas obtidas para cada modelo considerado, a fim de delimitar o uso e escolha do volante a ser fabricado. Segundo NASA (1976), num estudo de aplicação de força de empurramento de uma pessoa do sexo masculino, os valores podem variar de acordo com a altura entre o item a ser empurrado e os ombros de quem empurra. Para esse estudo, o valor máximo observado da força na direção normal ao item empurrado é de 778 N. Esse caso representa uma situação crítica em que a força foi aplicada de forma voluntária pelo próprio piloto, mas que representa de forma coerente o caso da condição de contorno aqui aplicada (NASA, 1976).

Dessa forma, com o valor da condição crítica, é possível realizar uma comparação útil relacionando os resultados obtidos, da Figura 32. Os volantes de 4 e 6 lâminas, considerando este limite crítico, não poderiam ser escolhidos visto que a

força necessária para realizar a falha da *honeycomb* é inferior a força de empurramento máxima, apesar de ser possível reparar a *honeycomb* após o dano. Os volantes de 8 lâminas apresentam valores mais condizentes com esta situação, já que a força para causar falha na *honeycomb* é superior a força de empurramento máxima.

Neste caso é visto que os volantes de 8 e 10 lâminas atende de forma suficiente a condição crítica de empurramento. No entanto, outros quesitos precisam ser levados em conta antes da decisão final de fabricação, como o de massa desses modelos.

Uma das análises mais importantes e que também foi motivação para este trabalho foi o investimento acerca da redução de massa do volante do protótipo 1 e 2 para o volante do 3º protótipo. Mesmo que ainda não fabricado, é possível comparar a massa entre estes volantes. É importante salientar que a massa dos modelos aqui estudados somente consideram a fibra de carbono e a *honeycomb* de aramida, com densidade de 1451 kg/m^3 e 48 kg/m^3 respectivamente. Portanto não são considerados a massa do acabamento em couro sintético e da estrutura de fixação. Mas é importante que estes itens sejam bem escolhidos para continuar atendendo o objetivo de diminuição da densidade volumétrica em relação ao volante dos protótipos anteriores. A Tabela 7 mostra a massa de cada um dos modelos, obtidas pelo Ansys.

Tabela 7: Massa dos modelos considerados

Modelo	Lâminas de fibra	Massa total (g)
Volante A	4	77,23
Volante B	6	107,00
Volante C	8	148,56
Volante D	10	184,23

Com base na análise dos diferentes efeitos considerados, conclui-se o objetivo deste estudo de análise dos volantes. Após as avaliações de comportamento mecânico, conforto do piloto pela geometria e massa de cada um dos modelos, chegou-se à conclusão de que o volante C, com 8 lâminas, é a melhor opção para fabricação e utilização no protótipo Camelo 3.

5 TRABALHO DE CONTINUIDADE

Apresentados os objetivos concluídos do trabalho, foi observado pontos de desenvolvimento que poderiam ser explorados mais profundamente em trabalhos posteriores até mesmo antes da fabricação final do volante para o protótipo 3 da equipe Ali Babaja.

Uma sugestão no aspecto da ergonomia é realizar um estudo sobre a inclinação do plano normal do volante em relação ao rosto do piloto, visando proporcionar maior conforto em conjunto com a empunhadura adotada. Isso permitiria aproveitar de maneira mais eficiente o estudo realizado sobre o conforto da geometria adotada neste trabalho e configurar melhor avaliação por parte do comitê da competição Baja.

Além disso é sugerido também a compreensão das condições de contorno apresentadas aqui neste trabalho. Condições de impacto do piloto com o volante em caso de colisão do protótipo pode ser mais um domínio valioso de ser estudado, bem como a transferência de carga repentina por meio de outras regiões de carga.

Outra abordagem sugerida é a substituição da *honeycomb* de aramida por espumas, como a de PVC ou a de PET, que também têm como função o núcleo de uma estrutura sanduíche. As espumas também podem conferir funções de diminuição de densidade ao volante e, além disso, possuem um custo menor quando comparado ao núcleo de aramida.

Por fim podem ser elaborado um plano de fabricação do volante, envolvendo as fases de laminação das fibras de carbono, laminação da *honeycomb* em conjunto com as fibras de carbono e etapas de corte do conjunto. Após esse trabalho podem ser pesquisados materiais para acabamento, preservação e proteção em pontas cortantes, como couro sintético ou alcantara, de forma que seja obtido maior valor agregado, sem comprometer a densidade do volante.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRBUS. **Composites**: Airbus continues to shape the future. [S.l.]: [S.n.], 2017. Disponível em: <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2017-08-composites-airbus-continues-to-shape-the-future>. Acesso em: Maio 2023.
- ALMEIDA, M. I. A. Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção. **Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Técnica de Lisboa**, Lisboa, 2009.
- ANSYS. **ANSYS 2023 R1**. [S.l.]: [S.n.], 2023.
- BAKER, Frederick S. **frontiers in biorefining**, 2010.
- BARBERO, Ever J. **Introduction to Composite Materials Design**. 3^a. ed. [S.l.]: CRC Press, 2018.
- BATHE, Klaus J. **Finite Element Procedures in Engineering Analysis**. [S.l.]: Prentice Hall, 1982.
- BITZER, Tom. **Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing**. Dublin: Springer, 1997.
- BONHAMS. 1893 Panhard-Levassor Type M2E 4hp Two-Seater. **Bonhams**, 2015. Disponível em: <https://www.bonhams.com/auction/22728/lot/105/1899-panhard-levassor-type-m2e-4hp-two-seater-chassis-no-1862-engine-no-1862/>. Acesso em: Maio 2023.
- CALLISTER, W. D. **Material Science and engineering**. New York: John Willey e Sons Inc, 1999.
- CHAWLA, Krishan K. **Composite Materials - Science and Engineering**. 3^a. ed. New York: Springer, 2012.
- CHEAH, Lynette W. Cars on a diet: the material and energy impacts of passenger vehicle weight reduction in the US - Tese de Doutorado. **Massachusetts Institute of Technology**, Massachusetts , 2010.
- COSTA, Michelle L.; REZENDE, Mirabel C.; PARDINI, Luiz C. Métodos de Estudo da Cinética de cura de resinas epóxi. **Scielo**, São José dos Campos, Abril 1999.
- DANIEL, Isaac M.; ISHAI, Ori. **Engineering Mechanics of composite materials**. 2^a. ed. New York: Oxford University Press, 2006.
- DIAS, F. T. *et al.* **Método dos Elementos Finitos: Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia**. 2^a. ed. [S.l.]: Lifel, 2018.
- DIAS, Thaís D. C.; PINTO, Larissa D. S.; BRITO, Jorge N. ESTUDO NUMÉRICO DO CAMPO DE TENSÃO E DESLOCAMENTO DE PAINÉIS SANDUÍCHE HONEYCOMB COM EMPACOTAMENTO CÚBICO E ORTOTRÓPICO. **COEN**, São João del-Rei, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/coen-2019/papers/estudo-numerico-do-campo-de-tensao-e-deslocamento-de-paineis-sanduiche-honeycomb-com-empacotamento-cubico-e-ortotropico?lang=pt-br>. Acesso em: Maio 2023.

FISH, Jacob. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

GIBSON, R. F. **Principles of composite material**. 4ª. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

HIBBELER, Russel C. **Resistência dos materiais**. [S.l.]: Pearson Educación, 2010. 343 p.

HOLM, Tobias. The history of the steering wheel. **Techhistorian**, 2022. Disponível em: <https://techhistorian.com/steering-wheel-history/>. Acesso em: Maio 2023.

IIDA, Itiro; BUARQUE, Lia. **Ergonomia: Projeto e Produção**. 3ª. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

MCLAREN. **McLaren P1 - Form Equals Function**. [S.l.]: [S.n.], 2015. Disponível em: <https://cars.mclaren.com/gb-en/legacy/mclaren-p1/design>. Acesso em: Maio 2023.

MOSSEY, Mary E. *et al.* Evaluation of four steering wheels to determine driver hand placement in a static environment. **Elsevier**, Clemson, Fevereiro 2014. Disponível em: <https://pdf.sciencedirectassets.com/271441/1-s2.0-S0003687014X00037/1-s2.0-S0003687014000295/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjECoaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIAN%2B6xiqRd8N%2FwwAWKqpVrhJ1CTnEz02ePOQUs4nJf0XAIeAzxXr%2B%2FI5kgRbSO8gsn1Ji6wZK0fz%2FRR44R>.

MOURA, Marcelo F. S. F.; MORAIS, Alfredo B. D.; MAGALHÃES, António G. D. **Materiais Compósitos: Materiais, fabrico e comportamento mecânico**. 2ª. ed. [S.l.]: Publindústria, 2010.

NASA. Man/System Requirements for Weightless Environments Airesearch, Washington DC, 1976. Disponível em: <https://msis.jsc.nasa.gov/sections/section04.htm>.

OLIVEIRA, Júlia Renata S. **ANÁLISE ESTRUTURAL DO CONJUNTO ASA-FUSELAGEM DE UMA AERONAVE DE AERODESIGN**. UFSC. Joinville, p. 46. 2020.

S. MONDAL, A. K. P.; S. CHAKRABORTY, N. M. Dynamic performance of sandwich composite plates with circular hole/cut-out: A mixed experimental–numerical study. **Elsevier**, 2015.

SAE. **REGULAMENTO ADMINISTRATIVO E TÉCNICO BAJA SAE BRASIL**. São Paulo. 2021.

SCHMIDL, G. W. **Molecular weight and rheology of lignin for carbon fiber, tese de doutorado em filosofia**. Gainesville: [S.n.], 1992.

SHAN, Junfang *et al.* Dynamic fracture of aramid paper honeycomb subjected to impact loading. **Science Direct**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110962>.

STEIN, Ralph. **The World of The Automobile**. [S.l.]: Random House, 1973.

Disponível em:

<https://archive.org/details/worldofautomobil0000ralp/page/n9/mode/2up>. Acesso em: Maio 2023.

TANABE, Alexandre Y. **Ergonomia no Processo de Desenvolvimento do Automóvel. Monografia**. USP. São Paulo. 2014.

VERAS, Marco A. N. **Estudo, fabrico e caracterização de painéis sanduíche com núcleos em materiais compósitos de cortiça**. INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA. Lisboa. 2019.

VIGNOLI, Lucas L.; CASTRO, Jaime T. P. A parametric study of stress concentration issues in unidirectional laminates. **Mechanics of Advanced Materials and Structures**, 2021. Acesso em: Junho 2023.

VOLKSWAGEN GROUP. History and future of the steering wheel. **Volkswagen**, 2023. Disponível em: <https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2019/04/we-are-still-spinning-our-wheels.html#>. Acesso em: Maio 2023.

WAZIR, A. H.; KAKAKHEL, L. **Preparation and characterization of pitch-based carbon fibers**. [S.l.]: [S.n.], v. 24, 2009. 83-88 p.

WILLIAMS, Stephen. Steering Wheels' Past, Present and (Autonomous) Future. **The New York Times**, 2020. Disponível em: <https://www.nytimes.com/2020/08/20/business/steering-wheels-history.html>. Acesso em: Maio 2023.

YANG, Weichao; ZHANG, Xufeng; YANG, Kuijian. Shear property characterization of aramid paper and its application to the prediction of honeycomb behaviors. **Elsevier**, Dezembro 2020. Acesso em: Maio 2023.

ZOLTEK. What is carbon fiber, 2021. Disponível em: <https://zoltex.com/carbon-fiber/what-is-carbon-fiber/>. Acesso em: Maio 2023.