

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS JOINVILLE  
CURSO ENGENHARIA AUTOMOTIVA

ÉRIK HENRIQUE SANTOS RAZENTE

MODELAGEM E ANÁLISE DE UMA RODA ARO 10" EM MATERIAL COMPÓSITO  
APLICADA A UM VEÍCULO FÓRMULA SAE

Joinville  
2025

ÉRIK HENRIQUE SANTOS RAZENTE

MODELAGEM E ANÁLISE DE UMA RODA ARO 10" EM MATERIAL COMPÓSITO  
APLICADA A UM VEÍCULO FÓRMULA SAE

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Marcos Alves Rabelo

Joinville

2025

ÉRIK HENRIQUE SANTOS RAZENTE

MODELAGEM E ANÁLISE DE UMA RODA ARO 10" EM MATERIAL COMPÓSITO  
APLICADA A UM VEÍCULO FÓRMULA SAE

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em engenharia automotiva Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 14 de Novembro de 2025.

**Banca examinadora**

---

Orientador: Dr. Marcos Alves Rabelo  
Orientador(a)  
Presidente

---

Prof. Dr. Sérgio Junichi Idehara  
Membro(a)  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Eng. Vinicius Mazetto Leandro  
Membro(a)  
Stellantis

A minha família, Fábio, Crislene, Yuri e Ana Pasquali.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Marcos, que nos últimos meses me orientou na produção deste trabalho, compartilhando não apenas seu conhecimento técnico, mas também suas vivências como engenheiro, as quais me inspirarão por muitos anos.

Aos professores Sérgio Idehara e Modesto Ferrer, pela atenção e disponibilidade desde o primeiro contato, ainda antes mesmo de eu estar matriculado, e por terem me apresentado ao projeto Fórmula, no qual participei por quatro anos e meio, e que certamente foi o principal responsável por manter minha motivação ao longo de toda a graduação.

Ao Vinicius Mazetto, por aceitar o convite para compor a banca e, principalmente, pelo curso de simulação ministrado à equipe Fórmula, o qual despertou meu interesse na área e motivou a elaboração deste trabalho.

Aos amigos Anderson, Estevan, Ítalo Kusmin, Gustavo Starke, Henrique Rocha, Giordan Langner e a todos que me acompanharam ao longo da graduação, durante o período em que estive à frente da diretoria do Fórmula e quando atuei no setor de Sistemas Veiculares, aprendi muito ao lado de cada um deles, e a jornada se tornou muito mais leve.

Aos meus avós, tios, pais e minha namorada, por serem meu alicerce e estarem sempre ao meu lado em todos os momentos.

*“It’s been a long road, getting from there to here,  
it’s been a long time, but my time is finally near.”*

Russell Watson

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento preliminar de uma roda em fibra de carbono aplicada ao veículo da equipe Fórmula CEM, da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville. O estudo tem como objetivo propor uma solução estrutural e economicamente viável que reduza a massa não suspensa do protótipo, contribuindo para o aprimoramento de sua dinâmica veicular. Foram consideradas as restrições impostas pela competição Fórmula SAE, bem como os requisitos de projeto relacionados à resistência mecânica, processo de manufatura e custo. O desenvolvimento foi conduzido segundo o modelo em “V”, contemplando as etapas de definição de requisitos, modelagem geométrica, pré-processamento, simulação numérica e análise financeira. As ferramentas utilizadas incluíram o SolidWorks para modelagem 3D e o ANSYS ACP para análise estrutural de laminados compósitos, com validação dos esforços por meio do critério de falha de Tsai-Hill. Os resultados indicaram que a roda em fibra de carbono, pesando aproximadamente 1,1 kg, apresenta desempenho estrutural satisfatório e custo cerca de 50% inferior ao das rodas comerciais em magnésio, demonstrando viabilidade técnica e econômica.

**Palavras-chave:** roda; fibra de carbono; Fórmula SAE; compósitos.

## ABSTRACT

This work presents the preliminary development of a carbon fiber wheel designed for the vehicle of the Fórmula CEM team at the Federal University of Santa Catarina – Joinville Campus. The study aims to propose a structurally and economically feasible solution to reduce the unsprung mass of the prototype, thereby enhancing its vehicle dynamics performance. The project considered the design restrictions imposed by the Formula SAE competition, as well as mechanical strength, manufacturing, and cost requirements. The development followed the V-Model methodology, encompassing requirement definition, geometric modeling, preprocessing, numerical simulation, and financial analysis. The tools used included SolidWorks for 3D modeling and ANSYS ACP for composite laminate analysis, with failure validation based on the Tsai-Hill criterion. The results indicated that the carbon fiber wheel, weighing approximately 1.1 kg, demonstrated satisfactory structural performance and a 50% lower cost compared to commercial magnesium wheels, confirming both technical and economic feasibility.

**Keywords:** wheel; carbon fiber; FSAE; composites.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Roda da TU Graz's Racing .....	19
Figura 2 - Componentes da massa não suspensa .....	21
Figura 3 – Modo de aplicação das forças.....	22
Figura 4 - Torque e forças no pneu de acordo com SAE .....	23
Figura 5 - Pilares do planejamento de projeto.....	24
Figura 6 - Método V.....	25
Figura 7 - Metodologia de projeto aplicada na análise.....	28
Figura 8 - Esquemático do projeto .....	28
Figura 9 – Esboço do CAD.....	30
Figura 10 - CAD Conceitual antes do pré processamento .....	30
Figura 11 - Modelo atual da equipe em alumínio fundido.....	31
Figura 12 - CAD como superfície .....	32
Figura 13 - Faces nomeadas.....	33
Figura 14 - Região cilíndrica da roda .....	33
Figura 15 – Tempo de cura padrão .....	35
Figura 16 - Propriedade polar da fibra utilizada.....	36
Figura 17 – Sistemas de referência para orientação das fibras .....	37
Figura 18 - Referências utilizadas .....	37
Figura 19 - Exemplo de orientação das fibras em geometria cilíndrica .....	38
Figura 20 - Exemplo de superfície plana com orientação de fibra evidente .....	38
Figura 21 - Orientação da fibra no material estrutural .....	39
Figura 22 - Exemplo de empilhamento de fibras .....	40
Figura 23 - Árvore de construção da laminação.....	40
Figura 24 - Força alinhada com raio da roda.....	41
Figura 25 - Força entre raios.....	42
Figura 26 - Análise das primeiras simulações .....	45
Figura 27 – Malha com alto gradiente entre os resultados dos elementos .....	45
Figura 28 - Qualidade dos elementos .....	46
Figura 29 - Refino de malha em concentrador de tensão .....	46
Figura 30 - Deformação na flange interna nas primeiras análises .....	47
Figura 31 - Quantidade de camadas final .....	49

Figura 32 - Vista isométrica frenagem.....	50
Figura 33 - Característica dos elementos sob maior tensão .....	51
Figura 34 - Vista isométrica aceleração .....	52
Figura 35 – Características dos elementos quando submetido a frenagem.....	52
Figura 36 - Camada crítica para esse carregamento .....	53
Figura 37 - Vista isométrica caso estático .....	54
Figura 38 - Elementos quando submetidos a carregamento estático.....	54
Figura 39 - Vista isométrica caso crítico.....	55
Figura 40 - Concentrador de tensão.....	55
Figura 41 - Elementos no caso crítico .....	56
Figura 42 - Caso crítico na posição 2 .....	61
Figura 43 - Frenagem com força aplicada na posição 2 .....	62
Figura 44 - Aceleração com força aplicada na posição 2 .....	63
Figura 45 - Caso estático com força aplicada na posição 2 .....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre diversos materiais .....	21
Tabela 2 - Propriedades do material .....	34
Tabela 3 - Sumário de forças e momentos crítico .....	43
Tabela 4 - Carregamento estático e acelerado .....	43
Tabela 5 - Custos para construir em fibra de carbono .....	48
Tabela 6 - Custos para ter um jogo de rodas Oz de magnésio em 10" .....	48

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANSYS – *Analysis System*

ANSYS ACP – *Analysis System Composite PrepPost*

CAD – *Computer-Aided Design*

CAE – *Computer-Aided Engineering*

FSAE – *Formula Society of Automotive Engineers*

CEM – *Combustion and Electric Motorsport*

INCOSE – *International Council on Systems Engineering*

MBSE – *Model-Based Systems Engineering*

SAE – *Society of Automotive Engineers*

UFSC – *Universidade Federal de Santa Catarina*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$F_x$ – Força longitudinal (tração ou frenagem) [N]

$F_y$ – Força lateral [N]

$F_z$ – Força normal [N]

$M_x$ – Momento de capotamento [N·m]

$M_y$ – Momento de resistência à rolagem [N·m]

$M_z$ – Torque de alinhamento [N·m]

$\sigma_1, \sigma_2$ – Tensões principais nas direções 1 e 2 [MPa]

$\sigma_{12}$ – Tensão de cisalhamento no plano 1–2 [MPa]

$X_t, X_c$ – Resistências à tração e compressão na direção 1 [MPa]

$Y_t, Y_c$ – Resistências à tração e compressão na direção 2 [MPa]

$S$ – Resistência ao cisalhamento no plano 1–2 [MPa]

$\theta$ – Ângulo de aplicação da força (ponto de contato pneu-solo) [°]

$\rho$ – Densidade do material [kg/m<sup>3</sup>]

$E_1, E_2$ – Módulos de elasticidade nas direções 1 e 2 [GPa]

$G_{12}$ – Módulo de cisalhamento no plano 1–2 [GPa]

$\nu_{12}$ – Coeficiente de Poisson [–]

$t$ – Espessura da camada [mm]

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1. OBJETIVOS .....	16
<b>1.1.1. Objetivo Geral</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1.2. Objetivos Específicos</b> .....	<b>16</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>17</b>
2.1. FÓRMULA SAE .....	17
<b>2.1.1. Provas e pontuações do Fórmula SAE</b> .....	<b>17</b>
<u>1.1.1.1 Provas estáticas</u> .....	<u>18</u>
<u>1.1.1.2 Provas dinâmicas</u> .....	<u>18</u>
<b>2.1.2. Conjunto pneu e roda para FSAE</b> .....	<b>19</b>
2.2. PROPRIEDADES DE MATERIAIS COMPÓSITOS .....	20
2.3. MASSA NÃO SUSPENSA .....	21
<b>2.3.1. Esforços envolvidos</b> .....	<b>22</b>
2.4. MÉTODO “V” .....	24
<b>2.4.1 Processo</b> .....	<b>24</b>
<b>2.4.2 Método</b> .....	<b>25</b>
<b>2.4.3 Ferramenta</b> .....	<b>25</b>
<b>2.4.4 Ambiente</b> .....	<b>26</b>
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>27</b>
3.1 REQUISITOS DE PROJETO .....	29
3.2 CAD 3D .....	29
3.3 CAD COMO SUPERFÍCIE .....	31
3.4 PRÉ PROCESSAMENTO .....	32
<b>3.4.1. Particionamento do modelo</b> .....	<b>32</b>
<b>3.4.2. Material de engenharia</b> .....	<b>34</b>
<b>3.4.3. Orientação das fibras</b> .....	<b>36</b>
<b>3.4.4. Laminação</b> .....	<b>39</b>
3.5 SIMULAÇÃO .....	41
<b>3.5.1. Condições de contorno</b> .....	<b>42</b>
<b>3.5.2. Critério de falha</b> .....	<b>43</b>
3.6 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO .....	44
3.7 ANÁLISE FINANCEIRA .....	47

<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>49</b>
4.1 RESULTADO EM FRENAGEM.....	50
4.2 RESULTADO EM ACELERAÇÃO.....	51
4.3 RESULTADO CASO ESTÁTICO .....	53
4.4 RESULTADO APLICANDO CASO CRÍTICO .....	54
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>57</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>59</b>
<b>APÊNDICE A - RESULTADOS NO MOMENTO QUE A FORÇA É APLICADA DE FORMA COLINEAR AO RAIOS DA RODA.....</b>	<b>61</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O avanço das tecnologias aplicadas à mobilidade veicular, aliado ao ambiente competitivo e educacional do Fórmula SAE, tem impulsionado o desenvolvimento de soluções inovadoras que aliam desempenho, leveza e confiabilidade estrutural. A equipe Fórmula CEM, da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, insere-se nesse contexto ao buscar melhorias contínuas em seu protótipo tipo fórmula, focando na redução de massa não suspensa e no aprimoramento da dinâmica veicular.

A presente proposta trata do desenvolvimento preliminar de uma roda em fibra de carbono, destinada ao veículo da equipe FÓRMULA CEM da UFSC Joinville, com enfoque na viabilidade de projeto, fabricação e validação. A substituição de rodas convencionais metálicas por soluções em compósito busca reduzir massa e inércia rotacional, otimizando aceleração, frenagem e resposta de suspensão. No entanto, essa transição exige cuidados adicionais quanto à resistência estrutural, métodos de manufatura e requisitos normativos.

A problemática central reside na necessidade de balancear desempenho e segurança com os recursos disponíveis, respeitando as restrições da competição e as capacidades técnicas e financeiras da equipe. A escolha do material compósito, embora promissora, impõe desafios técnicos relacionados à anisotropia, confiabilidade do processo de cura e dificuldade de ensaio físico.

Justifica-se este estudo pelo seu potencial impacto direto nos resultados de prova e no aprimoramento técnico dos membros da equipe, ao proporcionar aplicação prática de conhecimentos em dinâmica veicular, resistência de materiais, manufatura de compósitos e simulações computacionais. Autores como Milliken e Milliken (1995) e Bhagwat (2017) são referência neste trabalho por abordarem a influência da massa não suspensa na performance veicular e o uso de fibra de carbono em aplicações estruturais.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

Realizar o projeto preliminar e a análise estrutural de uma roda em fibra de carbono destinada à equipe Fórmula CEM (*Combustion and electric motorsport*), visando a redução de massa e a viabilidade econômica do componente.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar os esforços atuantes no sistema de rodas do veículo;
- Dimensionar o componente com base nas cargas aplicadas;
- Analisar diferentes geometrias com foco em viabilidade estrutural e de manufatura;
- Avaliar os possíveis processos de manufatura do componente;
- Quantificar a redução de massa não suspensa proporcionada pelo projeto;
- Comparar com modelos comerciais.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

As seções posteriores terão como temática as teorias e todo o embasamento que serão o alicerce para o presente trabalho. Neste capítulo será introduzido toda a teoria abordada no desenvolvimento do projeto.

### **2.1. FÓRMULA SAE**

A indústria americana, a fim de capacitar mão de obra, criou a competição “Mini-Indy”, que posteriormente foi chamada de Fórmula SAE (Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade), (SAE, 2025). Com o passar do tempo, outros países também seguiram o mesmo caminho, como, por exemplo, os países da Europa (Formula Student) e o Fórmula SAE Brasil, em 2004.

O objetivo principal da competição é apresentar um desafio de engenharia real que consiste no projeto, construção e validação de um carro de corrida. Dessa forma, os estudantes de engenharia conseguem alinhar os conhecimentos obtidos na universidade e explorá-los em um ambiente exigente, além de aprender a lidar com pressão, gestão de tempo, gerenciamento financeiro e trabalhar de forma competitiva; que são habilidades valiosas para um engenheiro.

Anualmente a competição acontece no Brasil, no estado de São Paulo, o ganhador consegue a possibilidade de competir também em Michigan, nos Estados Unidos. Quanto a competição em Michigan as regras são as mesmas que as aplicadas no Brasil (SAE, 2025).

#### **2.1.1. Provas e pontuações do Fórmula SAE**

Os desafios propostos pela SAE se dividem em duas grandes categorias: as provas dinâmicas tem como objetivo descobrir qual carro é mais rápido no circuito proposto e as provas estáticas. Esta tem como foco avaliar os projetos que compõem o carro, com um olhar crítico para as escolhas de engenharias que foram feitas. A seguir as provas e sua respectiva pontuação máxima (SAE, 2025):

#### Dinâmicas:

- Acceleration 100 pontos;
- Skid Pad 75;
- Autocross 125;
- Efficiency 100;
- Endurance 275;
- Total 675.

#### Estáticas:

- Presentation 75 pontos;
- Cost 100;
- Design 150;
- Total 325.

##### *1.1.1.1 Provas estáticas*

As provas estáticas avaliam a qualidade do projeto, capacidade de apresentação e gestão dos estudantes. Na prova de Presentation, os participantes devem defender o carro como um produto viável no mercado, elaborando uma proposta de venda para possíveis investidores (SAE, 2025).

A prova de Cost exige que a equipe apresente uma análise detalhada dos custos de produção, fabricação e montagem do veículo, evidenciando o planejamento financeiro do projeto. Por fim, a Design avalia criticamente as soluções de engenharia adotadas, considerando critérios como inovação, segurança, eficiência e justificativa técnica das escolhas realizadas ao longo do desenvolvimento do carro (SAE, 2010).

##### *1.1.1.2 Provas dinâmicas*

As provas dinâmicas testam diretamente o desempenho do carro em pista. A prova de Acceleration consiste em avaliar a capacidade do veículo de acelerar o mais rápido possível em linha reta, geralmente percorrendo 75 metros. Já a Skid Pad mede

o desempenho lateral do carro, avaliando sua aderência e comportamento em curvas por meio de um percurso em formato de "8" (SAE, 2025).

O Autocross é uma prova que simula um circuito técnico e de curta distância, com foco na agilidade e controle do carro, sendo um indicativo de desempenho geral em traçados sinuosos. A Endurance é considerada a prova mais desafiadora, testando a durabilidade, confiabilidade e eficiência do carro ao longo de um percurso extenso, com múltiplos veículos em pista. Durante a Endurance, também é avaliada a Eficiência, que mede o consumo de energia ou combustível, incentivando soluções que equilibrem desempenho e economia (SAE, 2010).

### 2.1.2. Conjunto pneu e roda para FSAE

Com base no regulamento (SAE, 2025), as rodas devem possuir, no mínimo, oito polegadas de diâmetro e caso utilizem apenas uma porca de travamento, é obrigatório um mecanismo que impeça o seu afrouxamento ou a soltura da roda, além disso, se a porca for de alumínio, ela deve ser anodizada e estar em boas condições de uso. O regulamento oferece liberdade para o projeto e a implementação de diferentes tipos de rodas, permitindo diversas possibilidades de fixação, geometria e diâmetro.

Figura 1 - Roda da TU Graz's Racing



Fonte: Bhagwat (2017).

Quanto aos pneus, o regulamento também é pouco restritivo, a equipe deve dispor de dois conjuntos: o conjunto para pista seca, é permitido o uso de pneus *slick* (lisos) ou com cravos, enquanto os pneus para pista molhada devem obrigatoriamente

ser ranhurado. Não é permitido modificar os pneus, como criar ranhuras manualmente; eles devem manter as características originais de fabricação e apresentar boas condições de uso.

Com o regulamento são extraídos os primeiros requisitos de projeto utilizados, a Figura 1 ilustra uma geometria desenvolvida e utilizada por muitos anos pela TU Graz's Racing (Bhagwat,2017). É um possível design e foi utilizado como referência para o projeto desenvolvido.

## 2.2. PROPRIEDADES DE MATERIAIS COMPÓSITOS

A fibra de carbono é um material compósito e tem como característica uma baixa densidade e alta resistência mecânica se comparado com materiais metálicos, cerca de 60% da densidade dos materiais metálicos mantendo a mesma tenacidade (Uyttersprot, 2015). O comportamento do gráfico tensão deformação nesse tipo de material apresenta comportamento elástico apenas e sua ruptura logo após o limite da fase elástica, enquanto os metais têm a fase de deformação plástica (permanente) e ruptura após a fase plástica.

Outros benefícios são elencados segundo PINHEIRO (2010): a possibilidade de integrar várias peças em uma única estrutura, a facilidade de monitoramento em tempo real com sensores integrados, alta rigidez e resistência específicas, superior resistência à fadiga e excelente resistência à corrosão. Além disso, os compósitos oferecem grande flexibilidade de projeto e fabricação, possibilitando formas complexas com menor tempo e custo de produção.

Apresentam também melhor resistência ao impacto, boas características de absorção de vibrações (NVH). A tabela 1 ilustra algumas características de diversos materiais compósitos em comparação com alumínio e aço.

Tabela 1 - Comparativo entre diversos materiais

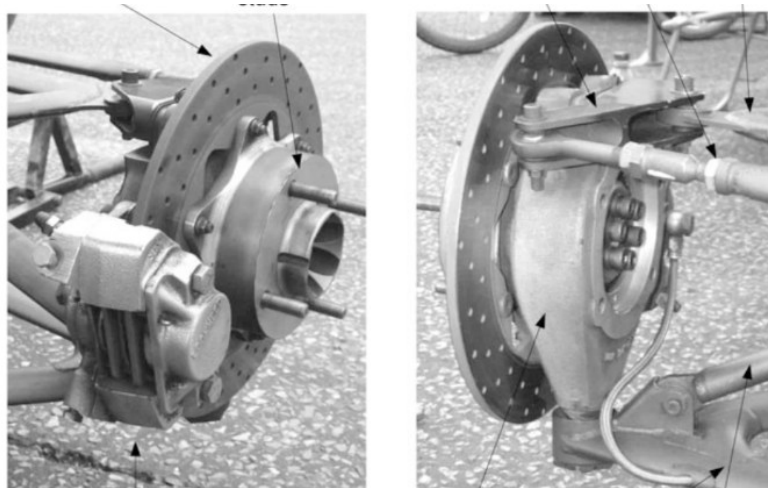
Material	Densidade $\rho$ (Mg m-3)	Modulo de Elastic. E (GPa)	Resistência $\sigma$ (MPa)
<b>Fibras</b>			
Carbono	1,95	390	2200
Vidro	2,56	76	1400 – 2500
Kevlar	1,45	125	2760
<b>Matrizes</b>			
Epóxi	1,2 – 1,4	2,1 – 5,5	40 – 85
Poliéster	1,1 – 1,4	1,3 – 4,5	45 – 85
<b>Compósitos</b>			
CFRP em Epóxi	1,5	189	1050
GFRP em Poliéster	2,0	48	1240
<b>Metais</b>			
Aço	7,8	207	1000
Liga de alumínio	2,8	71	500

Fonte: (MARQUES, 2015).

### 2.3. MASSA NÃO SUSPENSA

De acordo com Derek Seward (2022) a massa não suspensa é composta pelos componentes que a suspensão não suporta, portanto, sua força normal é aplicada direto ao solo. Os componentes não suspensos englobam as rodas, pneus, manga de eixo, cubo, pinça de freio, discos de freio, semieixo e geralmente os braços de suspensão delimitam o limite entre a massa suspensa e não suspensa (Seward, 2022).

Figura 2 - Componentes da massa não suspensa



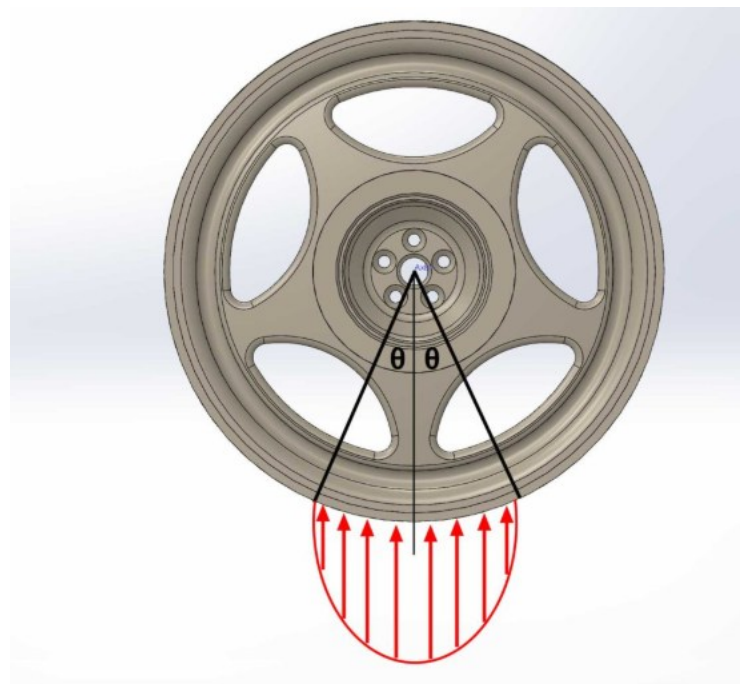
Fonte: Seward (2022).

As flechas da Figura 2 acima indicam os componentes diretamente ligados com a montagem do conjunto pneu-roda. Sendo eles: a pinça, braço de direção, cubo de roda, discos de freio, bandeja de suspensão, barra de direção e manga de eixo. A diminuição da massa dos componentes que englobam a montagem das rodas tem como o objetivo de facilitar o controle das rodas por parte dos amortecedores e molas sem comprometer a estabilidade do chassi e é mais eficaz que diminuir a massa suspensa (Seward, 2022).

### 2.3.1. Esforços envolvidos

As forças atuam sobre o aro da roda devido tanto à pressão do ar dentro do pneu quanto à força de reação do solo sobre o pneu e a forma como essas forças são transmitidas através do pneu até o aro tem grande impacto nas tensões na roda. Embora seja possível modelar o pneu diretamente, isso geralmente não é necessário e aumenta significativamente a complexidade do modelo (MUELANER, 2020). A Figura 3 ilustra o ângulo entre o centro da roda e a região de contato do pneu com o solo.

Figura 3 – Modo de aplicação das forças



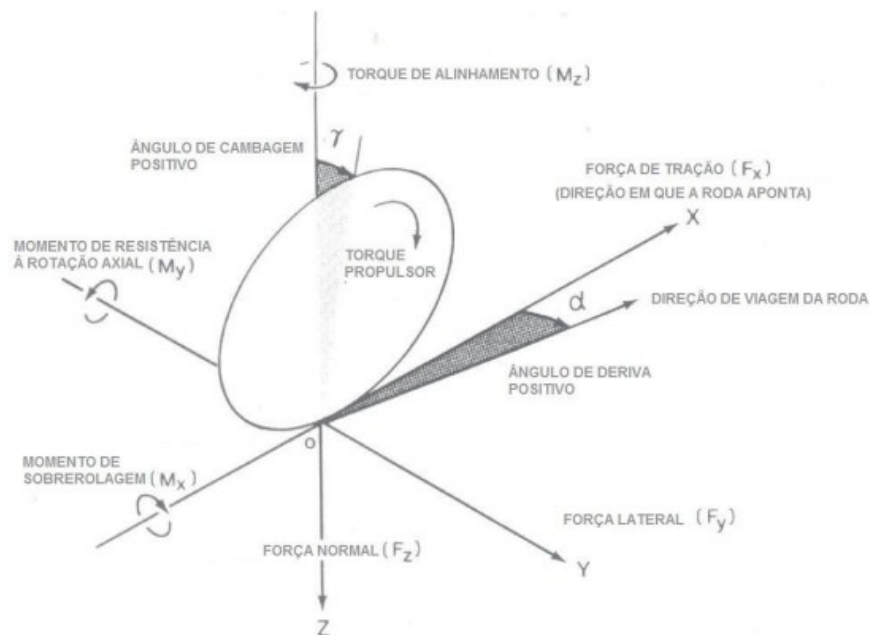
Fonte: Muelaner (2025)

As forças de reação que o solo impõe contra o pneu são transmitidas para a roda na região de contato entre a tala do pneu e a roda, entretanto essas forças não são constantes, mas sim proporcionais ao ângulo formado entre o centro da roda e a região de contato do pneu com o solo  $\theta$ , as forças são distribuídas de acordo com o cosseno desse ângulo (Stearns et. Al, 2006).

A convenção de eixos ordenados utilizada neste trabalho foi a fornecida pela SAE, e as forças e toques que o pneu é submetido são ilustradas na figura 4.

- Força normal  $F_z$ ;
- Força lateral  $F_y$ ;
- Força trativa  $F_x$ ;
- Torque de alinhamento  $M_z$ ;
- Momento de resistência de rolagem  $M_y$ ;
- Momento de capotamento  $M_x$ .

Figura 4 - Torque e forças no pneu de acordo com SAE



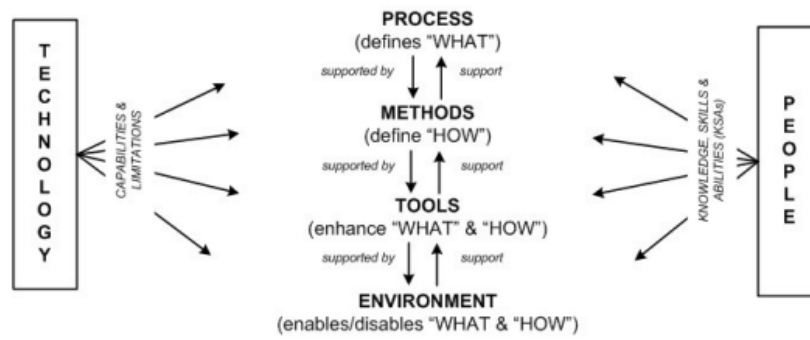
Fonte: Adaptado de Harty (2004)

Para algumas análises a magnitude dessas forças foi retirada do trabalho de Bryan Uyttersprot (2015), devido ao nível de detalhe que foi considerado em algumas simulações, entretanto outros casos de carregamento foram fornecidos pela equipe de Joinville. Os dados críticos são apresentados na tabela 3.

## 2.4. MÉTODO “V”

De acordo com a INCOSE (*International Council on Systems Engineering*) MBSE (*Model-Based Systems Engineering*), (Estefan, 2008), o desenvolvimento de um projeto de engenharia pode ser estruturado sobre quatro elementos fundamentais: processo, método, ferramenta e ambiente. Esses pilares permitem organizar o trabalho de forma lógica e sistemática, garantindo rastreabilidade e coerência entre as etapas de projeto, análise e validação.

Figura 5 - Pilares do planejamento de projeto



Fonte: Estefan (2008)

A Figura 5 possibilita enxergar os pilares fundamentais de um projeto e sem essas características o presente projeto não se consolida, é ilustrado que o projeto é limitado pelas pessoas e tecnologia disponível. Além disso é composto por processos, métodos, ferramentas e ambiente.

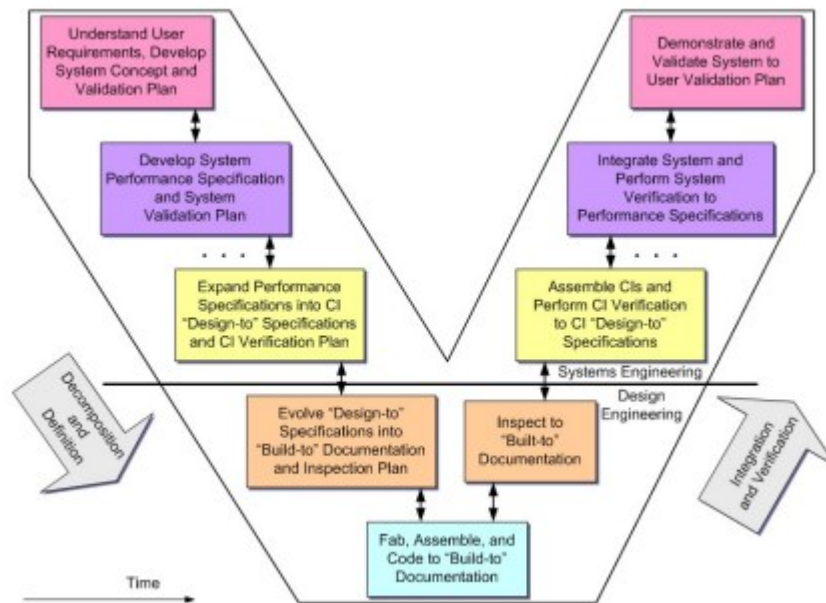
### 2.4.1 Processo

O processo é definido como uma sequência lógica de tarefas realizadas para atingir um determinado objetivo, estabelecendo o que deve ser feito, sem necessariamente especificar como cada atividade será executada. A estrutura de um processo permite representar diferentes níveis de agregação, desde as etapas mais gerais até as operações específicas, favorecendo a análise e a tomada de decisão em distintos níveis de detalhamento (Estefan, 2008).

## 2.4.2 Método

O método consiste no conjunto de técnicas e procedimentos utilizados para a execução das tarefas definidas pelo processo, ou seja, determina como cada etapa será conduzida. Neste estudo, o método adotado é o Modelo em V, amplamente utilizado em projetos de engenharia de sistemas e produtos (Estefan, 2008).

Figura 6 - Método V



Fonte: Estefan (2008)

Essa metodologia estabelece uma correspondência direta entre as fases de desenvolvimento (definição, concepção, modelagem e análise) e as fases de verificação e validação (testes de conceito, de modelo e de desempenho), como ilustrado na Figura 5. O Modelo em V foi selecionado por proporcionar rastreabilidade entre requisitos, modelagem e resultados de simulação, assegurando que o produto final atenda aos critérios de desempenho estabelecidos no início do projeto (Estefan, 2008).

## 2.4.3 Ferramenta

As ferramentas são instrumentos que, quando aplicados a um método, aumentam a eficiência e a precisão das tarefas, desde que utilizadas adequadamente e por

profissionais capacitados. Neste trabalho, destacam-se as ferramentas SolidWorks e ANSYS ACP (*Analysis System Composite PrepPost*), que permitiram reproduzir virtualmente o comportamento mecânico da roda e avaliar seu desempenho sob diferentes condições de carregamento (Estefan, 2008).

#### **2.4.4 Ambiente**

Por fim, o ambiente corresponde ao conjunto de condições organizacionais, técnicas e operacionais que sustentam a aplicação do processo, do método e das ferramentas. Ele compreende o contexto no qual o projeto é desenvolvido, incluindo recursos disponíveis, infraestrutura, limitações e objetivos institucionais.

O ambiente deste estudo é a equipe Fórmula CEM. As decisões de projeto e análise foram conduzidas considerando as restrições reais da equipe como disponibilidade de materiais, equipamentos de manufatura e tempo de desenvolvimento (Estefan, 2008).

### 3. METODOLOGIA

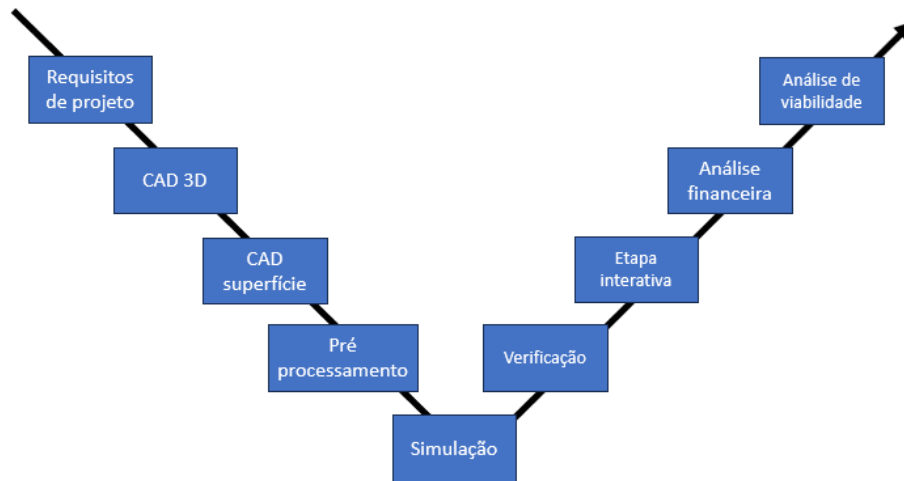
O desenvolvimento deste trabalho baseia-se em quatro pilares fundamentais: processo, método, ferramenta e ambiente. No contexto deste projeto, o processo corresponde à análise e desenvolvimento de uma roda, que suporte os casos mais críticos da equipe (mesma roda na dianteira e traseira), em materiais compósitos; o método adotado é o Modelo em V, aplicado como estrutura de projeto; as ferramentas empregadas são de engenharia assistida por computador CAE; e o ambiente de aplicação é o da equipe Fórmula CEM que utiliza um motor de XT660 tração traseira, considerando suas condições e limitações específicas.

Inicialmente, os desejos de projeto foram convertidos em requisitos de engenharia, definidos em conjunto com a equipe. Em seguida, elaborou-se um esboço preliminar da roda, contendo suas principais dimensões e características geométricas, que serviu de base para a primeira modelagem CAD (*Computer-Aided Design*) e posterior simulação numérica.

Com a simulação realizada deu-se início a etapa de integração e verificação. Estas consistem em verificar se os resultados estão atendendo as expectativas impostas na etapa de decomposição e definição.

Abaixo a Figura 7 ilustra uma adaptação feita pelo autor, para a análise realizada. Tendo em vista que o trabalho consiste na análise e modelagem da roda, as etapas que envolvem teste físico não foram realizadas, mas estão englobadas por não ser o foco. Entretanto foram mapeadas para trabalhos futuros darem continuidade e fechar o ciclo de projeto de forma completa.

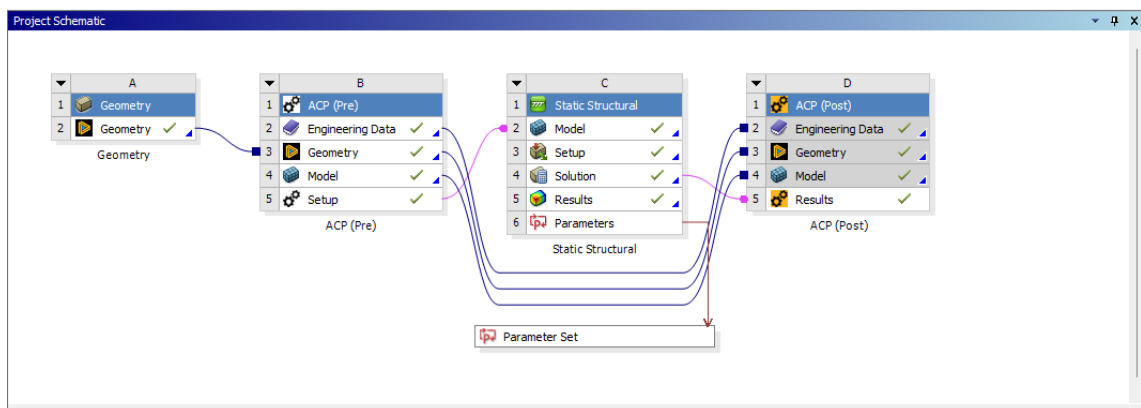
Figura 7 - Metodologia de projeto aplicada na análise



Fonte: Autor (2025)

Além do processo de verificação, após o modelo final definido, foi realizado uma análise financeira comparando com os custos de outras alternativas mais tradicionais. Desta maneira, o ciclo de análise se encerra analisando o ambiente de implementação da proposta.

Figura 8 - Esquemático do projeto



Fonte: Autor (2025)

Conforme ilustrado na Figura 8, a simulação envolveu diversas etapas de pré-processamento. Inicialmente, foi realizado o tratamento da geometria, seguido pela definição das propriedades do material. Em seguida, foram identificadas as faces onde seriam aplicados os esforços e as condições de contorno, bem como aquelas que demandavam maior refinamento de malha.

Posteriormente, determinou-se a orientação das fibras e o número de camadas, de acordo com a necessidade de resistência aos esforços e as limitações de manufatura. Por fim, aplicaram-se as condições de contorno e realizou-se a análise dos esforços em cada camada de fibra após a execução da simulação.

### 3.1 REQUISITOS DE PROJETO

Foram levantados os requisitos de projeto com base nas necessidades do protótipo Fórmula CEM, que foram analisados durante o processo iterativo de desenvolvimento. A seguir os requisitos mínimos para a viabilidade de manufatura do modelo:

- Aro interno de 10 polegadas com tala 6 polegadas que comporte o pneu Hoosier R20;
- Fixação por uma única porca central;
- Raio interno mínimo de 85mm, para a montagem do sistema de freio;
- Resistir as forças e momentos impostas pelo protótipo, ilustrados na tabela 3 e 4;
- Custar menos e ser mais leve que a roda de magnésio da fabricante italiana Oz, pois, é o modelo que a equipe utiliza atualmente;
- Manufatura possível de ser realizada sem utilizar autoclave, ou seja, na UFSC.

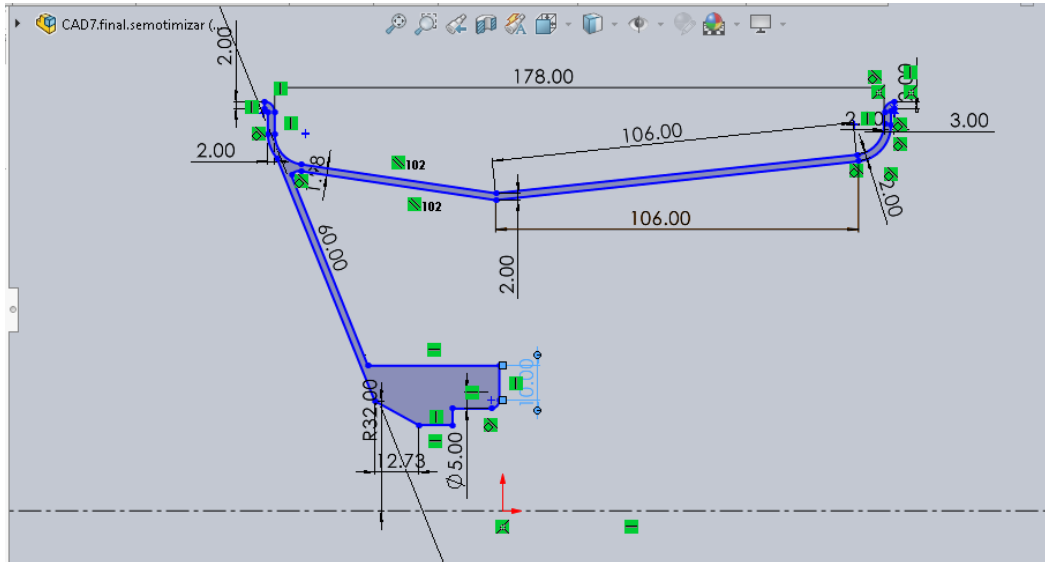
### 3.2 CAD 3D

Com os requisitos de projeto definidos, iniciou-se a etapa de modelagem tridimensional no SolidWorks onde em um primeiro momento, os parâmetros dimensionais e as restrições de manufatura foram os principais fatores que orientaram o desenvolvimento do modelo inicial. Após a realização das simulações preliminares, com um modelo sem otimizar, aplicado esforços críticos, com a mesma quantidade de camadas para toda a geometria, seguindo a natureza iterativa da metodologia de projeto, elaborou-se um segundo modelo geométrico.

Nessa nova versão, regiões foram refinadas e aliviadas, com o objetivo de reduzir massa e eliminar possíveis singularidades numéricas observadas nas análises

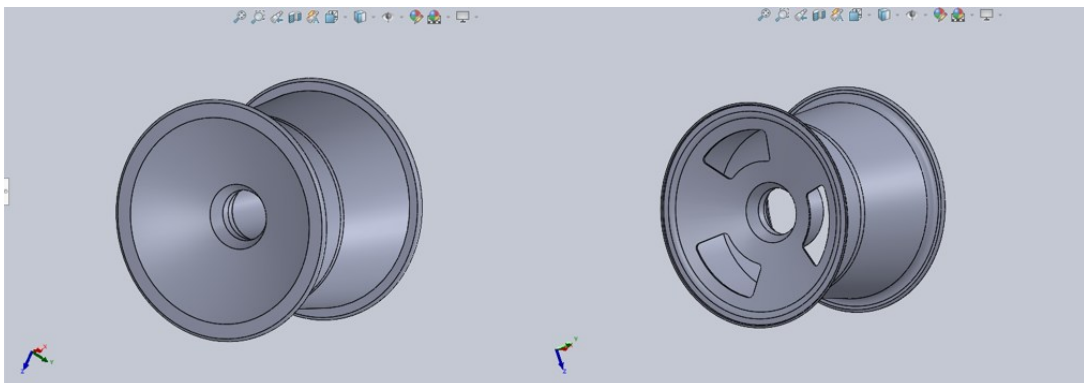
anteriores. A Figura 8 apresenta o esboço utilizado na concepção do primeiro modelo, enquanto a Figura 9 mostra o comparativo entre as duas geometrias desenvolvidas.

Figura 9 – Esboço do CAD



Fonte: Autor (2025)

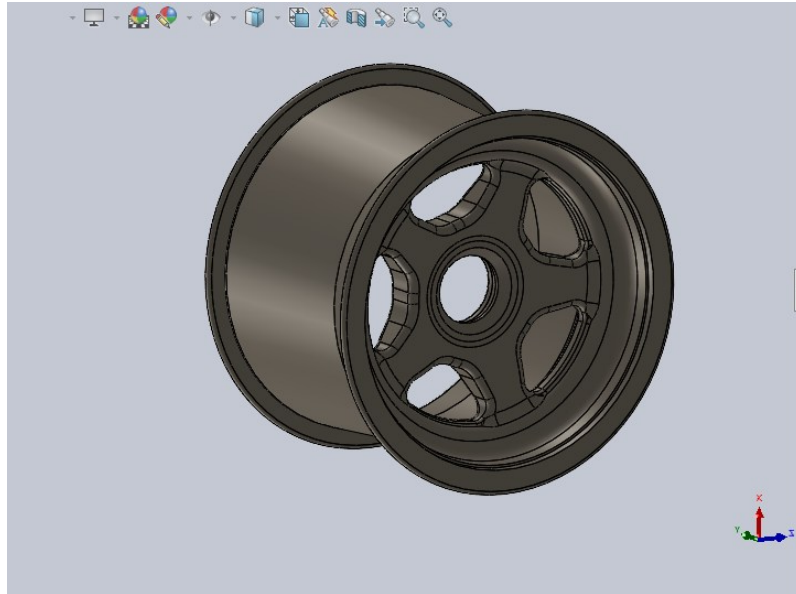
Figura 10 - CAD Conceitual antes do pré processamento



Fonte: Autor (2025)

Os modelos tem como premissa a simplicidade da geometria a fim de viabilizar a manufatura, na imagem abaixo, a princípio de comparação apenas, segue o modelo desenvolvido pela equipe Fórmula CEM para ser manufaturado em alumínio fundido. Devido ao processo de manufatura e material escolhido por eles, a liberdade na modelagem geométrica foi bem maior.

Figura 11 - Modelo atual da equipe em alumínio fundido



Fonte: Fórmula CEM (2025)

Nos capítulos seguintes serão descritos os processos de preparação do modelo no ANSYS (*Analysis System*). Também será incluso o tratamento do sólido para conversão em superfície (shell), etapa para a análise estrutural dos laminados em material compósito.

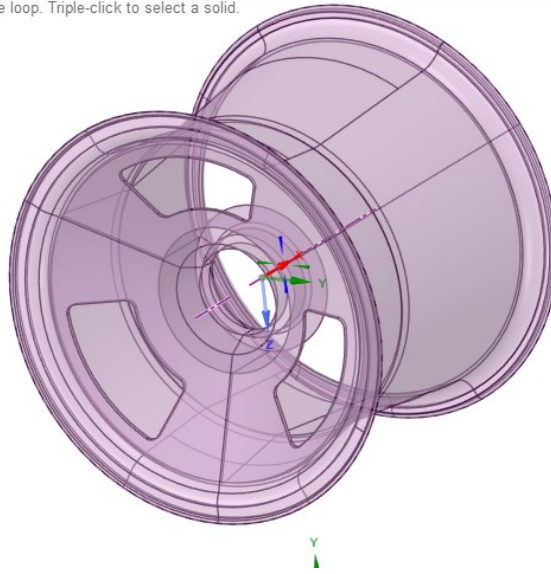
### 3.3 CAD COMO SUPERFÍCIE

Para simular materiais compósitos no ANSYS mechanical (solver), primeiramente deve ser tratado e descrito como serão as camadas das fibras, a orientação delas, sua resistência mecânica e a direção de deposição das camadas. Então, é necessário um pré-processamento no ANSYS ACP, entretanto, essa ferramenta aceita apenas geometria composta por superfícies (“shell elements”) pois as dimensões serão fornecidas no pré processamento (ACP).

Na Figura 12 é ilustrado a geometria tratada no spaceclaim transformada em superfície, e além disso, as faces foram criadas de acordo com a forma em que as fibras serão depositadas durante o processo de manufatura. O ângulo formado pela área de contato do pneu com o sono, o modo com que a força é aplicada ao aro e as condições de contorno, também foram levadas em consideração, pois será necessário ter essas faces discretizadas quando implementado o modelo no solver.

Figura 12 - CAD como superfície

to select an edge loop. Triple-click to select a solid.



Fonte: Autor (2025)

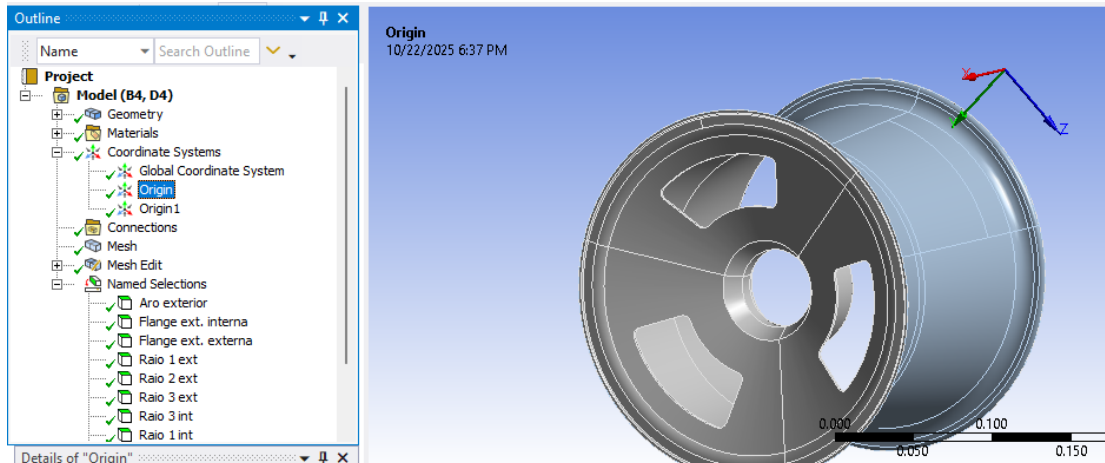
### 3.4 PRÉ PROCESSAMENTO

O pré-processamento no ANSYS ACP envolve todas as etapas de preparação do modelo composto antes da análise estrutural, ou seja, tudo o que define a geometria, materiais, empilhamento e condições de contorno. Na Figura 8 foi demonstrado como foi o fluxo de trabalho na ferramenta ANSYS, sendo notório que o ACP é a etapa que compila a geometria analisada (geometry), a malha gerada (Model), os materiais de engenharia (Engineering Data) e a disposição da fibra em cada face (Setup).

#### 3.4.1. Particionamento do modelo

Com o intuito de manter um controle da simulação, utilizou-se amplamente o recurso Named Selection para separar o modelo em diversas partes. Desta forma, é possível obter controle na imposição das condições de controle na roda, além de ser um recurso poderoso para o refino de malha em regiões específicas, conseguindo poupar poder computacional em regiões que o refino não se faz necessário.

Figura 13 - Faces nomeadas

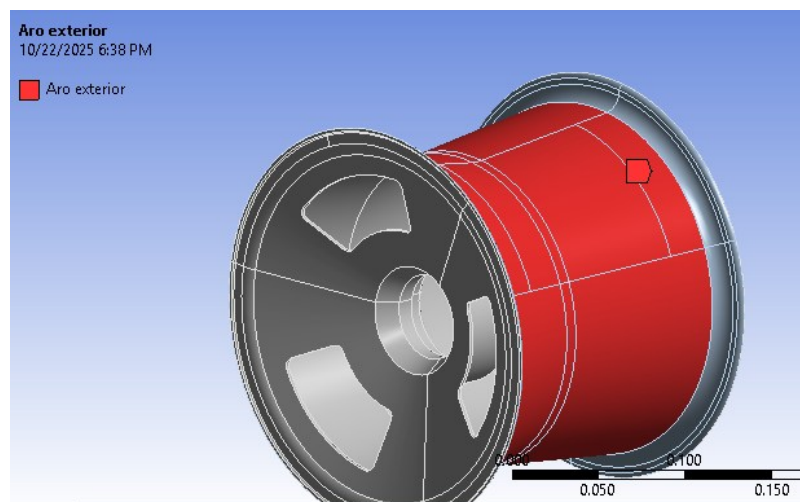


Fonte: Autor (2025)

Também foi criado mais dois sistemas de coordenadas, elas representam onde o pneu encosta no solo, que por sua vez é a fonte dos esforços que a roda está sujeita. Ademais, é ilustrado a região representada pelo aro do pneu em contato com a roda, esta é área que recebe os esforços da face do pneu, essas considerações serão explicadas com mais detalhes quando for abordado as condições de contorno.

A árvore de construção ilustra as regiões que serão depositados os materiais em tiras de fibra de carbono, e para o controle direcional dessa fibra foi separado a superfície em várias partes. Por exemplo, em vermelho temos uma região que não é plana e, portanto, foi desmembrada das demais para um maior controle nas fases posteriores de análise e aplicação da pressão do pneu.

Figura 14 - Região cilíndrica da roda



Fonte: Autor (2025)

### 3.4.2. Material de engenharia

O material de engenharia escolhido foi o XC100 da fabricante “easycomposites”, por se tratar de um material pronto para uso, já contendo fibra e resina em um mesmo produto, assim a manufatura é facilitada, ainda mais se tratando de geometria complexa. Outro fator de decisão foi por não necessitar de autoclave para a manufatura, necessitando apenas que a cura seja realizada a vácuo gerado por uma bomba e a fibra numa bolsa plástica apropriada, abaixo segue a tabela das propriedades do material que foi fornecida pelo fabricante.

Tabela 2 - Propriedades do material

Propriedade	Norma de Ensaio	#	Resultado	Unidades
Resistência à compressão	BS EN ISO 14126 : 1999		483	Mpa
Resistência à tração	BS EN ISO 527-4 : 1997		521	Mpa
Resistência ao alongamento	BS EN ISO 527-4 : 1997		55,1	Gpa
Resistência à flexão	BS EN ISO 14125 : 1998		777	Mpa
Módulo de flexão	BS EN ISO 14125 : 1998		46,7	Gpa
Resistência ao cisalhamento interlaminar	BS EN 2563 : 1997		64,7	Mpa

Fonte: Adaptado de easycomposites (2017)

Para garantir as propriedades que foram mencionadas acima, o processo de cura deve seguir o ciclo térmico que a Figura 15 ilustra, além de estar na bolsa de vácuo. O valor de 120°C é o valor ideal, contudo o fabricante também garante as propriedades se a cura for realizada a 85°C.

Figura 15 – Tempo de cura padrão

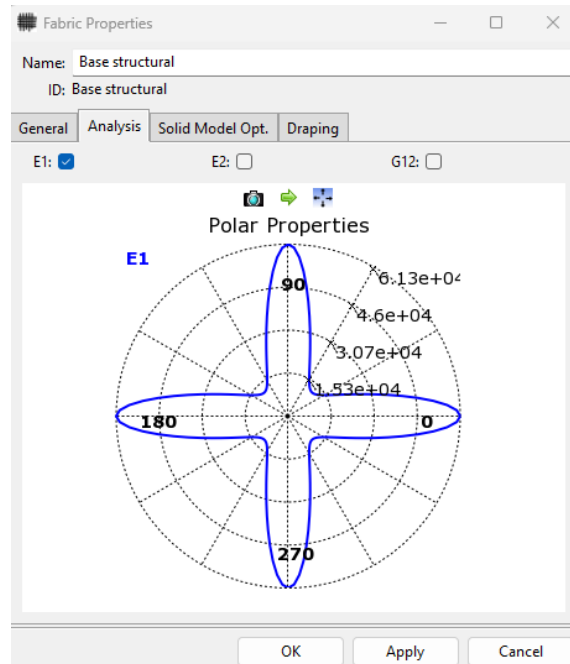
Step	Start Temp	Ramp Rate	Duration	End Temp	Elapsed Time
1	~ 20°C	1°C /min	00:50	70°C	00:50
2	70°C	Soak	04:00	70°C	04:50
3	70°C	2°C /min	00:25	120°C	05:15
4	120°C	Soak	01:00	120°C	06:15
5	120°C	Natural Cool	--	~20°C	07:15



Fonte: easycomposites (2017)

Conhecendo os parâmetros de engenharia do material foi implementado esses dados no modelo e as propriedades polar constam na Figura 15. Sendo notório a resistência diferente de acordo com a direção da força, foi realizado algumas estratégias para minimizar este efeito em alguns momentos quando aplicado carregamento combinado, entretanto quando sujeito a esforços unidirecionais foi aproveitado a característica do material para a otimização.

Figura 16 - Propriedade polar da fibra utilizada

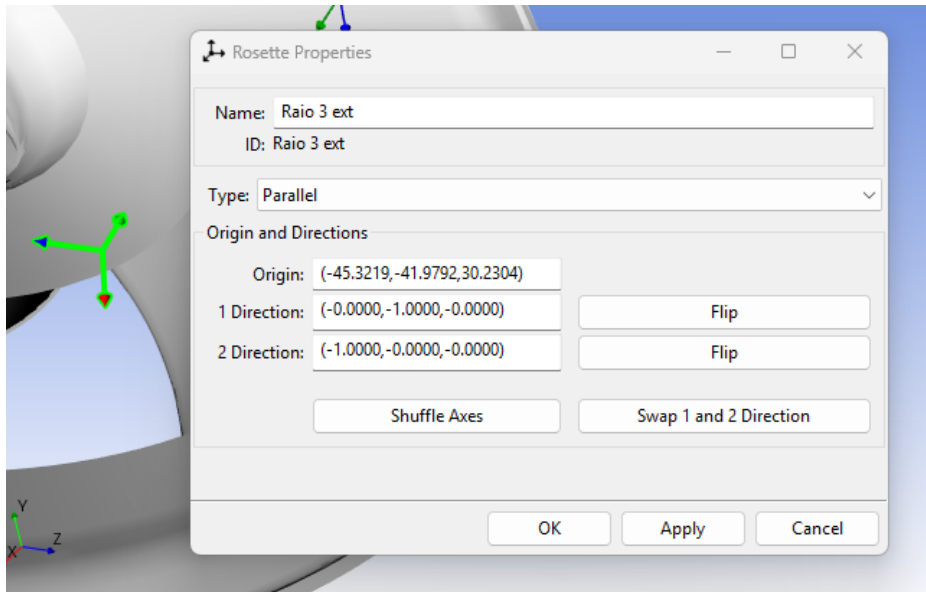


Fonte: Autor (2025)

### 3.4.3. Orientação das fibras

Foi definido diversos sistemas de referências (Rosettes) para melhor representar como cada elemento será colocado no molde e como esse mesmo elemento sofrerá os esforços do sistema. A Figura 17 ilustra as referências criadas, em que a seta em vermelho indica a direção principal de orientação da fibra, a seta azul a direção transversal e a verde apontam o sentido da espessura. Para uniformizar o comportamento do material foi empilhado camadas de tecido estando elas transladadas entre si.

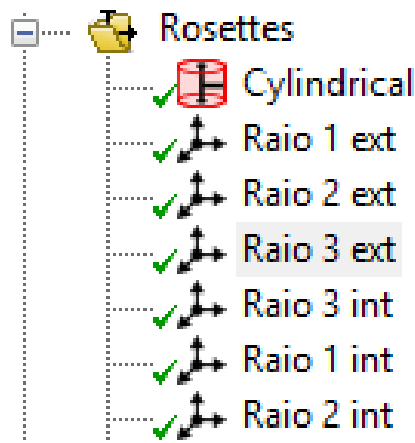
Figura 17 – Sistemas de referência para orientação das fibras



Fonte: Autor (2025)

A Figura 18 demonstra a quantidade de referências criadas, consistindo de uma para cada elemento plano e uma para todos os elementos cilíndricos. Quando se trata de coordenadas cilíndricas, a seta vermelha indica o sentido radial, a azul longitudinal e verde a espessura.

Figura 18 - Referências utilizadas

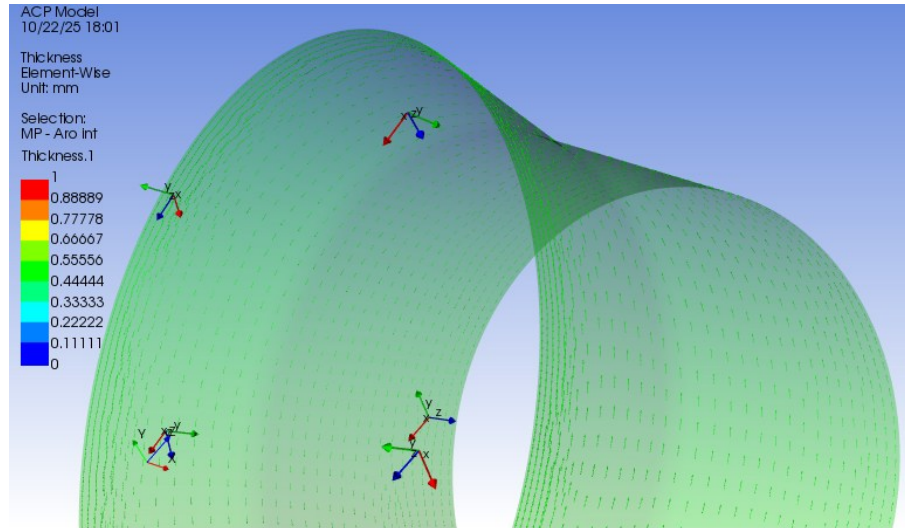


Fonte: Autor (2025)

Como resultado das definições mencionadas, obtém-se uma representação fiel de como a roda será após a laminação completa. Por esse motivo, o processo de manufatura deve ser conduzido com cautela, pois não adianta um detalhamento rigoroso na simulação se a fita de carbono pré-impregnada for cortada sem critério e

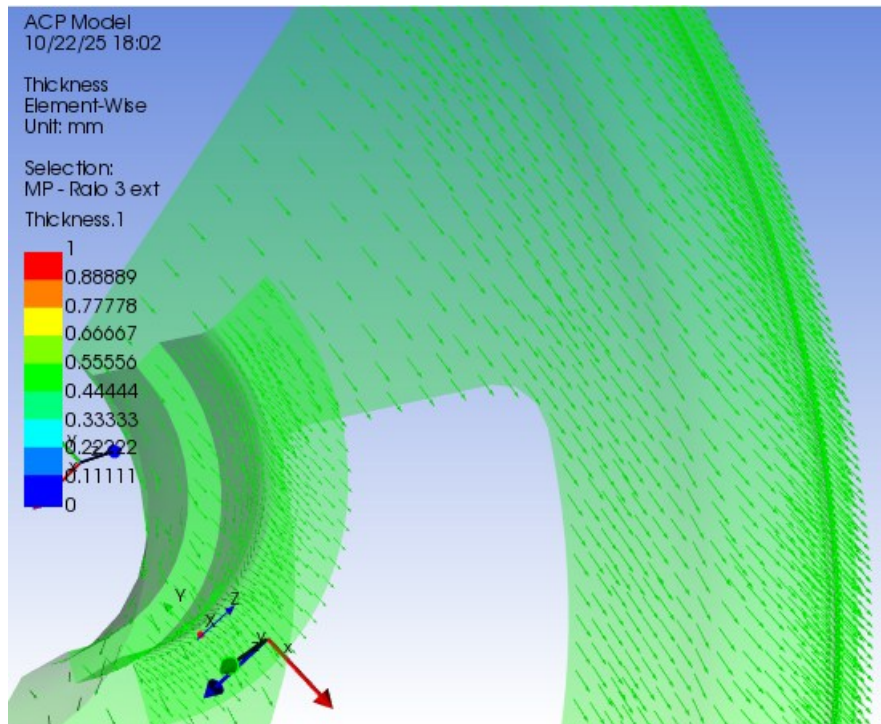
depositada sem seguir o projeto estabelecido. A Figura 19 e Figura 20 ilustram o sentido principal das fibras, evidenciando a importância da utilização de sistemas de coordenadas cilíndricas e cartesianas para a correta orientação durante a fabricação.

Figura 19 - Exemplo de orientação das fibras em geometria cilíndrica



Fonte: Autor (2025)

Figura 20 - Exemplo de superfície plana com orientação de fibra evidente

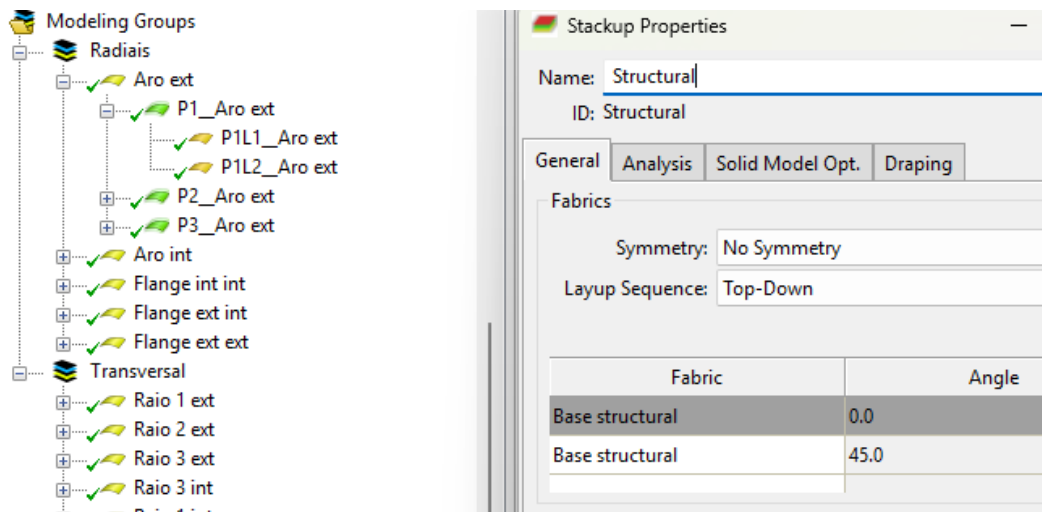


Fonte: Autor (2025)

### 3.4.4. Laminação

A estratégia utilizada para garantir um comportamento uniforme consistiu em montar um material de estrutura (Stackup) que foi utilizado em todo o processo de dimensionamento, como o material de pré-impregnado (Fabric) consiste de duas fibras a 90° entre si, o material base (tecido) é composto por uma dupla camada de carbono pré-impregnado a 45° entre elas. A Figura 21 ilustra como foi implementado o material de estrutura em cada seção da roda e como foi implementado a fibra para a criação do material estrutural.

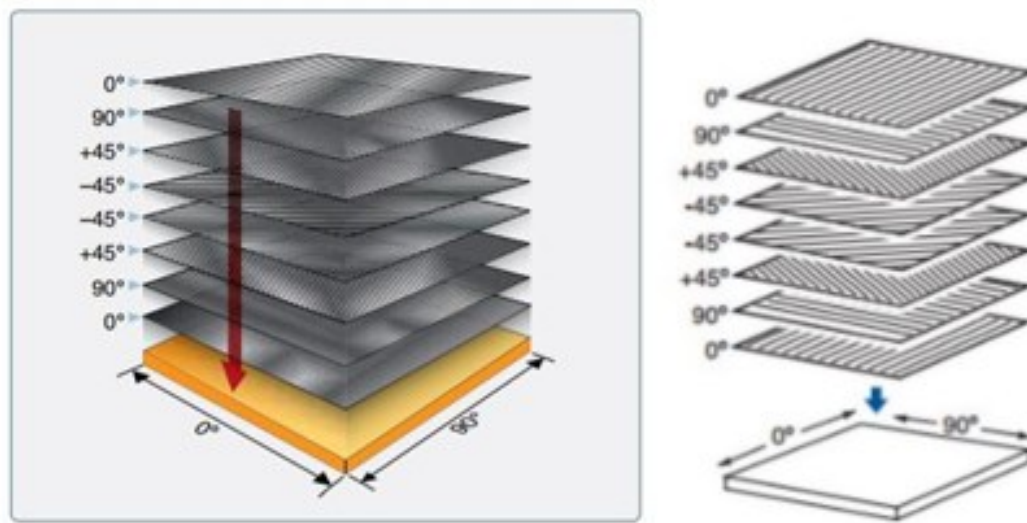
Figura 21 - Orientação da fibra no material estrutural



Fonte: Autor (2025)

Os “grupos modelados” é onde definiu-se quantas camadas de tecido cada face receberia, por exemplo: o Aro exterior em um primeiro momento recebeu três camadas de tecido (P1,P2 e P3), sendo que cada camada uma dupla (P1L1 e P1L2). Com o exemplo acima, um único elemento possui seis fibras empilhadas a 0 °/ 90°/ 135°/ 225°/ 270°/ 360° assim o comportamento do material ficou bastante uniforme na região. Abaixo é ilustrado de maneira mais didática como é feito a modelagem da fibra, sendo que o fato da orientação da fibra estar transladada em relação a camada anterior e posterior garante uma resistência direcional mais uniforme da peça.

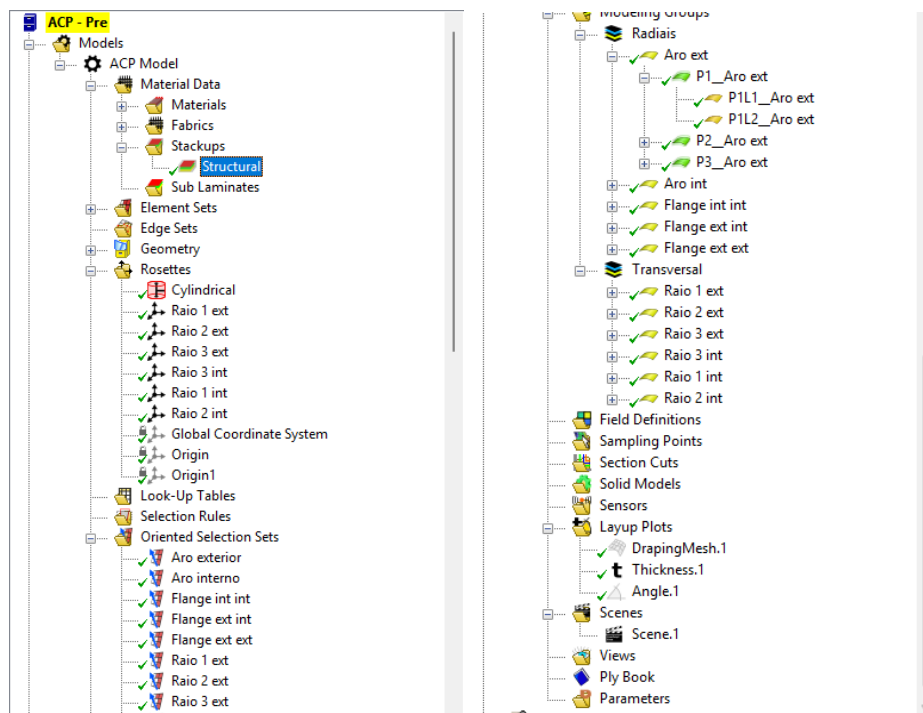
Figura 22 - Exemplo de empilhamento de fibras



Fonte: Kruse et. All (2021)

A laminação é a última etapa do pré-processamento a Figura 23 abaixo representa a árvore construtiva que engloba essa etapa. Após as camadas de tecido serem determinadas, foi iniciada a fase de implementação das condições de contorno.

Figura 23 - Árvore de construção da laminação

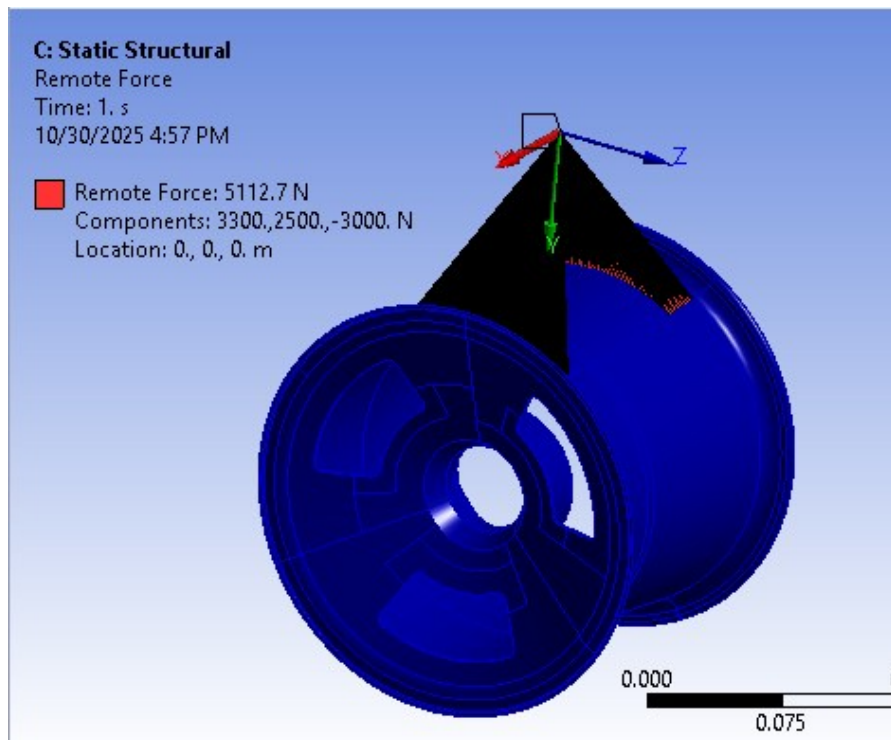


Fonte: Autor (2025)

### 3.5 SIMULAÇÃO

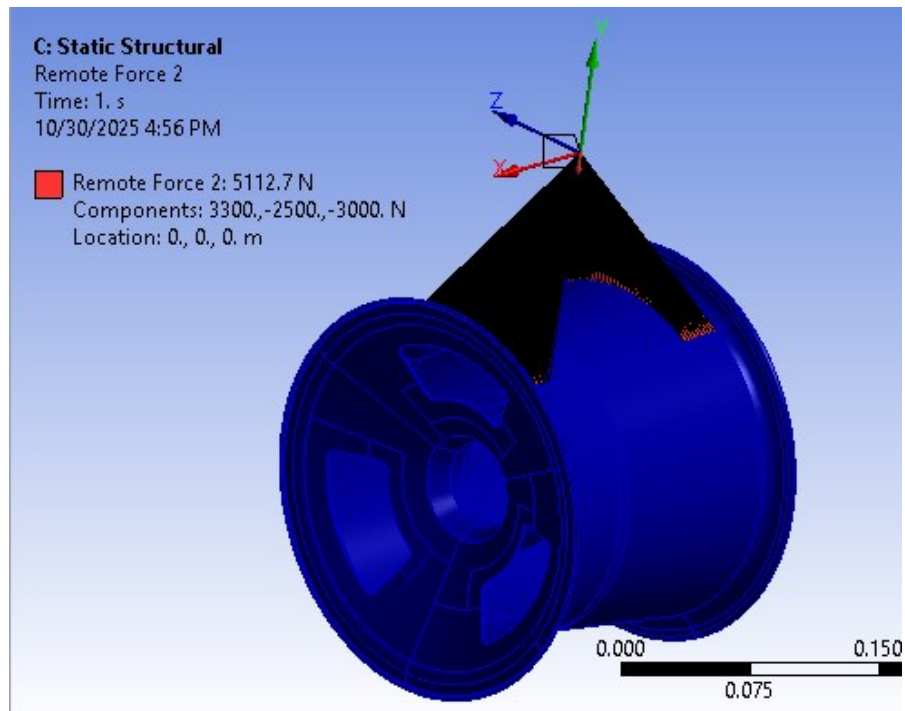
Restrições foram feitas no modelo a fim de tornar possível a análise, foi engastado a região de contato entre a porca e o cubo de roda, a pré-carga imposta pela porca de alumínio foi desconsiderada nesta análise, o ângulo  $\theta$  (explicado na Figura 3) considerado foi de  $30^\circ$ . Todos os carregamentos apresentados foram analisados em duas situações, quando o raio da roda está alinhado com o solo e quando está entre dois raios, como ilustrado nas imagens 24 e 25.

Figura 24 - Força alinhada com raio da roda



Fonte: Autor (2025)

Figura 25 - Força entre raios



Fonte: Autor (2025)

### 3.5.1. Condições de contorno

A força de reação não é constante ao longo da corrida, mas para o modelo de simulação foi considerado o pior caso, que consiste numa frenagem quando atingido a velocidade máxima, durante uma curva, analisando as rodas dianteiras que sofrem mais que a traseira. Essa tabela foi extraída do trabalho do Bryan (2015), outras situações de carregamento foram fornecidas pela equipe.

Tabela 3 - Sumário de forças e momentos crítico

<b>Forces</b>	
Fx (N)	3000
Fy (N)	3300
Fz (N)	2500
Air pressure (Pa)	240000
Force rubber on rim (N)	2000
Bump (N)	4000
<b>Torques</b>	
Mx (Nm)	120
My (Nm)	0
Mz (Nm)	165

Fonte: Bryan Uyttersprot (2015)

Também foi analisado o veículo em mais três situações, quando parado, durante uma aceleração pura e durante uma frenagem pura. Os esforços estáticos e dinâmicos (oriundos da transferência de carga) constam na tabela 4. A pressão do pneu também foi considerada contra a flange e aro, e possuem o mesmo módulo apresentado na tabela 3.

Tabela 4 - Carregamento estático e acelerado

	Frenagem	Aceleração	Estático
Fx	2360,0 [N]	920,0 [N]	
Fy			
Fz	1300,0 [N]	513,5 [N]	763,0 [N]
M	120,9 [N.m]	428,0 [N.m]	

Fonte: Fórmula CEM [2025]

### 3.5.2. Critério de falha

Para a análise foi utilizado o critério de Tsai-Hill, ele aplica-se para materiais com características anisotrópicas, considerando a interação de diferentes componentes de tensões. O critério assume uma forma homogênea e quadrática com termos de segundo grau nas razões tensão/ força.

A equação do critério de falha aplicada a um problema bidimensional esta expressa abaixo onde o valor crítico é um, ou seja, quando maior que um significa falha.

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1 * \sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} \geq 1 \quad (1)$$

- $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são as tensões principais nas direções principais do material;
- $X$  e  $Y$  são as resistências de tração e compressão nas direções 1 e 2;
- $\tau_{12}$  é a tensão de cisalhamento no plano 1-2;
- $S$  é a resistência ao cisalhamento no plano 1-2.

O termo com  $-\sigma_1 \sigma_2 / X^2$  representa a interação entre as tensões em diferentes direções (ou seja: combinar tensões reduz a margem de segurança).

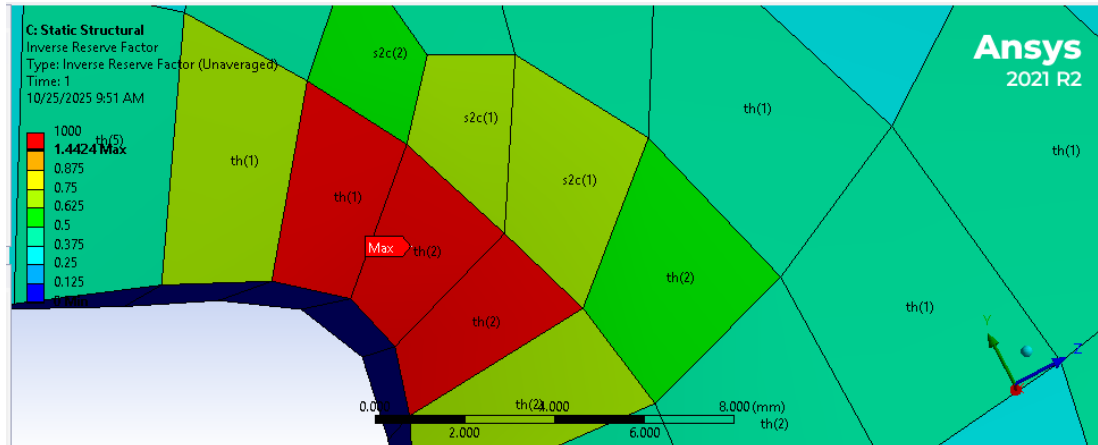
### 3.6 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO

Com as primeiras simulações realizadas foi possível observar algumas falhas no modelo e no dimensionamento. A Figura 25 demonstra alguns elementos que falharam e o critério de falha escolhido permite analisar a forma que ele falhou, assim é possível saber onde deve ser depositado mais material e onde apenas mudando a direção da fibra já é o suficiente. Quanto a convergência de malha, foi realizado uma análise local onde o gradiente de tensão entre elementos deve ser baixo e os resultados das simulações não devem mudar ao refinar a malha (resultados não sensíveis ao refino é um bom indicativo que a malha convergiu e não influencia o modelo negativamente).

Na Figura 26 a marcação th(2), s2c(1) e s2c(2) representam o modo de falha dos elementos, por exemplo:

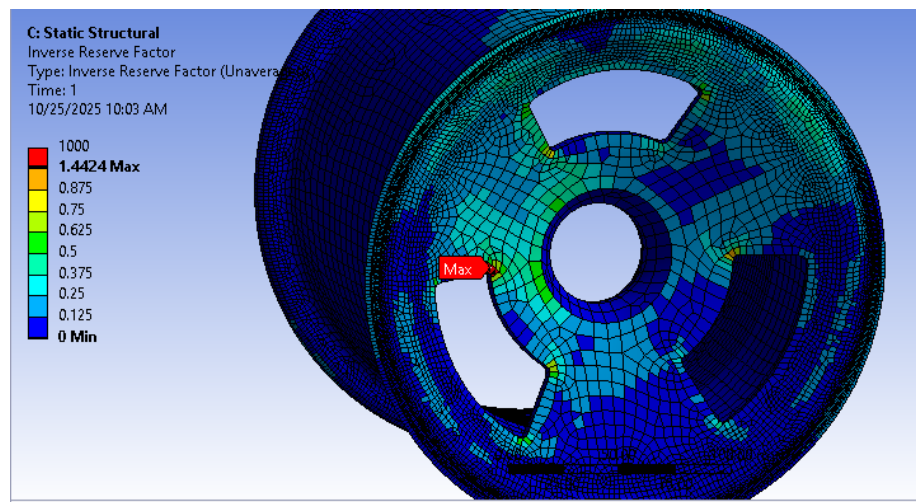
- s2c(1) significa: s-tensão máxima no plano, 2-direção secundária, c-compressão, (1)-na primeira camada;
- th(2) significa: th-tensão através da espessura, (2) segunda camada.

Figura 26 - Análise das primeiras simulações



Fonte: Autor (2025)

Figura 27 – Malha com alto gradiente entre os resultados dos elementos

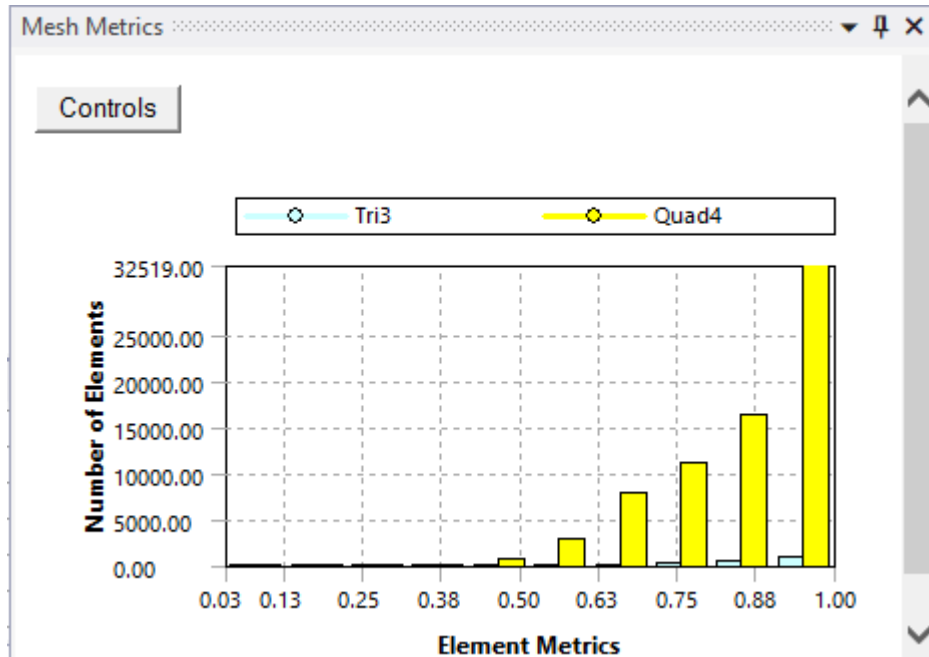


Fonte: Autor (2025)

A Figura 27 permite enxergar algumas falhas na malha, a convergência de malha não foi alcançada e o gradiente de tensão entre os elementos é alto. O maior valor foi justamente nos concentradores de tensão, assim a singularidade invalida a simulação pois não representa o valor real de tensão.

Devido a esses fatores, foi necessário refinar a malha nas regiões críticas e com grande gradiente. O refino não é aplicado ao modelo por inteiro por não haver necessidade de aumentar o custo computacional onde não são regiões de interesse.

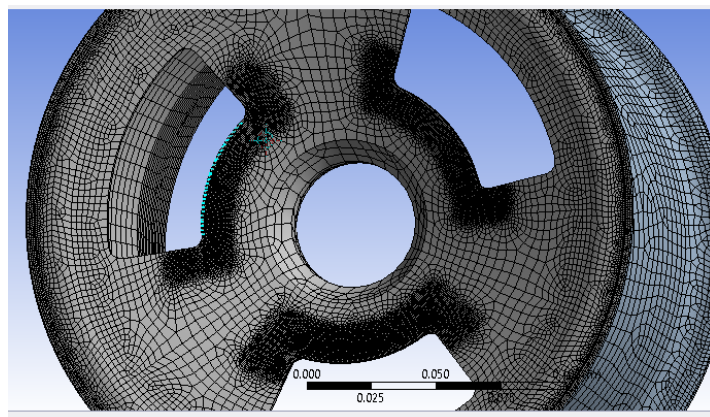
Figura 28 - Qualidade dos elementos

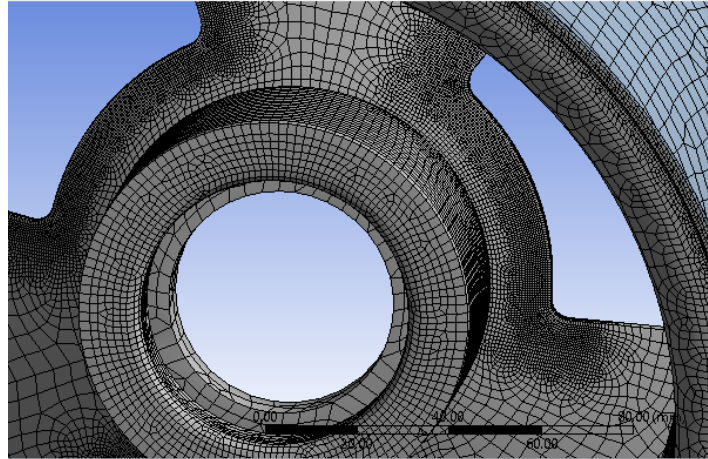


Fonte: Autor (2025)

Com a imagem acima tem-se grande parte dos elementos Tri3 e Quad4 com mais de 80% de qualidade, poucos elementos com qualidade entre 50% e 70% e quase nem um elemento abaixo dos 50%. Assim, as simulações começaram a ser úteis e representar melhor a realidade trazendo dados de engenharia precisos para o dimensionamento da roda, a Figura 29 mostra algumas regiões onde a malha foi refinada e a Figura 30 ilustra a região com maior deslocamento, a flange interna da roda e foi reforçada.

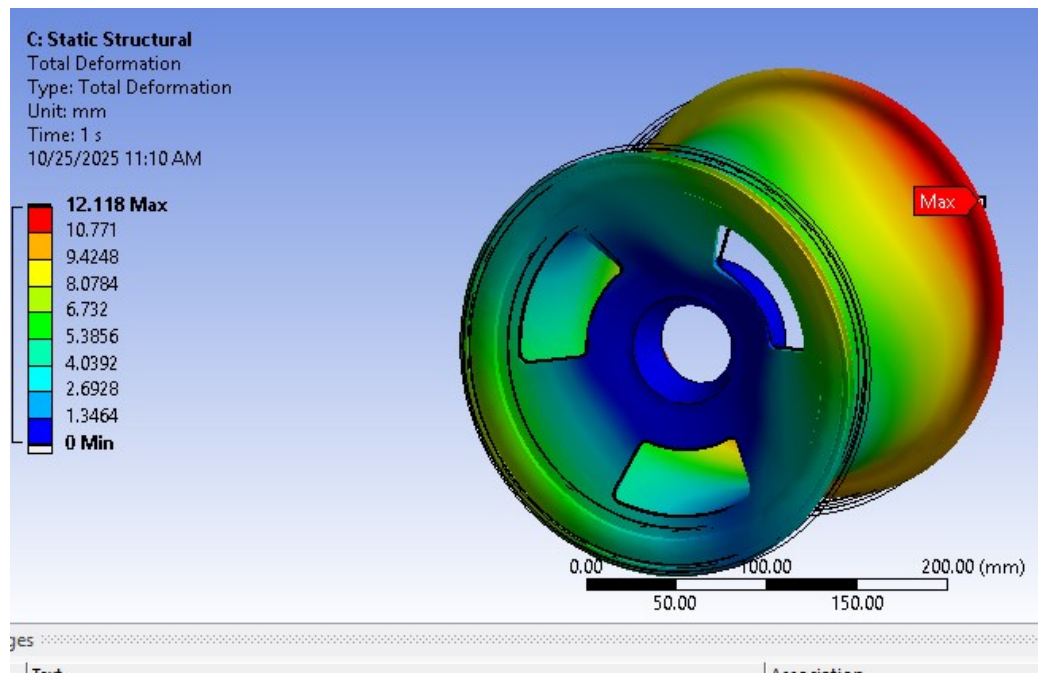
Figura 29 - Refino de malha em concentrador de tensão





Fonte: Autor (2025)

Figura 30 - Deformação na flange interna nas primeiras análises



Fonte: Autor (2025)

### 3.7 ANÁLISE FINANCEIRA

Após a análise estrutural finalizada, sabendo a quantidade de fibra a ser utilizada, foi calculado o custo de fabricação de um jogo de rodas. Foi considerado as perdas ao cortar a fibra e os valores foram convertidos de real para dólar a fim de facilitar a comparação com a Oz e para as tabelas se manterem atualizadas por mais tempo.

Tabela 5 - Custos para construir em fibra de carbono

Material pré-impregnado (€75,00/m <sup>2</sup> )	U\$800,00
Bomba de vácuo	U\$120,00
Embalagem para suportar o vácuo	U\$15,00
Usinagem da matriz	U\$200,00
Matéria prima da matriz [Nylon]	U\$150,00
Total	U\$1285,00

Fonte: Autor (2025)

Tabela 6 - Custos para ter um jogo de rodas Oz de magnésio em 10"

Jogo de rodas (4 unidades)	U\$1400,00
Frete	U\$308,00
Despachante aduaneiro	U\$905
Total	U\$2613,00

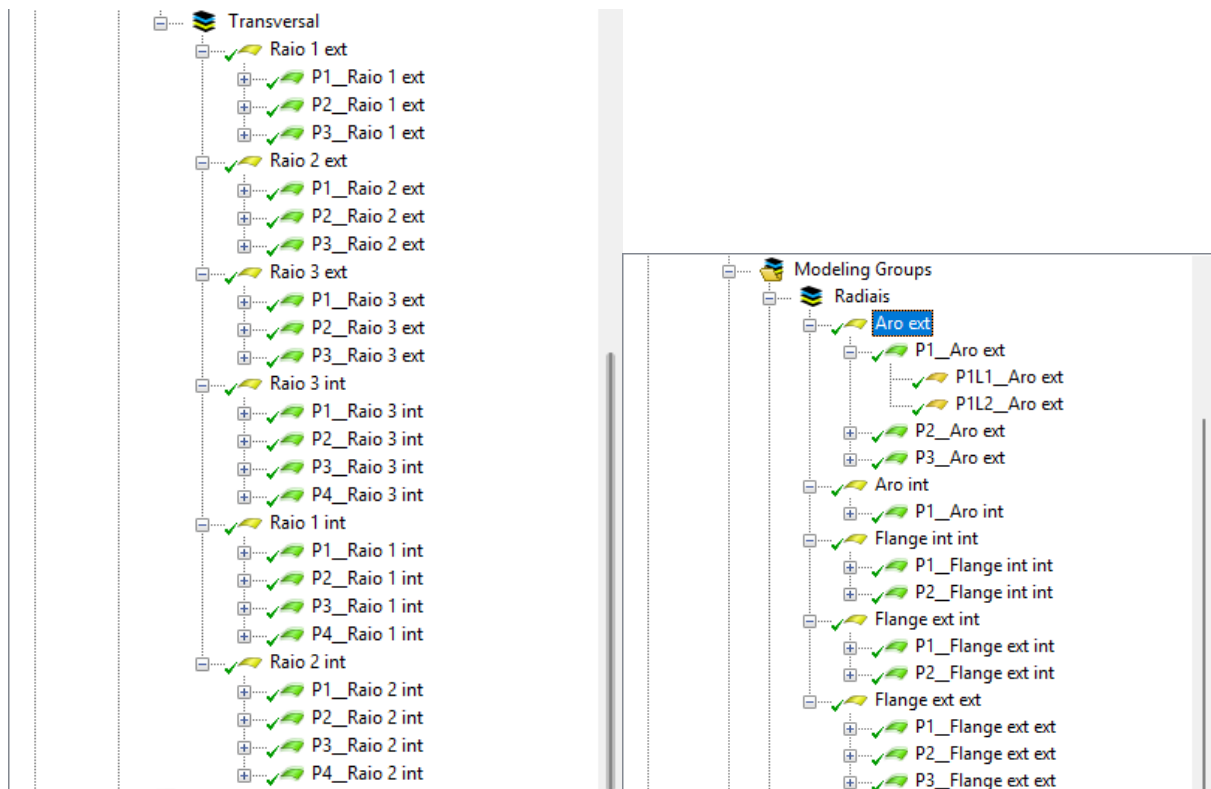
Fonte: Autor (2025)

As rodas comerciais apresentam um custo mais que duas vezes superior ao das rodas de fibra de carbono projetadas e fabricadas na universidade. É importante destacar, contudo, que esse valor pode variar conforme o apoio obtido pela equipe: a disponibilidade de patrocinadores para serviços de usinagem, fornecimento de matéria-prima ou processos de laminação pode reduzir significativamente tanto o custo quanto os riscos associados, além de elevar a qualidade da manufatura e da montagem final.

## 4. RESULTADOS

Após diversas interações, analisando a convergência de malha, dimensionando a quantidade e direção do tecido estrutural, refinando regiões de interesse e redimensionar regiões que falham, foi estabelecido uma quantidade satisfatória de camadas de tecido que suportam os esforços. A Figura 31 demonstra quantas camadas de carbono pré-impregnada e de material estrutural foram necessárias em cada região.

Figura 31 - Quantidade de camadas final



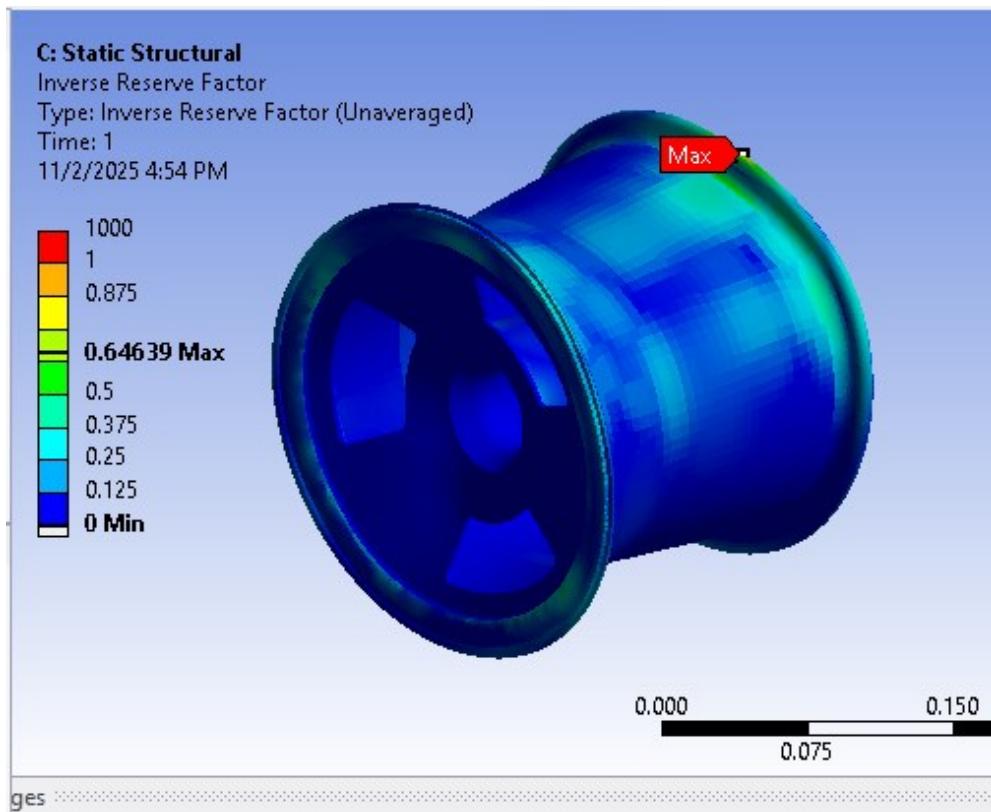
Fonte: Autor (2025)

Foi notório que quando o esforço foi aplicado entre dois raios é mais crítico do que quando aplicado de forma colinear ao raio. Então, a análise dos resultados será com foco no caso mais severo e o caso menos severo consta no apêndice do trabalho.

#### 4.1 RESULTADO EM FRENAGEM

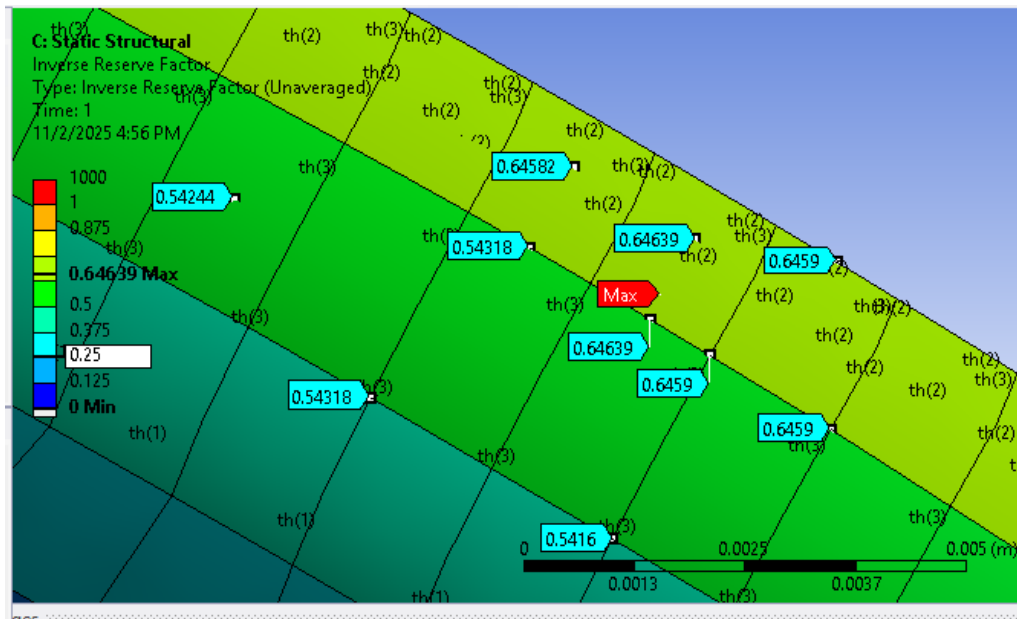
Tendo em vista o cenário de frenagem contendo magnitude de força normal ao eixo dianteiro maior devido a transferência de carga, obteve uma maior tensão na região interna da roda, possível observar através da Figura 32. Em específico na região da flange que também está sujeito a uma componente de força devido à pressão do pneu e esta é uma região que tem característica geométrica bem similar a um cilindro e não contém raios como a face da roda, sendo um dos lugares críticos para a análise.

Figura 32 - Vista isométrica frenagem



Fonte: Autor (2025)

Figura 33 - Característica dos elementos sob maior tensão



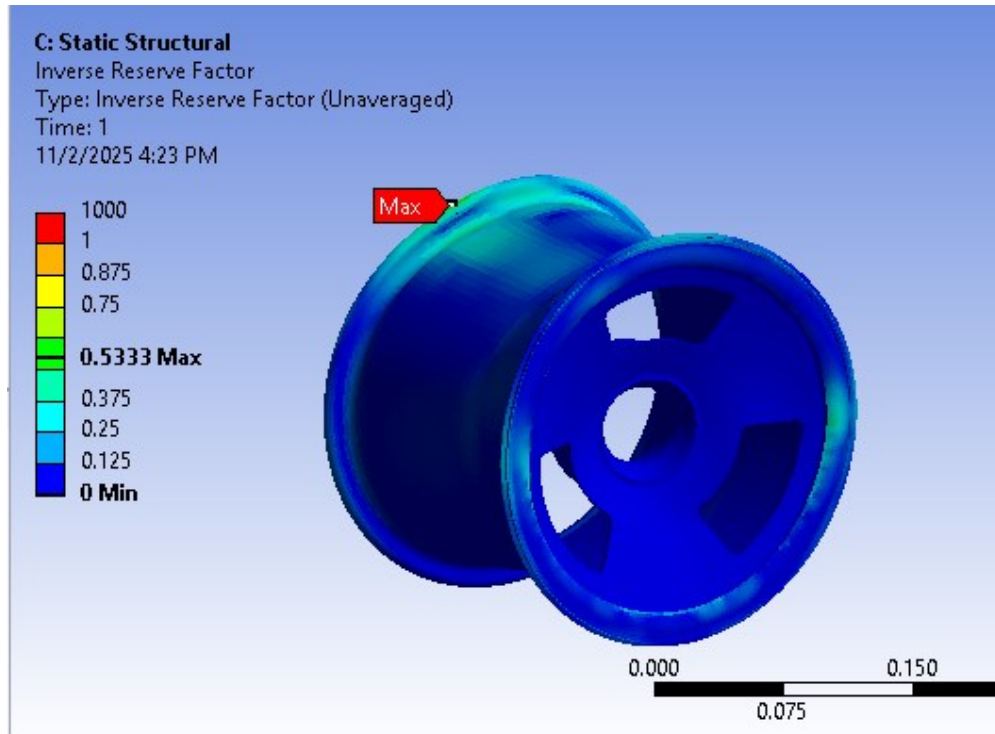
Fonte: Autor (2025)

Com base na Figura 33 é notório que se necessário fosse, a melhor maneira de aumentar a resiliência da região é aumentar a quantidade de camadas, pois o critério de falha aponta que o mais crítico é a tensão normal ao plano. Também foi apontado que as camadas internas foram as que mais sofreram tensão, o gradiente do fator de segurança é um valor baixo, então, a aquela região os resultados convergiram e a malha está aceitável.

#### 4.2 RESULTADO EM ACELERAÇÃO

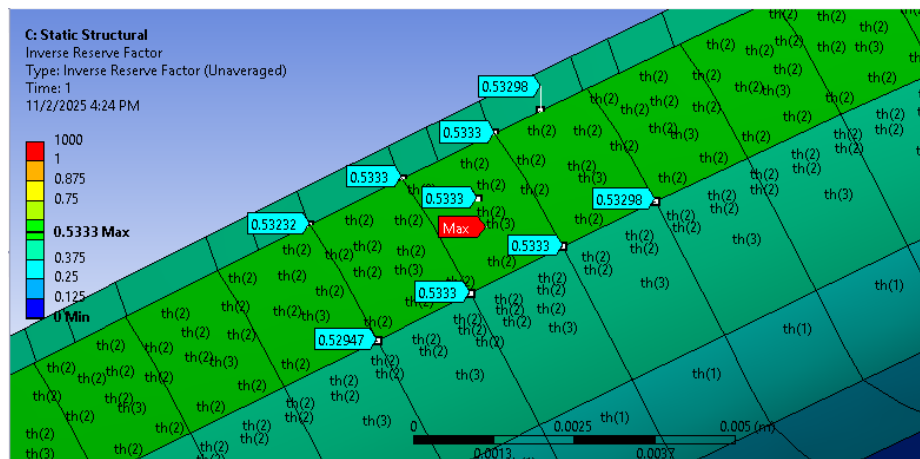
Quando se trata da aceleração, analisar os esforços do eixo traseiro é interessante, por possuírem maior carga normal devido a transferência de carga e possuir torque devido ao semieixo. A região crítica foi análoga a situação anterior, em frenagem, e um pouco menos crítica em aceleração, provavelmente se deve ao fato de um veículo possuir maior potência nos freios que no motor e causar maior aceleração longitudinal (em módulo).

Figura 34 - Vista isométrica aceleração



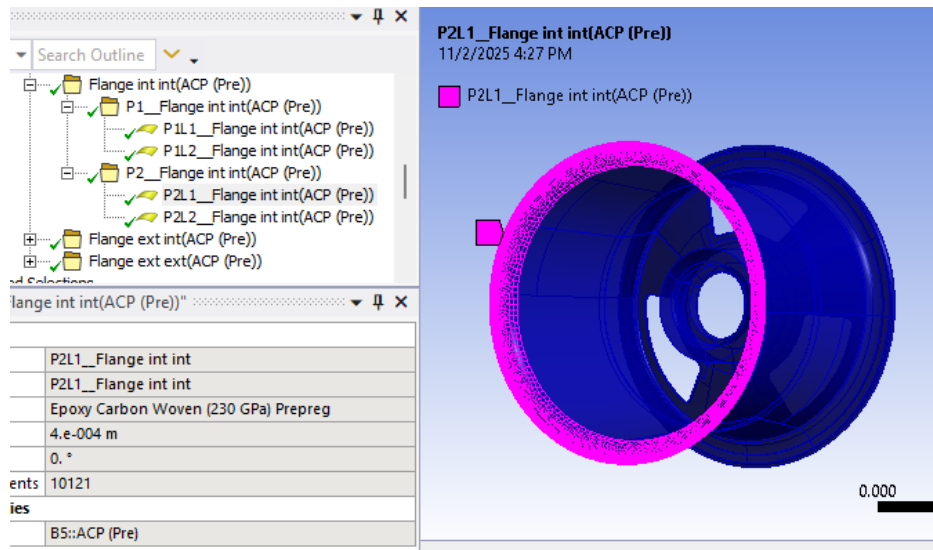
Fonte: Autor (2025)

Figura 35 – Características dos elementos quando submetido a frenagem



Fonte: Autor (2025)

Figura 36 - Camada crítica para esse carregamento



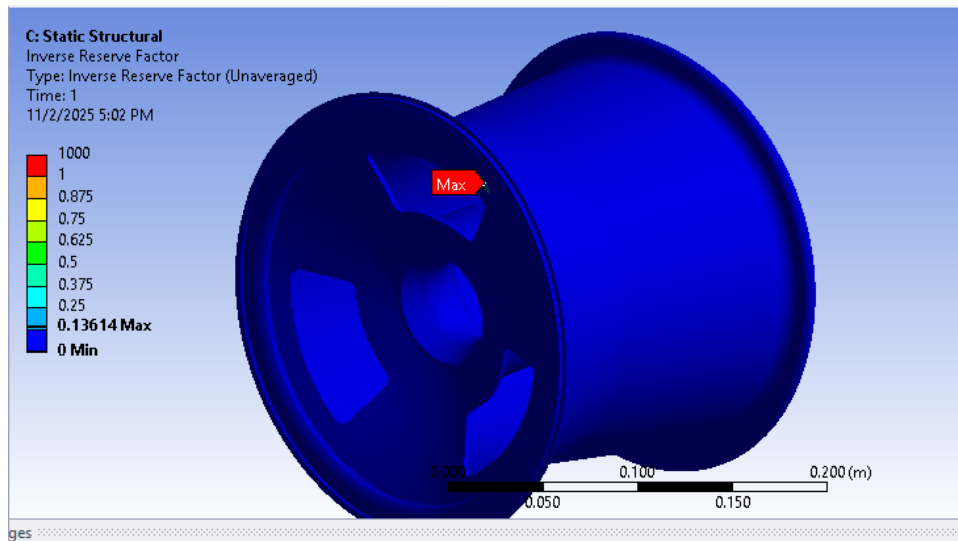
Fonte: Autor (2025)

Assim como no caso anterior, a malha está satisfatória (baixo gradiente entre elementos e resultados não são mais sensíveis ao refino de malha) e a tensão mais impactante é a normal ao plano, conseqüentemente para aumentar a resistência na região, se tivesse falhado, seria aumentar as camadas. Além dessa análise a Figura 36 demonstra a região e a quantidade de camadas na região.

#### 4.3 RESULTADO CASO ESTÁTICO

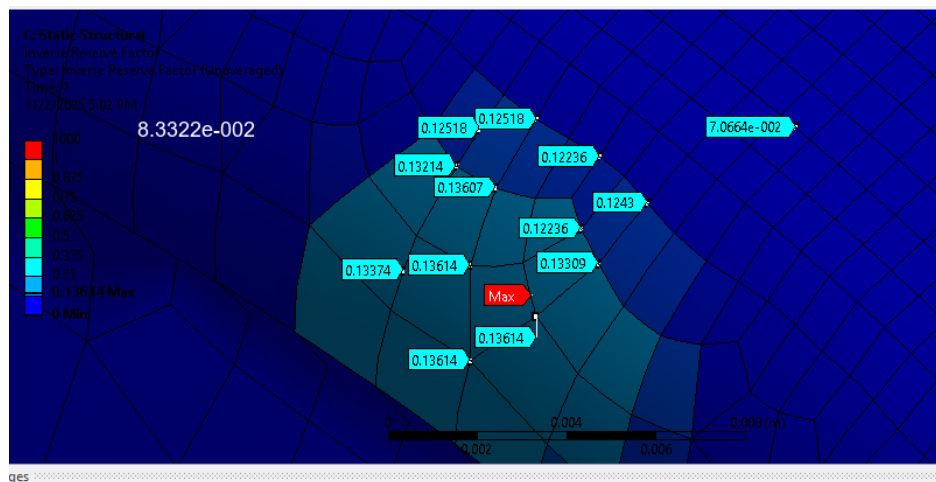
O caso estático, a velocidade constante ou velocidade igual a zero, está sujeito a esforços mais brandos. Então, por consequência, foi notado que o modelo está sob tensões baixas, a região mais crítica utiliza apenas 13% do máximo suportado pelo material. Esse comportamento é ilustrado pela Figura 37

Figura 37 - Vista isométrica caso estático



Fonte: Autor (2025)

Figura 38 - Elementos quando submetidos a carregamento estático

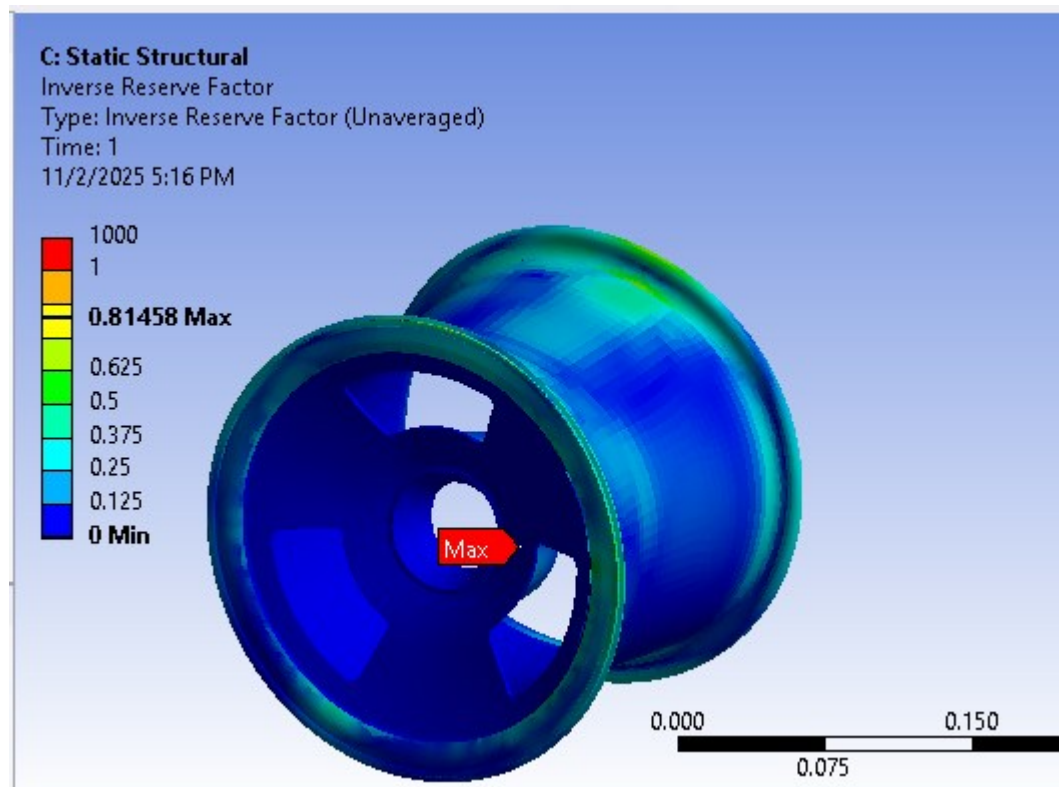


Fonte: Autor (2025)

#### 4.4 RESULTADO APLICANDO CASO CRÍTICO

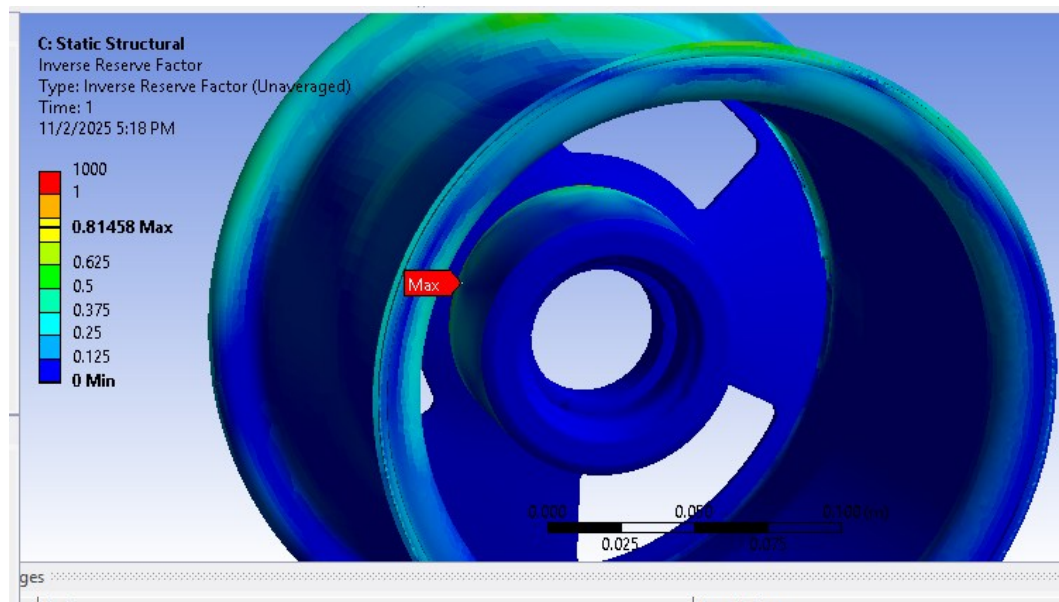
O caso crítico apresenta cargas combinadas com maiores módulos devido a componente na direção Y, pois apresenta esforços resultantes da transferência de carga lateral. Devido a esta componente, agora outras regiões sofrem mais, como os concentradores de tensão entre os raios da roda e o concentrador de tensão gerado na região onde a porca é alocada e o raio interno.

Figura 39 - Vista isométrica caso crítico



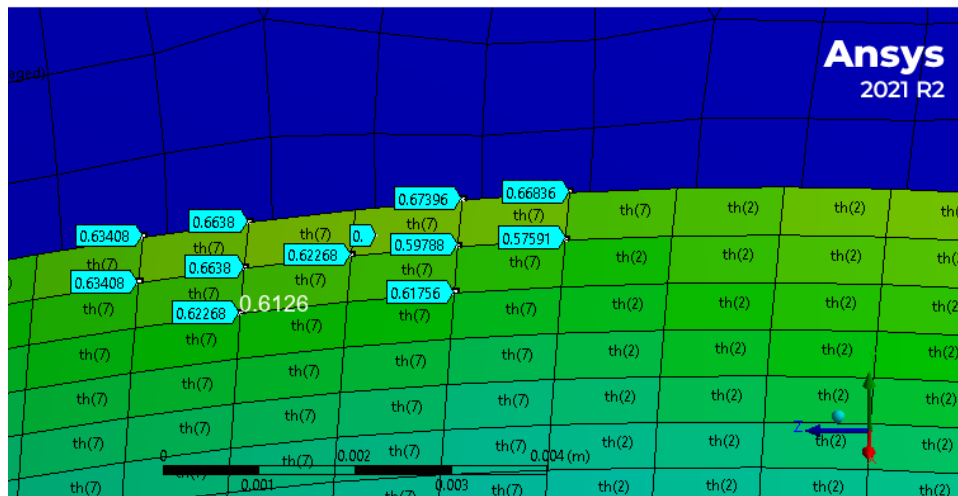
Fonte: Autor (2025)

Figura 40 - Concentrador de tensão



Fonte: Autor (2025)

Figura 41 - Elementos no caso crítico



Fonte: Autor (2025)

Apenas um elemento apresentou 81% da tensão máxima do material e não foi alcançado um refino de malha suficiente para uniformizar as tensões ao redor desse elemento. A região crítica mais uniforme está ilustrada na Figura 40 com cerca de 68% da capacidade do material, e assim como nos casos analisados anteriormente aqui também é necessário aumentar mais camadas para aumentar a resistência ( se as cargas aumentarem no próximo projeto), ou seja, a direção das fibras em todos os casos críticos não foi o limitante.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e analisar preliminarmente uma roda em material compósito de fibra de carbono para aplicação no protótipo Fórmula SAE da equipe Fórmula CEM da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville. A proposta buscou conciliar desempenho estrutural, viabilidade de manufatura e custo acessível, considerando as limitações técnicas e financeiras da equipe.

Com base nas simulações realizadas pelo autor utilizando a ferramenta ACP do ANSYS e nas análises de esforços obtidas, foi possível identificar as regiões críticas do componente e propor soluções de laminação adequadas. A estrutura apresentou comportamento coerente com os requisitos de resistência e rigidez esperados, não ultrapassando o limite de falha segundo o critério de Tsai-Hill. As camadas de reforço aplicadas nas regiões de maior solicitação se mostraram suficientes para garantir segurança estrutural, evidenciando o potencial da fibra de carbono como material alternativo ao magnésio e ao alumínio.

Do ponto de vista de desempenho, a redução estimada de massa da roda foi significativa: o modelo em fibra de carbono apresentou peso de aproximadamente 1,1 kg, em comparação a 1,6 kg das rodas comerciais em magnésio da marca OZ. Essa diminuição de cerca de 30% da massa em um componente rotativo impacta diretamente a dinâmica veicular, com potencial de melhoria na aceleração, frenagem e resposta de suspensão.

No aspecto econômico, o custo de fabricação do conjunto proposto mostrou-se cerca de 50% inferior ao de rodas comerciais importadas, embora o processo de manufatura em ambiente universitário apresente incertezas, especialmente pela necessidade de controle rigoroso na deposição das fibras e no controle de temperatura durante a cura da resina os resultados obtidos indicam que o projeto é viável tanto técnica quanto financeiramente, além disso, a experiência adquirida durante o desenvolvimento e manufatura contribui para o amadurecimento técnico dos integrantes da equipe, promovendo integração entre teoria e prática que é a finalidade de uma equipe de competição.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a continuidade do projeto com a aplicação de algoritmos de otimização com o objetivo de maior redução da massa.

Posteriormente a validação experimental dos resultados numéricos e a fabricação de um protótipo físico para a realização de ensaios destrutivos e não destrutivos.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, Avelino. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 6. ed. São Paulo: Érica, 2013.
- AMERICAN SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE). **Formula SAE Rules 2025**. Warrendale, PA: SAE International, 2025. Disponível em: <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DownloadDocument.aspx?DocumentID=4bafd174-62da-48b6-b016-589385ca5ae6>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- AMERICAN SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE). **History of Formula SAE**. 2010. Disponível em: <https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- ANSYS INC. **ANSYS Workbench, Release 2021 R2**. Canonsburg, PA: ANSYS Inc., 2021
- BHAGWAT, Pratik Ganesh G. **Design and analysis of a 10” carbon fiber wheel for a Formula SAE racecar**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – University of Texas at Arlington, Texas, 2017. Disponível em: [https://mavmatrix.uta.edu/mechaerospace\\_theses/912](https://mavmatrix.uta.edu/mechaerospace_theses/912). Acesso em: 29 jun. 2025.
- EASY COMPOSITES LTD. **XC110-416g 2x2 twill 6k prepreg carbon fibre**. 2017. Disponível em: <https://www.easycomposites.co.uk/xc110-416g-22-twill-6k-prepreg-carbon-fibre>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- ESTEFAN, Jeff A. **Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies**. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, INCOSE MBSE Initiative, Rev. B, 2008.
- HOOSIER TIRE GP. **Technical Information**. 2025. Disponível em: <https://hoosiertiregp.com/technical-information/>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- HARTY, David. **Tire and Wheel Dynamics for Vehicle Simulation**. SAE Technical Paper, 2004.
- KRUSE, T. et al. **Composite Laminate Analysis Using Finite Element Modelling**. Journal of Composite Materials, v. 55, n. 3, 2021.
- LEAP Australia. **ANSYS Composite PrepPost Tutorials** – YouTube Playlist. YouTube, 2024. Disponível em: [https://youtube.com/playlist?list=PLvsJbyBB0CMd4MRh5\\_BCWxVdnD6jaalQf](https://youtube.com/playlist?list=PLvsJbyBB0CMd4MRh5_BCWxVdnD6jaalQf). Acesso em: 29 jun. 2025.
- MARQUES, Francisco Adson. **Análise experimental de reparos de compósitos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2015.

MILLIKEN, William F.; MILLIKEN, Douglas L. **Race Car Vehicle Dynamics**. Warrendale, PA: SAE International, 1995.

MUELANER, Joe. **Finite Element Analysis of Pneumatic Tire Loading on Wheel**. Engineers Rule, 2020. Disponível em: <https://www.engineersrule.com/finite-element-analysis-of-pneumatic-tire-loading-on-wheel/>. Acesso em: 29 jun. 2025.

OZ RACING. **Formula Student Wheels**. 2025. Disponível em: <https://www.ozracing.com/motorsport/formula-student/wheels>. Acesso em: 29 jun. 2025.

PINHEIRO, David José Gonçalves. Análise Estática e Dinâmica de Painéis Corrugados Construídos em Materiais Compósitos. 2010. **Trabalho de Conclusão de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica)**. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2010.

SAE. **History of Formula SAE**. 2010. Disponível em: <https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72>.

SAE. **Formula SAE Rules**. 2025 Disponível em: <http://fsaeonline.com/cdsweb/gen/DownloadDocument.aspx?DocumentID=d9fa3638-59f8-411c-a487-e27abc2d9022>.

SEWARD, Derek. **Race Car Design**. London: Palgrave, 2022.

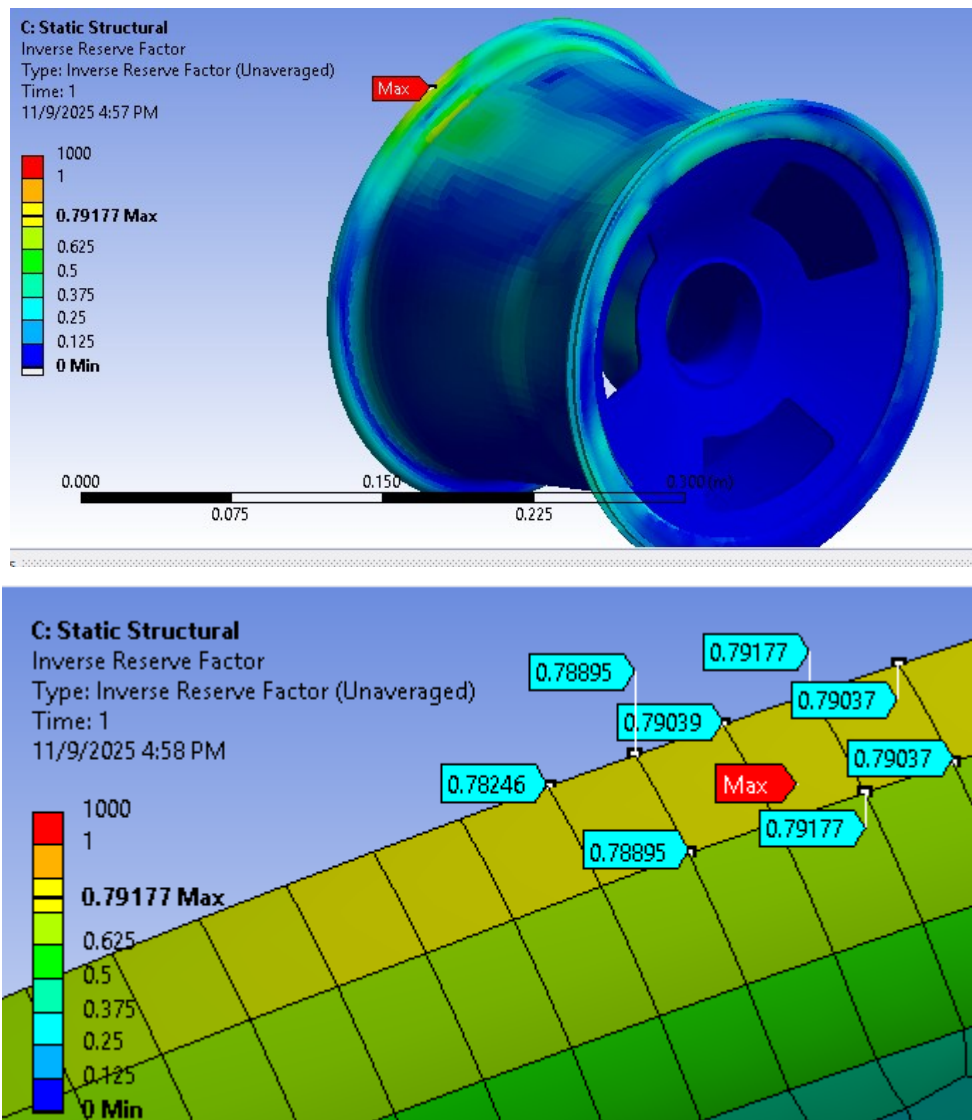
STEARNS, J.; SRIVATSAN, T. S.; GAO, X.; LAM, P. C. **Understanding the Influence of Pressure and Radial Loads on Stress and Displacement Response of a Rotating Body: The Automobile Wheel**. International Journal of Rotating Machinery, 2006.

UYTTERSROT, Bryan. **Analysis of a Carbon Fibre Rim: Student Formula**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Tampere University of Applied Sciences, Tampere, 2015.

## APÊNDICE A - Resultados no momento que a força é aplicada de forma colinear ao raio da roda

Resultado aplicando caso crítico:

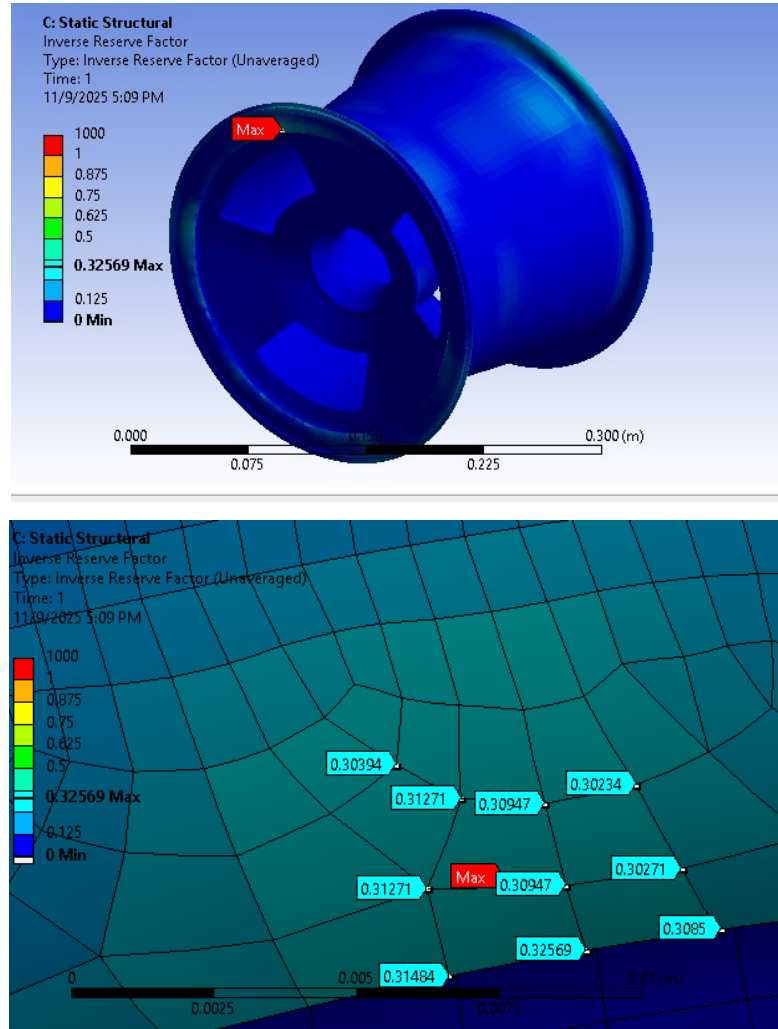
Figura 42 - Caso critico na posição 2



Fonte: Autor (2025)

Resultado em frenagem:

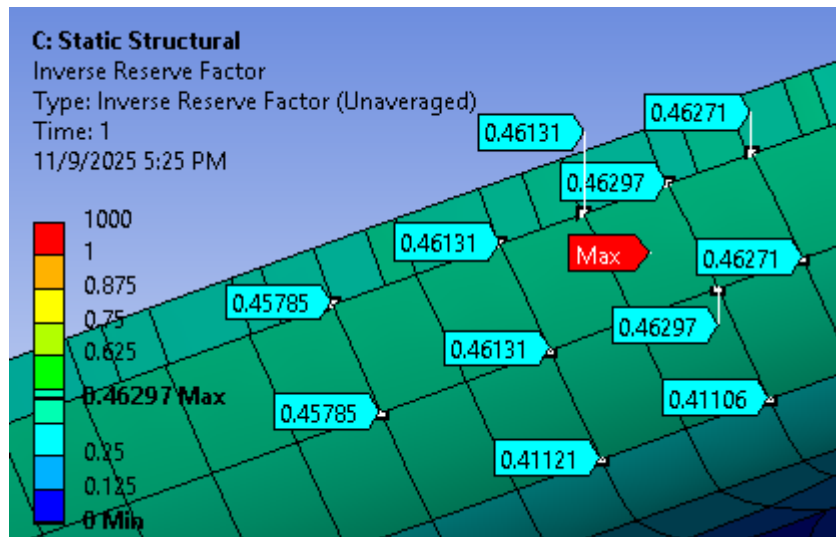
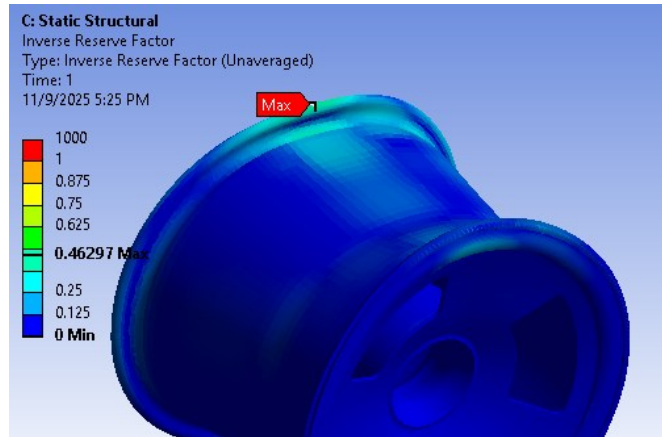
Figura 43 - Frenagem com força aplicada na posição 2



Fonte: Autor (2025)

Resultado em aceleração:

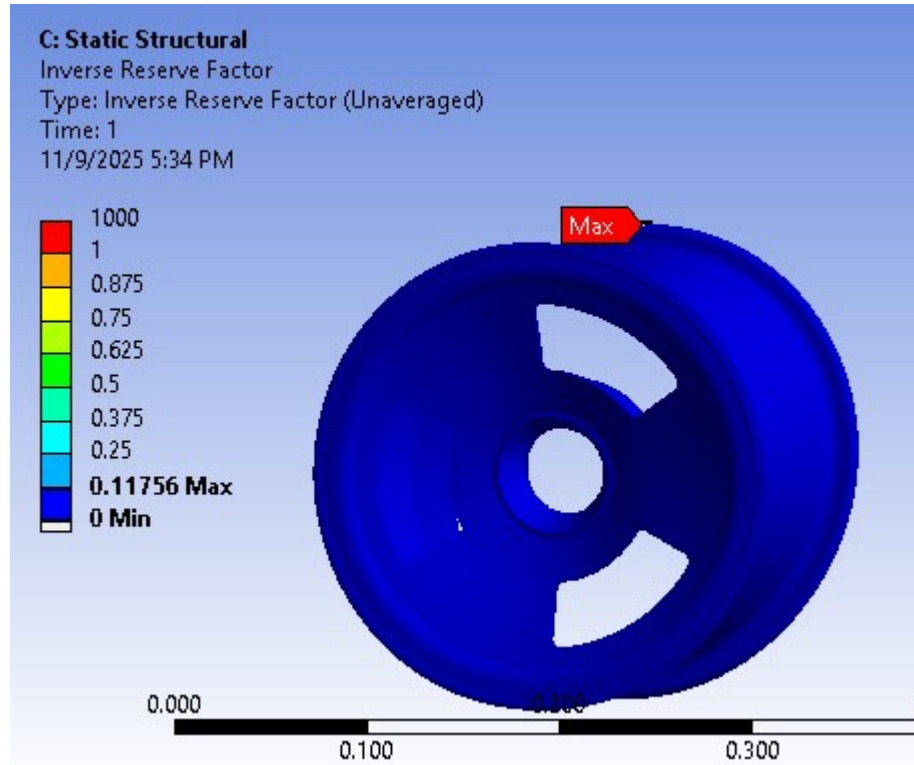
Figura 44 - Aceleração com força aplicada na posição 2



Fonte: Autor (2025)

Resultado caso estático:

Figura 45 - Caso estático com força aplicada na posição 2



Fonte: Autor (2025)