

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

GUILHERME MANFIO JASCHKE

**Método dos elementos finitos aplicado a uma roda fabricada com
material compósito laminado para protótipo de Fórmula SAE**

**SÃO CARLOS
2018**

GUILHERME MANFIO JASCHKE

Método dos elementos finitos aplicado a uma roda fabricada com material compósito laminado para protótipo de Fórmula SAE

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Leite Ribeiro

**SÃO CARLOS
2018**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

J39m Jaschke, Guilherme Manfio
 Método dos elementos finitos aplicado a uma roda
 fabricada com material compósito laminado para
 protótipo de Fórmula SAE / Guilherme Manfio Jaschke;
 orientador Marcelo Leite Ribeiro. São Carlos, 2018.

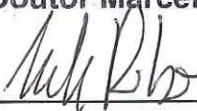
 Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e
 Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
 Universidade de São Paulo, 2018.

 1. Elementos Finitos. 2. Compósitos. 3. Roda. 4.
 Fórmula SAE. I. Título.

Candidato: Guilherme Manfio Jaschke
Título do TCC: Método dos Elementos Finitos aplicado a uma roda fabricada com material compósito laminado para protótipo de Fórmula SAE
Data de defesa: 21/11/2018

Comissão Julgadora	Resultado
Professor Doutor Marcelo Leite Ribeiro (orientador)	Aprovado
Instituição: EESC - SAA	
Professor Titular Jonas de Carvalho	Aprovado.
Instituição: EESC - SEM	
Professor Associado José Ricardo Tarpani	Aprovado
Instituição: EESC - SMM	

Presidente da Banca: **Professor Doutor Marcelo Leite Ribeiro**



(assinatura)

À minha família, pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, aos meus pais, André Luís Jaschke e Olga Liane Zanotto Manfio Jaschke, por me transmitirem a educação e os valores que me guiaram até aqui. E a minha irmã, Gabriela Manfio Jaschke, pelo carinho e pelas conversas descontraídas.

Aos meus avós, Cláudio Artioli Manfio, Diléa Zanotto Manfio e Genny M. F. Jaschke (*in memoriam*), e ao meu tio, Paulo Fernandes Zanotto (Duca), pelo incentivo e pela sabedoria transmitidos a mim.

À Maria Angélica do Carmo Zanotto e ao Laurencio Nascimento de Jesus, por me receberem em São Carlos e por me ajudarem sempre que foi preciso.

Ao Prof. Dr. Marcelo Leite Ribeiro, por dar a oportunidade de eu desenvolver esse projeto e pela orientação.

Aos docentes do Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos, pelo esforço envolvido na criação desse curso e por compartilhar seus conhecimentos com os alunos.

Aos membros da equipe EESC-USP Fórmula SAE, pela ajuda no desenvolvimento do trabalho, pela amizade e pelo conhecimento construído ao longo desses anos.

Aos amigos do Q1, pelas noites de estudo, pelas discussões enriquecedoras e, sobretudo, pela amizade e pelo companheirismo que marcaram a graduação.

Ao governo brasileiro e à Universidade de São Paulo, pelo suporte e pela educação gratuita e de qualidade.

A todos que, direta ou indiretamente, possibilitaram a execução desse trabalho.

RESUMO

JASCHKE, Guilherme Manfio. **Método dos elementos finitos aplicado a uma roda fabricada com material compósito laminado para protótipo de Fórmula SAE.** 2018. 86 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

O desejo das equipes de competição automobilística de ir mais rápido e a pressão imposta sob a indústria automotiva por veículos com baixas emissões de gás carbônico faz da redução de massa um objetivo em comum entre esses dois universos. Há quase 60 anos, na Fórmula 1, se iniciava o uso de materiais compósitos em automóveis e, com o advento de novas tecnologias, esse recurso vem se aproximando do público geral. Seguindo essa linha de pensamento, se propôs o desenvolvimento de uma roda constituída de polímero reforçado com fibras de carbono, para um carro de Formula SAE. Para tanto, foi necessário estudar os esforços os quais o componente será submetido, definir sua geometria e realizar análises estruturais levando em conta diferentes cenários de pilotagem. Essa última etapa foi abordada com mais profundidade ao longo do trabalho, sendo desenvolvida com o auxílio de um software de simulação baseado na teoria dos elementos finitos. O trabalho, além de apresentar soluções que conseguiram satisfazer os objetivos traçados, mostra um pouco do desafio que é lidar com o modelamento de um material não isotrópico aplicado a geometria complexa.

Palavras-chave: Elementos Finitos. Compósitos. Roda. Fórmula SAE.

ABSTRACT

JASCHKE, Guilherme Manfio. **Finite elements method applied to a laminated composite wheel for Formula SAE prototype**. 2018. 86 pp. Term paper (Undergraduate Course of Material and Manufacturing Engineering) - São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2018.

The intent of racing car competition teams to drive faster and faster and the pressure placed on automobile industry in order to build vehicles with low carbon dioxide emission makes mass reduction a common purpose pursued by both staffs. Almost 60 years ago, in Formula 1, one started using composite materials in racing cars, and with the emergence of new technologies, that resource is becoming more and more widespread and well-known. Following that trend, one tried to develop a wheel composed by polymer reinforced with carbon fiber, for a Formula SAE racing car. Therefore, it was necessary to study the amount of stress to which the component will be submitted, to define its geometry and to carry out structural analyses taking into account different driving scenarios. This final phase required a more careful and detailed development by using a simulation software based on the finite element theory. Besides presenting solutions which help one meet the intended purpose of the research, it reveals some of the challenges one has to face when dealing with the modeling of not isotropic material applied to complex geometry.

Keywords: Finite elements. Composite. Wheel. Formula SAE

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução e Projeção do Uso de Fibra de Carbono.....	15
Figura 2 - Designs adotados por equipes de Fórmula SAE; a) Team Bath Racing; b) Team Dealfit; c) AMZ Racing; d) TU Graz Racing Team.....	16
Figura 3 - Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos.....	20
Figura 4 - Representação de compósitos reforçados por fibras a) contínuas e alinhadas; b) descontínuas e alinhadas; c) descontínuas e orientadas aleatoriamente.....	22
Figura 5 - Esquema de um painel-sanduíche com núcleo de colmeia.....	23
Figura 6 - Esquema de construção de um compósito laminado com camadas unidirecionais.....	23
Figura 7 - Sistemas de coordenadas global e local em um compósito laminado.....	25
Figura 8 - Comparação entre os critérios de falha de (a) Tsai-Wu, (b) máxima deformação e (c) Azzi-Tsai-Hill. Dados de tensão biaxial de um compósito de matriz de epóxi reforçado com fibras de carbono (tensões em MPa).....	28
Figura 9 - Painéis sanduíche aplicados em chassis na Fórmula 1; a) Chassi de alumínio “corte e dobra”, anos 70 b) Chassi McLaren MP4/1, 1980, com compósito reforçado por fibras de carbono.....	30
Figura 10 - Exemplo de aplicação de compósitos na Fórmula 1; a) Caixa de transmissão; b) Braços da suspensão; c) Cobertura do motor.....	31
Figura 11 - Processo de análise por elementos finitos.....	32
Figura 12 - Pré-processamento: Exemplos de atividades executadas nessa etapa; a) Modelo geométrico importado; b) Definição de restrições de movimento na base do componente; c) Componente discretizado por vários elementos.....	34
Figura 13 - Pós-processamento: gradientes de tensão de acordo com critério de Von Misses.....	34
Figura 14 - Propriedades do pneu.....	36
Figura 15 - Transferência de carga lateral (a) e longitudinal (b).....	37
Figura 16 - Propriedades do protótipo.....	38
Figura 17 - a) Cubo da roda de alumínio; b) Cubo da roda de compósito laminado.....	39
Figura 18 - Conjunto roda utilizado com o cubo com <i>center-lock</i>	42

Figura 19 - Método de representação de junção por parafuso. (a) Vista isométrica de toda a roda, destacando-se as relações; (b) Detalhe em corte das relações em um dos furos	43
Figura 20 - Aplicação da pressão interna dos pneus.....	44
Figura 21 - Aplicação do carregamento normal.....	45
Figura 22 - Acoplamento dos assentos e ponto de aplicação dos momentos.....	46
Figura 23 - Flange - Curva - Gradientes de tensão em 0°, 7,5° e 15°	47
Figura 24 - Flange - Curva - Gradientes de tensão em 0°, vistas isométricas	48
Figura 25 - Aros - Curva - Gradientes de tensão em 0°, 7,5° e 15°	49
Figura 26 - Aros - Curva - Detalhe da concentração de tensão no furo 7, no aro externo e interno em carregamento a 0°	50
Figura 27 - Roda de alumínio - Curva - Gradientes de deslocamento em 0°, vistas isométricas.....	51
Figura 28 - Roda de alumínio - Curva - Gradientes de deslocamento em 0°, 7,5° e 15°	52
Figura 29 - Flange - Frenagem - Gradientes de tensão em 0°, 7,5° e 15°.....	54
Figura 30 - Flange - Frenagem - Gradientes de tensão em 15°, vistas isométricas e detalhe da região de concentração de tensão.....	55
Figura 31 - Aros - Frenagem - Gradientes de tensão em 0°, 7,5° e 15°.....	56
Figura 32 - Roda de alumínio - Frenagem - Gradientes de deslocamento em 0°, vistas isométricas.....	57
Figura 33 - Flange - Combinado - Gradientes de tensão em 0°, 7,5° e 15°.....	58
Figura 34 - Flange - Combinado - Gradientes de tensão em 0°, vistas isométricas.....	59
Figura 35 - Aros - Combinado - Gradientes de tensão em 0°, 7,5° e 15° e detalhe da região de concentração de tensão.....	60
Figura 36 - Roda de alumínio - Combinado - Gradientes de deslocamento em 0°, 7,5° e 15° e vistas isométricas de 0°	61
Figura 37 - Esquema de uma roda de chapas de aço.....	63
Figura 38 - Componentes do conjunto roda.....	64
Figura 39 - Perfil da roda de acordo com padrão TRA; a) Tire and Rim Association Standard; b) Perfil da roda projetada.....	65
Figura 40 - Conjunto roda do novo design.....	66
Figura 41 - Superfícies acopladas por "TIE"	70

Figura 42 - Superfícies engastadas nos insertos.....	70
Figura 43 - Carregamentos aplicados à roda de compósito laminado. a) Pressão interna do pneu; b) Força normal; c) Forças laterais e longitudinais.....	71
Figura 44 - Secções de laminação e indicações da direção 0°.....	72
Figura 45 - Distribuição e orientação das camadas da roda de compósito laminado.....	73
Figura 46 - Gradientes de tensão S11, S22 e S33 (máximo valor dentre todas as camadas) de RL-1 nas situações de maior impacto.....	74
Figura 47 - Resultado do critério de Hashin para a roda de compósito laminado.....	76
Figura 48 - Gradientes de deslocamento de RL-1 em curva.....	77
Figura 49 - Gradientes de deslocamento em RL-1 nas situações de maior impacto.....	78
Figura 50 - <i>Layups</i> dos modelos de roda de compósito laminado.....	80

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Aros - Curva - Tensão vs. Distância do caminho analisado em 0°	51
Gráfico 2 - Aros - Curva - Deslocamento vs. Distância do caminho analisado em 0°	53
Gráfico 3 - Aros - Frenagem - Deslocamento vs. Distância do caminho analisado em 0°	57
Gráfico 4 - Aros - Combinado - Deslocamento vs. Distância do caminho analisado em 0°	62
Gráfico 5 - Comparação entre os deslocamentos ao longo do perfil do aro da roda de alumínio (AL) e de RL-1	79
Gráfico 6 - Comparação entre a melhora no desempenho e a massa dos modelos	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Carregamentos nas rodas do protótipo em diferentes tipos de pilotagem.....	39
Tabela 2 - Propriedades dos materiais dos aros e flange da roda de alumínio.....	41
Tabela 3 - Propriedades de fibras de reforço para compósitos.....	67
Tabela 4 - Resultados experimentais do prepreg em comparação com valores da literatura.....	68

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo geral.....	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
1.3 Estrutura.....	17
2 REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1 Materiais compósitos	19
2.1.1 Compósitos reforçados por fibras.....	20
2.1.2 Compósitos estruturais.....	22
2.1.3 Leis constitutivas.....	24
2.1.4 Projeto com materiais compósitos laminados.....	26
2.1.5 Compósitos na competição automobilística.....	29
2.2 Método dos elementos finitos	31
3 DEFINIÇÃO DOS CARREGAMENTOS	35
3.1 Carregamentos oriundos da pressão interna do pneu.....	35
3.2 Carregamentos oriundos de condições de pilotagem.....	36
3.3 Carregamentos oriundos da fixação da roda no cubo.....	39
4 ANÁLISE E RESULTADOS DA RODA DE ALUMÍNIO	41
4.1 Geometria e material.....	41
4.2 Modelamento.....	42
4.2.1 Condições de contorno.....	43
4.2.2 Aplicação da pressão interna dos pneus.....	44
4.2.3 Aplicação do carregamento normal (no eixo Z).....	44
4.2.4 Aplicação das forças lateral e longitudinal.....	45
4.3 Resultados e discussão	46
4.3.1 Curva.....	46
4.3.2 Frenagem.....	53
4.3.3 Combinado (Curva + Frenagem).....	58
5 ANÁLISE E RESULTADOS DA RODA DE COMPÓSITO LAMINADO	63

5.1 Definição da geometria	63
5.2 Escolha do material	66
5.3 Modelamento	69
5.3.1 Condições de contorno.....	69
5.3.2 Aplicação dos carregamentos.....	70
5.3.3 Quantidade e orientação das camadas.....	71
5.4 Resultados e discussão	72
5.4.1 Roda de compósito laminado (RL-1).....	73
5.4.2 Otimização da roda de compósito laminado.....	79
6 CONCLUSÃO	82
6.1 Recomendações para futuros trabalhos	83
REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

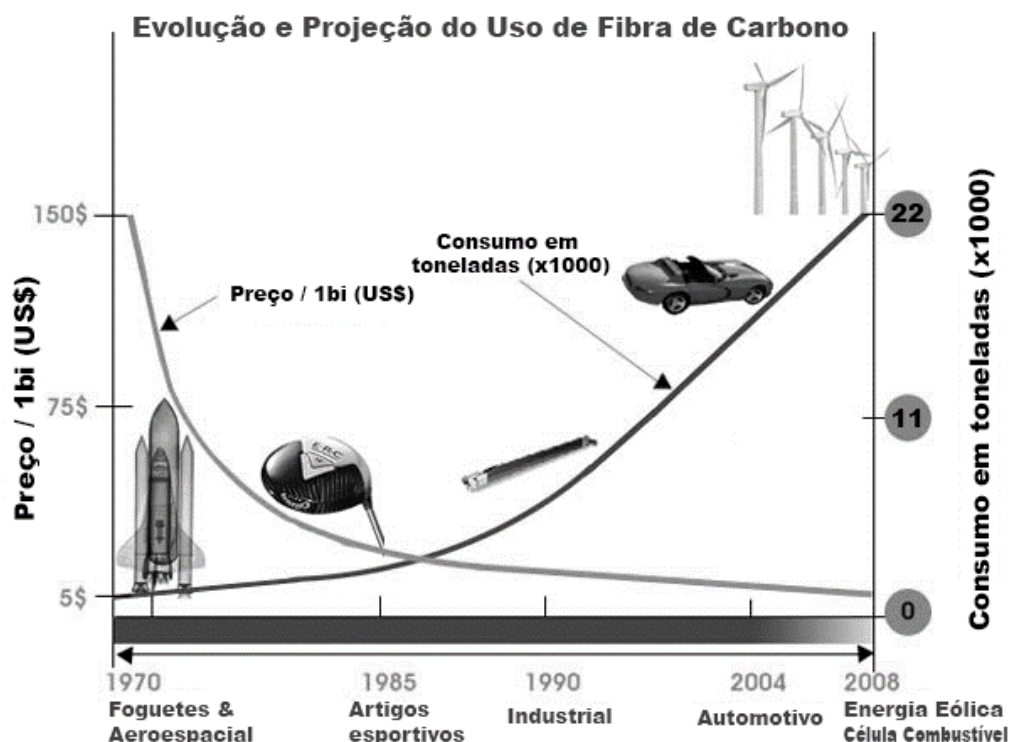
Desde a popularização do automóvel, no início do século passado, a indústria vem se moldando de acordo com os requisitos exigidos pelo consumidor. A crise do petróleo na década de 1970, por exemplo, levou as montadoras a desenvolverem soluções que implicassem no baixo consumo de combustível a fim de conquistar o mercado. A necessidade de aumentar a produção e reduzir custos também mudou os traços da indústria automotiva durante as décadas de 80 e 90 (NYAMWANGE; NYAMWANGE, 2014).

Atualmente, com o consumidor atento às questões ambientais e os órgãos regulamentadores cada vez mais rígidos, os esforços estão direcionados para reduzir as emissões de CO₂. É nesse cenário que o uso de materiais compósitos em carros populares passa a ser um atrativo, uma vez que possuem propriedades mecânicas específicas muito superiores aos materiais metálicos comumente utilizados nesse setor, o que implica a redução de massa do carro como um todo (STEWART, 2010).

Esse cenário também contribui em maior segurança para o condutor. Tendo em vista o princípio da conservação de energia, quanto menor for a massa, menor será a energia a ser absorvida pela estrutura do carro no caso de uma colisão, portanto o risco do condutor se machucar é menor (TOLOUEI; MAHER; TITHERIDGE, 2013).

Em virtude do elevado custo, tanto da matéria prima como dos processos atrelados ao projeto e à manufatura de estruturas em compósitos, sua aplicação no setor automotivo se viu restrita às competições automobilísticas e à indústria de carros de luxo e alta performance. Porém, com o advento de novas tecnologias, como o processo de RTM (Resin Transfer Molding), as mantas com resina pré-impregnada, o método de enrolamento filamentar, seu emprego em larga escala pode ser vislumbrado nos dias de hoje. A Figura 1 contrapõe a produção e o preço da fibra de carbono ao longo dos anos, corroborando o que foi dito anteriormente.

Figura 1 - Evolução e Projeção do Uso de Fibra de Carbono



Fonte: Adaptado de Carbon... (2017).

No âmbito da competição estudantil “Fórmula SAE”, organizada pela SAE (*Society of Automotive Engineers*), a utilização de compósitos pelas equipes tem aumentado cada vez mais ao longo dos anos. Diante do desafio de obter o menor tempo nas provas contra o relógio com a maior eficiência energética possível, o emprego de tal material se justifica, visto que a redução de massa obtida influi diretamente na dinâmica veicular e no consumo de combustível.

Um carro de menor massa obtém maior aceleração em retas, curvas e frenagens (aceleração negativa) quando comparado com um carro de maior massa, se submetidos a forças iguais. Isso se deve à Segunda Lei de Newton, expressa na equação (1). De acordo com Colin Chapman, importante designer da indústria automobilística inglesa, “Adicionar potência faz você ir mais rápido em retas. Subtrair peso faz você ir mais rápido em todos os lugares” (SEWARD, 2014, p. 30).

$$F = m \cdot a \Rightarrow a = \frac{F}{m} \quad (1)$$

F =força; m =massa; a =aceleração.

Com isso em mente, um item que vem sendo analisado em relação à sua geometria e material é a roda que, ligada diretamente ao sistema de suspensão, influi na dirigibilidade do veículo. Inicialmente inspiradas nas rodas de charretes, de madeira e metal, evoluíram para discos planos de aço, passando para formas encontradas hoje, em aço estampado e laminado, até os designs mais avançados, forjadas em ligas de alumínio e ligas de magnésio (STEARNS, 2001).

Atualmente há poucas empresas que desenvolvem projetos de rodas em materiais compósitos laminados para uso geral ou mesmo no universo da competição automotiva, no entanto, entre as equipes de Fórmula SAE, essa é uma proposta que se vê com relativa frequência. Contudo, vale ressaltar que não basta apenas substituir o material do componente, é necessário levar em conta a não isotropia dos compósitos em relação aos esforços envolvidos, do contrário, o projeto não será eficiente. A Figura 2 ilustra alguns designs de equipes europeias.

Figura 2 - Designs adotados por equipes de Fórmula SAE; a) Team Bath Racing; b) Team Dealfit; c) AMZ Racing; d) TU Graz Racing Team



Fonte: Adaptado pelo Autor com base em imagens de domínio público disponíveis na web.

No caso de uma roda, tanto a geometria, quanto os carregamentos aplicados, tornam seu desenvolvimento uma tarefa complexa. Adicionando as propriedades desse material no processo, fica ainda mais difícil prever o comportamento do componente.

Esse é um dos desafios de se trabalhar com compósitos, e a indústria vem trabalhando para superá-lo. Há certa relutância quanto à precisão dos modelos gerados, o que implica um questionamento sobre custo-benefício dessas análises, porém há inúmeros casos de sucesso na indústria aeroespacial, e mesmo na própria indústria automotiva, que provam que se pode confiar nos resultados observados pelas simulações (BRADY; BRADY, 2010).

É nessa direção que este trabalho caminha, propondo um novo design para a roda da equipe EESC-USP Fórmula SAE.

1.1 Objetivo geral

O objetivo dessa monografia é projetar uma nova roda, composta de um polímero reforçado com fibras de carbono, para o protótipo de Fórmula SAE, baseando-se nas informações levantadas pela equipe da Escola de Engenharia de São Carlos. Deseja-se que esse componente seja mais rígido e mais leve que o anterior e sabe-se que ele deve cumprir requisitos tanto estruturais, como requisitos geométricos, trabalhando sem depreciar o funcionamento do conjunto.

Baseado no que foi apresentado até então, com esse novo componente se espera obter um melhor desempenho do protótipo em provas contra o relógio, em consumo de combustível e em segurança para o piloto.

1.2 Objetivos Específicos

Para desenvolver este projeto, identificar os carregamentos relacionados à roda e como aplicá-los é primordial. Deve-se levar em consideração o fato de que o componente está em constante rotação e as diferentes situações de pilotagem do carro.

Como se espera que o novo modelo seja mais rígido que a roda usada atualmente, é necessário criar parâmetros para fazer essa comparação. O que leva ao modelamento da roda de alumínio para extrair dados relacionados ao deslocamento, os quais serão utilizados nas etapas posteriores para nortear o design da nova roda.

Design, este, que se inicia ao definir a geometria e conferir a interferência com os outros componentes que interagem com a roda, com o auxílio de softwares de CAD. E se finaliza com a otimização do modelo no software de CAE, para determinar as quantidades e orientações das camadas do compósito laminado necessárias para suportar os carregamentos e apresentar deslocamentos ao menos equivalentes àqueles obtidos da roda de alumínio.

1.3 Estrutura

A fim de facilitar a leitura e o entendimento, este estudo encontra-se estruturado em seis seções. Na primeira seção são apresentados o panorama no qual está

inserido o tema deste trabalho, os objetivos e a estruturação. Em seguida, se descreve brevemente os materiais compósitos e o método dos elementos finitos, conhecimentos mais abordados durante o projeto.

A terceira seção trata sobre os carregamentos que foram considerados e como foram calculados. Eles são comuns a ambas as rodas, por isso faz sentido expô-los logo antes das seções que as apresentam. Com o propósito de facilitar o entendimento dos modelos e seus respectivos resultados, optou-se por destinar uma seção inteira às informações referentes a cada roda, dessa forma tem-se uma visão de cada modelamento, do começo ao fim.

Encerrando a monografia, há uma seção contendo a conclusão e sugestões para futuros trabalhos nessa área.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nessa seção priorizou-se definir e classificar os materiais compósitos, bem como apresentar sua inserção no universo do automobilismo de competição. Julgou-se necessário, também, definir o método dos elementos finitos (MEF) e explicar, de forma básica e sucinta, seu funcionamento e aplicações.

2.1 Materiais compósitos

Segundo Callister e Rethwisch (2012), um compósito pode ser considerado qualquer material multifásico que apresenta proporções significativas das propriedades de ambos os materiais que o constituem, de modo que o conjunto resulte em melhores propriedades finais.

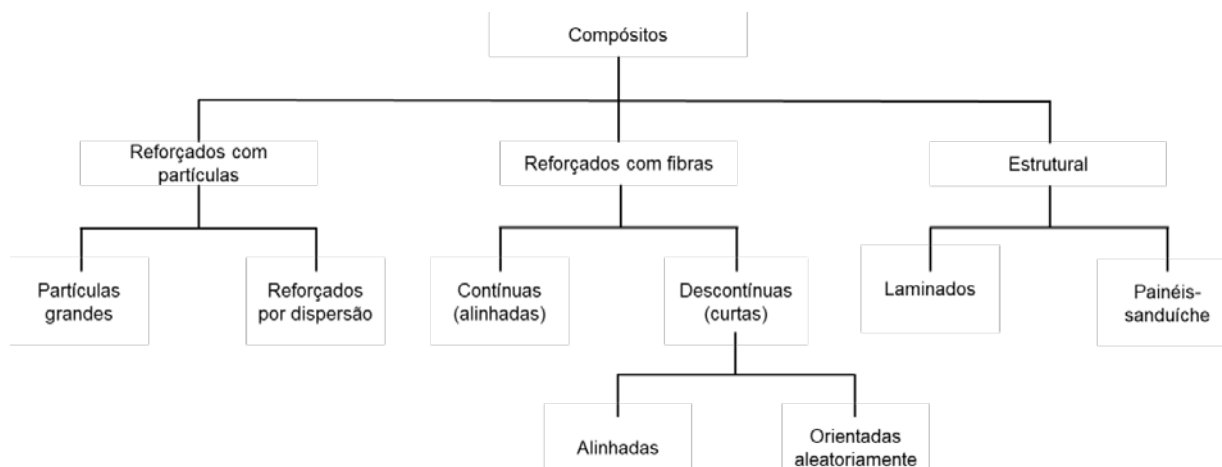
A busca por obter melhores propriedades mecânicas, como rigidez, dureza, resistência à corrosão e a temperaturas elevadas, é a principal motivação para se criar materiais compósitos. Essas propriedades obtidas não são verificadas em nenhuma liga metálica, cerâmica ou material polimérico monolítico convencional.

Os materiais que formam um compósito são denominados matriz (aglomerante ou fase contínua) e reforço (fase dispersa). O primeiro tem como função manter a união dos reforços e transmitir a eles os esforços aplicados, podendo ser metálico, cerâmico ou polimérico. Os reforços, por sua vez, têm a função de suportar os esforços transmitidos pela matriz.

As características das fases presentes refletem diretamente nas propriedades do material final, que também dependem da quantidade relativa de cada fase e da geometria da fase dispersa. Cabe salientar que o termo “geometria” engloba fatores como forma, tamanho, distribuição e orientação dos reforços.

Em razão da grande variedade de combinações que podem existir, Callister e Rethwisch (2012) propõe que esses materiais sejam divididos em três classes, são elas: os compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e compósitos estruturais. Cada uma dessas classes possui ao menos duas subdivisões, como pode-se ver a seguir, na Figura 3.

Figura 3 - Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2012, p. 537).

As duas subdivisões observadas nos compósitos reforçados por partículas se dão tanto pelo tamanho das partículas utilizadas, como pelo mecanismo de aumento de resistência aplicado a cada um. Naqueles reforçados por partículas grandes, a fase dispersa suporta parte da carga transferida pela matriz e restringe o movimento dela nas imediações de cada partícula. São exemplos desse tipo de compósito, o concreto (matriz cerâmica), os cermetos (matriz metálica) e os elastômeros reforçados com negro de fumo (matriz polimérica).

Já nos compósitos reforçados por dispersão, as partículas possuem diâmetros entre 10nm e 100nm e impedem ou dificultam o movimento das discordâncias, ao passo que a matriz suporta a maior parte da carga aplicada. As ligas metálicas reforçadas por dispersão são um exemplo desse tipo de material.

Por sua importância, os compósitos reforçados por fibras e estruturais serão tratados separadamente, com maior profundidade, nas seções subsequentes.

2.1.1 Compósitos reforçados por fibras

Graças à sua alta resistência em relação ao peso, esse tipo de compósito é o mais importante tecnologicamente falando. Com o uso de matrizes e reforços com peso específico cada vez menores, estão sendo produzidos compósitos reforçados por fibras com módulos e resistências específicos, isto é, a razão entre o módulo de elasticidade e o peso e entre o limite de resistência à tração e o peso, excepcionalmente altos (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Há uma variedade de tipos de fibras e matrizes utilizadas no projeto de materiais compósitos. As fibras mais utilizadas como reforço são as de vidro, carbono ou aramida, as quais podem ser combinadas de acordo com a necessidade do projeto. Já as matrizes mais utilizadas são aquelas compostas por resinas epóxi, poliuretano ou vinílicas.

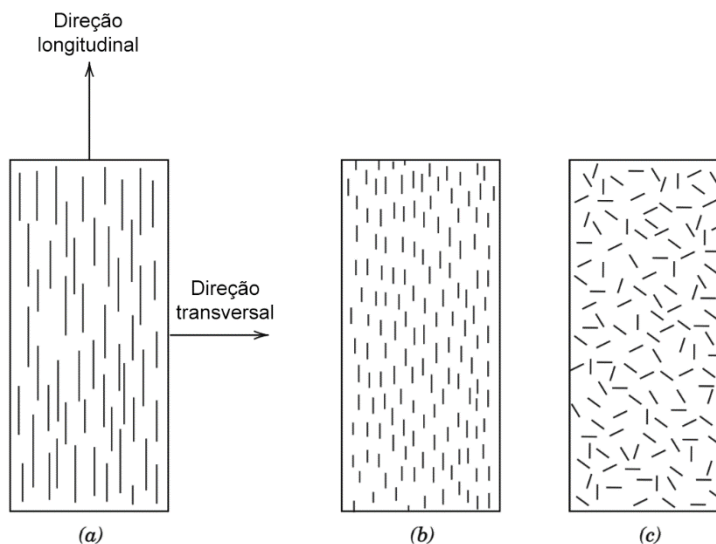
As características de resistência mecânica esperadas nesse tipo de compósito se dão em virtude não só das propriedades da fibra em si, mas também do grau de transferência de carga da matriz para o reforço. Tal fator é influenciado tanto pela qualidade da adesão fibra-matriz como pelo comprimento das fibras.

Sendo assim, para que haja um ganho efetivo em resistência mecânica, um comprimento mínimo de fibra é necessário. Tal dimensão depende do diâmetro e do limite de resistência à tração da fibra e da resistência de ligação entre fibra-matriz. Para fibras de vidro e fibras de carbono esse comprimento crítico, denominado l_c , é na ordem de 1mm.

De forma geral, são classificadas como fibras curtas ou descontínuas aquelas com comprimento menor que $15 \cdot l_c$, ao passo que as maiores que isso são denominadas contínuas. No que se refere aos custos de fabricação, as fibras descontínuas apresentam uma vantagem em relação às contínuas, uma vez que elas podem ser injetadas, extrudadas e moldadas por compressão, resultando numa velocidade de produção mais alta e permitindo que formas mais complexas sejam conformadas.

Além da classificação quanto ao tamanho das fibras, leva-se em conta a orientação das mesmas no material. Elas podem ser alinhadas ou orientadas aleatoriamente, como apontado na Figura 4.

Figura 4 - Representação de compósitos reforçados por fibras a) contínuas e alinhadas; b) descontínuas e alinhadas; c) descontínuas e orientadas aleatoriamente



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2012, p. 543).

Quando se trata de compósitos que são reforçados por fibras alinhadas, aqueles que possuem fibras curtas apresentam menor eficiência de reforço, de 10% a 50% abaixo daquela observada em materiais que empregam fibras longas como reforço. Contudo, quando se empregam fibras curtas com orientação aleatória, observa-se que suas propriedades são anisotrópicas e ainda menores que as encontradas nos materiais supracitados.

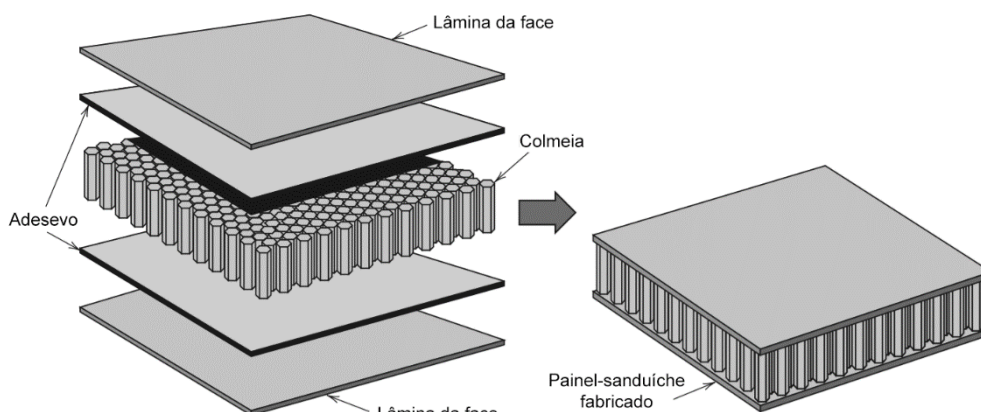
2.1.2 Compósitos estruturais

Como principais exemplos de compósitos estruturais destacam-se os painéis-sanduíche e os laminados, sendo que na constituição de ambos podem aparecer materiais homogêneos, bem como compósitos. Ambos devem suas propriedades em razão tanto dos materiais que os compõem, como da geometria de suas fases, as quais têm um papel estrutural diferenciado.

No caso dos painéis-sanduíche, um material de núcleo é colocado entre duas lâminas de um material mais rígido e resistente, dessa forma o compósito final possui uma resistência maior à flambagem. Ligas de alumínio e plásticos reforçados com fibras são frequentemente utilizados como lâminas e, como materiais de núcleo, as espumas poliméricas rígidas e estruturas em forma de colmeia – estas geralmente em

alumínio ou aramida – são as opções mais utilizadas. São encontrados em tamanha variedade que suas aplicações vão desde telhados e pisos até a indústria aeroespacial. Na Figura 5 pode-se ver um exemplo esquemático de um painel-sanduíche com núcleo de colmeia.

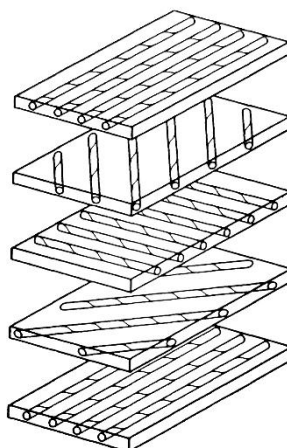
Figura 5 - Esquema de um painel-sanduíche com núcleo de colmeia



Fonte: Adaptado Callister e Rethwisch (2012, p. 564).

Os compósitos laminados, por outro lado, são concebidos pela união de lâminas com resistência elevada em uma ou mais direções. Essa forma de construção permite projetar o material orientando as camadas nas direções mais solicitadas. A Figura 6, a seguir, mostra um exemplo de construção de um laminado.

Figura 6 - Esquema de construção de um compósito laminado com camadas unidirecionais



Fonte: Jones (1999, p. 17)

Matrizes poliméricas que possuem como reforços tecidos feitos com fibras de carbono, vidro ou aramida (ou ainda combinações destes), são comumente utilizadas como constituintes das camadas de um laminado. Atualmente, encontra-se no mercado tramas tecidas de forma a apresentar fibras orientadas em uma, duas ou até três direções, chamados de tecidos unidirecionais e multidirecionais, divididos em bidirecionais e tridimensionais.

2.1.3 Leis constitutivas

De maneira geral, um compósito laminado pode ser considerado um sólido, de forma que, ao receber carregamentos externos, produz tensões internas para equilibrá-los, de acordo com a Teoria da Elasticidade (TITA, 2003). Como cada lâmina que compõe o laminado tem sua própria orientação, essas tensões são representadas por um tensor local segundo a orientação da camada, como o seguinte:

$$\sigma_{Local} = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3 \ \tau_{23} \ \tau_{23} \ \tau_{12}]^T \quad (2)$$

Pela Lei de Hooke Generalizada, esse tensor pode ser relacionado ao tensor de rigidez e ao tensor de deformação locais. O tensor de rigidez (C_{ij}) é composto por 36 termos, contudo eles se reduzem a 9 em razão da simetria da matriz e da característica ortotrópica dos compósitos laminados. Esta última implica a independência entre as tensões normais e as distorções angulares, bem como na independência entre as tensões de cisalhamento e as deformações normais (TITA, 2003). O tensor de deformação pode ser representado, tal como o tensor de tensões, por meio de um vetor com seis componentes. Nesse caso, a relação entre eles se estabelece conforme a equação 3, abaixo, que se pode chamar de equação constitutiva.

$$\sigma_{Local} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3)$$

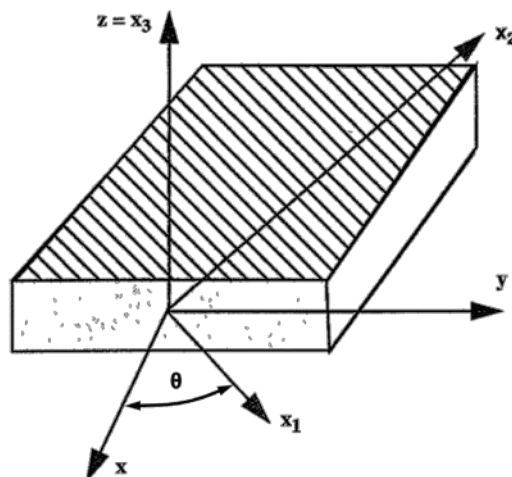
Onde:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{E_{11} \cdot (1 - \nu_{23} \cdot \nu_{32})}{\Delta} & C_{44} &= G_{23} & C_{12} &= \frac{E_{11} \cdot (\nu_{21} - \nu_{31} \cdot \nu_{23})}{\Delta} = \frac{E_{22} \cdot (\nu_{12} - \nu_{13} \cdot \nu_{32})}{\Delta} \\ C_{22} &= \frac{E_{22} \cdot (1 - \nu_{31} \cdot \nu_{13})}{\Delta} & C_{55} &= G_{13} & C_{13} &= \frac{E_{11} \cdot (\nu_{31} - \nu_{21} \cdot \nu_{32})}{\Delta} = \frac{E_{22} \cdot (\nu_{13} - \nu_{21} \cdot \nu_{23})}{\Delta} \\ C_{33} &= \frac{E_{33} \cdot (1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21})}{\Delta} & C_{66} &= G_{12} & C_{23} &= \frac{E_{11} \cdot (\nu_{32} - \nu_{12} \cdot \nu_{31})}{\Delta} = \frac{E_{33} \cdot (\nu_{23} - \nu_{21} \cdot \nu_{13})}{\Delta} \end{aligned}$$

$$\Delta = 1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21} - \nu_{23} \cdot \nu_{32} - \nu_{31} \cdot \nu_{13} - 2 \cdot \nu_{21} \cdot \nu_{32} \cdot \nu_{13}$$

- E₁₁: Módulo de elasticidade na direção da fibra (1);
- E₂₂: Módulo de elasticidade perpendicular à fibra (2);
- E₃₃: Módulo de elasticidade normal ao plano da fibra (3);
- G₁₂: Módulo de cisalhamento no plano 1-2;
- G₁₃: Módulo de cisalhamento no plano 1-3;
- G₂₃: Módulo de cisalhamento no plano 2-3;
- ν_{12} : Coeficiente de Poisson no plano 1-2;
- ν_{13} : Coeficiente de Poisson no plano 1-3;
- ν_{23} : Coeficiente de Poisson no plano 2-3.

Figura 7 - Sistemas de coordenadas global e local em um compósito laminado



Fonte: Adaptado de Herakovich (1997, p.51).

Como os tensores estão atrelados à orientação da camada que eles representam, é preciso fazer uma transformação de coordenadas para conseguir

extrair os tensores nas coordenadas globais. A matriz de transformação se dá no seguinte formato, em que theta é o ângulo entre o sistema de coordenadas global e o sistema de coordenadas local, conforme a Figura 7.

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & 0 & 0 & 2.m.n \\ n^2 & m^2 & 0 & 0 & 0 & -2.m.n \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & -n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n & m & 0 \\ -m.n & m.n & 0 & 0 & 0 & (m^2 - n^2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Onde: $m=\cos(\theta)$; $n=\sin(\theta)$.

Então, a matriz rigidez global $[\bar{C}]$ é obtida, e com ela, calcula-se o tensor global de tensões, conforme as operações 5 e 6, a seguir:

$$[\bar{C}] = [T]^{-1} \cdot [C] \cdot [T] \quad (5) \quad \sigma_{Global} = [\bar{C}] \cdot \varepsilon_{Global} \quad (6)$$

A partir da mesma matriz transformação também é possível correlacionar as tensões locais às tensões globais, de acordo com a equação 7, abaixo.

$$\sigma_{Local} = [T] \cdot \sigma_{Global} \quad (7)$$

A teoria apresentada permite que se analise as tensões e deformações em cada lâmina do compósito. O que se relaciona diretamente com o assunto tratado na seção seguinte: o projeto com materiais compósitos laminados.

2.1.4 Projeto com materiais compósitos laminados

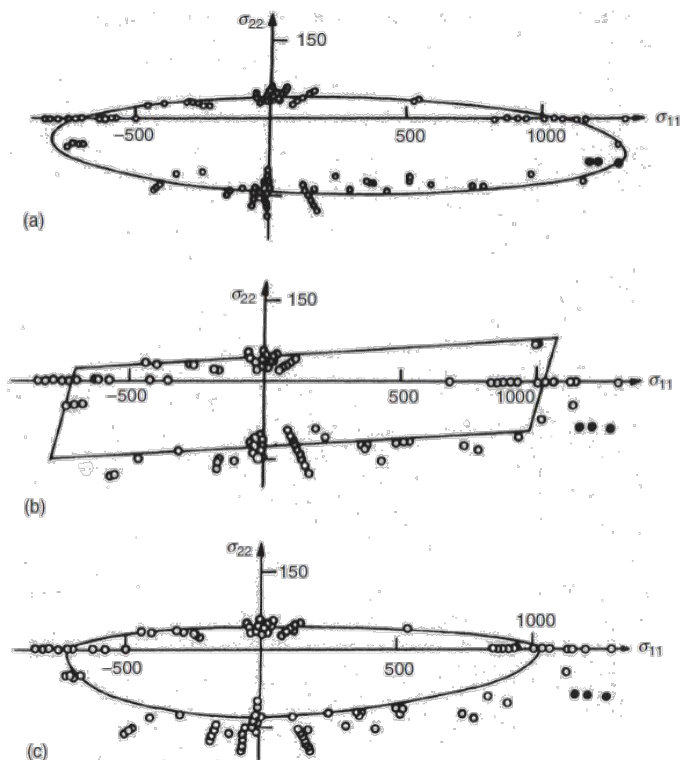
O projeto, seja de um componente seja de uma estrutura de material compósito, deve cumprir os mesmos requisitos daquele feito com um material metálico, por exemplo, isto é: suportar a carga máxima de projeto em teste estático; que a vida em fadiga deve ser igual ou maior à vida estipulada para o componente; que as deformações geradas pela aplicação da carga máxima e pelas cargas cíclicas não interfiram no funcionamento do conjunto do qual ele faz parte (MALLICK, 2008).

De forma resumida, o projeto é desenvolvido de modo a evitar a falha do componente durante o tempo que ele trabalhará. Sendo assim, deve-se atentar para a definição de falha quando se utiliza materiais compósitos.

No caso de compósitos laminados pode-se considerar que a peça falhou a partir do momento que a primeira camada falha ou apenas quando a última camada falha. O que determina qual critério deve ser escolhido é a aplicação do componente, visto que há situações em que a diferença de tensão entre a ruptura da primeira camada e da última é mínima, levando ao colapso, e há outras em que essa diferença é tal que o componente ainda é apto para desempenhar suas funções mesmo com o rompimento de uma de suas camadas (MALLICK, 2008).

Há diferentes critérios de falhas que podem ser utilizados para prever a resistência de compósitos laminados em análises estáticas. É necessário saber as tensões presentes em cada lâmina e aplicar o método escolhido em cada uma delas. São critérios de falha: o critério da máxima tensão, o critério da máxima deformação, a teoria de Azzi-Tsai-Hill e a teoria de Tsai-Wu. A Figura 8, abaixo, faz uma comparação entre os três últimos métodos citados. Nota-se que a teoria de Tsai-Wu se adequa melhor aos dados, visto que ela considera a interação entre as tensões na direção transversal e longitudinal na forma de um coeficiente, o qual determina a inclinação e a distância entre os eixos da elipse.

Figura 8 - Comparação entre os critérios de falha de (a) Tsai-Wu, (b) máxima deformação e (c) Azzi-Tsai-Hill. Dados de tensão biaxial de um compósito de matriz de epóxi reforçado com fibras de carbono (tensões em MPa)



Fonte: Mallick (2008, p. 480).

Há ainda critérios da chamada segunda geração, os quais, além de englobarem as teorias dos critérios passados, conseguem determinar o modo de falha (se foi uma falha na fibra ou na matriz, por exemplo) e possuem modelos de progressão de danos, degradando a rigidez e resistência do laminado após a primeira falha. Um exemplo é o critério de falha de Hashin, o qual será utilizado nas etapas de modelamento deste trabalho (DUARTE; SÁEZ; SILVESTRE, 2017).

O referido critério aborda quatro modos de falha: (F_f^t) falha por ruptura da fibra em tração; (F_f^c) falha por flambagem da fibra em compressão; (F_m^t) falha por fratura da matriz em tração e (F_m^c) falha por esmagamento da matriz em compressão. Para cada um deles há uma equação cujos resultados devem ser menores que 1 para satisfazer ao critério de falha de Hashin. Essas equações estão enumeradas de 8 a 11, a seguir:

$$F_f^t = \left(\frac{\sigma_{11}}{S_{t1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{s12}}\right)^2 \leq 1 \quad (8) \quad F_f^c = \left(\frac{\sigma_{11}}{S_{c1}}\right)^2 \leq 1 \quad (9)$$

$$F_m^t = \left(\frac{\sigma_{22}}{S_{t2}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{s12}}\right)^2 \leq 1 \quad (10) \quad F_m^c = \left(\frac{\sigma_{22}}{2.S_{t23}}\right)^2 + \left[\left(\frac{S_{c2}}{2.S_{s23}}\right)^2 - 1\right] \cdot \frac{\sigma_{22}}{S_{c2}} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{s12}}\right)^2 \leq 1 \quad (11)$$

Onde:

σ_{11} : Tensão na direção da fibra; σ_{22} : Tensão na perpendicular à fibra; σ_{12} : Tensão no plano 1-2;
 S_{t1} : Resistência à tração na direção da fibra; S_{t2} : Resistência à tração perpendicular à fibra;
 S_{c1} : Resistência à compressão na direção da fibra; S_{c2} : Resistência à compressão perpendicular à fibra;
 S_{s12} : Resistência ao cisalhamento no plano 1-2; S_{s23} : Resistência ao cisalhamento no plano 2-3.

Quando se fala em fadiga, os compósitos laminados se comportam de maneira bem diferente dos metais. Não ocorre uma falha catastrófica resultante do crescimento de trincas, mas sim um acúmulo de danos que, gradualmente, faz com que o material vá perdendo sua rigidez, acarretando em maiores deformações ou vibrações. Por isso, definir a vida em fadiga de um componente assim não é uma tarefa simples, visto que o critério usado para determinar a falha é um tanto subjetivo.

Como o emprego desse tipo de material é relativamente recente quando comparado à utilização de metais, polímeros e cerâmicas, não se desenvolveu, até o momento, uma metodologia eficaz para a previsão da vida em fadiga de compósitos laminados, ou ainda um consenso no que diz respeito ao conceito de falha estrutural de componentes que utilizam esse material. Sendo assim, os projetistas se baseiam em métodos empíricos para desenvolver seus projetos, construindo protótipos e realizando testes (MALLICK, 2008).

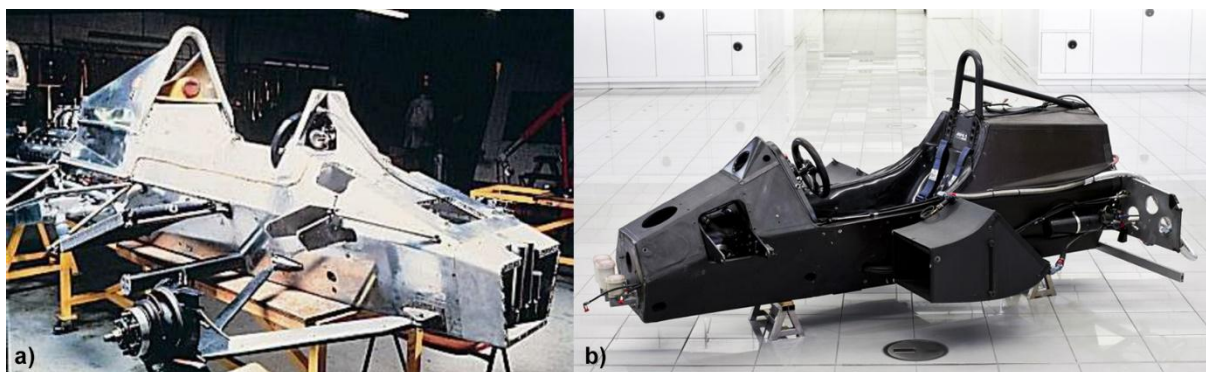
2.1.5 Compósitos na competição automobilística

No universo da competição automobilística, a Fórmula 1 ocupa o nível mais elevado no que diz respeito a tecnologia e investimento, sendo assim, natural assumir que foi nesse meio que se iniciou a utilização de materiais compósitos em automóveis.

Foi no início da década de 1960, nos chassis, que se empregou pela primeira vez materiais compósitos na Fórmula 1. O protótipo em questão nunca chegou a competir, seu chassi era composto por estruturas sanduíche, com lâminas externas e núcleo de colmeia, ambos de alumínio, e lâmina interna de polímeros reforçados com fibras de vidro. Essa concepção, no entanto, foi revolucionária, se tornando a base para o projeto dos chassis nos 20 anos que se seguiram (SAVAGE, 2008).

Nos anos 70, o uso de estruturas sanduíche em alumínio já era bastante difundido. Adotava-se um método de corte e dobra das lâminas de alumínio e posterior colagem feita com filmes adesivos de epóxi. Já no início dos anos 80, o primeiro chassi feito com compósitos reforçados com fibras de carbono foi introduzido pela McLaren. Esse modelo era feito em três etapas, primeiro a lâmina interna era curada, seguido pela adesão da estrutura de colmeia e, por último, a lâmina externa era laminada e curada. A Figura 9 mostra um chassi em alumínio, manufaturado na década de 70 em contraste com o primeiro chassi em compósito reforçado com fibras de carbono, de 1980 (SAVAGE, 2008).

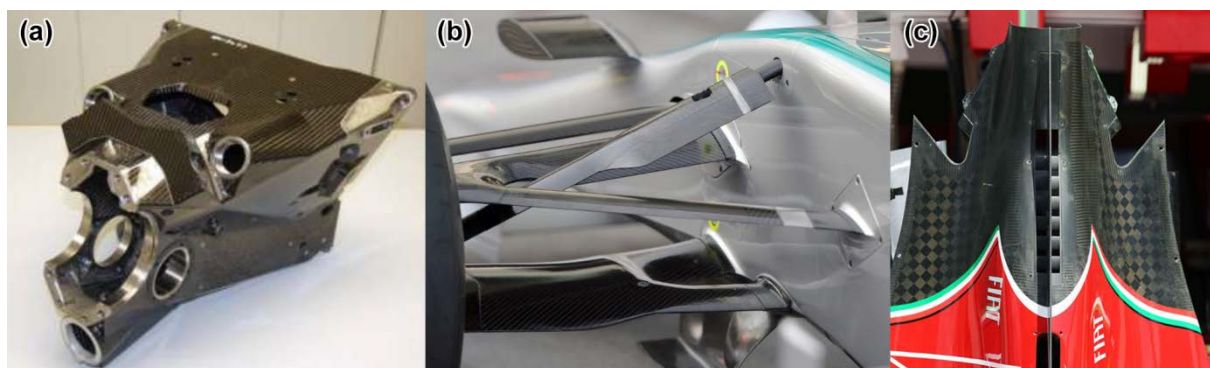
Figura 9 - Painéis sanduíche aplicados em chassis na Fórmula 1; a) Chassi de alumínio “corte e dobra”, anos 70 b) Chassi McLaren MP4/1, 1980, com compósito reforçado por fibras de carbono



Fonte: a) Adaptado de Savage (2008); b) #BLACKSWANMOMENTS... (2017).

O que se sucedeu foi a implementação de compósitos em outros componentes sempre que seu emprego implicasse vantagens mecânicas ou redução da complexidade do projeto. Como se pode ver na Figura 10, braços de suspensão, caixas da transmissão, carenagens, e muitas outras peças passaram a ser manufaturadas em compósitos desde então. De acordo com Savage (2008), o uso desse tipo de material representava cerca de 85% do volume de um carro de Fórmula 1, em 2008, que refletia em menos de 25% da massa total.

Figura 10 - Exemplo de aplicação de compósitos na Fórmula 1; a) Caixa de transmissão; b) Braços da suspensão; c) Cobertura do motor



Fonte: a) Adaptado de Savage (2008); b) Suspension... (2017); b) Ferrari... (2014).

Novos materiais, métodos de manufatura e ferramentas de auxílio ao projeto expandiram a utilização dos materiais compósitos nos carros da Fórmula 1. A tendência é que essas tecnologias continuem crescendo, o que indica que serão vistos ainda mais componentes manufaturados com esse tipo de material.

2.2 Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos é largamente utilizado para solucionar problemas de engenharia. Foi concebido inicialmente para uso em análises estruturais, mas logo se percebeu que essa ferramenta poderia ser usada em diversos outros tipos de problemas, como transferência de calor e dinâmica de fluídos.

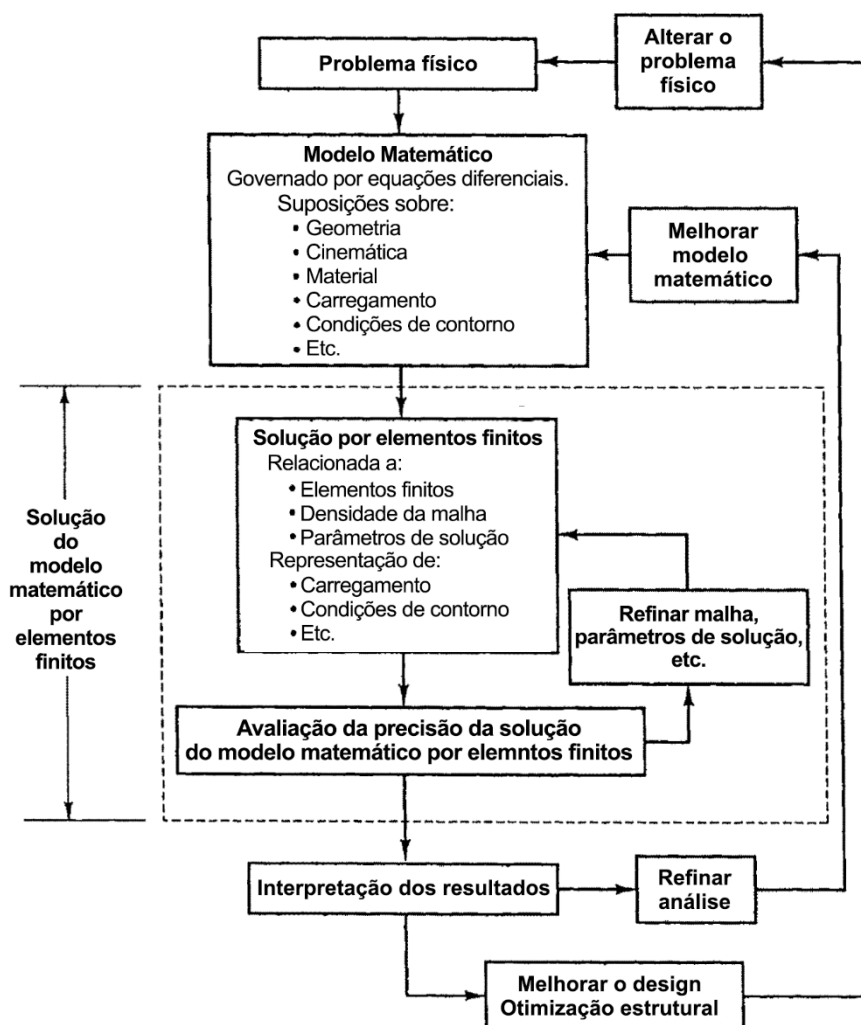
Sua origem se deu graças ao advento da computação digital, que tornou possível criar e solucionar o conjunto de equações necessárias para a solução do problema geral de maneira eficiente (BATHE, 2014).

No caso do projeto de um componente, por exemplo, há várias etapas, como a de verificação do desempenho estrutural. Essa verificação pode ser concluída mediante observações analíticas, mas dependendo da complexidade do componente a aplicação de um modelo matemático estrutural pode não ser viável. É nesse contexto que a adoção de métodos numéricos se faz necessária.

Deve-se, então, propor um modelo matemático que represente a situação considerada, de forma que suposições são tomadas para sua confecção e são elas que vão reger as equações diferenciais que o compõem. A solução obtida é reflexo daquilo que está presente no modelo, visto que o método dos elementos finitos é apenas um procedimento numérico.

Se o resultado não corresponde ao esperado, a solução numérica deve ser repetida aplicando critérios de resolução mais refinados, como reduzir o tamanho da malha, até que o resultado seja satisfatório. Muito provavelmente será necessário fazer outras suposições, o que implica novos modelos matemáticos e soluções numéricas, conforme indica o fluxograma expresso na Figura 11 (BATHE, 2014). Mas é importante ter em mente que é impossível criar um modelo matemático que represente de forma exata o problema analisado, sendo assim, o ponto-chave é construir um modelo que seja eficiente e confiável, ou seja, que ele entregue um resultado suficientemente preciso e próximo do obtido por meio de um modelo mais complexo, porém com menor custo.

Figura 11 - Processo de análise por elementos finitos



Fonte: Adaptado de Bathe (2014, p. 3).

Por meio do Método dos Elementos Finitos a estrutura é dividida em elementos de geometria simplificada, ligados por nós, formando uma malha. Cada elemento representa parte da rigidez do corpo, expressa numa matriz de rigidez do elemento. Com a superposição ou soma das matrizes de rigidez de cada elemento, determina-se a rigidez do corpo $[K]$. Analogamente se obtém o vetor de força global $\{F\}$ e, de acordo com a Lei de Hooke, tem-se a equação (12), abaixo.

$$[K]\{U\} = \{F\} \quad (12)$$

O vetor $\{U\}$, da equação (2), é o vetor de incógnitas, contendo os deslocamentos dos nós da malha. Com o emprego de métodos numéricos, é possível chegar aos valores dos deslocamentos contidos nesse vetor e, com base neles, às deformações e tensões. A essa estratégia se dá o nome de método dos deslocamentos.

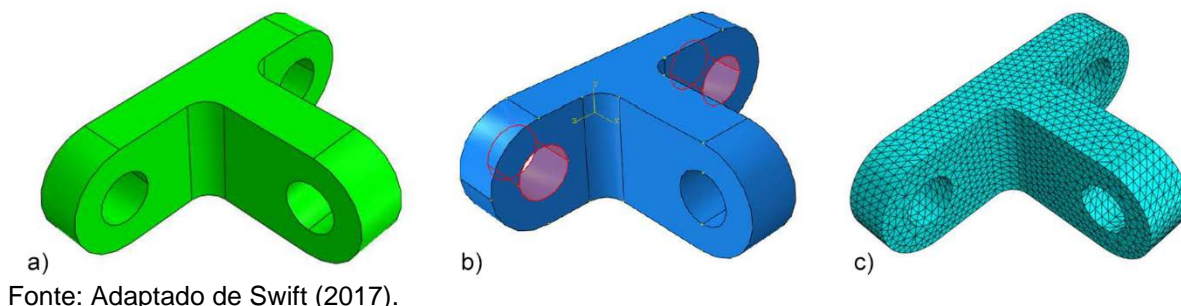
Outro método, chamado método das forças, consiste em inverter a matriz de rigidez $[K]$, resultando na matriz de flexibilidade $[C]$. Com ela, reescreve-se a equação (12), da Lei de Hooke, obtendo-se a equação (13). Valendo-se dela, calculam-se aos valores contidos no vetor $\{U\}$ e, conseqüentemente, as tensões e deformações (BITTENCOURT, 2010).

$$[C]\{F\} = \{U\} \quad (13)$$

O processo como um todo pode ser dividido em três etapas, a saber:

Pré-processamento: nesse passo tudo é preparado para que se consiga a melhor solução possível, com o menor custo computacional. São definidas as hipóteses, as condições de contorno e os carregamentos envolvidos no problema, assim como os elementos, as propriedades do material e da geometria do modelo. Outro item importante determinado nesse passo é a função de interpolação, a qual está diretamente relacionada com a precisão do modelamento. A Figura 12, a seguir, mostra algumas das tarefas citadas acima.

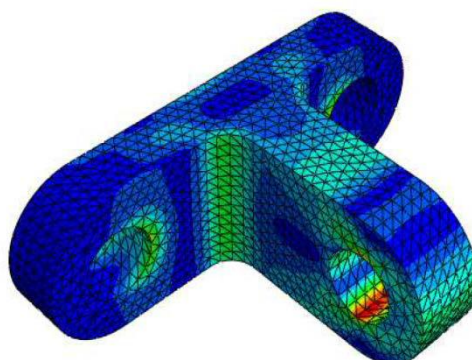
Figura 12 - Pré-processamento: Exemplos de atividades executadas nessa etapa; a) Modelo geométrico importado; b) Definição de restrições de movimento na base do componente; c) Componente discretizado por vários elementos



Solução: durante essa etapa são executados os cálculos para a resolução do problema, de acordo com o método de solução (como já foi mencionado anteriormente) e com a função de interpolação selecionada. Vale salientar que o ponto de partida para essa resolução é o modelo que foi gerado no pré-processamento, logo, o rigor das respostas depende da perícia do profissional responsável pelo modelamento.

Pós-processamento: o que resta a fazer nesse último passo é determinar a forma a qual será visualizada a solução obtida. Depende das necessidades do engenheiro que está desenvolvendo a simulação quais dados serão mostrados e como. Pode-se visualizar gradientes de temperatura, deslocamentos nodais, deformações da geometria, gradientes de tensão (como ilustra a Figura 13, entre outros) (TITA, 1999).

Figura 13 - Pós-processamento: gradientes de tensão de acordo com critério de Von Misses



Fonte: Adaptado de Swift (2017).

3 DEFINIÇÃO DOS CARREGAMENTOS

Como mencionado, no projeto de um componente, deve-se considerar os tipos de carregamentos aplicados, se são estáticos ou dinâmicos, e analisar cada cenário. Entretanto, para uma roda, essa definição é mais complexa, visto que ela está sujeita à rotação. Isso implica que cada ponto da estrutura terá uma tensão que varia de acordo com a posição angular desse ponto em relação à região de contato do pneu com a via (MORAES, 2007).

Tendo isso em mente, propôs-se uma abordagem que leva em conta a rotação da roda, considerando o carregamento estático, analisado em três posições diferentes para a roda atual - 0° , $7,5^\circ$ e 15° - e em outras três posições equivalentes para o novo modelo - 0° , 30° e 60° . Fez-se isso pois, em cada uma das posições citadas, para ambos os modelos, forças estão atuando alinhadas com o raio da roda, numa posição intermediária entre dois raios e no ponto médio entre dois raios, respectivamente.

Em razão da natureza cíclica dos carregamentos atuantes na roda, é inegável que este componente esteja sujeito à fadiga, tanto que esse é o aspecto mais estudado no projeto de uma roda automotiva tradicional. Entretanto, como foi explicado na seção 2.1.4, o estudo da vida em fadiga de um componente feito de compósito laminado ainda é um desafio entre os projetistas e se prova um assunto demasiado extenso para ser tratado nessa monografia, portanto apenas análises estáticas serão desenvolvidas.

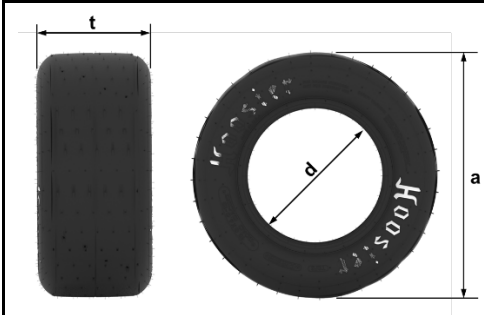
Os carregamentos que foram considerados são oriundos da pressão do pneu e das condições de pilotagem às quais o veículo é sujeito. A seguir cada caso será explicado.

3.1 Carregamentos oriundos da pressão interna do pneu

Como o pneu é pressurizado e está em contato direto com a roda, toda superfície externa do aro, localizada entre os assentos dos pneus, está sujeita à pressão interna do pneu.

As propriedades do pneu utilizado pela equipe estão descritas na Figura 14.

Figura 14 - Propriedades do pneu



Marca/Modelo	t	d	a	Pressão máx. de inflação
Hoosier/41100	6"	10"	18"	40 psi
	152,4 [mm]	254 [mm]	457,2 [mm]	275,8 kPa

Fonte: O Autor.

Assumindo a máxima pressão interna indicada pelo fabricante do pneu, expressa na Figura 14, definiu-se que esse carregamento será o seguinte:

- Pressão interna = 275,8 kPa

3.2 Carregamentos oriundos de condições de pilotagem

Nas provas dinâmicas de uma competição de Fórmula SAE o carro passa por situações de aceleração, frenagem, curva, ou ainda combinações delas, como no caso de uma curva com frenagem ou uma curva com aceleração.

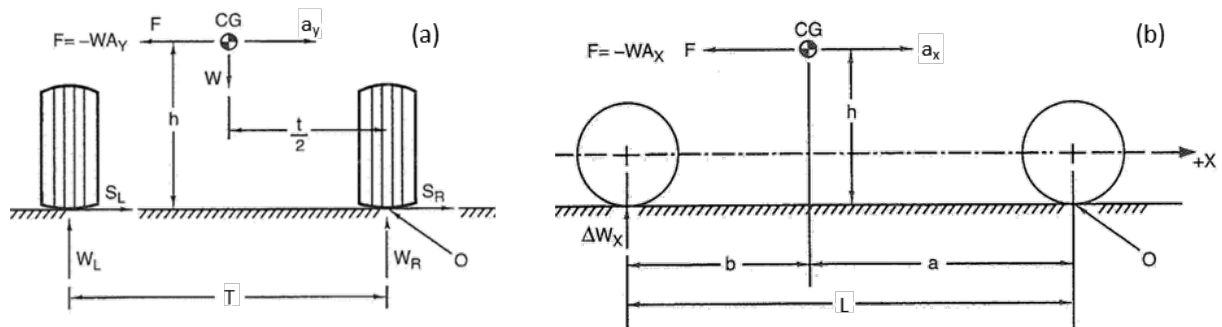
Para acelerar, frear ou mudar de direção, o carro deve estar sujeito a uma força, a qual ocorre na interface pneu-pavimento. Numa frenagem brusca em que o carro derrapa, por exemplo, o coeficiente de atrito que era estático, passa a ser dinâmico (menor), logo, pode-se inferir que as forças na interface pneu-pavimento atingem seu máximo no limiar da perda de aderência, sendo nas situações de aderência que o piloto tem total controle sobre o carro (SEWARD, 2014).

Durante testes, e mesmo durante a competição, foram captadas, pelos acelerômetros do carro, acelerações laterais e longitudinais. Considerando apenas situações em que não houve perda de aderência, fez-se um levantamento das acelerações de maior magnitude geradas em cada uma das situações citadas.

Durante uma curva, por exemplo, o carro sofre a ação de uma força inercial, a força centrífuga, de sentido oposto à aceleração lateral. No caso de uma curva à direita, como ilustrado na Figura 15 (a), as forças geradas nos pneus (S_L e S_R) resultam na aceleração lateral (a_Y). Se feito o balanço dos momentos no plano YZ, tendo o ponto O como referência, é possível calcular a reação normal no lado

esquerdo do carro (W_L), que, se subtraída do peso do carro naquele lado, resulta na transferência de carga lateral (ΔW_y), segundo a equação (14). De forma análoga, na frenagem ou na aceleração, ocorre uma força inercial contrária à aceleração longitudinal (a_x). A Figura 15 (b) representa o carro em apenas dois eixos sob o efeito de uma aceleração positiva, feito o balanço dos momentos no plano XZ, tomando o ponto O como referência, é possível deduzir a expressão (15), para a transferência de carga longitudinal, ΔW_x (MILLIKEN; MILLIKEN, 1995).

Figura 15 - Transferência de carga lateral (a) e longitudinal (b)



Fonte: Adaptado de Milliken e Milliken (1995, p. 678; p. 685).

Onde: W : peso total do carro;
 W_L : peso no lado esquerdo do carro;
 W_R : peso no lado direito do carro;
 S_L : força lateral no pneu esquerdo;
 S_R : força lateral no pneu direito;
 CG: centro de gravidade.

L : distância entre-eixos;
 T : bitola;
 h : altura do CG;
 a : distância do CG ao eixo dianteiro;
 b : distância do CG ao eixo traseiro;

$$\Delta W_y = \pm \frac{W \cdot h \cdot a_y}{T} \quad (14)$$

$$\Delta W_x = \pm \frac{W \cdot h \cdot a_x}{L} \quad (15)$$

Como o carro possui dispositivos aerodinâmicos (asa dianteira e traseira e assoalho difusor), os quais produzem arrasto e força descendente, essa última a mais desejada, uma vez que ela é transmitida ao solo pelos pneus, aumentando a força normal que age sobre eles, e, portanto, aumentando a força de atrito entre os pneus e o solo. A força descendente pode ser calculada segundo a equação (16), a seguir.

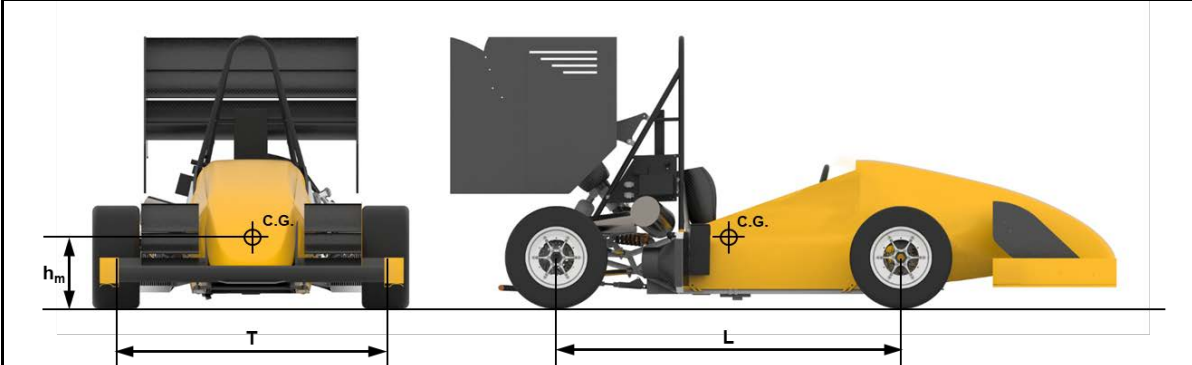
$$F_L = \frac{C_L \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S}{2} \quad (16)$$

Onde: F_L : força de lift; S : área frontal do dispositivo.
 C_L : coeficiente de lift; v : velocidade do ar;
 ρ : densidade do ar;

Sabendo como calcular as transferências de carga em cada situação e a força aerodinâmica, é possível determinar a carga no eixo Z de cada pneu. Seguindo a distribuição da carga em Z em cada pneu, se determinam as forças laterais e longitudinais em cada um deles. De posse das acelerações, as forças são calculadas de acordo com a Segunda Lei de Newton, a qual diz que a força é diretamente proporcional à massa multiplicada pela aceleração que atua sobre ela.

Considerando os dados do protótipo, expressos na Figura 16, e os dados obtidos em pista, calculou-se os esforços de acordo com o raciocínio explicado até então. Os resultados desses cálculos estão organizados na Tabela 1, de modo que é possível notar alguns deles destacados em negrito: serão eles os utilizados na etapa de modelamento, visto que são os maiores esforços registrados em cada caso.

Figura 16 - Propriedades do protótipo



Massa (com piloto)	255 kg
Distância entre eixos (L)	1530 mm
Bitola (T)	1200 mm
Posição vertical do centro de gravidade (h)	297 mm
Distribuição de peso	50% traseira / 50% dianteira
C_L	-1,5
S	1,59 m ²
Distribuição da força aerodinâmica	50% traseira / 50% dianteira

Fonte: O Autor.

Tabela 1 - Carregamentos nas rodas do protótipo em diferentes tipos de pilotagem

	FRENAGEM				CURVA				COMBINADO			
A_x [g]	1,3				0				0,92			
A_y [g]	0				2				1,58			
v [km/h]	80				80				80			
F_z [N]	FL	1121,37	1121,37	FR	FL	1424,87	186,60	FR	FL	1518,22	539,99	FR
	RL	490,10	490,10	RR	RL	1424,87	186,60	RR	RL	1071,48	93,25	RR
F_y [N]	FL	0,00	0,00	FR	FL	2211,88	289,67	FR	FL	1861,87	662,22	FR
	RL	0,00	0,00	RR	RL	2211,88	289,67	RR	RL	1314,00	114,35	RR
F_x [N]	FL	1131,49	1131,49	FR	FL	0,00	0,00	FR	FL	1084,13	385,60	FR
	RL	494,52	494,52	RR	RL	0,00	0,00	RR	RL	765,12	66,58	RR

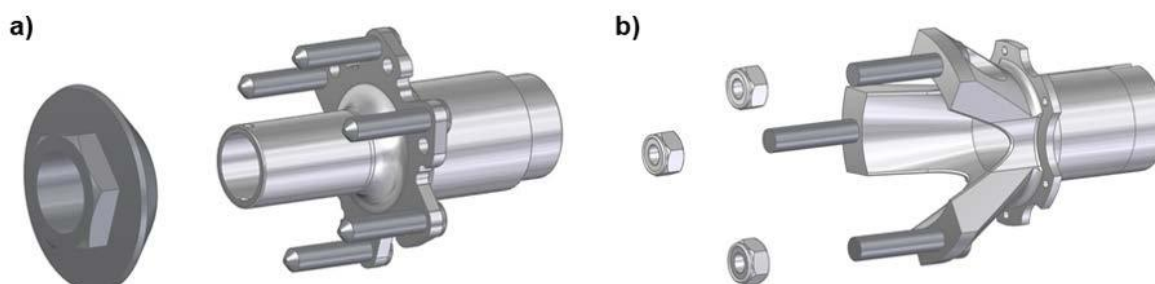
Legenda: FL: Front/Left (Dianteiro/Esquerdo); FR: Front/Rear (Dianteiro/Direito);
RL: Rear/Left (Traseiro/Esquerdo); RR: Rear/Rigth (Traseiro/Direito).

Fonte: O Autor.

3.3 Carregamentos oriundos da fixação da roda no cubo

As rodas analisadas fazem uso de diferentes métodos de fixação: a roda de alumínio utiliza um sistema de porca única, chamado de *center-lock*, e o novo modelo segue uma nova abordagem, a qual conecta a roda ao cubo por três parafusos dispostos numa circunferência, a 120° um do outro. Tal mudança se deu fruto de estudos desenvolvidos pela equipe os quais visavam facilitar o processo de troca da roda; por mais que o modelo de porca única possa parecer superior nesse quesito, o torque elevado que era aplicado à porca tornava a tarefa impossível de ser realizada por apenas uma pessoa, fato que mudou com a implementação do novo modelo de cubo. Ambos são mostrados na Figura 17.

Figura 17 - a) Cubo da roda de alumínio; b) Cubo da roda de compósito laminado



Fonte: O Autor.

Tratando-se do projeto de uma roda laminada de fibra de carbono com secção oca, é indispensável o uso de insertos para que a distribuição de tensões na região de fixação seja mais uniforme, bem como, para proteger a superfície da roda, evitando que os parafusos a desgastem. Logo, a força de aperto dos parafusos será suportada pelos insertos, os quais não serão simulados junto à roda a fim de manter o modelo mais simples. Como a influência desse carregamento nas regiões de interesse (aros e as zonas da flange mais próximas aos aros) é baixa, também decidiu-se não representá-lo no modelo da roda de alumínio.

Apesar desse carregamento não ser considerado, é necessário equivaler a fixação da roda no cubo. Esse tratamento será explicado em mais detalhes na seção de modelamento de ambas as rodas.

4 ANÁLISE E RESULTADOS DA RODA DE ALUMÍNIO

4.1 Geometria e material

Essa roda tem 10" de diâmetro e 7" de largura, composta por três componentes principais, sendo eles:

- 1 par de aros da marca Keizer, feitos em alumínio ASTM 6061-T6, sendo um interno de 5" de largura e outro externo, de 2" de largura;
- 1 flange projetada pelos membros da equipe EESC-USP Fórmula SAE, manufaturada em alumínio ASTM 7075-T6;
- 12 porcas e parafusos M6.

A Tabela 2, a seguir, expõe os dados dos materiais supracitados, alguns dos quais foram utilizados no modelamento desse conjunto.

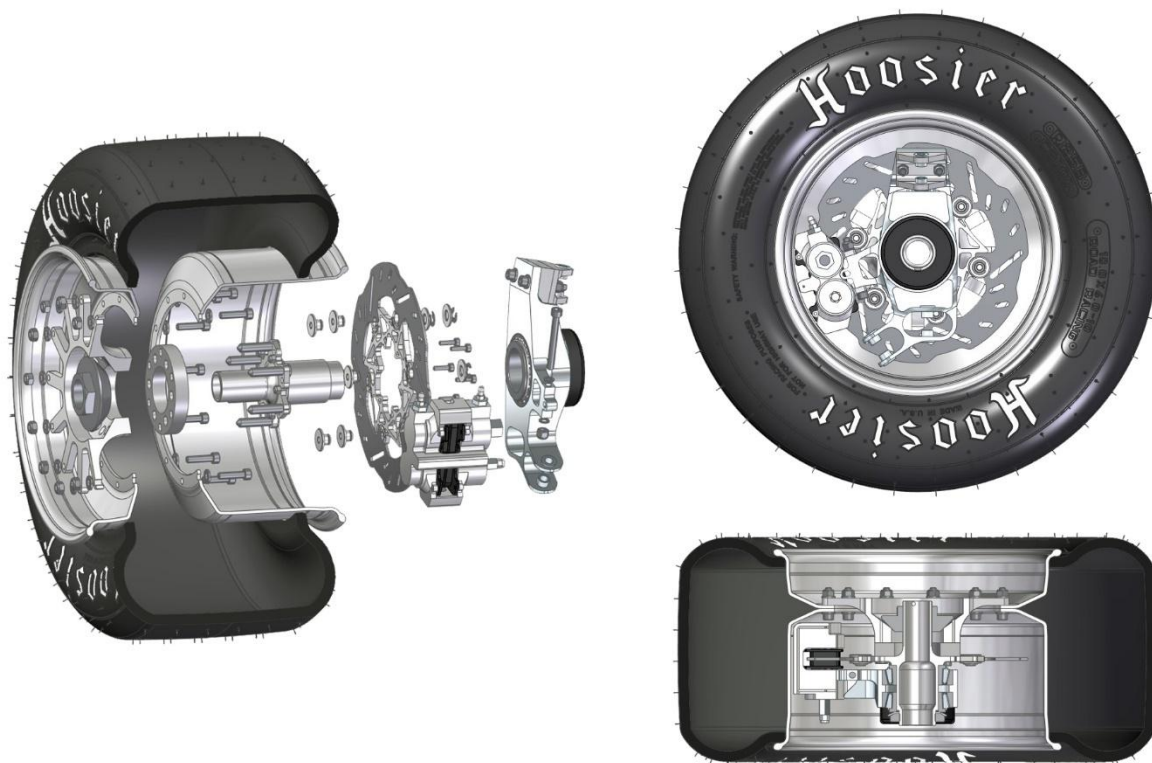
Tabela 2 - Propriedades dos materiais dos aros e flange da roda de alumínio

PROPRIEDADES	Al 6061-T6	Al 7075-T6
Densidade [g/cm ³]	2,7	2,81
Módulo de Elasticidade [GPa]	69,9	71,7
Tensão máxima de ruptura [MPa]	310	572
Tensão máxima de escoamento [MPa]	276	503
Coeficiente de Poisson	0,33	0,33

Fonte: Adaptado de Aluminum 6061-T6... (2018) e Aluminum 7075-T6... (2018).

O conjunto compostos pelos aros e pela flange de alumínio é unido por doze parafusos, pesando 2,315 Kg e se liga ao cubo por meio de um sistema de porca única, chamado *center-lock*. Há seis pinos no cubo, os quais auxiliam na transmissão do torque à roda, como se pode ver na Figura 18.

Figura 18 - Conjunto roda utilizado com o cubo com *center-lock*



Fonte: O Autor.

4.2 Modelamento

Utilizou-se o software Abaqus 6.14, da empresa francesa Dassault Systemes, para modelar os componentes nas situações descritas. Já que os materiais tanto da roda, como da flange, são isotrópicos e há secções mais espessas na geometria analisada, foram usados elementos sólidos C3D8R, os quais são elementos de primeira ordem e de integração reduzida, para uso geral em problemas estruturais. Cada modelo apresentou 2.096.328 graus de liberdade.

Como o modelamento da roda do protótipo de 2017 serve apenas de comparativo para o desenvolvimento do novo modelo e sabendo que ela nunca falhou catastróficamente devido a excesso de cargas, optou-se por não utilizar fatores de segurança nessa etapa, reservando essa prática apenas na etapa de modelamento da nova roda.

4.2.1 Condições de contorno

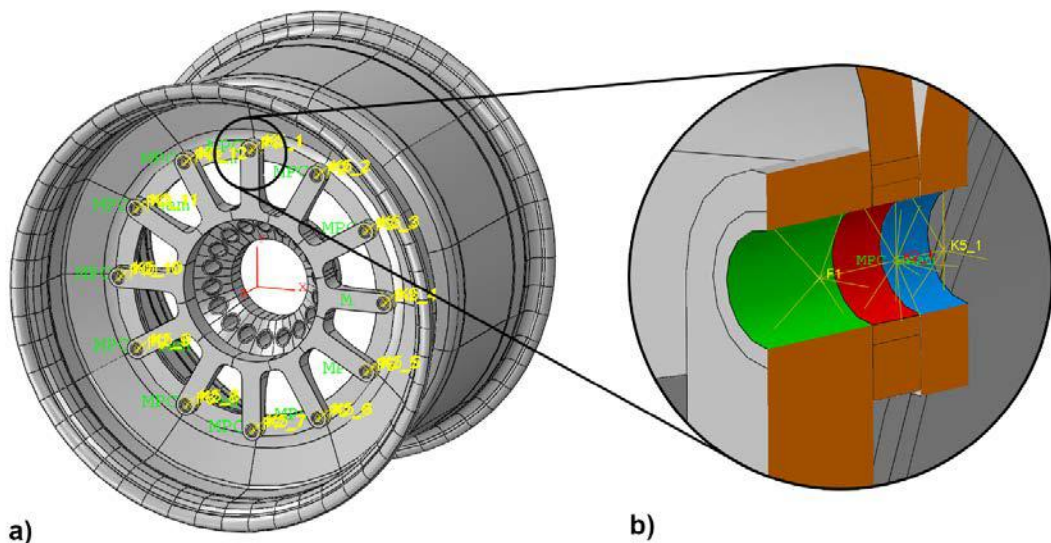
Os componentes foram descritos como sólidos deformáveis e, em razão de ambos os materiais que os compõem serem metais, eles foram definidos como isotrópicos. As propriedades utilizadas na definição dos materiais estão expostas na Tabela 2.

Optou-se por engastar as superfícies da flange que ficam em contato direto com o cubo e com a porca, e aplicar os carregamentos nas regiões da roda que os suportam. O engaste foi feito de modo que todos os graus de liberdade fossem restringidos nessas superfícies.

Outra condição de contorno aplicada está relacionada ao fato dessa roda ser composta por três partes: a flange, o aro interno e o aro externo, conectadas por 12 parafusos no total. A seguinte estratégia foi adotada para representar cada junção:

- Criar um ponto central ao furo e sua profundidade, para cada parte.
- Criar uma relação de acoplamento entre os nós da superfície interna do furo de cada parte e seu respectivo ponto central.
- Criar uma relação entre os três pontos que formam a junção, unindo-os como um corpo rígido.

Figura 19 - Método de representação de junção por parafuso. (a) Vista isométrica de toda a roda, destacando-se as relações; (b) Detalhe em corte das relações em um dos furos

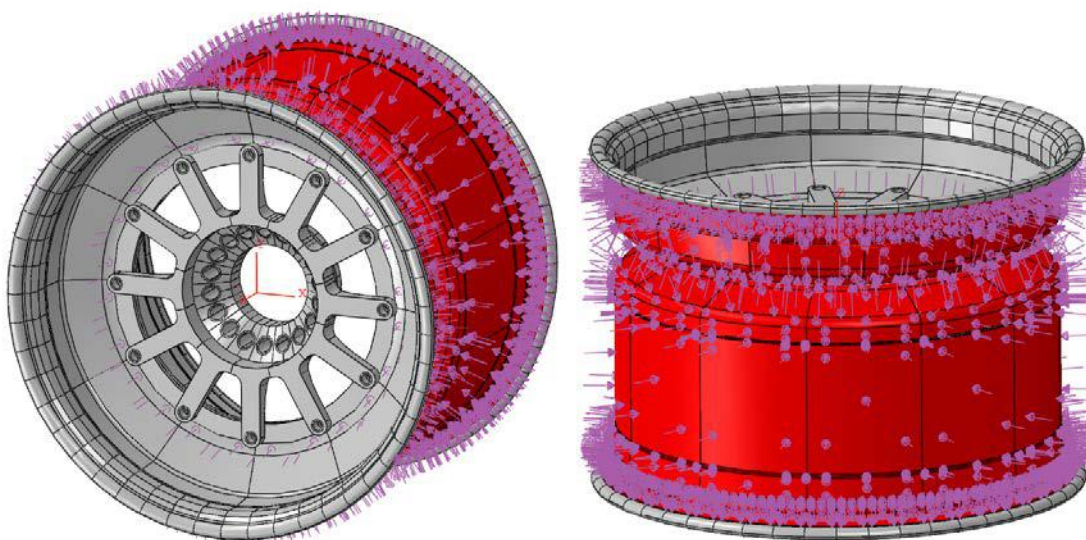


Fonte: O Autor.

4.2.2 Aplicação da pressão interna dos pneus

A pressão interna dos pneus foi aplicada em toda a superfície externa localizada entre os assentos do pneu, nas duas metades que compõem o aro do conjunto. A Figura 20, a seguir, ilustra essa etapa.

Figura 20 - Aplicação da pressão interna dos pneus

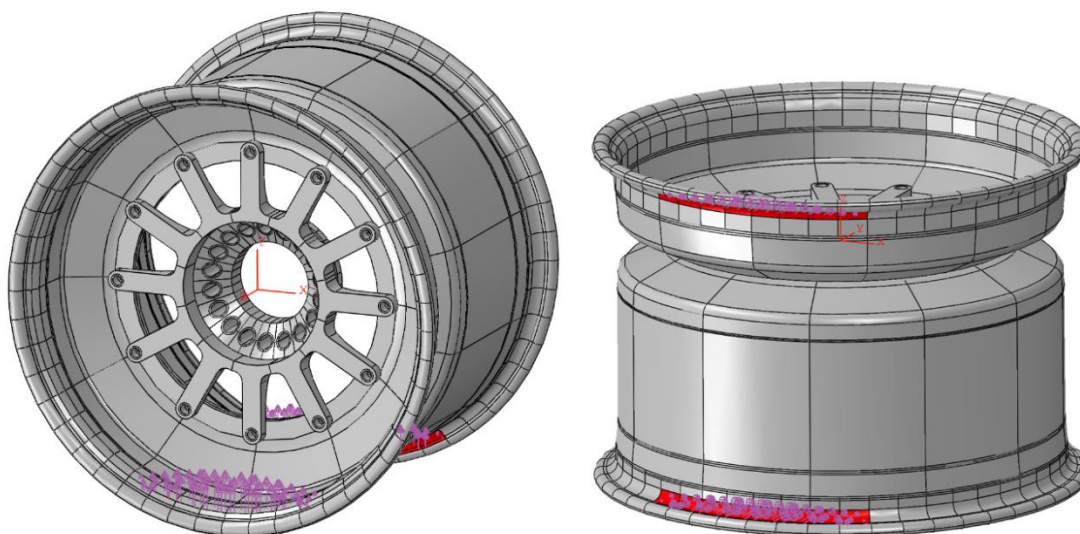


Fonte: O Autor.

4.2.3 Aplicação do carregamento normal (no eixo Z)

A força normal é aplicada na região dos assentos do pneu, numa região localizada entre -30° e $+30^\circ$ com relação ao ponto de contato do pneu com a via, conforme ilustrado na Figura 21. Faz-se isso uma vez que o pneu apresenta uma zona plana em contato com o solo quando carregado verticalmente, então o comprimento dessa zona é convertido em uma secção angular equivalente da região de contato entre o pneu e o aro (assentos do pneu) (STEARNS, 2001). Foi adotada uma distribuição de pressão parabólica, cujas condições para que a expressão fosse encontrada são: que o carregamento é nulo para as posições angulares -30° e $+30^\circ$ e que a integral do carregamento entre essas posições seja igual à força normal. Como o pneu é achatado verticalmente, as regiões do pneu adjacentes às posições angulares descritas acima tendem a se afastar dos aros, o que implica na diminuição da transferência de carga a medida que se caminha para perto de -30° e $+30^\circ$, por isso a adoção de uma distribuição parabólica do carregamento.

Figura 21 - Aplicação do carregamento normal



Fonte: O Autor.

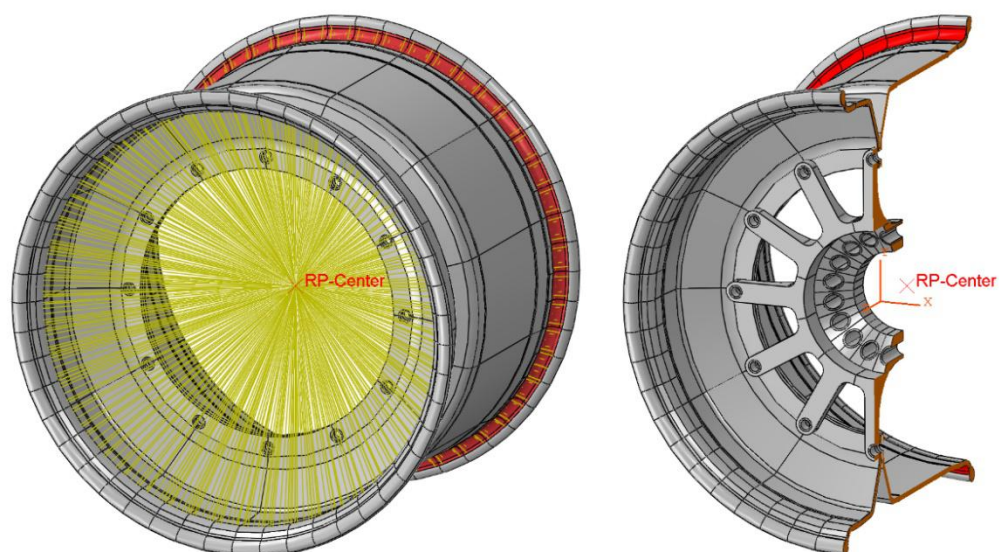
4.2.4 Aplicação das forças lateral e longitudinal

Foi decidido aplicar essas forças na forma de momentos distribuídos nos assentos do pneu, de modo que as forças lateral e longitudinal foram multiplicadas pela distância entre o ponto de aplicação delas e um ponto no centro da roda, cuja magnitude equivale ao raio do pneu.

A fim de que esse momento fosse aplicado nos assentos dos pneus, foi necessário criar uma relação entre os nós presentes na superfície e o ponto criado no centro da roda, fazendo os graus de liberdade desses nós se relacionarem aos graus de liberdade do ponto. Contudo, o acoplamento utilizado permite que as regiões acopladas sofram deformações, influenciando menos nos resultados.

Como as forças ocorrem na área de contato do pneu com o pavimento, adotou-se uma simplificação na qual é considerado que as forças atuam no ponto central dessa área, diretamente abaixo ao ponto central criado para a aplicação dos momentos. Assim, a magnitude do braço que multiplica a força é igual ao raio do pneu (conforme a magnitude indicada na Figura 14, da seção 3.1).

Figura 22 - Acoplamento dos assentos e ponto de aplicação dos momentos



Fonte: O Autor.

4.3 Resultados e discussão

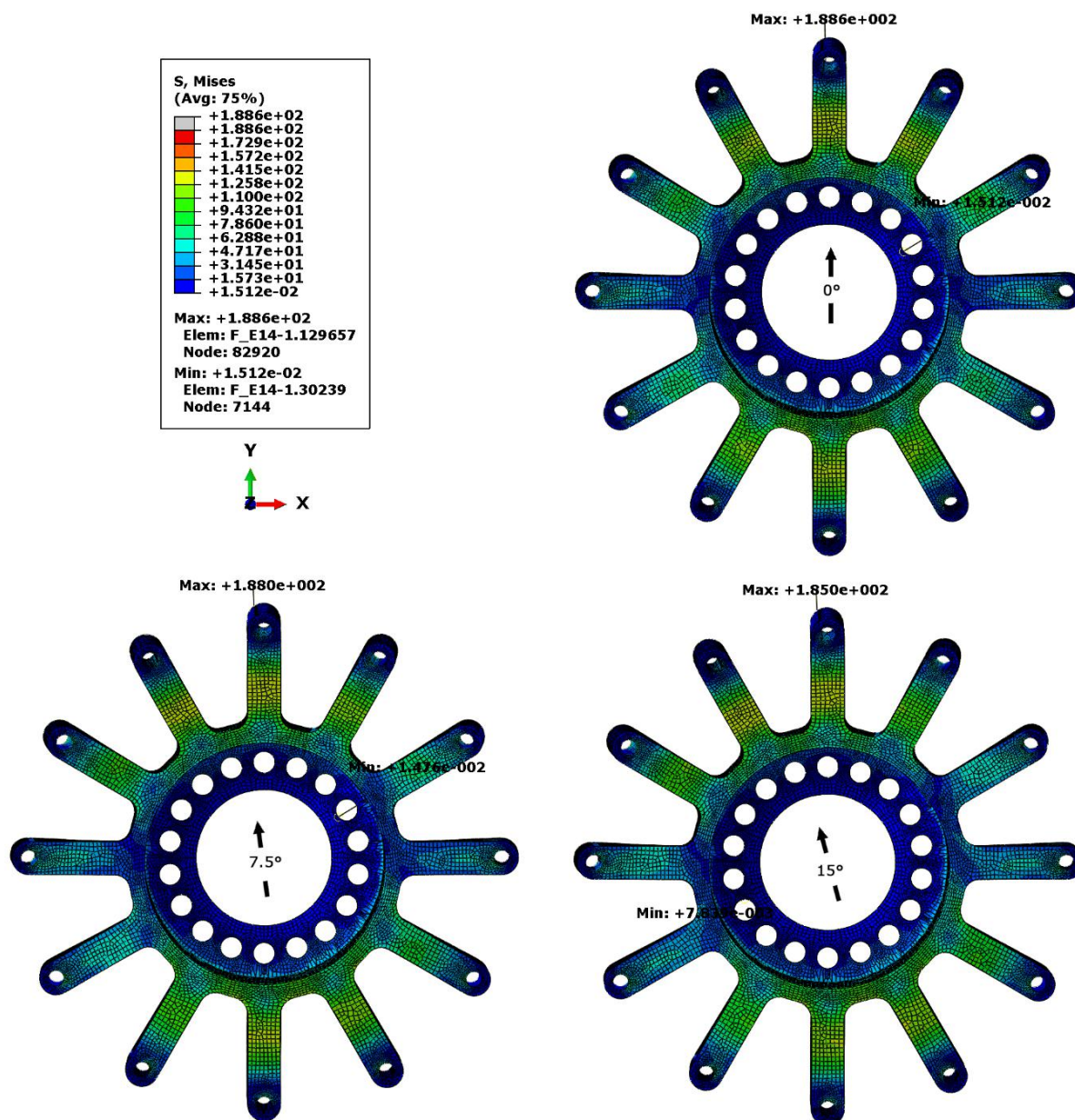
Como o resultado e a análise da roda de compósito laminado dependem diretamente do resultado e da análise do modelo da roda usada em 2017, notou-se a necessidade de mostrar que esse último modelo está de acordo com o ponto de vista das tensões, o que indica que os dados de deformação são condizentes e válidos para serem utilizados como parâmetros posteriormente.

Em razão dos diferentes materiais que compõem essa roda, foi necessário analisar os aros e a flange separadamente com relação às tensões. Por isso serão vistas figuras nas quais há apenas a flange e outras em que há apenas os aros. Contudo, quando o assunto são os deslocamentos, tal divisão não foi seguida, visto que essa análise pode ser feita em conjunto sem problema algum.

4.3.1 Curva

Começando pela análise de tensões da flange nas três posições propostas, nota-se um pico de tensão de 188MPa, que ocorre no lado interno do raio 1, na posição 0°, conforme mostrado na Figura 23 e na Figura 24.

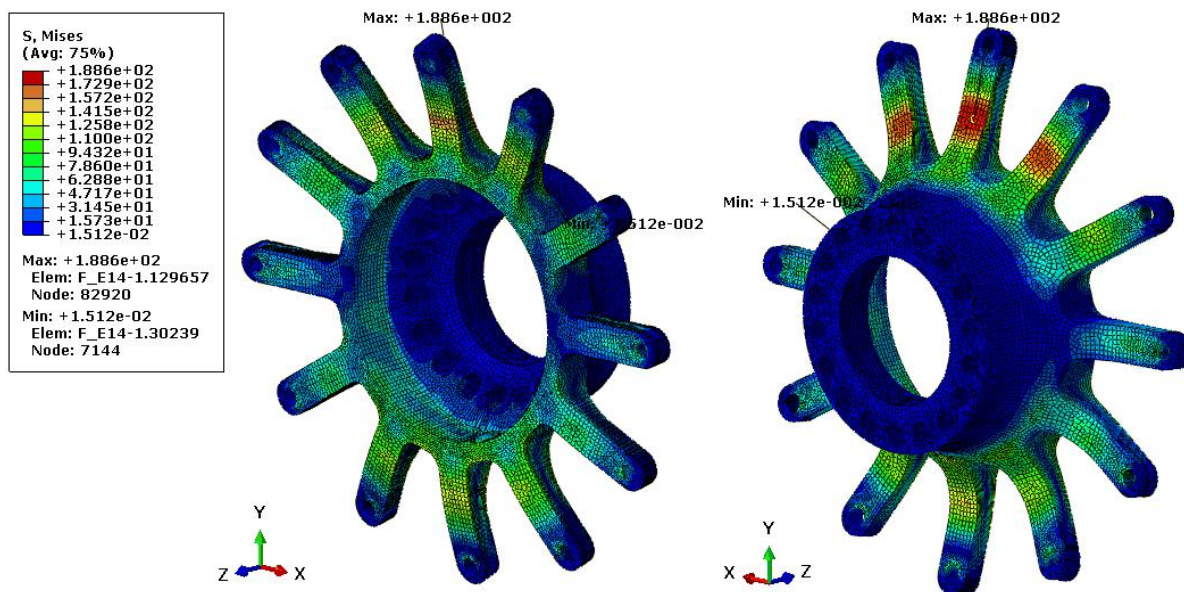
Figura 23 - Flange - Curva - Gradientes de tensão em 0°, 7,5° e 15°



Fonte: O Autor.

A Figura 24 oferece uma visão melhor do gradiente de tensões na flange, resultante dessa situação de pilotagem. Vê-se que os valores mais elevados se encontram em aproximadamente dois terços dos raios, a partir do centro, e que, em comparação com a tensão de escoamento do material que os compõe, as tensões encontradas não implicam na falha do componente.

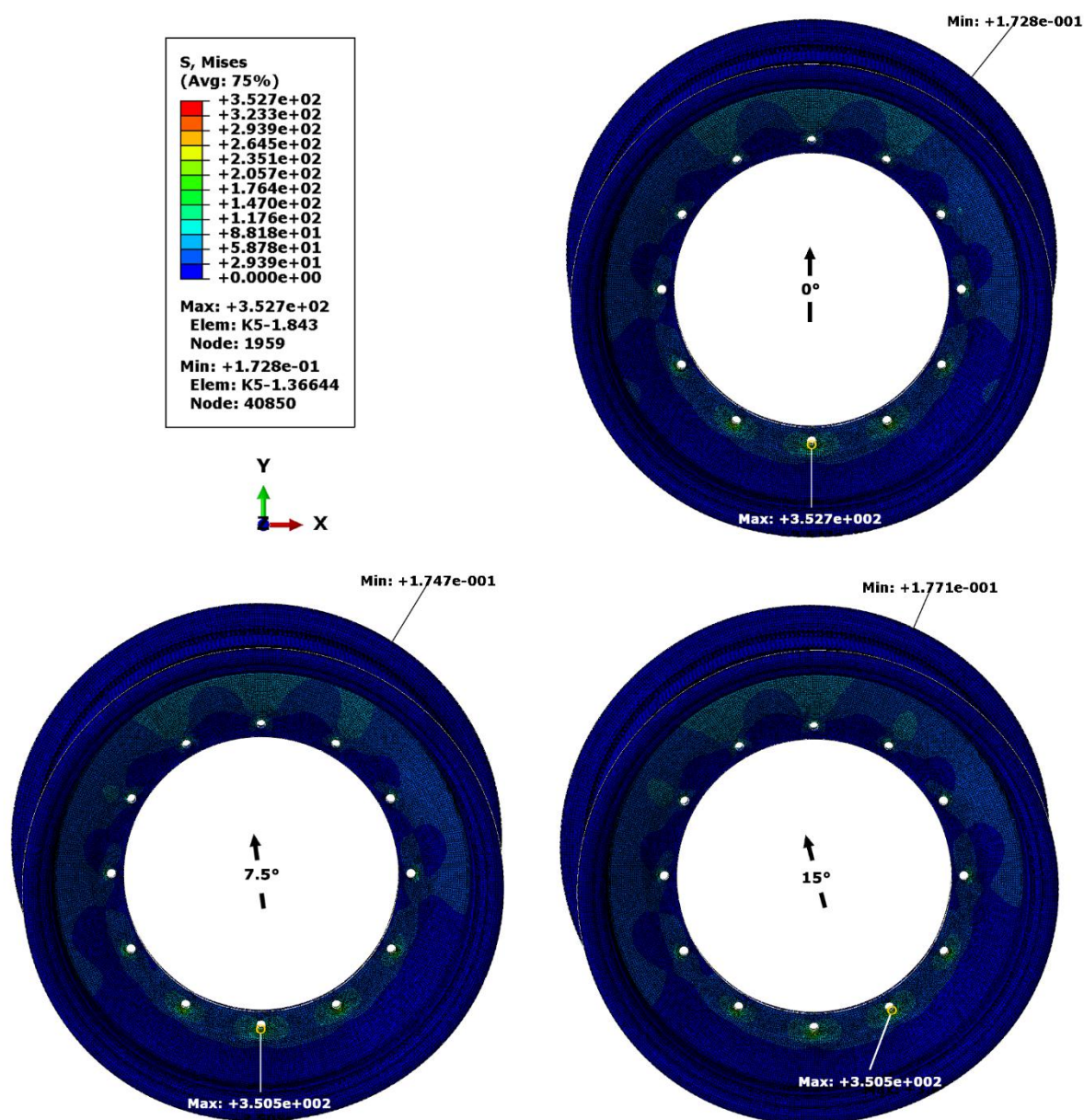
Figura 24 - Flange - Curva - Gradientes de tensão em 0°, vistas isométricas



Fonte: O Autor.

No caso dos aros, conforme ilustra a Figura 25, fica evidente que há concentrações de tensão nos furos de montagem do conjunto. A máxima tensão registrada encontra-se em um deles, na posição de 0°, e possui magnitude de 352,7MPa, não muito diferente das avistadas nos outros furos.

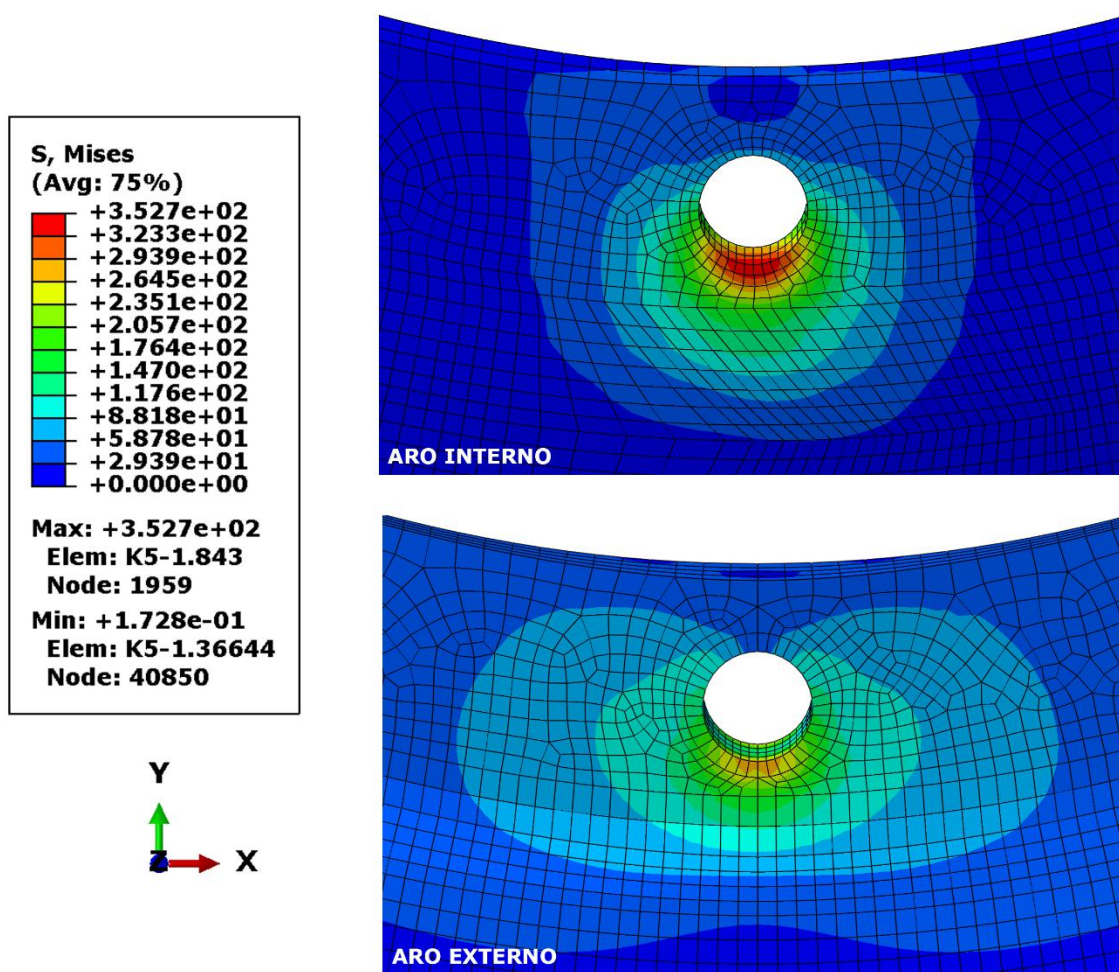
Figura 25 - Aros - Curva - Gradientes de tensão em 0°, 7,5° e 15°



Fonte: O Autor.

Se interpretados os resultados de modo superficial, pode-se cometer o equívoco de considerar que esses componentes falhariam em detrimento das tensões encontradas, as quais superam tanto a tensão limite de escoamento, como a tensão limite de ruptura do material que as constitui. Contudo, vale lembrar que a união dos componentes foi modelada fazendo-se uso de relações que restringem os graus de liberdade das superfícies internas dos furos de fixação. A Figura 26, a seguir, ilustra de perto as tensões elevadas no aro interno e externo.

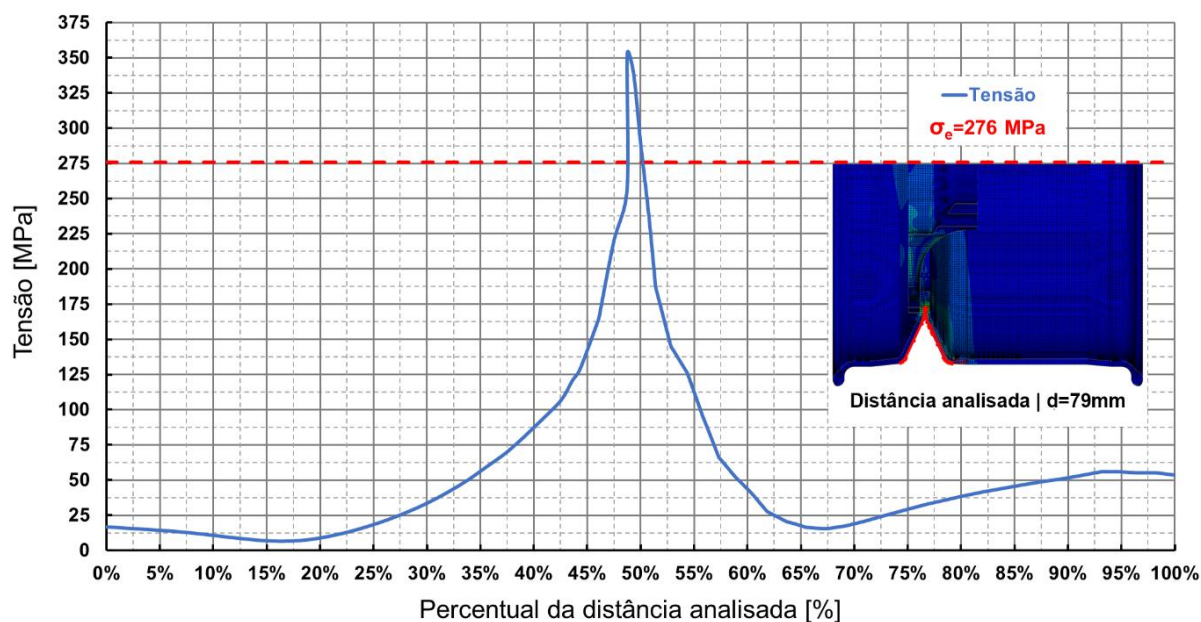
Figura 26 - Aros - Curva - Detalhe da concentração de tensão no furo 7, no aro externo e interno em carregamento a 0°



Fonte: O Autor.

Observa-se que os valores elevados se situam em pontos próximos às regiões submetidas às relações de acoplamento. O Gráfico 1 suporta esse fato, mostrando os resultados de tensão ao longo das porções dos perfis dos aros localizadas na parte inferior do furo analisado. As tensões acima do limite de escoamento do material, 276MPa, são vistas em menos de 2,5% do perfil investigado, cujo comprimento é 79mm.

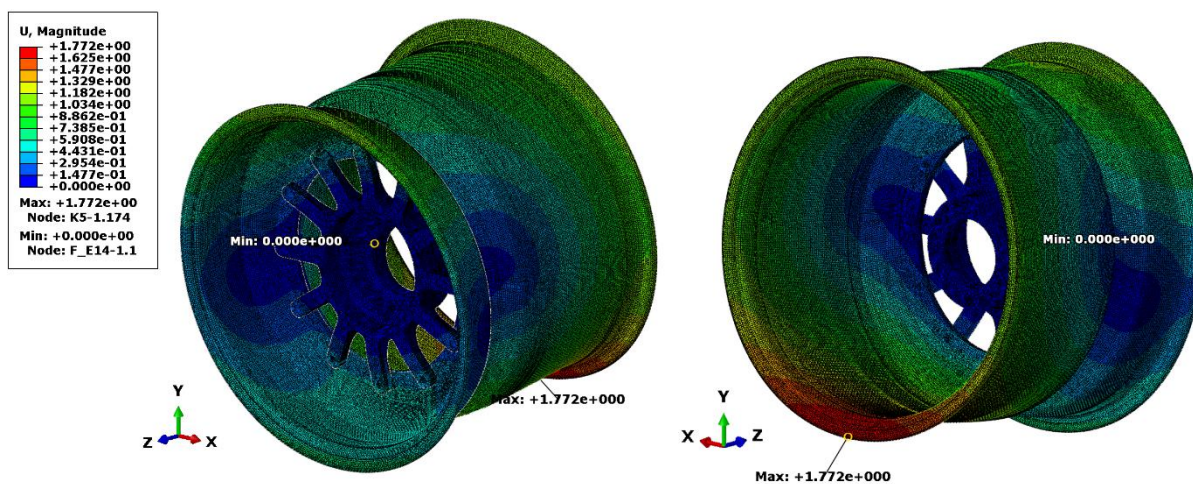
Gráfico 1 - Aros - Curva - Tensão vs. Distância do caminho analisado em 0°



Fonte: O Autor.

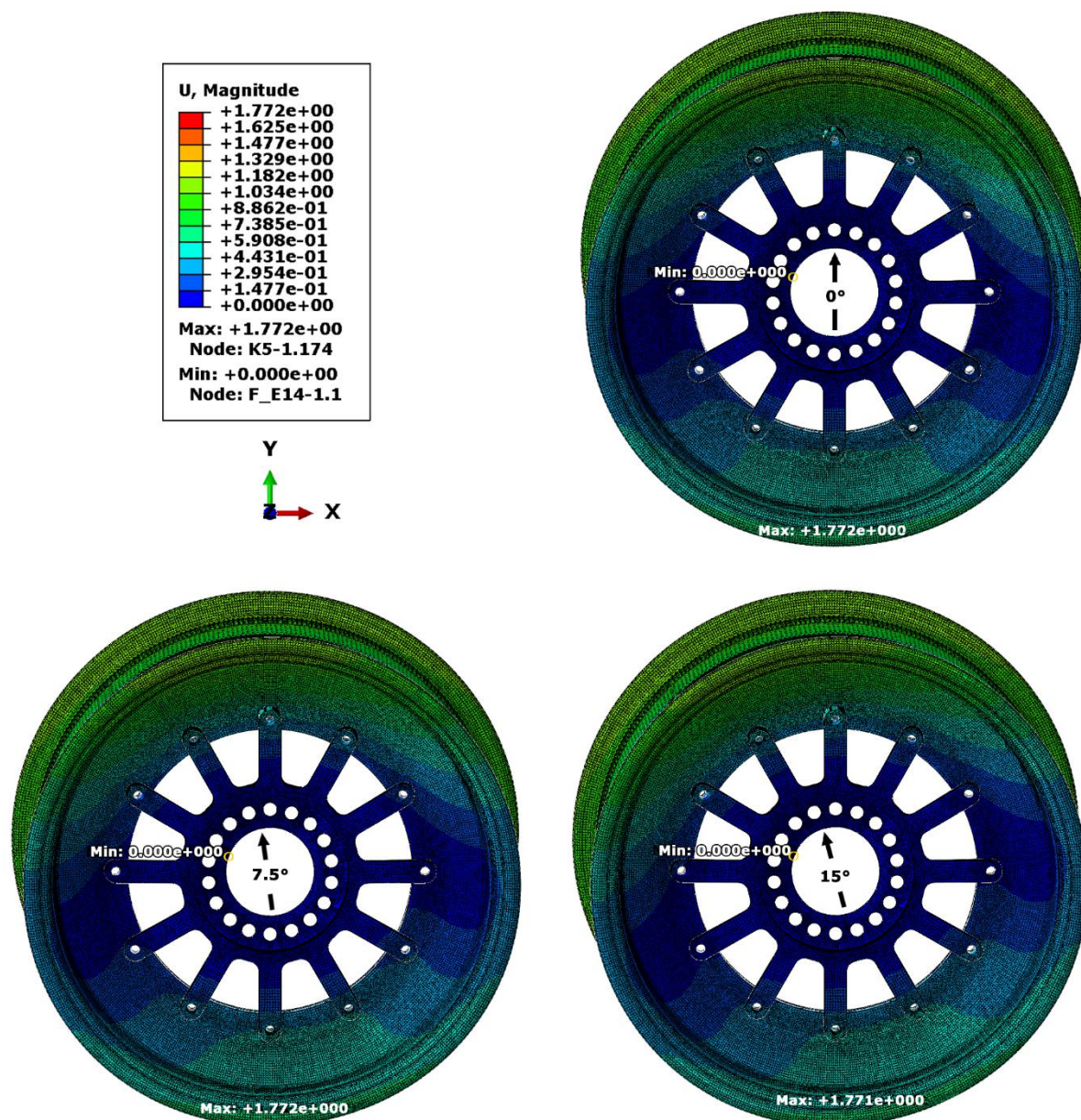
Com relação aos deslocamentos, percebe-se sua máxima magnitude na região próxima aos assentos do pneu do aro interno, como se pode ver na Figura 27. Vê-se que a região de máximo deslocamento acompanha a mudança de posição de aplicação dos carregamentos, contudo o seu valor pouco varia entre 0°, 7,5° e 15°, como ilustra a Figura 28.

Figura 27 - Roda de alumínio - Curva - Gradientes de deslocamento em 0°, vistas isométricas



Fonte: O Autor.

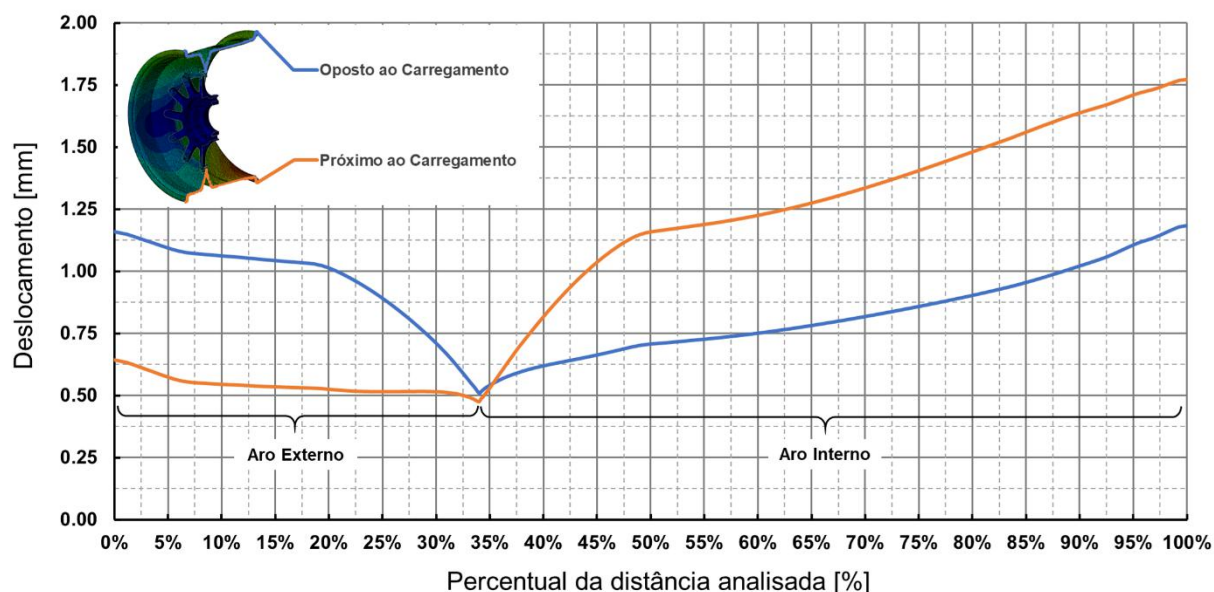
Figura 28 - Roda de alumínio - Curva - Gradientes de deslocamento em 0°, 7,5° e 15°



Fonte: O Autor.

Verifica-se também que no aro externo, ao contrário do que ocorre no interno, as maiores deformações se encontram no lado oposto à aplicação das forças, evidenciado pelo tom esverdeado nessa região e pelo tom azulado (mais próximo de zero) na base. A fim de conseguir dados mais detalhados do deslocamento nessas regiões, foi gerado o Gráfico 2, cujos dados foram extraídos dos perfis de ambos os aros, tanto na região de aplicação dos carregamentos como no lado oposto.

Gráfico 2 - Aros - Curva - Deslocamento vs. Distância do caminho analisado em 0°



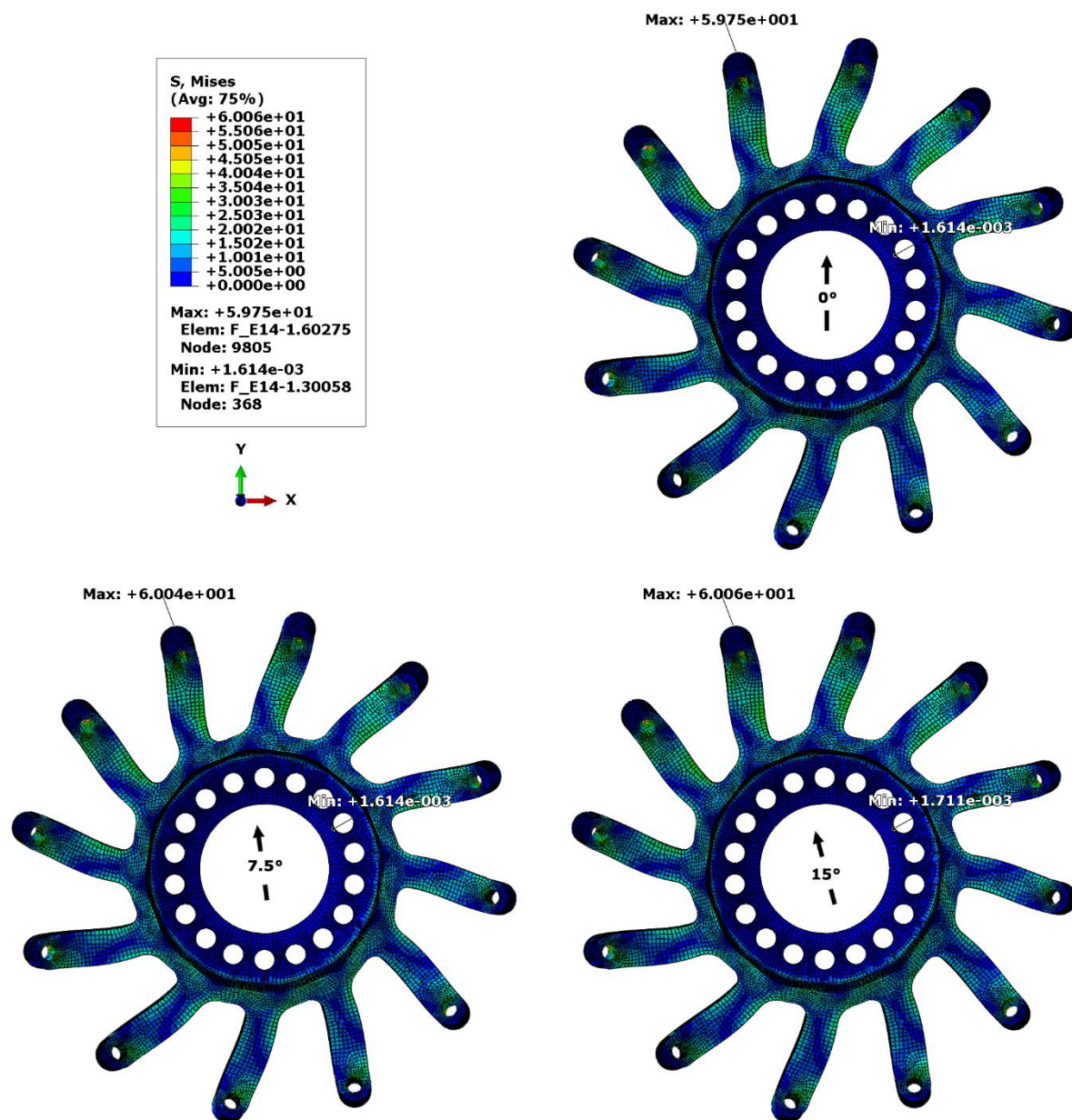
Fonte: O Autor.

Como os resultados observados em 0°, 7,5° e 15° são muito próximos, foi considerado apenas o resultado em 0° na elaboração do Gráfico 1, o qual é de grande utilidade para o projeto da roda de compósito laminado, visto que ele apresenta uma análise dos deslocamentos ao longo de todo o perfil do aro, o qual tem um papel de peso na rigidez estrutural da roda como um todo.

4.3.2 Frenagem

Procedendo de modo análogo à seção anterior, vê-se os gradientes de tensão na flange, resultantes da situação de frenagem em todas posições de carregamentos consideradas na Figura 29. Observa-se que as tensões são consideravelmente inferiores àquelas obtidas na situação de curva e que a maior delas ocorre em 15°, e não em 0°, como visto anteriormente. Vale salientar, no entanto, que os resultados variaram pouco entre cada posição, sendo o máximo 60,06MPa e o menor 59,75MPa.

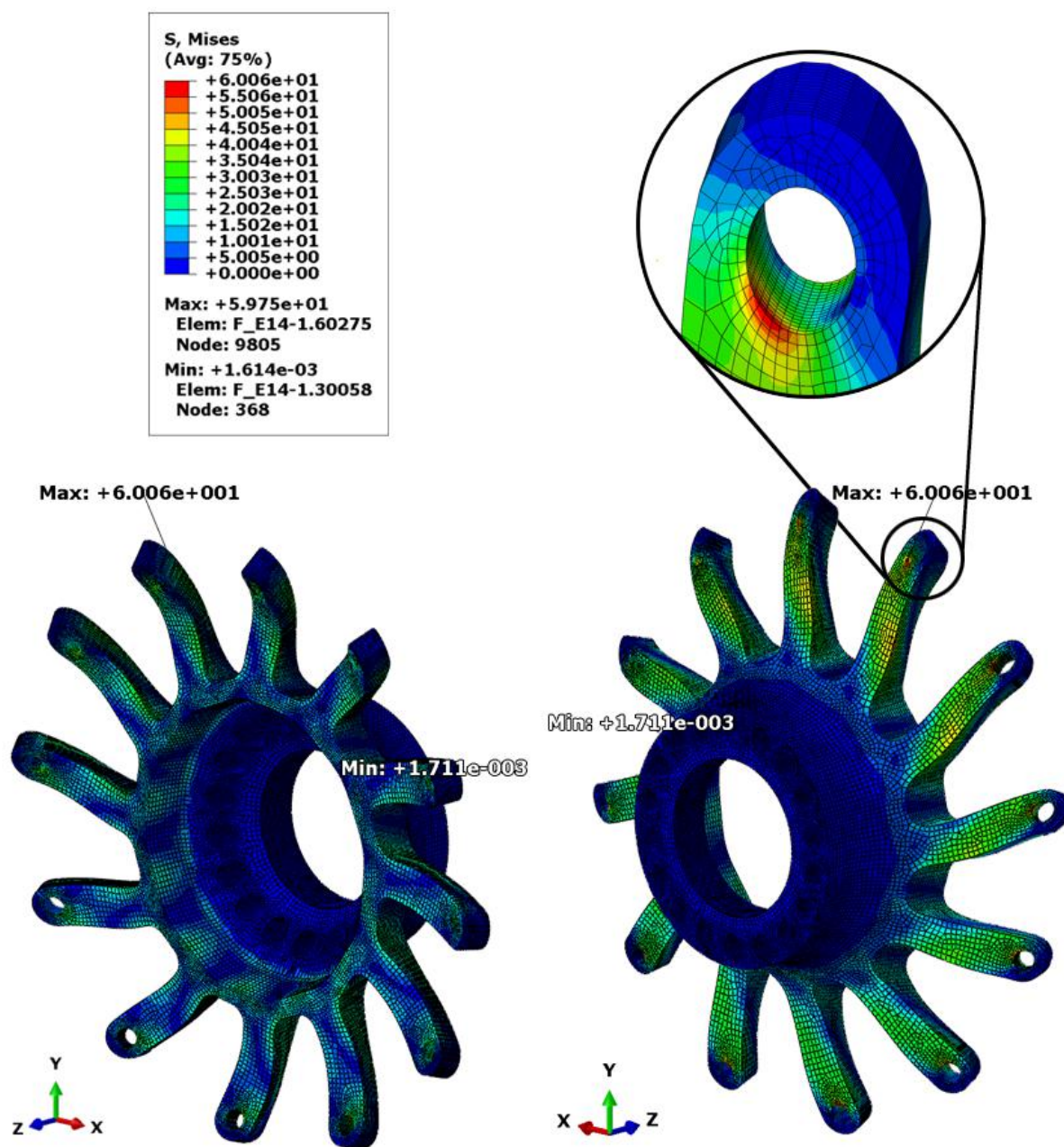
Figura 29 - Flange - Frenagem - Gradientes de tensão em 0°, 7,5° e 15°



Fonte: O Autor.

Nessa situação de pilotagem constatou-se que o pico de tensão na flange ocorreu nos furos de fixação, assim como ocorreu nos aros na situação anterior. Contudo, a magnitude desse pico está longe da tensão de escoamento do material da flange (503MPa). A Figura 30, a seguir, mostra a flange em vista isométrica, bem como a região em que há concentração de tensões em destaque.

Figura 30 -Flange - Frenagem - Gradientes de tensão em 15°, vistas isométricas e detalhe da região de concentração de tensão

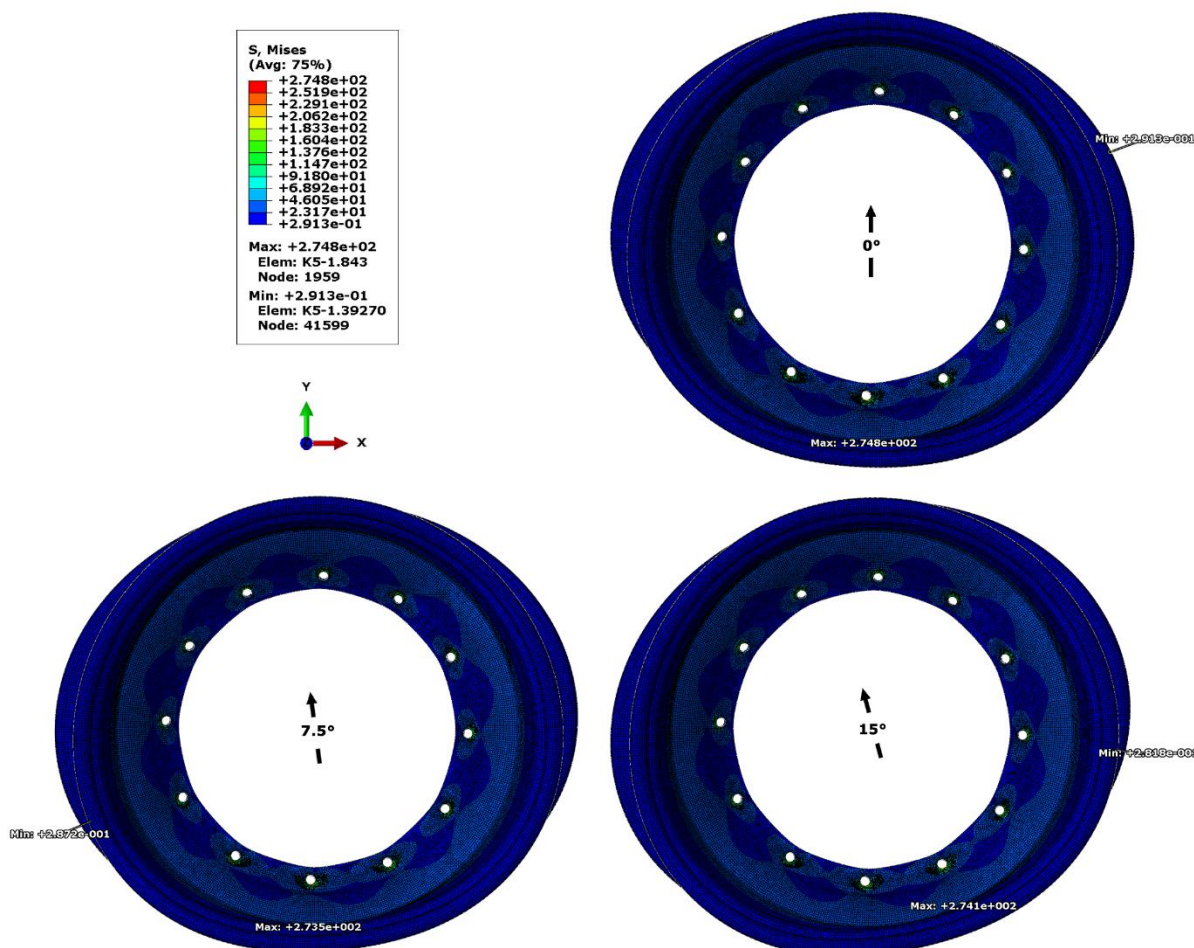


Fonte: O Autor.

Assim como observado na flange, nos aros os resultados variam muito pouco de uma posição para outra, sendo que nesse caso é na posição de 0° que se vê o pico de tensão, de magnitude 274,8MPa. Observando a Figura 31, percebe-se que nesse modelo ocorreu o mesmo fenômeno de concentração de tensões nas regiões dos furos de montagem dos aros. Como descrito na seção anterior, isso é fruto da abordagem escolhida para representar a união desse conjunto e pode-se

desconsiderar os resultados nas regiões muito próximas a esses furos, reiterando a validade do modelo.

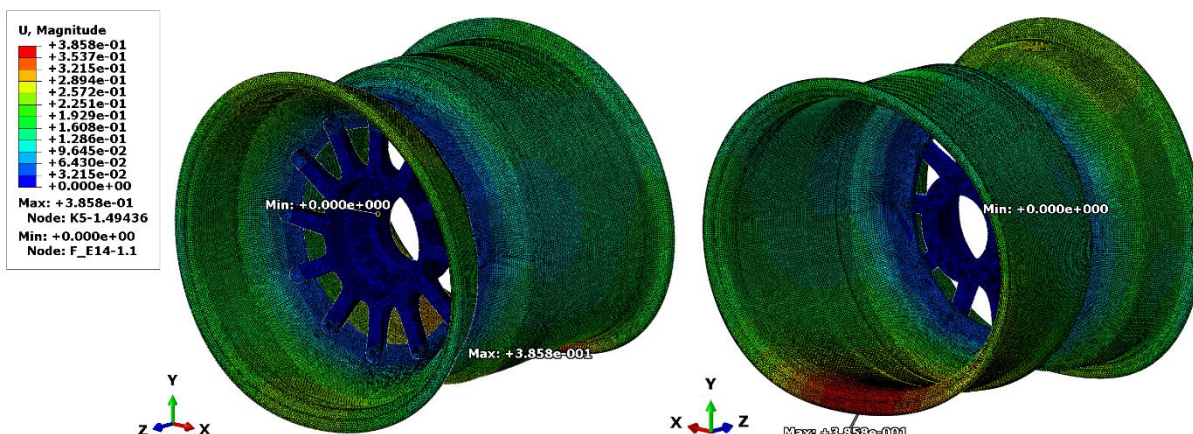
Figura 31 - Aros - Frenagem - Gradientes de tensão em 0°, 7,5° e 15°



Fonte: O Autor.

Como foi possível notar, as tensões decorrentes desse caso são consideravelmente menores que aquelas examinadas na situação de curva, sendo assim, não é surpresa que os deslocamentos sejam menores também. Os resultados encontrados nas três posições são da ordem de 0,3mm e diferem no máximo em 9×10^{-4} mm. Tendo isso em vista, considerou-se suficiente expor o resultado apenas de 0°, na Figura 32. Assim como visto anteriormente, o pico de deslocamento se encontra próximo ao assento do pneu do aro interno.

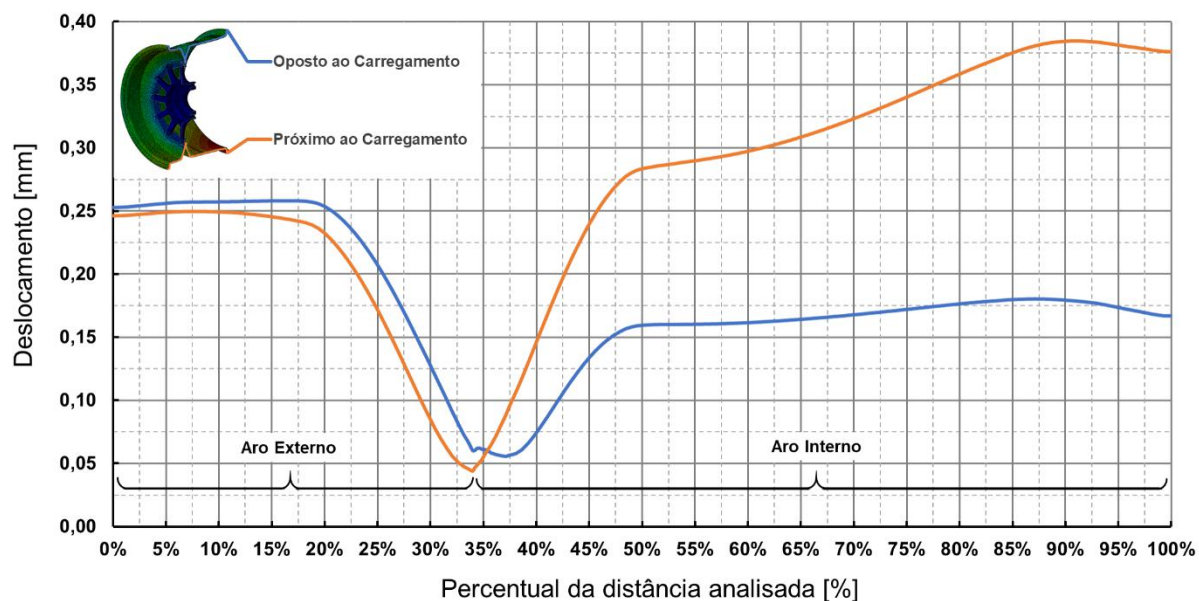
Figura 32 - Roda de alumínio - Frenagem - Gradientes de deslocamento em 0°, vistas isométricas



Fonte: O Autor.

Como feito anteriormente, analisou-se o perfil dos aros em busca de dados mais completos. O Gráfico 3, a seguir, ilustra o deslocamento ao longo do perfil, corroborando o observado na Figura 32, como esperado. Nesse caso, o deslocamento medido no lado oposto e o lado próximo ao carregamento no aro externo varia em média 11%, contra 42% observado no caso anterior. Já com relação ao aro interno, essa diferença diminuiu, sendo uma diferença média de 46% em frenagem e 32% em curva. Contudo, no geral, o caso de frenagem implica deslocamentos bem menores que os observados em curva.

Gráfico 3 - Aros - Frenagem - Deslocamento vs. Distância do caminho analisado em 0°

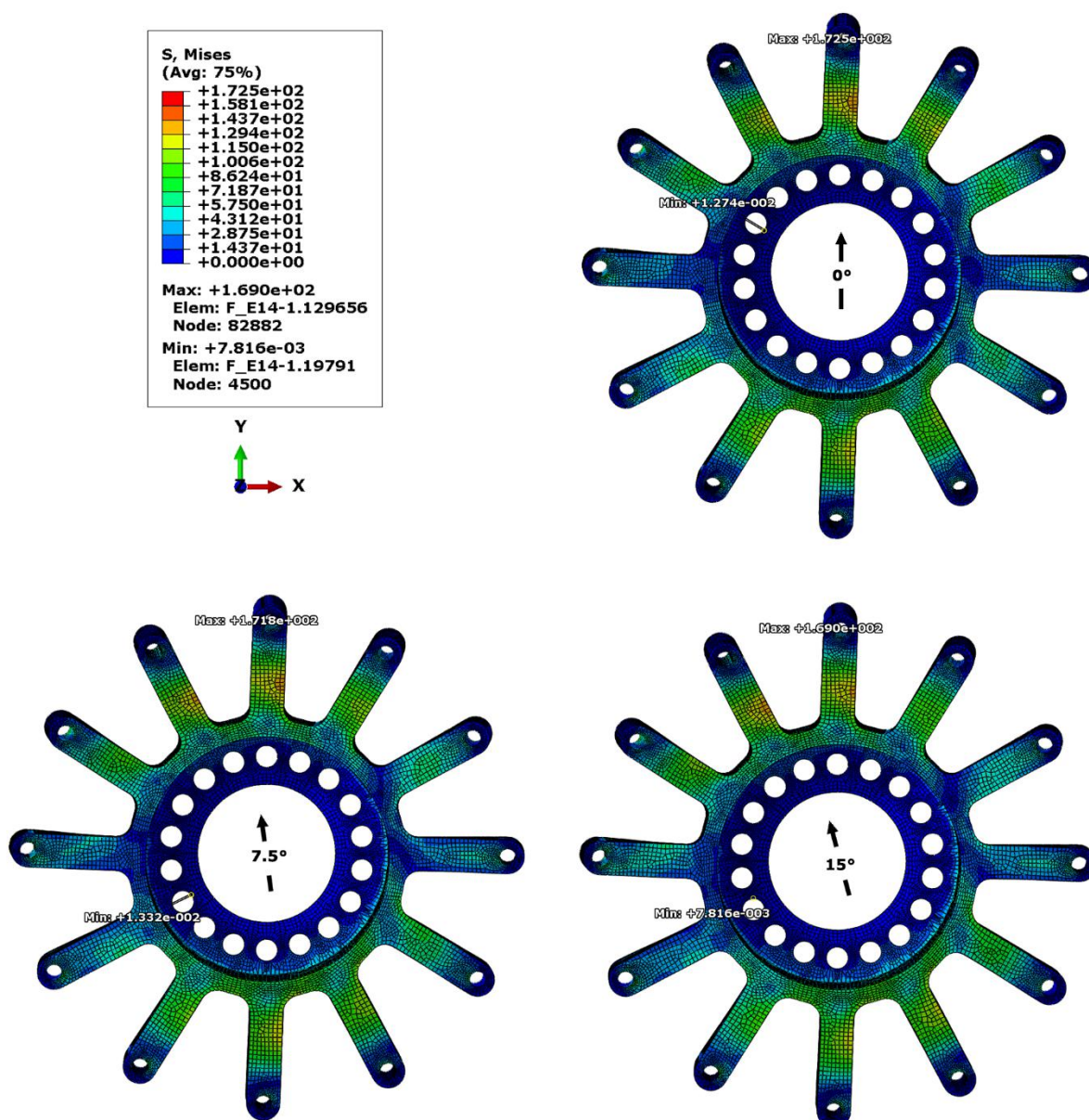


Fonte: O Autor.

4.3.3 Combinado (Curva + Frenagem)

Nesse caso em que há uma combinação das duas situações de pilotagem, foram observados picos de tensão mais parecidos com os encontrados no caso de curva, do que com aqueles vistos no caso de frenagem, o que era esperado, tendo em vista os resultados anteriores e sabendo que a aceleração lateral é maior que a longitudinal na situação analisada. A tensão máxima foi vista na posição de 0° , como ilustrado na Figura 33, e tem magnitude de 172,5MPa, distante da tensão limite de escoamento do material da flange (503MPa).

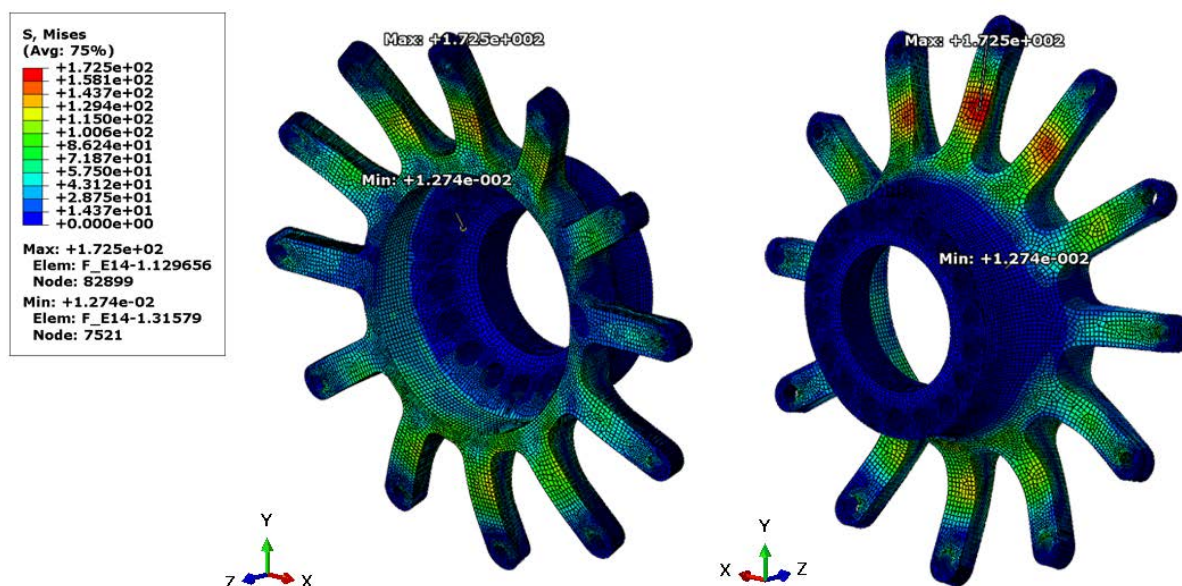
Figura 33 - Flange - Combinado - Gradientes de tensão em 0° , $7,5^\circ$ e 15°



Fonte: O Autor.

A fim de mostrar melhor a distribuição de tensões na flange, foi escolhida a posição em que foi encontrada a maior tensão, 0°, e gerada a Figura 34. Nela é possível observar que as tensões mais elevadas ocorrem em regiões similares ao observado no caso de curva, ou seja, na porção dos raios logo após os furos de fixação aos aros. Olhando a parte posterior da flange, percebe-se que as áreas avermelhadas, as quais se encontravam bem ao centro de cada um dos raios no caso de curva, estão ligeiramente deslocadas para a direita, talvez em virtude da influência da força longitudinal presente nesse modelo.

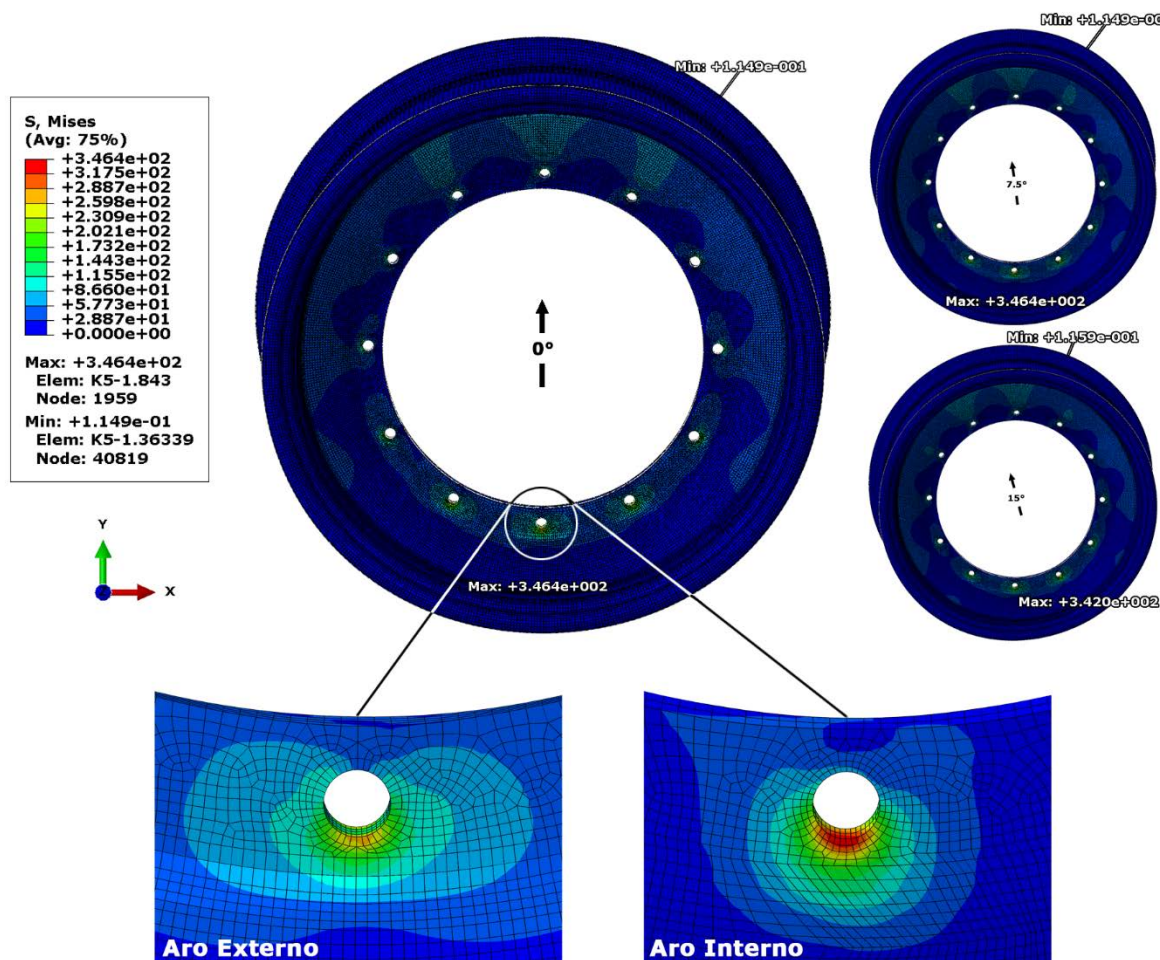
Figura 34 - Flange - Combinado - Gradientes de tensão em 0°, vistas isométricas



Fonte: O Autor.

Os aros também tiveram um desempenho mais próximo ao da situação de curva e também exibiram tensões elevadas ao redor dos furos de montagem do conjunto. Na Figura 35 é possível verificar essa semelhança, observada até no padrão do gradiente de tensões ao redor dos furos, em destaque. As tensões máximas variam até 4,4MPa de uma posição para a outra, sendo a maior delas igual a 346,4MPa - um pouco menor que aquela encontrada em curva: 352,7MPa.

Figura 35 - Aros - Combinado - Gradientes de tensão em 0°, 7,5° e 15° e detalhe da região de concentração de tensão



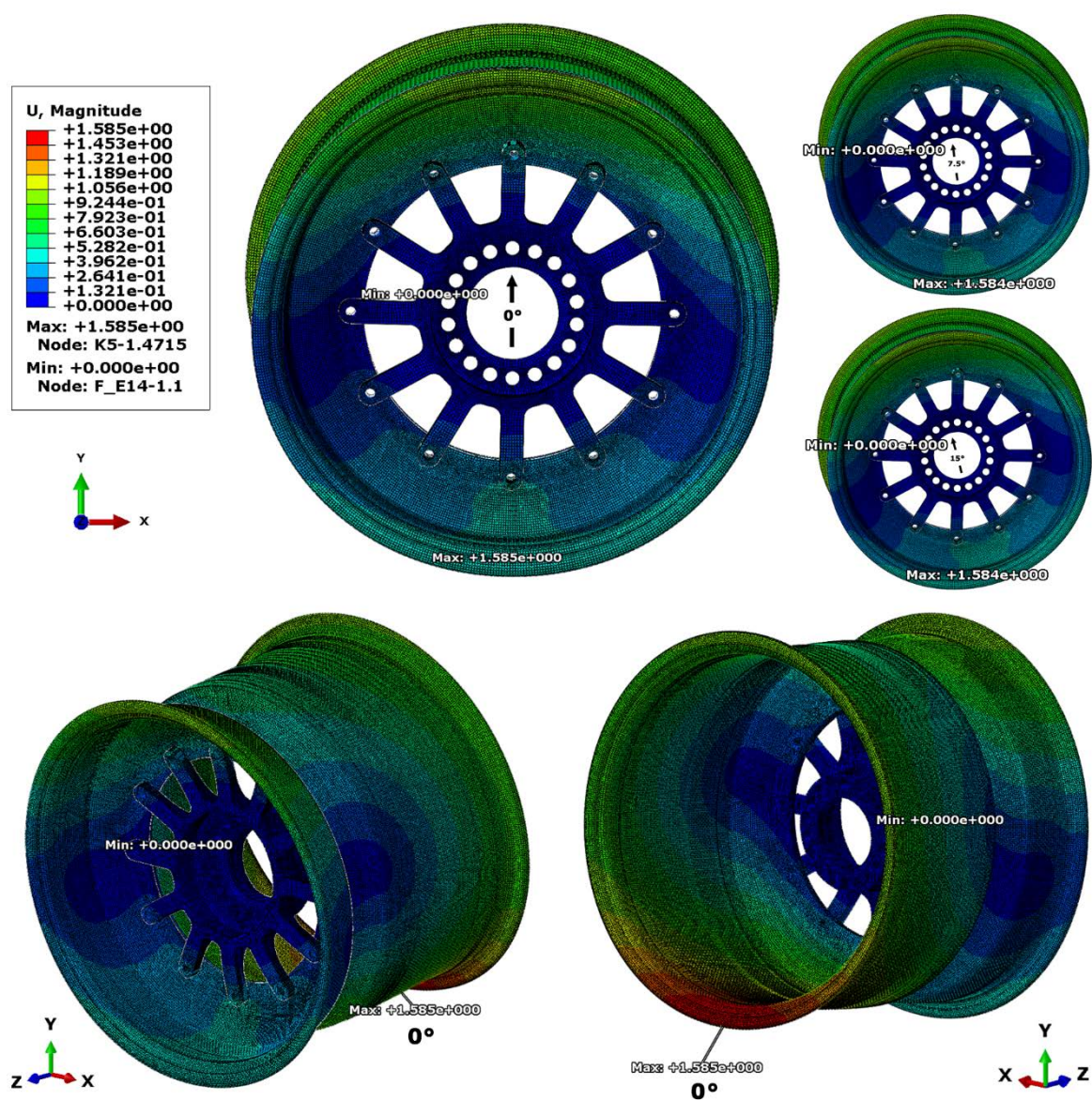
Fonte: O Autor.

As elevadas tensões ao redor dos furos têm a mesma origem daquelas encontradas na situação de curva: as condições de contorno aplicadas ao modelo. Como foi explicado anteriormente, o modo como foi representada a união dos componentes se resume no acoplamento das superfícies internas dos furos de cada parte, o que implica restrições nos graus de liberdade dessas superfícies e, conseqüentemente, tensões elevadas no seu entorno. Como observado no Gráfico 1, no caso de curva, o estresse se concentra na região bem próxima aos furos e pode ser desconsiderado, abordagem esta que pode ser utilizada também para esse caso.

Com relação aos deslocamentos sofridos, pode-se destacar, novamente, a similaridade com o observado no cenário de curva. O maior deslocamento resultante da combinação de curva e frenagem é apenas 0,187mm menor que aquele oriundo somente da situação de curva. A Figura 36 expõe esse dado, proveniente da posição

0°, bem como os resultados das outras posições. Nota-se, também, duas características verificadas nos outros dois casos analisados: o local de maior deslocamento – próximo ao assento do pneu do aro interno – e o fato de os deslocamentos no aro externo serem maiores no lado oposto à aplicação do carregamento, ao contrário do observado no aro interno, em que os maiores deslocamentos estão próximos à aplicação do carregamento.

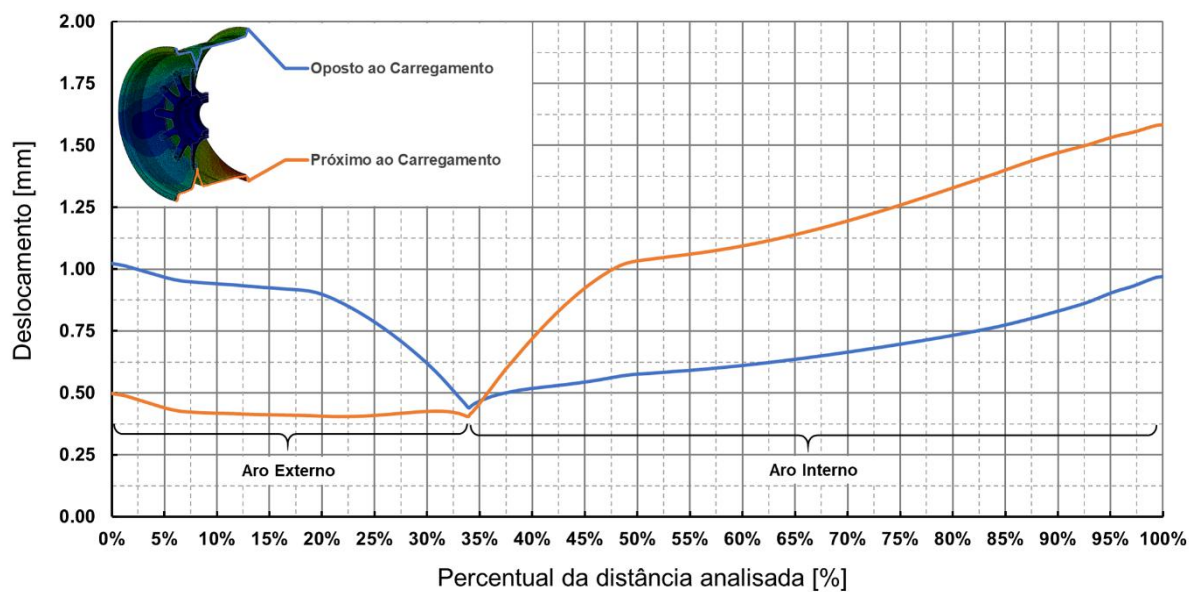
Figura 36 - Roda de alumínio - Combinado - Gradientes de deslocamento em 0°, 7,5° e 15° e vistas isométricas de 0°



Fonte: O Autor.

O Gráfico 4, a seguir, exibe em mais detalhes os deslocamentos ao longo do perfil do lado oposto e do lado próximo à aplicação do carregamento, como feito anteriormente. Verifica-se que seu formato é muito semelhante ao Gráfico 1, assim como a grandeza dos deslocamentos.

Gráfico 4 - Aros - Combinado - Deslocamento vs. Distância do caminho analisado em 0°



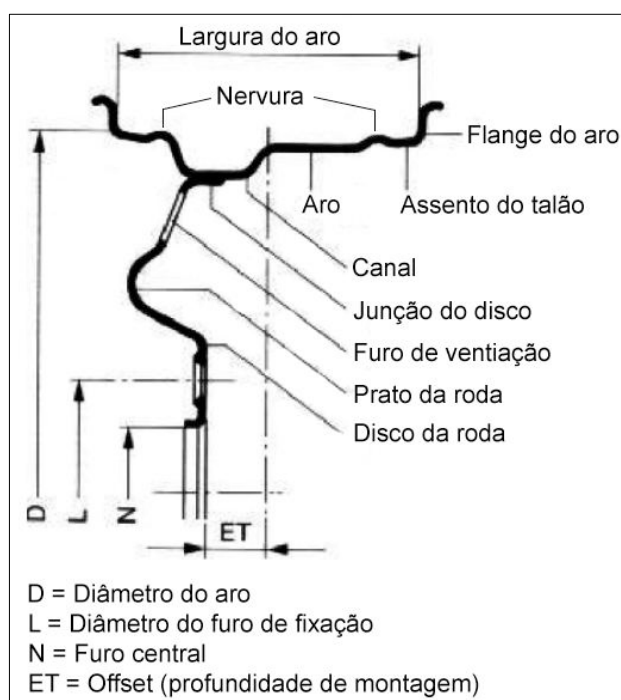
Fonte: O Autor.

5 ANÁLISE E RESULTADOS DA RODA DE COMPÓSITO LAMINADO

5.1 Definição da geometria

Segundo Moraes (2007), a geometria da roda é determinada fundamentalmente pelos requisitos do sistema de freios, componentes do eixo e pelo tamanho do pneu a ser utilizado. A Figura 37 mostra os elementos relacionados a uma roda automotiva de aço.

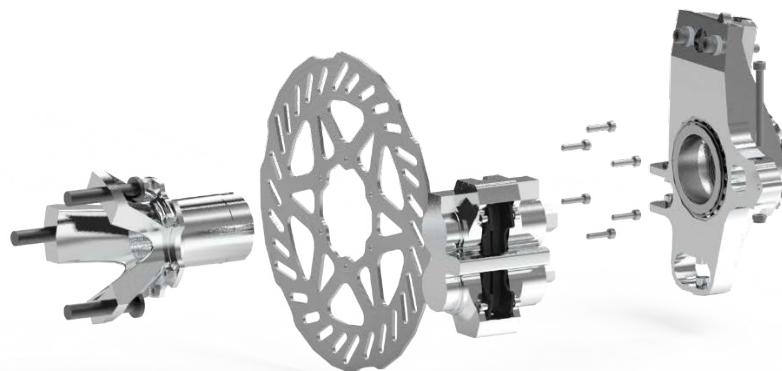
Figura 37 - Esquema de uma roda de chapas de aço



Fonte: Adaptado de Moraes (2007, p. 62).

A geometria da roda foi determinada de acordo com as especificações de projeto do protótipo de Fórmula SAE em estudo. O projeto da suspensão requer o uso de rodas de 10" de diâmetro e com largura do aro de 7". O conjunto de freio, a manga e o cubo também influenciaram diretamente nas dimensões da roda, uma vez que ficam alojados no seu interior. A Figura 38 ilustra os componentes que se alojam no interior da roda, bem como o cubo no qual ela se ligará.

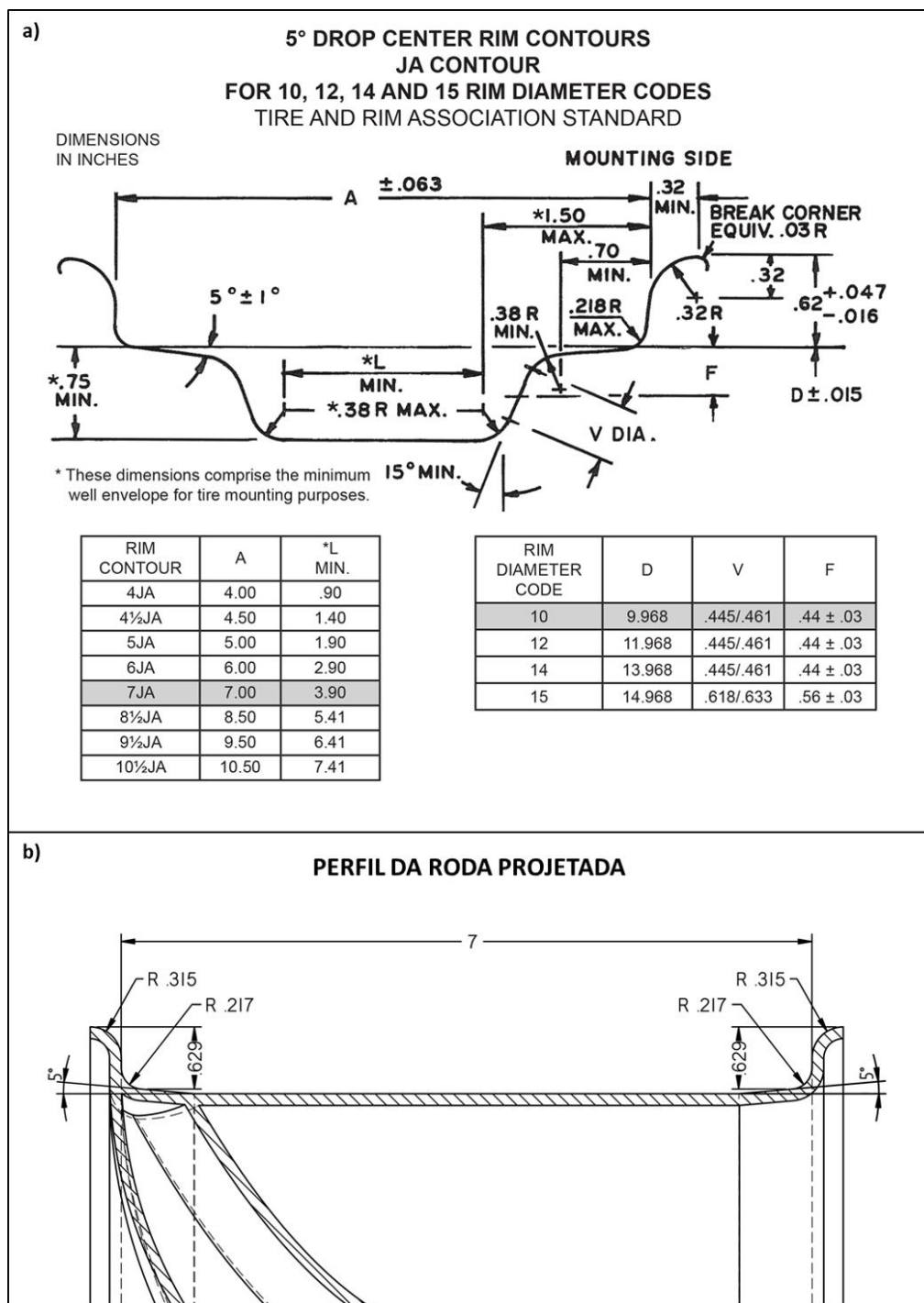
Figura 38 - Componentes do conjunto roda



Fonte: O Autor.

Ligados diretamente à roda estão dois componentes: o cubo e o pneu. O primeiro foi desenhado de forma que a roda fosse ligada a ele por três parafusos M10, dispostos num padrão triangular. O pneu, por sua vez, interage com a roda no assento do talão. Como o pneu é pressurizado, deve-se desenhar a roda de forma a garantir a vedação no contato pneu-roda. Assim sendo, foi seguido o padrão da Associação de Pneus e Rodas (*Tire and Rim Association - TRA*), exibido na Figura 39, no design da roda.

Figura 39 - Perfil da roda de acordo com padrão TRA; a) Tire and Rim Association Standard; b) Perfil da roda projetada

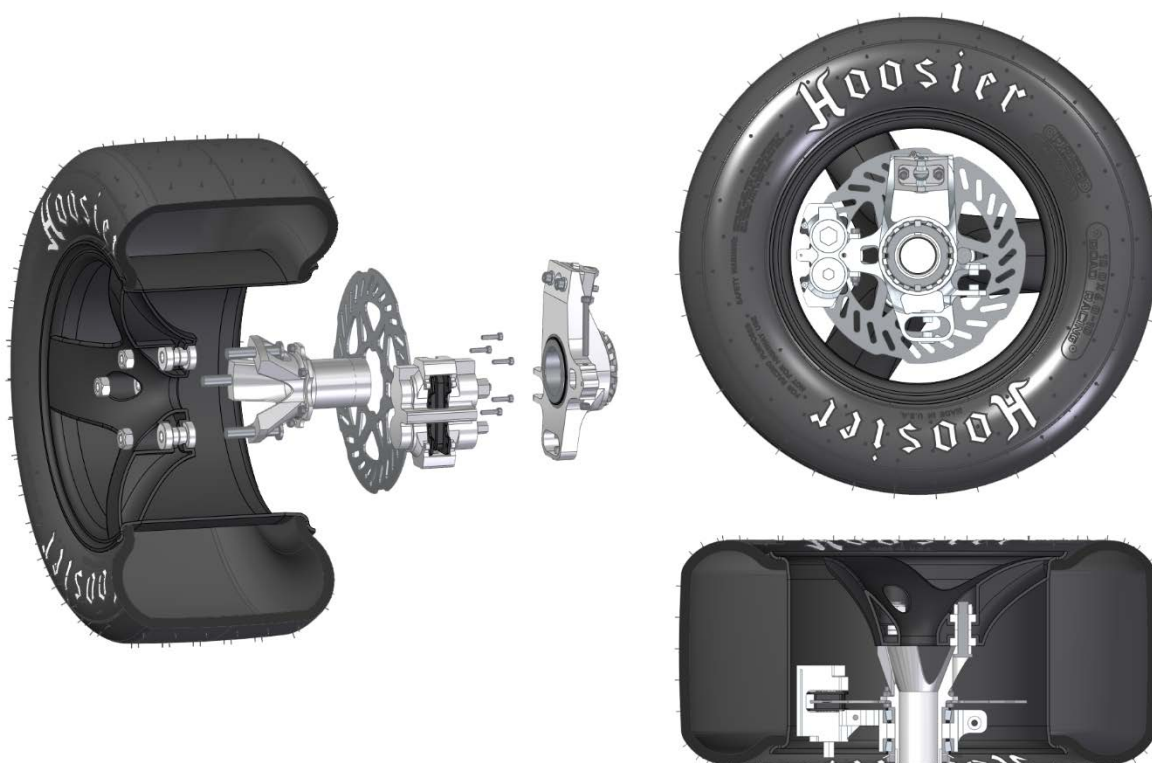


Fonte: a) Adaptado de Tire and Rim Association (2017, p. 4); b) O Autor.

Nota-se, na Figura 39, que há uma série de perfis que não foram replicados no componente projetado, como o canal central e as nervuras. Isso ocorre para simplificar a geometria, uma vez que esta será manufaturada com materiais compósitos, o que torna a execução do projeto mais complexa se comparada com a manufatura de rodas em série.

A Figura 40, a seguir, expõe o design do componente como um todo. Pode-se observar que a geometria dos raios é oca, a fim de assegurar o baixo peso da peça, e conseguir maior área da secção, o que confere maior rigidez à estrutura. Verifica-se também que a geometria adotada concorda com os componentes que a cercam, garantindo o funcionamento do todo.

Figura 40 - Conjunto roda do novo design



Fonte: O Autor.

5.2 Escolha do material

Como já foi introduzido no início dessa monografia, a redução de massa é um dos principais objetivos na indústria automotiva e, sem dúvida, ainda mais significativa no universo da competição automobilística. Ambos vem fazendo uso de materiais compósitos com esse propósito, portanto é natural que esse seja o caminho seguido para se definir o material dessa roda.

Pela Tabela 3, abaixo, verifica-se algumas propriedades de fibras utilizadas como reforço. Entre elas se destacam, pela baixa densidade e resistência à tração, a fibra de carbono e a fibra de aramida.

Sabe-se que as fibras de aramida têm boas propriedades com relação à absorção de impactos, mas como os carros de Fórmula SAE competem em autódromos, pode-se inferir que não haverá irregularidades no pavimento capazes de causar danos por impacto nas rodas. Além disso seu módulo de Young é mais de 50% menor que o da fibra de carbono, o que não condiz com o objetivo de criar um componente mais rígido. Logo, a fibra de carbono é a melhor escolha para material de reforço nessa aplicação.

Tabela 3 - Propriedades de fibras de reforço para compósitos

Fibra	Desidade (ρ) [g/cm ³]	Módulo de Young (E_f) [GPa]	Resistência à Tração (σ_{tf}) [MPa]
Aramida (Kevlar49)	1,45	130	2900
Carbono	1,86	380	2700
Fibra de Vidro (tipo E)	2,54	70	2200
SiC (Nicalon)	2,6	250	2200
Boro	2,65	420	3500
Alumina	3,90	380	1400

Fonte: Adaptado de Tita (1999, p. 9).

De acordo com Tita (1999), as resinas epóxi possuem módulos de elasticidade e compressão altos, o que permite sua aplicação em projetos estruturais. A sua baixa viscosidade facilita a moldagem, o que vai ao encontro do que se espera na manufatura da roda, a qual possui uma geometria consideravelmente complexa. Sendo assim, essa é a melhor opção para esse projeto.

Definidos reforço e matriz, algumas propriedades desse conjunto são requeridas na etapa de simulação. Como a tese de doutorado escrita por Tita (2003) lida com essa mesma combinação de reforço e matriz, na forma de fibras unidirecionais (“UD”) pré-impregnadas com resina (material usualmente chamado de “prepreg”, no mercado), julgou-se apropriado adotar os dados por ele levantados experimentalmente.

Como a roda é um componente de responsabilidade elevada, optar pelo uso de dados obtidos experimentalmente torna seu projeto mais próximo da realidade. O que faz o uso desses dados ser ainda mais interessante é que, além dos materiais de reforço e matriz serem os mesmos, o formato em que eles se apresentam (“prepreg”), também é o mesmo que se pensa em utilizar na manufatura do componente.

O prepreg consiste em mantas de fibra de carbono já impregnadas com resina, garantindo maior controle sobre a fração fibra/resina. É mais fácil de manuseado e contribui para que o processo seja mais limpo em comparação com métodos em que a resina líquida é aplicada às fibras secas. É preciso aplicar pressão sobre o prepreg para que ele assente no molde, portanto é comum usar sacos de vácuo em conjunto com autoclaves para aplica-la. A resina é curada após ciclos de aquecimento e para que ela não cure enquanto o material fica estocado, ele é armazenado em baixas temperaturas.

Na Tabela 4, estão expostos os resultados que Tita (2003) obteve comparados com valores da literatura. Esses são os dados que serão utilizados na etapa de modelamento para definir o material do modelo.

Tabela 4 - Resultados experimentais do prepreg em comparação com valores da literatura

PROPRIEDADES ELÁSTICAS E VALORES DE RESISTÊNCIA	UNIDADE	UNIDIRECIONAL		
		Valor ⁽ⁱ⁾	Valor	
Propriedades Elásticas				
Módulo de Elasticidade:	paralelo à fibra (E_{11})	GPa	127	132 ⁽ⁱⁱⁱ⁾
	perpendicular à fibra ($E_{22}=E_{33}$)	GPa	10	10,3 ⁽ⁱⁱⁱ⁾
Módulo de Cisalhamento:	plano 1-2 ($G_{12}=G_{13}$)	GPa	5,4	4,55 ^(iv)
	plano 2-3 (G_{23})	GPa	3,05 ⁽ⁱⁱ⁾	3,05 ⁽ⁱⁱ⁾
Coeficiente de Poisson:	$\nu_{12}=\nu_{13}$	-	0,34	0,327 ⁽ⁱⁱ⁾
	ν_{23}	-	0,306 ⁽ⁱⁱ⁾	0,306 ⁽ⁱⁱ⁾
Valores de Resistência				
Tração:	paralelo à fibra (X_T)	MPa	1400	1314 ^(iv)
	perpendicular à fibra (Y_T)	MPa	47	45 ⁽ⁱⁱⁱ⁾
Compressão:	paralelo à fibra (X_C)	MPa	930	1179 ⁽ⁱⁱ⁾
	perpendicular à fibra (Y_C)	MPa	130	140 ⁽ⁱⁱⁱ⁾
Cisalhamento:	plano 1-2 ($S_{12}=S_{13}$)	MPa	53	48 ^(iv)
	plano 2-3 (S_{23})	MPa	89 ⁽ⁱⁱ⁾	89 ⁽ⁱⁱ⁾
Fração Volumétrica em Fibra (V_f)		%	63	60
Densidade (ρ_c)		g/cm ³	1,58	1,47 ⁽ⁱⁱⁱ⁾
Espessura da Lâmina		mm	0,18	-

(i) TITA(2003); (ii) Hexcel® (prepreg M40J); (iii) Engineered Materials Handbook (1987); (iv) TSAI (1986)

Fonte: Adaptado de Tita (2003, p. 75).

5.3 Modelamento

Para o modelamento da nova roda, foi usado o mesmo software da etapa anterior: o Abaqus, versão 6.14. Em razão do material utilizado e da pequena espessura da roda, optou-se por modelá-la usando elementos tipo casca (ou *shell*, em inglês) S4R e S3R, os quais são elementos de primeira ordem e de integração reduzida, para uso geral em problemas estruturais. Cada modelo apresentou 1.140.264 graus de liberdade.

Se tratando de um componente de baixa tiragem, manufaturado artesanalmente (ainda que em ambiente adequado e seguindo as boas práticas utilizadas ao lidar com materiais compósitos laminados), decidiu-se aplicar um coeficiente de segurança de 1,8 aos carregamentos, levando em conta instabilidades no processo de fabricação.

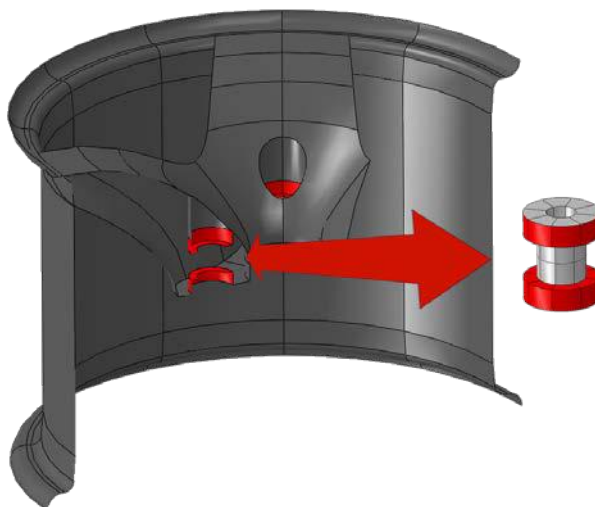
5.3.1 Condições de contorno

Nessa etapa há sete componentes: a roda e os seis insertos, os quais são alojados aos pares, um em cada extremidade dos orifícios destinados a eles. Inicialmente, a ideia era desconsiderar os insertos, engastando as superfícies da roda que entram em contato com eles. Porém, constatou-se que essa abordagem corrobora a concentração de tensão nas regiões adjacentes ao alojamento dos insertos.

Tendo isso em mente, há dois tipos de materiais presentes nesse modelo: um isotrópico, o alumínio dos insertos; e um anisotrópico, o compósito laminado da roda. Como a técnica para representar esses materiais difere muito, os insertos foram representados como sólidos de secção homogênea; já a roda, foi modelada como casca, visto que a espessura das paredes é pequena em relação às outras dimensões, e foi dividida em secções de laminação.

Como os insertos serão colados à roda, optou-se por aplicar a relação “TIE” entre as superfícies de trabalho desses componentes, como pode-se ver na Figura 41. Essa relação acopla um par de superfícies, de modo que não haja movimentação relativa entre elas.

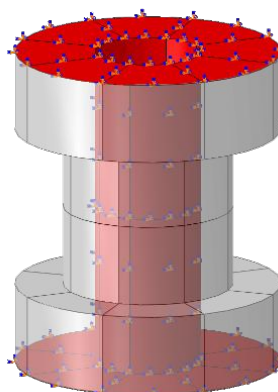
Figura 41 - Superfícies acopladas por “TIE”



Fonte: O Autor.

De forma análoga ao que foi feito na roda de alumínio, optou-se por fixar as superfícies dos inserts que entram em contato com o cubo e os parafusos/porcas. Como se vê na Figura 42, essas foram as superfícies engastadas em cada inserto.

Figura 42 - Superfícies engastadas nos inserts



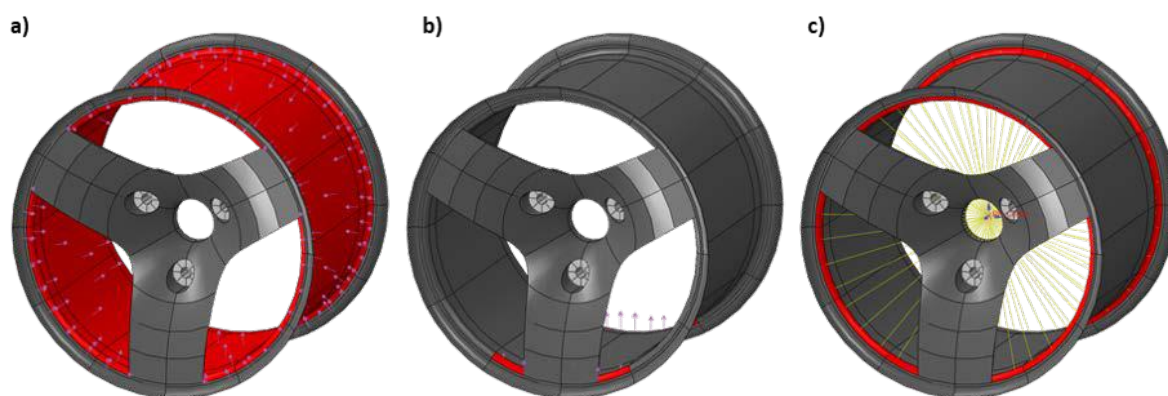
Fonte: O Autor.

5.3.2 Aplicação dos carregamentos

Os carregamentos foram aplicados em regiões específicas da roda, seguindo a mesma lógica utilizada anteriormente, o que permite esse assunto ser tratado globalmente, apenas nesse subitem.

A pressão interna do pneu foi aplicada nas superfícies dos assentos do pneu, bem como nas superfícies compreendidas entre eles. A força normal seguiu a mesma distribuição citada no item 4.2.3, alocada ao longo de uma porção de 60° em cada assento do pneu. E as forças laterais foram transformadas em momentos, cuja aplicação se deu no ponto central da roda, o qual foi acoplado às superfícies dos assentos do pneu, como descrito em detalhes no item 4.2.4. A Figura 43, abaixo, exemplifica os carregamentos aplicados à roda de compósito laminado.

Figura 43 - Carregamentos aplicados à roda de compósito laminado. a) Pressão interna do pneu; b) Força normal; c) Forças laterais e longitudinais

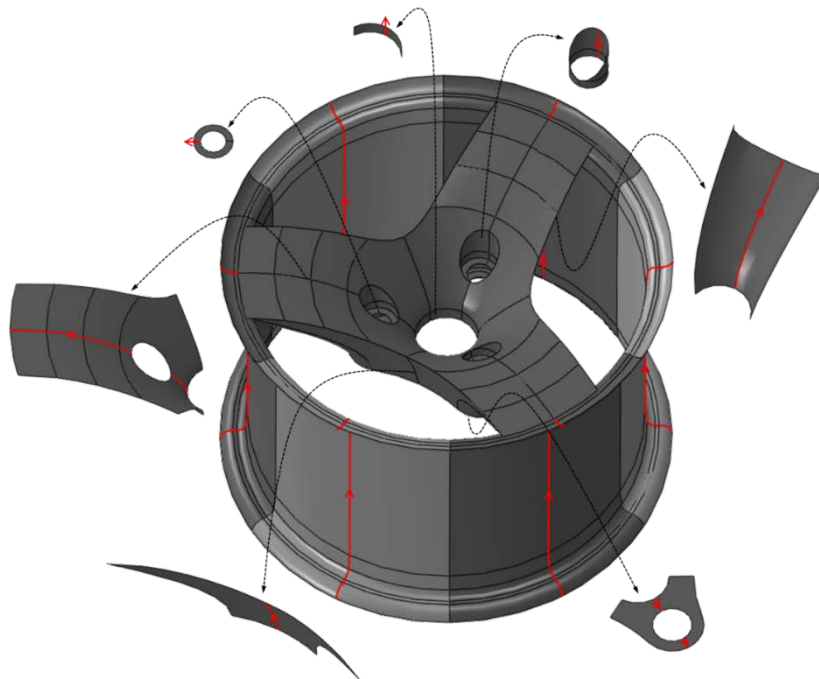


Fonte: O Autor.

5.3.3 Quantidade e orientação das camadas

Tratando-se da aplicação de um compósito laminado em uma geometria complexa, foi necessário fracionar a roda e definir um sistema de coordenadas para cada secção, e então começar a pensar nas quantidades e orientações das camadas. A Figura 44, abaixo, ilustra o fracionamento da roda.

Figura 44 - Secções de laminação e indicações da direção 0°



Fonte: O Autor.

A ideia foi começar com 14 camadas, como uma média baseada nos trabalhos de Chapman (2011) e Ressa (2013), ambos sobre rodas para veículos de Fórmula SAE, cujos designs iniciais começaram com 10 e 16 camadas, respectivamente.

O que se sucedeu foram inúmeros testes envolvendo a otimização do número de camadas e suas orientações, refinamento da malha em locais de concentração de tensão e revisão das relações estabelecidas, a fim de conseguir criar um modelo que suportasse os carregamentos, fosse mais leve e tivesse melhor desempenho com relação aos deslocamentos que a roda de alumínio.

5.4 Resultados e discussão

Os modelos testados ao longo dessa seção são aprimoramentos do modelo inicial, apresentado no item anterior. Isso quer dizer que todos eles suportam os carregamentos oriundos do funcionamento da roda em todas as situações consideradas, mas diferem com relação aos deslocamentos que apresentam.

Vale recordar que o objetivo que se quer atingir ao projetar a roda em material compósito laminado é conseguir um componente mais leve e, ao mesmo tempo, tão rígido ou mais que a roda de alumínio utilizada anteriormente. Para tanto, é necessário aumentar o número de camadas, partindo do modelo base (que embora seja mais

leve e suporte os carregamentos, não apresenta resultados aceitáveis com relação à deformação, logo, é menos rígido que a roda de alumínio).

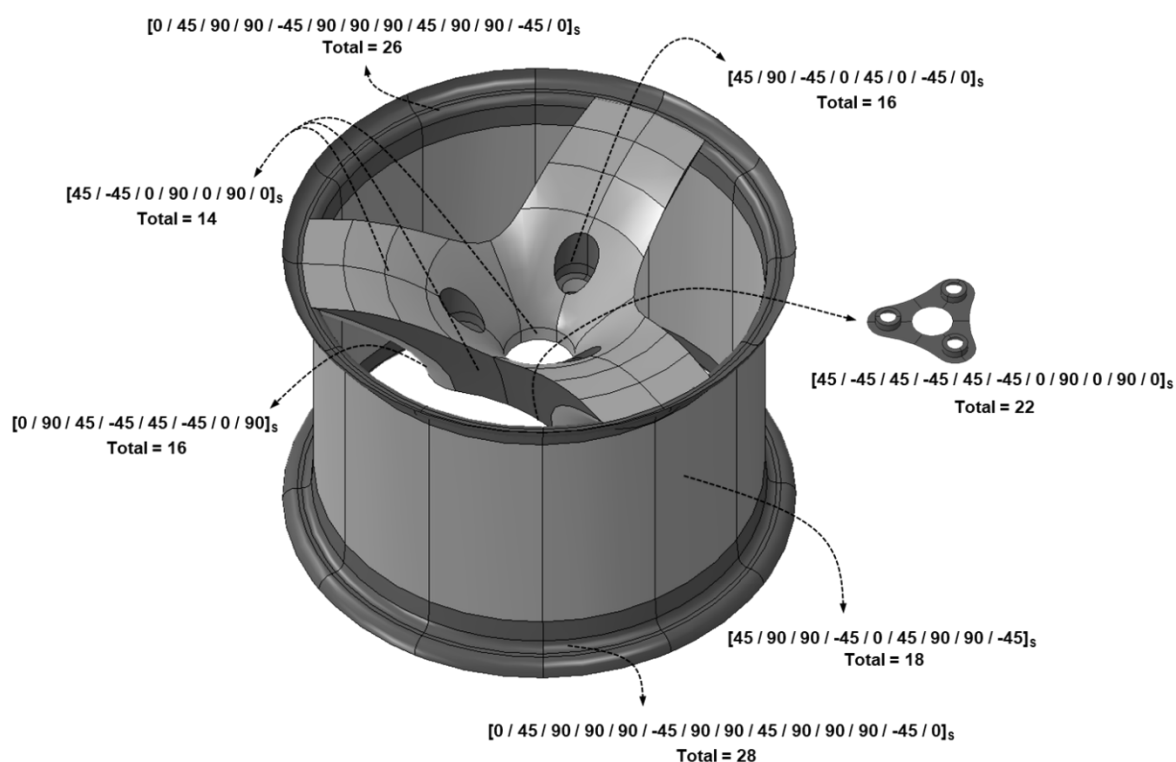
Por se tratar de um material ortotrópico, foi necessário analisar diferentes componentes da tensão, S_{11} , S_{22} e S_{12} , bem como os resultados do critério de evolução de danos de Hashin. Como há três condições de pilotagem sendo analisadas em 0° , 30° e 60° , cada uma, optou-se por expor os resultados mais extremos de cada parâmetro analisado.

Para comparar os resultados de deformação dos modelos em fibra com a roda de 2017, foram usados gráficos contendo a deformação ao longo do perfil do aro, bem como imagens dos gradientes de deslocamento.

5.4.1 Roda de compósito laminado (RL-1)

Esse modelo apresenta regiões com 14 a 28 camadas, conforme se vê na Figura 45. As áreas dos assentos do pneu e seus arredores se mostraram com maior influência na deformação do componente ao longo do perfil do aro, por isso possuem maior número de camadas. A base da roda também contém mais camadas em razão do acúmulo de tensão ao redor dos alojamentos dos insertos.

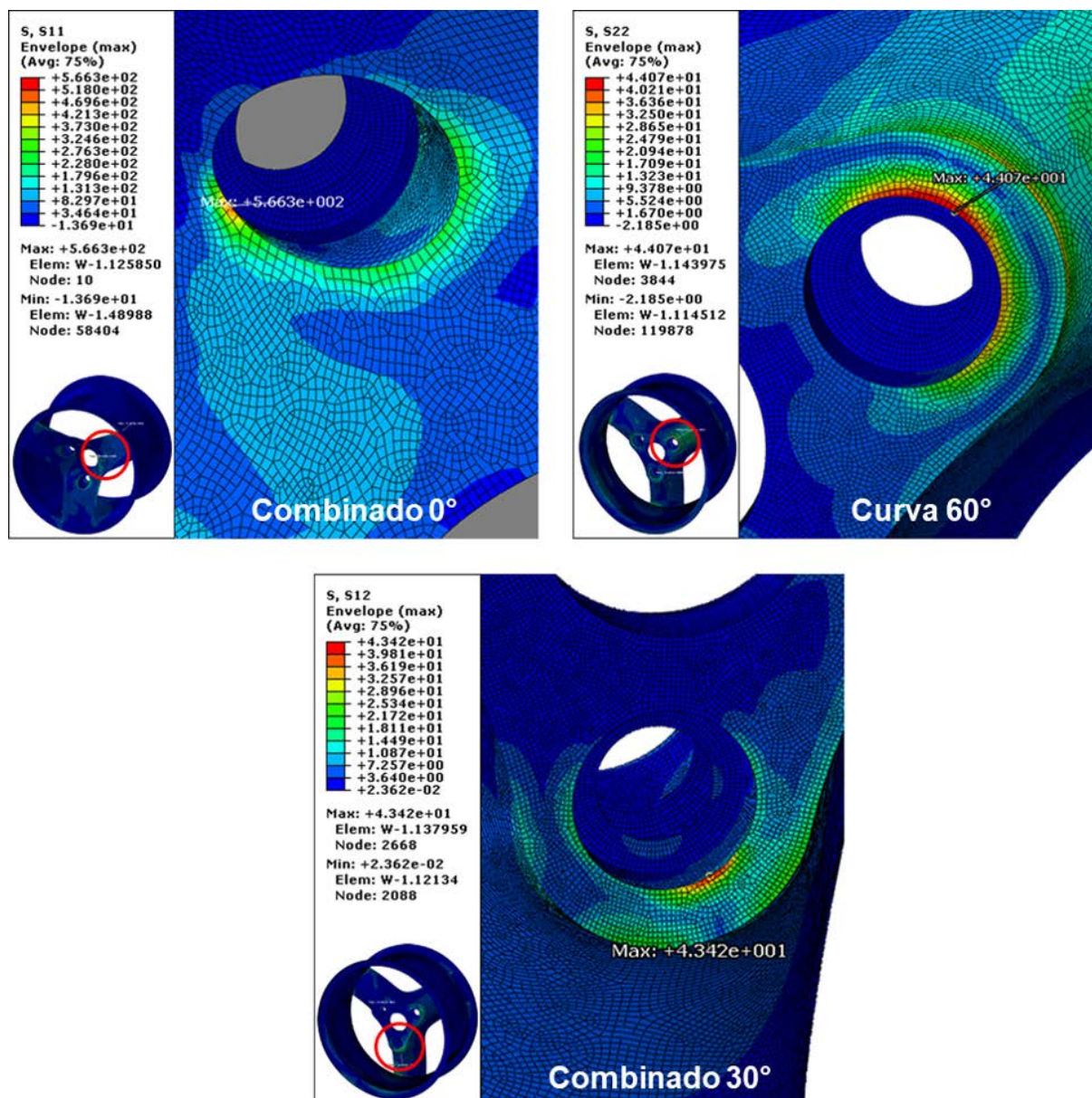
Figura 45 - Distribuição e orientação das camadas da roda de compósito laminado



Fonte: O Autor.

Assim como observado com a roda de alumínio, a situação de frenagem foi a que menos impactou os parâmetros analisados. O mesmo não pode ser dito sobre a combinação de frenagem e curva, que foi responsável pelos resultados mais graves, como se observa na Figura 46, a seguir.

Figura 46 - Gradientes de tensão S11, S22 e S33 (máximo valor dentre todas as camadas) de RL-1 nas situações de maior impacto



Fonte: O Autor.

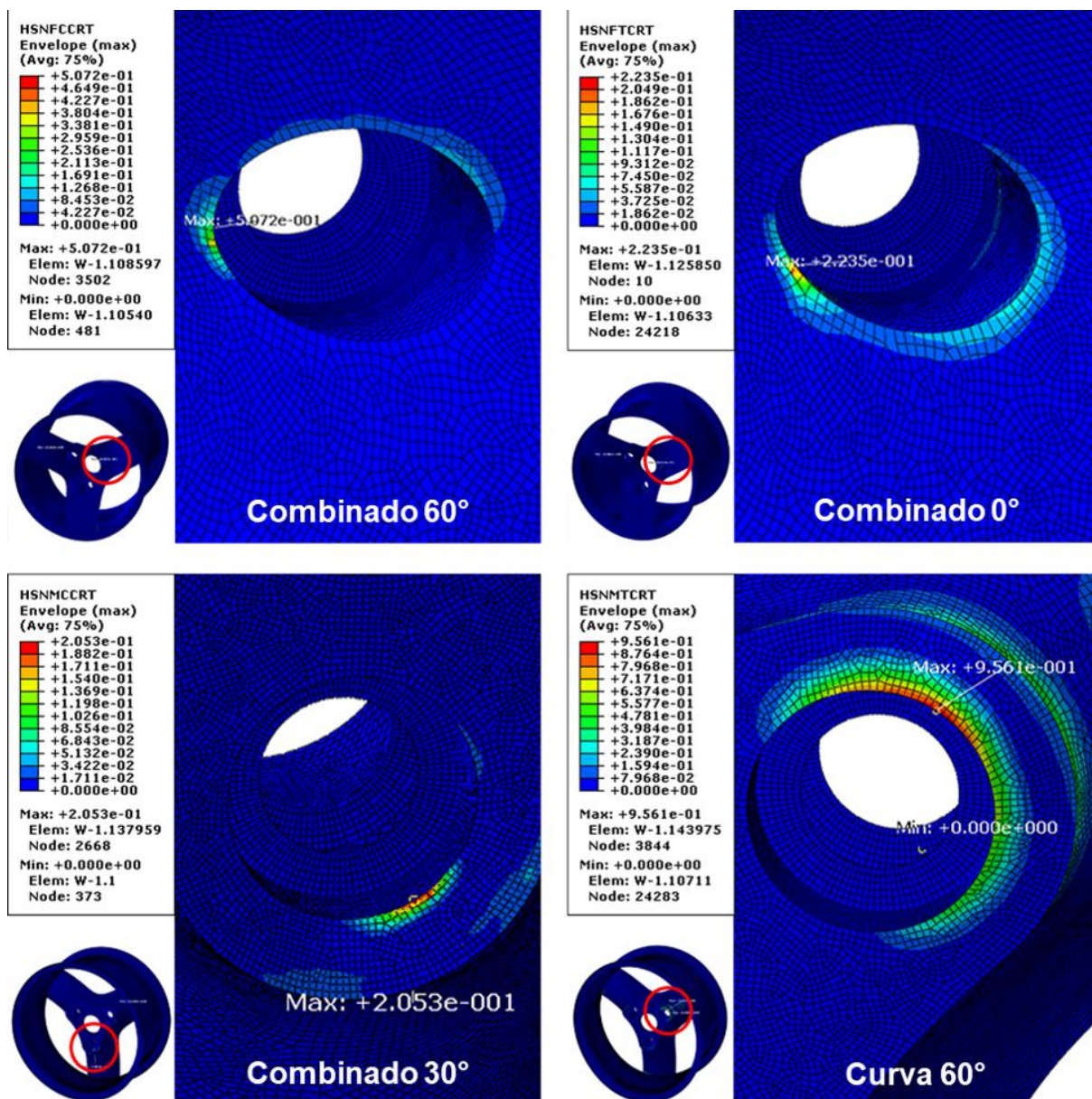
Nota-se que os picos de tensão ocorrem, como esperado, nas regiões ao redor dos alojamentos dos incertos, uma vez que estão próximas ao engaste e apresentam cantos de 90° ou menos, os quais atuam como concentradores de tensão.

Pelo critério de dano de Hashin, o resultado de pelo menos um dos seus índices for maior que 1, implica que o componente está falhando, como explicado na seção 2.1.4. São quatro os índices e cada um está representado pelo software da seguinte maneira:

- HSNFTCRT - falha por ruptura da fibra em tração;
- HSNFCCRT - flambagem da fibra em compressão;
- HSNMTCRT - fratura da matriz em tração;
- HSNMCCRT - esmagamento da matriz em compressão.

Como pode-se ver na Figura 47, a seguir, todos os índices resultaram abaixo de 1, o que corrobora a análise das tensões feita anteriormente. Observa-se que os valores máximos dos índices de Hashin também ocorreram próximos aos alojamentos dos insertos.

Figura 47 - Resultado do critério de Hashin para a roda de compósito laminado

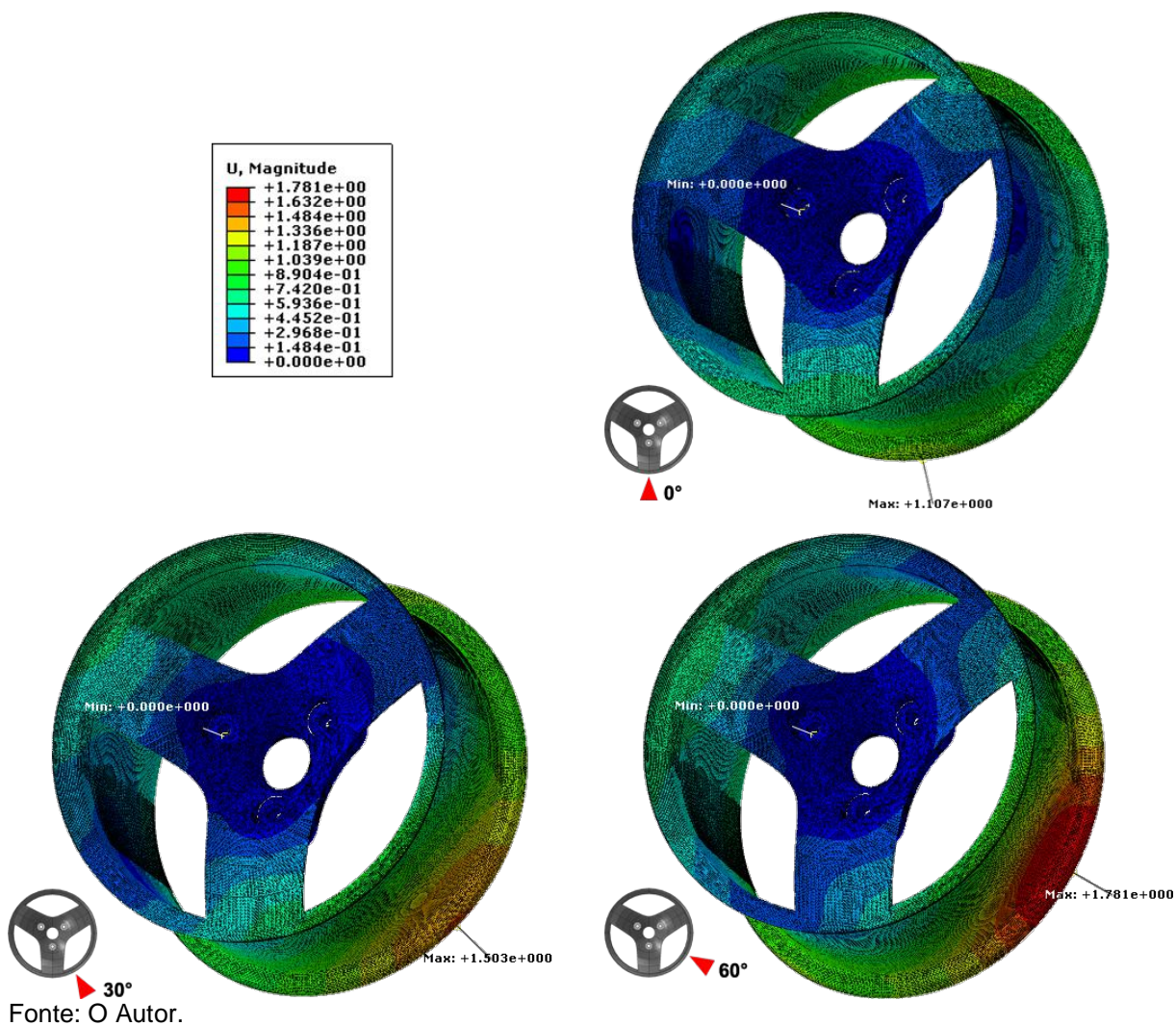


Fonte: O Autor.

Com relação aos deslocamentos, ao contrário do que ocorre com a roda de alumínio, verifica-se diferenças consideráveis nos resultados em razão do posicionamento do carregamento. Isso ocorre em todos os casos estudados, eles exibem um padrão semelhante no aumento do deslocamento de 0° para 30° e de 30° para 60°, como exemplificado pelo caso de curva, na Figura 48. Isso pode ser explicado pela maior distância angular entre os raios, enquanto a roda de alumínio tinha 12 raios espalhados a cada 30°, a nova geometria tem apenas 3 raios, um a cada 120°. Por um lado, há redução de massa, por outro, a porção do aro sem apoio

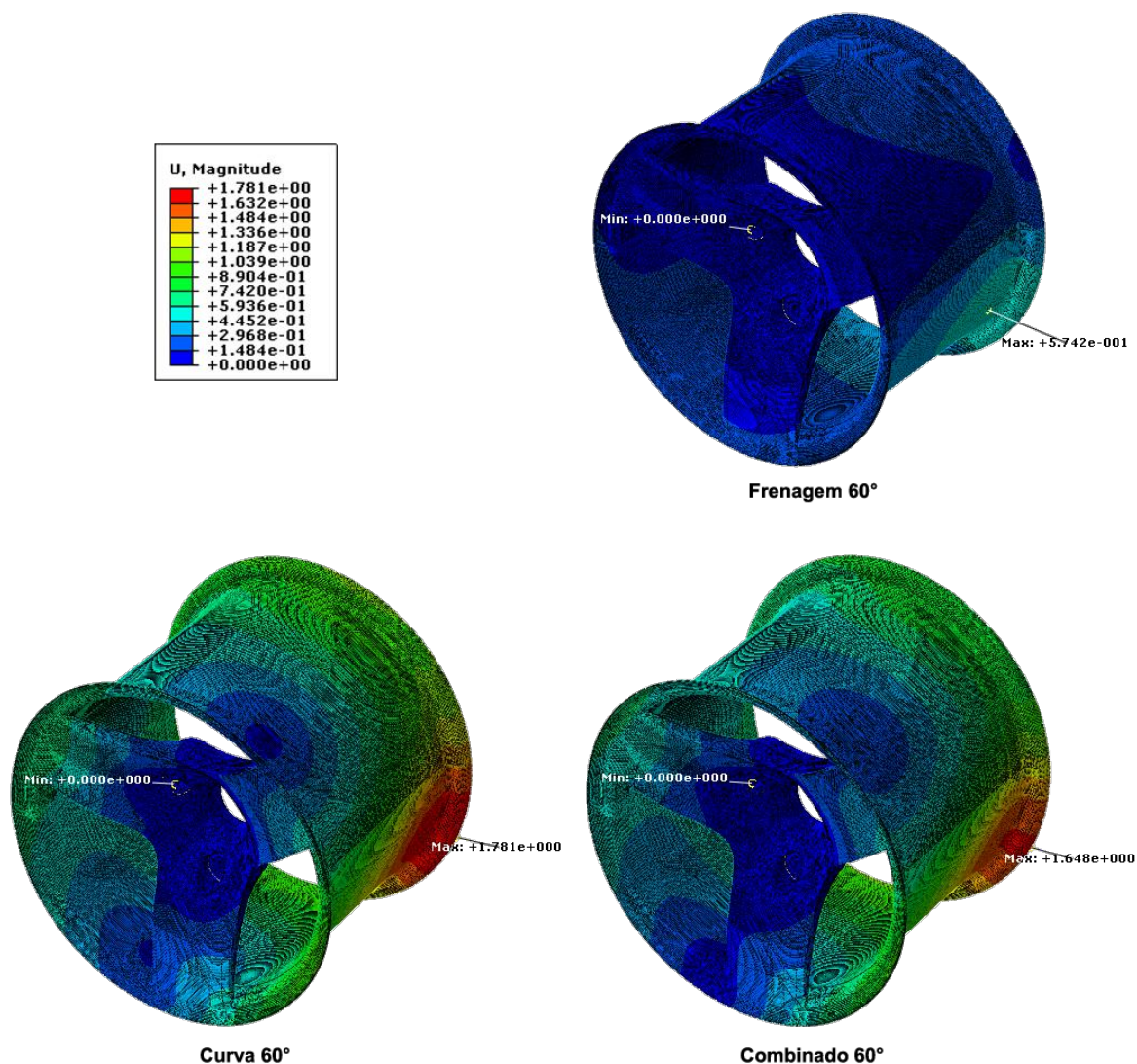
dos raios é maior, levando essas regiões a deformarem mais quando o carregamento atua diretamente sobre elas.

Figura 48 - Gradientes de deslocamento de RL-1 em curva



As situações de curva e de combinação de curva e frenagem apresentaram resultados próximos, sendo elas as que resultam nos piores desempenhos, como pode-se ver na Figura 49. Isso se deve, provavelmente, ao fato das forças laterais que agem nessas situações serem de magnitude maior que a força longitudinal que atua na frenagem, bem como pelo carregamento normal, o qual é de 27% a 35% maior que o encontrado em frenagem.

Figura 49 - Gradientes de deslocamento em RL-1 nas situações de maior impacto

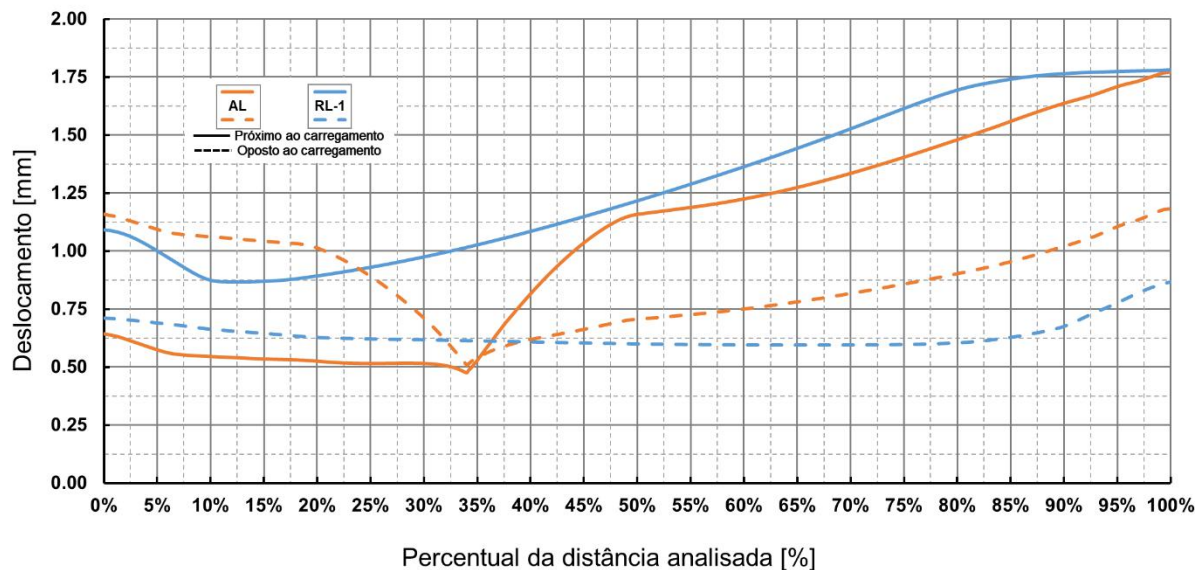


Fonte: O Autor.

Nota-se que, mesmo sob carregamento a 60°, esse modelo apresenta deslocamentos muito próximos aos máximos observados na roda de alumínio. E quando carregado tanto em 0° como em 30°, os deslocamentos são sempre inferiores àqueles exibidos na roda de alumínio, o que indica que esse modelo é superior nesse quesito.

Ao comparar os gráficos de deslocamento ao longo do perfil do aro, no caso de curva na posição 60°, percebe-se que o lado próximo ao carregamento deforma mais que o lado oposto ao carregamento ao longo de toda a distância analisada, diferente do que ocorre com a roda de alumínio.

Gráfico 5 - Comparação entre os deslocamentos ao longo do perfil do aro da roda de alumínio (AL) e de RL-1



Fonte: O Autor.

À primeira vista não fica evidente a equivalência dos designs, uma vez que ora as curvas de deslocamento da roda de compósito laminado são menores, ora as da roda de alumínio apresentam melhor resultado. Contudo, comparar a soma das integrais das curvas da roda de compósito laminado, com a soma das integrais das curvas da roda de alumínio, revela resultados muito próximos, com uma diferença de apenas 0,45% entre eles.

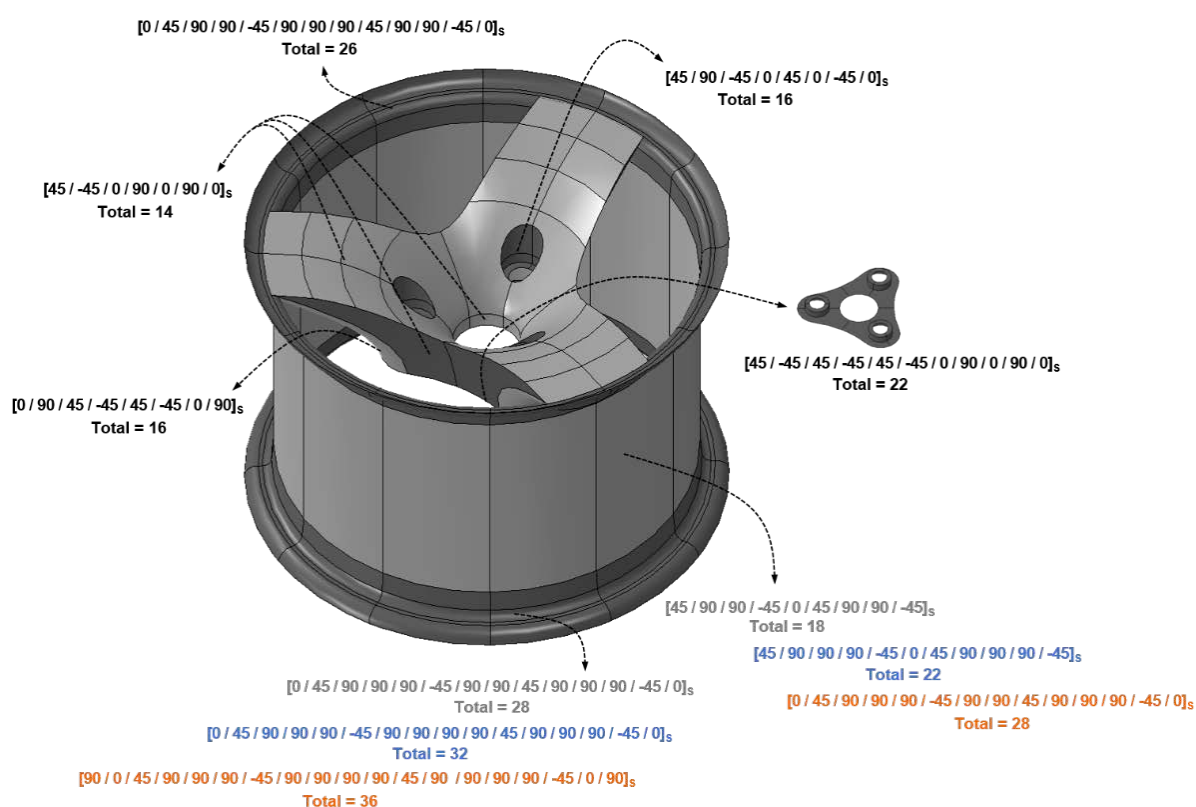
Mesmo sendo equivalente ou um pouco nas situações de carregamento a 60°, a roda de compósito laminado se mostra superior à roda de alumínio quando em 0° e 30° no que diz respeito aos deslocamentos, logo é mais rígida. Ao comparar todos os resultados e fazer uma média, constata-se no modelo RL-1 uma diminuição de 5,2% dos deslocamentos analisados ao longo dos perfis do raio. O outro ponto interessante é que ele é 0,849kg mais leve que a opção em alumínio, incluindo a massa dos insertos.

5.4.2 Otimização da roda de compósito laminado

Mesmo atingindo os objetivos com o design exibido no item 5.4.1, tentou-se conduzir um estudo sobre o quanto se poderia melhorá-lo e como isso afetaria a massa do componente. Para tanto, desenvolveu-se mais dois modelos para esta comparação.

Durante o processo de otimização percebeu-se que o assento do pneu inferior e o centro do aro eram as zonas que mais influenciavam no resultado final do deslocamento, por isso a diferença entre os modelos se dá na quantidade e orientação das camadas nesses pontos. A Figura 50 traz uma representação visual das alterações que foram feitas; em preto estão os *layups* comuns a todos os modelos; em cinza está representado RL-1; em azul, RL-2; e em laranja, RL-3.

Figura 50 - *Layups* dos modelos de roda de compósito laminado



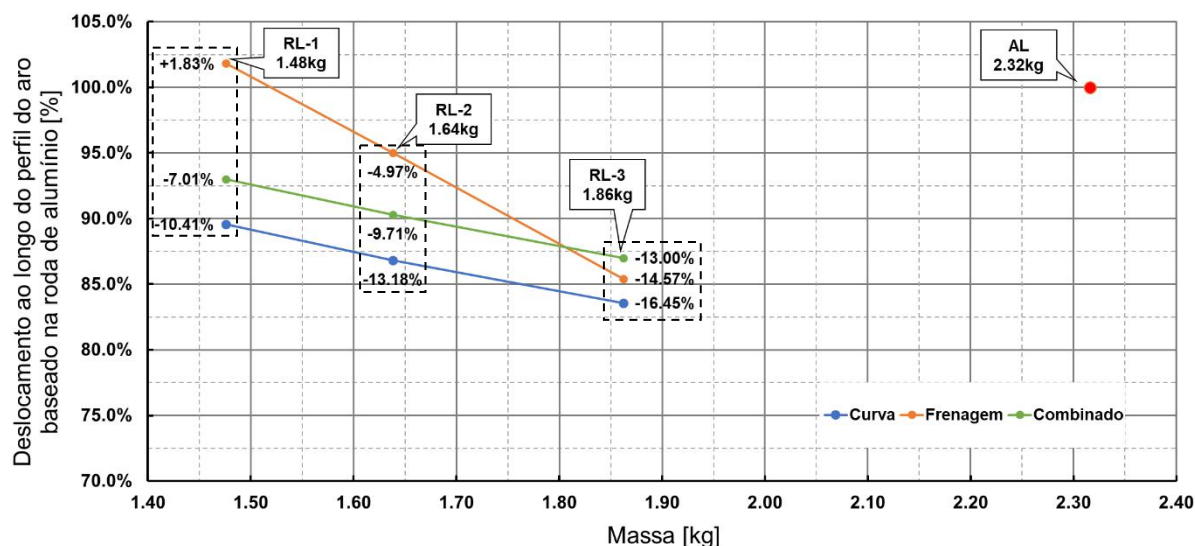
Fonte: O Autor.

Mesmo tornando mais rígidos os pontos mencionados, não se observou aumento significativo nas tensões no restante da roda, em nenhum dos modelos. Todos eles apresentam tensões abaixo dos limites de ruptura do material e estão de acordo com os critérios de dano de Hashin.

Comparou-se os modelos seguindo a lógica apresentada na seção anterior, que consiste na comparação das integrais dos gráficos de deslocamento ao longo do perfil do aro, tanto próximo ao local de aplicação dos esforços, como no lado oposto. Foram confrontados os dados de todas as situações propostas no desenvolvimento do projeto, comparando-os equivalentemente. Com a medição da melhora em cada posição, por

meio de uma média simples, estimou-se a melhora de cada situação de pilotagem como um todo, cruzando isso com as massas, gerou-se o Gráfico 6, a seguir.

Gráfico 6 - Comparação entre a melhora no desempenho e a massa dos modelos



Fonte: O Autor.

Como pode-se ver, RL-1 é o único modelo que apresenta piora de desempenho num dos cenários, entretanto essa piora é de apenas 1,83%. Isso se deve em virtude do carregamento da frenagem na posição de 60°, em que o aro está menos apoiado pelos raios.

Apesar desse ponto negativo, RL-1 é a opção que traz mais redução de massa por roda: menos 840g, seguido de RL-2, que reduz 680g e de RL-3, com 460g de redução. Partindo direto de RL-1 para RL-3, deixa-se de perder 380g por roda para que o componente desloque poucos décimos de milímetro a menos. Pensando apenas no custo da matéria-prima utilizada nos modelos (sem contar as perdas), estima-se que seriam gastos US\$105,00 a mais por roda para produzir RL-3, considerando que a fibra de carbono pré-impregnada pese 200g/m² (portanto os 380g a mais se traduzem em 7,6m² de material) e custe US\$55,00/m².

Tendo isso em mente, RL-2 parece ser uma alternativa melhor, visto que é apenas 160g mais pesada que RL-1 e a supera em todos os cenários. Fazendo a mesma comparação de custo de matéria-prima adicional para manufaturá-la, vê-se que cerca de US\$40,00 seriam gastos a mais, seguindo o mesmo raciocínio anterior. A redução de massa se dá na casa dos 30% por roda, o que não é muito perto dos

50% de redução de massa por roda que Reesa (2013) conseguiu, mas que se traduz em 2,56kg a menos ao considerar as quatro rodas do veículo.

6 CONCLUSÃO

Como foi possível acompanhar, a ideia de reduzir massa de um protótipo de Formula SAE através do projeto de uma nova roda foi esmiuçada ao longo do trabalho. Desde a identificação dos requisitos de projeto até as etapas de modelamento, o que serviu para abranger todos os passos necessários para a execução de um projeto teórico de um item como esse.

Os desafios encontrados ao longo dessa obra começaram logo que se notou a falta de parâmetros estruturais estabelecidos na literatura sobre o projeto de uma roda com as características desejadas, o que levou o autor a optar por criar seus próprios parâmetros baseados no modelamento da roda de alumínio utilizada pela equipe. Apesar do esforço envolvido, essa etapa foi positiva pois gerou muito aprendizado que pôde ser aplicado no modelamento da roda de compósito laminado.

Dada a geometria complexa do novo design, não foi tarefa simples alocar os layups e determinar seus sistemas de coordenadas, deixando menos intuitivo ainda prever como orientar as camadas em cada um deles. O número de layups também foi um empecilho, visto que eram 45 no total, elevando o tempo destinado a alteração das orientações e quantidades das camadas durante o processo de otimização.

Fruto desse processo, os modelos apresentados ao final do seção 5 conseguiram cumprir com os objetivos do projeto, se analisado o deslocamento por massa, ficou evidente a superioridade da roda de compósito laminado em relação à roda de alumínio, mesmo não atingindo tanta redução de massa como observado em outros trabalhos citados. Talvez isso seja reflexo do fator de segurança utilizado ou de uma possível imprecisão dos dados da simulação da roda de alumínio que foram utilizados como base.

Considerando que os dados estão corretos, o comparativo entre a massa e a melhora na performance, embora seja uma aproximação, tanto do ponto de vista da estimativa da massa pelo software, como da representatividade que os resultados ao longo dos perfis do aro têm em relação ao todo, serviu bem ao propósito de mostrar o valor pago, tanto em massa, quanto em dinheiro, contribuindo para a escolha do melhor design.

Contudo há um ponto que não foi discutido: o processo de manufatura. Isso implicaria mais restrições em relação à quantidade de camadas e à própria geometria da roda, em razão das transições entre zonas com diferentes quantidades de camadas, da geometria dos moldes, entre outros fatores.

Ainda assim, do ponto de vista estrutural, os objetivos traçados no início da monografia foram alcançados. Além de reunir conhecimentos que foram abordados durante a graduação, esse trabalho serviu de canal para o aperfeiçoamento deles, principalmente em relação a modelamento e simulação com elementos finitos.

6.1 Recomendações para futuros trabalhos

A falta de experimentos é o principal ponto a ser discutido nessa seção, visto que um modelo real seria muito útil para a definição dos parâmetros de deformação da roda de alumínio, já que foram eles que nortearam o desenvolvimento do projeto. Com uma base mais sólida, pode-se evitar a propagação de erros ao longo do projeto, evitando, por exemplo, que dados de deformação elevados fossem considerados, resultando numa roda compósito laminado mais pesada ou mesmo o contrário, deformações menores que as reais poderiam dar origem a uma roda mais frágil.

Um experimento real com a roda de material compósito laminado também seria positivo no que diz respeito à otimização do modelo virtual, uma vez que os resultados poderiam ser comparados entre si, orientando as suposições com relação à aplicação das cargas, à montagem dos insertos, entre outras. Contudo, em razão da complexidade geométrica, manufaturar esse protótipo seria dispendioso, o que se aplicaria a outro nível de pesquisa e, talvez dependeria de investimento de terceiros.

Provavelmente, um caminho mais seguro do ponto de vista de confiabilidade e manufatura, seria projetar apenas os aros da roda, de modo que o mesmo modelo de flange fosse intercambiável entre a roda compósito laminado e a roda de alumínio. É evidente que isso restringe mais o design, entretanto serve como passo intermediário para, no futuro, manufaturar uma roda inteira de compósito. Ademais, essa seria uma geometria simples o suficiente para que protótipos possam ser produzidos, além de ser uma proposta mais atrativa no tocante ao custo do produto final.

REFERÊNCIAS

- ALUMINUM 6061-T6; 6061-T651. **ASM Aerospace Specification Metals, Inc.**
Disponível em:
<<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma6061t6>>. Acesso em: 04 maio 2018.
- ALUMINUM 7075-T6; 7075-T651. **ASM Aerospace Specification Metals, Inc.**
Disponível em:
<<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075T6>>. Acesso em: 04 maio 2018.
- BATHE, K. J. **Finite Element Procedures**. Watertown: Prentice Hall, 2014.
- #BLACKSWANMOMENTS - MP4/1. **Mclaren Cars**. Disponível em:
<<http://cars.mclaren.com/featured-articles/blackswanmoments-mp41.html>>. Acesso em: 24 out. 2017.
- BITTENCOURT, M. L. **Análise Computacional de Estruturas**. Campinas: Editora Unicamp, 2010.
- BRADY, M.; BRADY, P. Technology developments in automotive composites. **Reinforced Plastics**, v. 54, n. 6, p. 25-29, nov./dez. 2010.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CARBON Fiber Production. **The University of Tennessee Space Institute**. Disponível em: <<http://www.utsi.edu/index.php/carbon-fiber-production/>>. Acesso em: 14 out. 2017.
- CHAPMAN, K. M. **Development of a Composite Wheel Rim for an FSAE Car**. 2011. 28 p. Monografia (Graduação em Engenharia Aeronáutica) - University of New South Wales, Canberra, 2011.
- DUARTE, A. P. C.; SÁEZ, A. D.; SILVESTRE, N. Comparative study between XFEM and Hashin damage criterion applied to failure of composites. **Thin-Walled Structures**, v. 115, p. 277-288, jun. 2017.
- FERRARI F14-T engine cover. **Motorsport.com**, 19 jun. 2014. Disponível em:
<<https://www.motorsport.com/f1/photo/main-gallery/ferrari-f14-t-engine-cover-2/>>. Acesso em: 26 out. 2017.
- HERAKOVICH, C. T. **Mechanics of Fibrous Composites**. 1. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1997.
- JONES, R. M. **Mechanics of Composite Materials**. 2. ed. Nova Iorque: Taylor & Francis, 1999.

MALLICK, P. K. **Fiber Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design**. 3. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2008.

MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L. **Race Car Vehicle Dynamics**. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1995.

MORAES, L. F. L. **Análise estrutural e verificação da vida à fadiga de uma roda automotiva utilizando o Método dos Elementos Finitos**. 2007. 110 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NYAMWANGE, J.; NYAMWANGE, M. Major Innovations in Transportation: Evolution of Automobiles. **International Journal of Humanities and Social Science**, v. 4, n. 5(1), p. 40-45, mar. 2014.

RESSA, A. **Development of a carbon fiber wheel rim**. 2013. 43 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - The Ohio State University, Columbus, 2013.

SAVAGE, G. **Composite Materials Technology in Fórmula 1 Motor Racing**, jul. 2008. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Composite-Materials-Technology-in-Formula-1-Motor-Savage/30f929d9eaaeece8881fa06436be69dd672adc817>>. Acesso em: 14 out. 2017.

SEWARD, D. **Race Car Design**. Londres: Palgrave, 2014.

STEARNS, J. C. **An Investigation of stress and displacement distribution in a aluminum alloy automobile rim**. 2001. 240 p. Thesis (Ph.D in Mechanical Engineering) - The University of Akron, Akron, OH, EUA, 2001.

STEWART, R. Automotive composites offer lighter solutions. **Reinforced Plastics**, v. 54, n. 2, p. 22-28, mar./abr. 2010.

SUSPENSION. **Formula1.com**. Disponível em: <<https://www.formula1.com/en/championship/inside-f1/understanding-f1-racing/Suspension.html>>. Acesso em: 26 out. 2017.

SWIFT, S. **Tutorial 1 (Basic): Simple Bracket**. Disponível em: <<http://www.ssanalysis.co.uk/knowledge-base/abaqus-tutorials>>. Acesso em: 24 out. 2017.

TIRE AND RIM ASSOCIATION - TRA. **The Tire and Rim Association Year Book**. Akron: TRA, 2017.

TITA, V. **Análise dinâmica teórica e experimental de vigas fabricadas a partir de materiais compósitos poliméricos reforçados**. 1999. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

TITA, V. **Contribuição ao estudo de danos e falhas progressivas em estruturas de material compósito polimérico**. 2003. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

TOLOUEI, R., MAHER, M., TITHERIDGE, H. Vehicle mass and injury risk in two-car crashes: A novel methodology. **Accident Analysis and Prevention**, v. 50, p. 155-166, jan. 2013.