

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Karoline Nascimento da Silva

Projeto estrutural de um cubo de roda para veículos

***off-road* do tipo mini Baja**

Relatório Final do Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de
Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Ivan F. M. Menezes

Rio de Janeiro

Fevereiro 2025

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a Deus por Sua constante orientação, apoio e graça ao longo de toda a minha jornada acadêmica, desde o início da graduação até a conclusão deste trabalho. Agradeço por me capacitar com as habilidades e recursos necessários para enfrentar os desafios acadêmicos. Cada obstáculo superado e cada conquista alcançada foram verdadeiras bênçãos de Sua bondade e misericórdia.

Aos meus queridos pais, não há palavras suficientes para o apoio que me proporcionaram desde o início da minha graduação. Foram meus maiores incentivadores, encorajando-me a perseguir meus sonhos e apoiando-me incondicionalmente em cada passo do caminho. Mesmo nos momentos de maior desafio, quando eu me sentia incapaz de prosseguir sozinha, estavam lá, oferecendo seu amor, orientação e apoio inestimáveis. Sem seus sacrifícios e dedicação, minhas conquistas não seriam possíveis.

Agradeço aos meus companheiros de caminhada, que estiveram ao meu lado durante noites intermináveis de estudo e trabalhos em grupo. A pandemia nos impôs a distância física, mas também fortaleceu nossos laços, tornando-nos ainda mais resilientes diante dos desafios.

Aos amigos, que compreenderam minhas ausências ao longo dessa jornada, sou muito grata. Equilibrar a vida acadêmica e social não foi uma tarefa simples, mas, com dedicação e foco, especialmente nos momentos mais intensos, foi possível superar cada obstáculo e alcançar esta conquista.

Agradeço ao meu professor orientador, Ivan Menezes, por sua paciência, orientação e generosidade ao compartilhar seu vasto conhecimento durante o processo de elaboração deste trabalho. Sua dedicação em oferecer *feedback* construtivo foi fundamental para meu crescimento acadêmico. Agradeço sinceramente por investir seu tempo e esforço em me orientar, inspirar e desafiar-me a alcançar meu máximo potencial.

Por fim, gostaria de agradecer à PUC-Rio por esses anos de aprendizado, pelas oportunidades de crescimento acadêmico e profissional, e por proporcionar um ambiente de ensino que incentivou o desenvolvimento do conhecimento, da ética e da inovação. Sou grato por cada experiência vivida, pelos desafios superados e pelo preparo que essa instituição me proporcionou para os caminhos futuros.

RESUMO

Projeto estrutural de um cubo de roda para veículos *off-road* do tipo mini Baja

Este trabalho apresenta o projeto estrutural de um cubo de roda para veículos *off-road* do tipo Mini Baja, aplicando metodologias de análise e simulação computacional para garantir sua eficiência e desempenho. A abordagem adotada inicia-se com uma ampla revisão bibliográfica, seguida pela definição dos objetivos do projeto e pela coleta de dados essenciais para a fase de desenvolvimento. Em seguida, são realizadas a seleção do material mais adequado para a aplicação e a escolha dos rolamentos, uma vez que esses componentes também estão sujeitos a esforços transmitidos para o cubo de roda. A modelagem foi desenvolvida no *software* SolidWorks, enquanto as análises estruturais e simulações das condições críticas de operação foram conduzidas no *software* ANSYS, utilizando o Método dos Elementos Finitos. Os resultados obtidos contribuíram para a validação do projeto, garantindo que o componente atenda aos requisitos mecânicos e estruturais exigidos para sua aplicação no Mini Baja.

Palavras chaves: cubo de roda, Baja SAE, projeto estrutural, Método de Elementos Finitos.

ABSTRACT

Structural design of a wheel hub for mini Baja type off-road vehicles

This work presents the structural design of a wheel hub for off-road vehicles of the Mini Baja type, applying analysis and computational simulation methodologies to ensure its efficiency and performance. The approach begins with a comprehensive literature review, followed by the definition of the project objectives and the collection of essential data for the development phase. Subsequently, the selection of the most suitable material for the application and the choice of bearings are carried out, as these components are also subjected to forces transmitted to the wheel hub. The modeling was developed using SolidWorks, while the structural analyses and simulations of critical operating conditions were conducted in ANSYS, applying the Finite Element Method. The results obtained contributed to the validation of the project, ensuring that the component meets the mechanical and structural requirements necessary for its application in the Mini Baja.

Keywords: wheel hub, Baja SAE, structural design, Finite Element Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Alinhamento para enduro de resistência na competição nacional 2020 Baja SAE Brasil	10
Figura 2. Veículo Baja SAE Brasil	14
Figura 3. Transferência de Carga Longitudinal.....	27
Figura 4. Transferência de Carga Lateral	28
Figura 5. Protótipo	44
Figura 6. Protótipo com Linhas Ocultas Visíveis	45
Figura 7. Dados do Material no software ANSYS	46
Figura 8. Malha - Vista Frontal	47
Figura 9. Malha - Vista Traseira.....	47
Figura 10. Malha - Vista Lateral.....	48
Figura 11. Malha - Vista Detalhada dos Furos.....	48
Figura 12. Força Aplicada - Vista Frontal.....	49
Figura 13. Força Aplicada - Vista Traseira	49
Figura 14. Força Aplicada - Vista Lateral.....	50
Figura 15. Condição de Contorno B	50
Figura 16. Detalhes da Condição de Contorno B	51
Figura 17. Condição de Contorno C	51
Figura 18. Detalhes da Condição de Contorno C	52
Figura 19. Resultado da Simulação.....	53
Figura 20. Resultado da Simulação - Vista Frontal	53
Figura 21. Resultado da Simulação - Vista Traseira.....	54
Figura 22. Resultado da Simulação - Vista Lateral.....	54
Figura 23. Ponto Crítico de Tensão	55
Figura 24. Cálculo do Rolamento 32004 X.....	55
Figura 25. Cálculo do Rolamento 32005 X.....	56

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	9
2.1. VEÍCULOS <i>OFF-ROAD</i>	9
2.1.1. Veículos <i>Off-road</i> : Mini Baja e Competições SAE	9
2.1.2. Características dos Veículos <i>Off-road</i>	14
2.1.3. Desafios e Comparações com Outros Veículos de Competição	18
2.2. SISTEMA DE SUSPENSÃO E COMPONENTES ASSOCIADOS.....	19
2.3. CUBO DE RODA: FUNÇÕES E IMPORTÂNCIA	23
2.4. DINÂMICA VEICULAR: TRANSFERÊNCIA DE CARGA E ESFORÇOS	26
2.5. MATERIAIS PARA O PROJETO DE CUBO DE RODA	30
2.6. SELEÇÃO DE ROLAMENTOS PARA CUBO DE RODA.....	32
2.7. CONCEITOS GERAIS SOBRE O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	34
2.8. NORMAS TÉCNICAS E REGULAMENTAÇÕES PARA PROJETOS VEICULARES.....	37
3. METODOLOGIA	41
3.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	41
3.2. DEFINIÇÃO DE OBJETIVOS.....	41
3.3. COLETA DE DADOS	41
3.4. ESCOLHA DO MATERIAL	42
3.5. SELEÇÃO DE ROLAMENTOS	43
3.6. MODELAGEM	43
3.7. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	45
4. RESULTADOS	53
5. CONCLUSÃO	57
6. REFERÊNCIAS.....	58

"Consagre ao Senhor tudo o que
você faz, e os seus planos serão
bem-sucedidos."

Provérbios 16:3

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de veículos *off-road*, especialmente no âmbito das competições acadêmicas como o Baja SAE, envolve uma série de desafios de engenharia que exigem soluções robustas e inovadoras para garantir desempenho, segurança e durabilidade. Um dos componentes essenciais para o bom funcionamento desses veículos é o cubo de roda, peça fundamental no sistema de suspensão e direção. O projeto adequado desse componente é crucial, pois ele é responsável por suportar a carga do veículo, absorver impactos e manter a estabilidade durante as manobras, além de influenciar diretamente a eficiência de outros sistemas, como os freios e a suspensão. A escolha adequada dos materiais, o dimensionamento preciso e a análise das cargas aplicadas sobre o cubo de roda são essenciais para garantir que o veículo seja capaz de suportar as condições extremas das competições *off-road*, nas quais obstáculos como terrenos acidentados, curvas fechadas e frenagens bruscas são comuns.

Neste trabalho, o foco é o desenvolvimento de um cubo de roda capaz de suportar as condições adversas enfrentadas pelos veículos *off-road*, com a utilização de análises estruturais, como o método dos elementos finitos (MEF) (Cook, 1981), para garantir sua resistência e durabilidade. Além disso, o trabalho buscará explorar diferentes opções de materiais e técnicas de fabricação, a fim de otimizar o peso do cubo sem comprometer sua integridade estrutural. Assim, o objetivo principal é desenvolver um projeto que atenda aos requisitos de desempenho das competições Baja SAE, mantendo o equilíbrio entre robustez e eficiência.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. VEÍCULOS *OFF-ROAD*

O estudo de veículos *off-road*, particularmente os que participam das competições Baja SAE, tem atraído atenção devido aos desafios inerentes ao desenvolvimento de soluções tecnológicas para melhorar o desempenho desses veículos em terrenos adversos.

As competições Baja SAE, promovidas por universidades em todo o mundo, desempenham um papel crucial no fomento à inovação e na aplicação prática de conhecimentos teóricos em engenharia automotiva. Esses eventos não só testam a capacidade técnica dos estudantes, mas também promovem a investigação e o desenvolvimento contínuo de veículos projetados para operar em condições extremas, exigindo um equilíbrio delicado entre robustez estrutural, eficiência e durabilidade.

2.1.1. Veículos *Off-road*: Mini Baja e Competições SAE

Os veículos *off-road*, especialmente aqueles que participam das competições Baja SAE, têm se tornado objetos de intenso estudo e desenvolvimento na engenharia automotiva, uma vez que representam um desafio significativo para a aplicação de conhecimentos técnicos em condições extremas.

As competições Baja SAE são eventos acadêmicos nacionais e internacionais que oferecem aos estudantes a oportunidade de projetar, construir e competir com veículos em um ambiente controlado, simulando situações reais de operação em terrenos acidentados. Nesse contexto, o foco se dá na construção de protótipos que são leves, ágeis e robustos, capazes de enfrentar uma variedade de desafios impostos pelos terrenos irregulares e pelas características adversas do ambiente em que atuam.



Figura 1. Alinhamento para enduro de resistência na competição nacional 2020 Baja SAE Brasil

Fonte: Araújo (2022).

A história das competições Baja SAE remonta à década de 1970, quando foram criadas com o intuito de fornecer uma plataforma para a prática da engenharia. O conceito de projetar e construir veículos *off-road* que possam competir sob diferentes condições testou não apenas a criatividade e a capacidade técnica dos estudantes, mas também impulsionou a inovação no *design* e na construção de componentes automotivos.

Dentre os elementos que compõem um veículo *off-road*, o chassi é um dos mais críticos. Este componente não apenas suporta o peso do veículo, mas também deve ser projetado para distribuir as cargas geradas durante as provas. Um chassi mal projetado pode levar a falhas mecânicas significativas, comprometendo o desempenho do veículo. A literatura técnica enfatiza que um *design* otimizado de chassi é fundamental para garantir a estabilidade e a segurança em condições extremas (Gillespie, 1992). Isso envolve o uso de materiais avançados e técnicas de fabricação que permitem um equilíbrio adequado entre resistência e peso, que é crucial em competições *off-road*. Nesse sentido, a escolha de materiais como alumínio e ligas de aço se mostra vantajosa, pois oferece robustez sem adicionar peso excessivo ao veículo. A integração de técnicas de análise numérica, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), tem possibilitado simulações que ajudam a prever o

comportamento estrutural do chassi sob diferentes condições de carga, otimizando assim seu *design* antes da fabricação (Jazar, 2015).

A suspensão é outro componente vital para o desempenho dos veículos *off-road*, pois é responsável por absorver os impactos e manter o controle durante as manobras. A capacidade da suspensão de lidar com cargas variáveis sem comprometer a integridade do veículo é fundamental, especialmente em competições que exigem manobras rápidas e mudanças bruscas de direção. Um sistema de suspensão eficaz pode melhorar significativamente a estabilidade e a segurança do veículo, permitindo que ele mantenha a tração em terrenos irregulares. A dinâmica de suspensão deve ser cuidadosamente projetada, considerando os efeitos da transferência de carga lateral e as reações do veículo durante curvas acentuadas (Milliken; Milliken, 1995). A eficiência da suspensão impacta diretamente a estabilidade e a segurança do veículo, uma vez que um sistema mal dimensionado pode levar a falhas mecânicas sob esforços extremos. Além disso, o *design* da suspensão influencia na capacidade do veículo de manter tração e aderência ao solo, fatores críticos em competições que envolvem terrenos com baixa aderência, como lama, cascalho e areia.

Os pneus *all-terrain* também desempenham um papel crucial na performance dos veículos *off-road*. Eles são o único ponto de contato entre o veículo e o solo, e sua escolha pode ser determinante para o sucesso nas competições. Pneus adequados, projetados para terrenos acidentados, proporcionam melhor tração e controle, permitindo que o veículo transite com eficiência sobre superfícies irregulares (Pacejka, 2002). A interação entre o pneu e o solo é considerada um dos fatores mais críticos para a estabilidade e o controle do veículo. A escolha do pneu deve ser feita com base nas características do terreno e nas condições ambientais esperadas durante as competições. Em cenários onde a superfície do solo pode variar drasticamente, a versatilidade dos pneus se torna uma característica indispensável para garantir um desempenho satisfatório.

Os desafios enfrentados pelos veículos *off-road* não se limitam à robustez e ao desempenho em terrenos adversos. A durabilidade é uma preocupação constante, uma vez que os veículos são submetidos a esforços constantes e severos durante as competições. O *design* de componentes como freios e sistemas de transmissão deve considerar as forças de frenagem, aceleração e

os esforços envolvidos em curvas, que podem gerar cargas significativas sobre as partes mecânicas (Limpert, 1999). A capacidade de dissipar calor e resistir ao desgaste é essencial para que o veículo mantenha seu desempenho ao longo de competições prolongadas. A escolha dos rolamentos, por exemplo, é fundamental para garantir a durabilidade sob cargas dinâmicas. Rolamentos de alta qualidade são essenciais para suportar as exigências do ambiente *off-road*, onde as condições podem ser adversas e as tensões, extremas. A seleção adequada de rolamentos é destacada como um fator crítico para a eficiência e a segurança do veículo (Kotzalas; Harris, 2006).

Quando comparados a outros tipos de veículos de competição, os veículos *off-road* requerem uma resistência estrutural superior. Veículos de corrida em pistas pavimentadas, como os da Fórmula SAE, concentram-se em aerodinâmica e velocidade em superfícies lisas, enquanto os veículos Baja SAE precisam equilibrar a capacidade de desempenho com a resistência a impactos severos e a operação em terrenos irregulares. Os motores de combustão interna utilizados em veículos de competição devem ser otimizados para fornecer potência suficiente sem sobrecarregar os componentes mecânicos. Isto se aplica particularmente aos veículos *off-road*, que dependem de um motor eficiente para superar obstáculos e manter a tração em terrenos difíceis (Brunetti, 2013). A comparação com veículos de competição em pista mostra que, enquanto a velocidade é uma prioridade para aqueles, a capacidade de lidar com condições extremas de terreno é o fator principal para os veículos Baja SAE.

A dinâmica veicular em competições *off-road* exige uma análise atenta das cargas dinâmicas, como a transferência de peso durante curvas e frenagens bruscas. Essa dinâmica se mostra bastante distinta daquelas observadas em competições em superfícies lisas, sendo necessário um entendimento aprofundado das interações entre os diferentes componentes do veículo. As condições do solo podem mudar rapidamente, criando novos desafios. A aplicação do método dos elementos finitos no desenvolvimento de componentes, como o cubo de roda, permite a simulação do comportamento estrutural sob diferentes condições de carga, otimizando o *design* para minimizar tensões e deformações (Jazar, 2015). Esta abordagem se torna crucial em competições Baja SAE, onde o cubo de roda deve suportar não apenas cargas verticais, mas também laterais, que são frequentemente geradas em terrenos acidentados.

Além da análise estrutural, a seleção de materiais para os veículos *off-road* é um fator determinante no desempenho geral. O uso de materiais leves, como ligas de alumínio e fibra de carbono, permite a redução do peso do veículo sem comprometer a resistência necessária. A escolha dos materiais deve ser orientada não apenas pela resistência mecânica, mas também pela durabilidade em condições adversas. Materiais como o aço são frequentemente utilizados pela sua robustez, enquanto o alumínio é preferido em áreas onde a redução de peso é crítica. A escolha do material deve ainda considerar o ambiente operacional do veículo, que pode incluir temperaturas extremas, umidade e sujeira, fatores comuns em competições Baja SAE.

A utilização de ferramentas numéricas de simulação, como o MEF, é uma abordagem eficaz no desenvolvimento de componentes automotivos. Essa técnica permite a realização de análises detalhadas de tensões e deformações em componentes, identificando áreas críticas que necessitam de otimização. A análise estrutural precisa e a simulação de cargas reais são essenciais para garantir que os componentes possam suportar as condições extremas das competições *off-road*, onde o impacto constante e a transferência de peso representam desafios significativos à integridade estrutural do veículo (Rovere; Wills, 2014).

Por fim, a integração de diferentes elementos no projeto de um veículo *off-road*, como chassi, suspensão, pneus e rolamentos, exige uma abordagem holística. Essa abordagem considera não apenas o desempenho individual de cada componente, mas também a interação entre eles. A escolha adequada de materiais, o *design* otimizado e o uso de ferramentas avançadas de análise estrutural são determinantes para o sucesso em competições como a Baja SAE. Historicamente, essas competições têm impulsionado o avanço tecnológico no campo da engenharia automotiva, proporcionando uma plataforma valiosa para experimentação e inovação. À medida que novas tecnologias e materiais são desenvolvidos, espera-se que os veículos *off-road* se tornem cada vez mais eficientes, resistentes e competitivos, tanto nas competições quanto em aplicações industriais e comerciais.

Dessa forma, o desenvolvimento e a otimização de veículos *off-road* nas competições Baja SAE representam não apenas um desafio técnico, mas também uma oportunidade de aprendizado prático para os estudantes, que

podem aplicar suas teorias em um ambiente de competição real. O impacto dessas experiências se estende além das competições, contribuindo para a formação de profissionais capacitados e inovadores na área da engenharia automotiva. Com a contínua evolução das tecnologias e a demanda por veículos mais eficientes e sustentáveis, o futuro das competições *off-road* e das inovações tecnológicas associadas parece promissor, prometendo um impacto duradouro na indústria automotiva.

2.1.2. Características dos Veículos *Off-road*

Os veículos *off-road*, projetados para operar em terrenos acidentados e desafiadores, possuem características técnicas específicas que os diferenciam dos veículos convencionais. Essa distinção é fundamental para entender como esses veículos funcionam e porque são tão valorizados em competições e atividades recreativas em ambientes adversos.



Figura 2. Veículo Baja SAE Brasil

Fonte: Araújo (2022).

As características essenciais incluem o *design* do chassi, sistemas de suspensão, tipos de pneus, entre outros componentes que visam proporcionar desempenho superior, resistência e durabilidade. O chassi dos veículos *off-road* é um dos principais elementos de *design*, pois deve ser capaz de suportar o peso total do veículo e as forças resultantes das manobras em terrenos irregulares. Um chassi reforçado é projetado para resistir a impactos e tensões extremas, garantindo que a integridade estrutural do veículo seja mantida em condições adversas. Isso implica o uso de materiais avançados que ofereçam uma combinação ideal de leveza e resistência. As considerações sobre o *design* do

chassi incluem a utilização de técnicas de modelagem e simulação numérica, como o MEF, que permitem prever o comportamento estrutural do componente sob diferentes condições de carga. Busca-se otimizar a geometria do chassi para maximizar a resistência e minimizar o peso, fatores que têm um impacto direto no desempenho geral do veículo (Gillespie, 1992; Jazar, 2015).

A suspensão é outro aspecto crítico que contribui significativamente para a capacidade de um veículo *off-road* de absorver choques e manter o controle. Sistemas de suspensão robustos são projetados para lidar com cargas dinâmicas e permitir que o veículo opere de maneira eficiente em terrenos acidentados. A transferência de carga durante curvas e frenagens é um fator importante que deve ser considerado no *design* da suspensão. A capacidade de absorver impactos sem comprometer a estabilidade do veículo é essencial, e um sistema bem projetado melhora não apenas o conforto do motorista, mas também a segurança durante as manobras em alta velocidade em terrenos desafiadores. A literatura técnica enfatiza que a dinâmica de suspensão é fundamental para o desempenho dos veículos *off-road*, especialmente em manobras que envolvem a transferência de carga lateral, como em curvas acentuadas (Milliken; Milliken, 1995).

Os pneus *all-terrain* também desempenham um papel crucial na performance dos veículos *off-road*. Eles são o único ponto de contato entre o veículo e o solo. Pneus adequados, projetados para terrenos acidentados, proporcionam melhor tração e controle, permitindo que o veículo transite com eficiência sobre superfícies irregulares. A interação entre o pneu e o solo é considerada um dos fatores mais críticos para a estabilidade e o controle do veículo. A literatura destaca que a escolha dos pneus deve ser feita com base nas características do terreno e nas condições ambientais esperadas durante as competições (Pacejka, 2002). Em cenários onde a superfície do solo pode variar drasticamente, a versatilidade dos pneus se torna uma característica indispensável para garantir o sucesso em competições. Pneus inadequados podem resultar em perda de tração, o que compromete diretamente a performance do veículo.

Além das características físicas, a durabilidade dos veículos *off-road* é uma preocupação constante. Esses veículos são submetidos a esforços contínuos durante as competições, e a capacidade de resistir ao desgaste e

dissipar calor é fundamental para manter o desempenho ao longo de longas provas. O *design* de componentes como freios e sistemas de transmissão deve considerar os esforços de frenagem, aceleração e os esforços envolvidos em curvas, que podem gerar cargas significativas sobre as partes mecânicas (Limpert, 1999). A capacidade de dissipar calor e resistir ao desgaste são características essenciais para garantir que o veículo mantenha seu desempenho durante longas provas em competições *off-road*. A seleção adequada de rolamentos é fundamental para garantir a durabilidade dos componentes sob cargas dinâmicas, como aquelas geradas em terrenos acidentados. O uso de rolamentos de alta qualidade permite que os veículos suportem cargas extremas sem comprometer o desempenho, aumentando a vida útil dos componentes críticos (Kotzalas; Harris, 2006).

Os desafios enfrentados pelos veículos *off-road* exigem uma abordagem diferenciada no desenvolvimento e na construção. Comparados a veículos projetados para competições em pistas pavimentadas, como os da Fórmula SAE, os veículos *off-road* devem ser projetados com um foco maior em resistência estrutural e capacidade de suportar impactos. Enquanto os projetos de veículos de corrida em pistas pavimentadas, como os da Fórmula SAE, estão mais focados em aerodinâmica e velocidade em superfícies lisas, os projetos de veículos Baja SAE precisam equilibrar desempenho com a capacidade de resistir a impactos severos e operar em terrenos irregulares (Brunetti, 2013). O desenvolvimento dos motores de combustão interna utilizados nessas competições deve ser otimizado para fornecer potência adequada sem sobrecarregar os componentes mecânicos. A eficiência do motor é um aspecto crítico que impacta diretamente a capacidade do veículo de superar obstáculos e manter tração em terrenos difíceis. Essa diferença no foco entre os tipos de competição ressalta a importância de considerar as particularidades das competições *off-road* no processo de *design* e construção dos veículos.

A dinâmica veicular em competições *off-road* exige uma análise atenta das cargas dinâmicas, como a transferência de peso durante curvas e frenagens bruscas. Essa dinâmica se mostra bastante distinta daquelas observadas em competições em superfícies lisas, sendo necessário um entendimento aprofundado das interações entre os diferentes componentes do veículo.

Além da análise estrutural, a seleção de materiais para os veículos *off-road* é um fator determinante no desempenho geral. O uso de materiais leves, como ligas de alumínio, é uma estratégia comum para reduzir o peso do veículo sem comprometer a resistência necessária. Materiais como o aço, devido à sua robustez, são frequentemente utilizados em áreas onde a durabilidade é crítica. A escolha do material deve levar em consideração o ambiente operacional do veículo, que pode incluir temperaturas extremas, umidade e sujeira, fatores frequentemente encontrados em competições *off-road* (Juvinali; Marshek, 2000; Kaufman, 2008).

A integração de diferentes características nos veículos *off-road*, como chassi, suspensão, pneus e rolamentos, exige uma abordagem holística que considere não apenas o desempenho individual de cada componente, mas também a interação entre eles. O desenvolvimento e a otimização desses veículos nas competições Baja SAE representam não apenas um desafio técnico, mas também uma oportunidade de aprendizado prático para os estudantes, que podem aplicar suas teorias em um ambiente de competição real. O impacto dessas experiências se estende além das competições, contribuindo para a formação de profissionais capacitados e inovadores na área da engenharia automotiva.

Com a contínua evolução das tecnologias e a demanda por veículos mais eficientes e sustentáveis, o futuro das competições *off-road* e das inovações tecnológicas associadas parece promissor. A constante pressão para melhorar o desempenho e a eficiência dos veículos em condições extremas impulsiona o desenvolvimento de novos materiais e técnicas, contribuindo assim para a formação de uma nova geração de veículos *off-road* que não só se destacam nas competições, mas também encontram aplicações em setores industriais e comerciais. O compromisso com a pesquisa e o desenvolvimento contínuo assegura que os veículos *off-road* permaneçam na vanguarda da engenharia automotiva, refletindo as necessidades e desafios de um mundo em constante mudança.

Dessa forma, o desenvolvimento e a otimização de veículos *off-road* nas competições Baja SAE representam não apenas um desafio técnico, mas também uma oportunidade de aprendizado prático para os estudantes. O impacto dessas experiências se estende além das competições, contribuindo

para a formação de profissionais capacitados e inovadores na área da engenharia automotiva. Com a contínua evolução das tecnologias e a demanda por veículos mais eficientes e sustentáveis, espera-se que os veículos *off-road* se tornem cada vez mais eficientes, resistentes e competitivos, não apenas nas competições, mas também em aplicações industriais e comerciais.

Outro elemento essencial dos veículos Baja é a suspensão, que deve ser projetada para absorver choques e manter o controle do veículo, mesmo em terrenos acidentados. As condições de operação exigem um sistema de suspensão robusto que possa lidar com cargas variáveis sem comprometer a integridade estrutural do veículo. A eficiência da suspensão impacta diretamente a estabilidade e a segurança do veículo, uma vez que um sistema mal dimensionado pode levar a falhas mecânicas sob esforços extremos. Além disso, o *design* da suspensão influencia na capacidade do veículo de manter tração e aderência ao solo, fatores críticos em competições que envolvem terrenos com baixa aderência, como lama, cascalho e areia.

2.1.3. Desafios e Comparações com Outros Veículos de Competição

Os desafios enfrentados pelos veículos *off-road* vão além da necessidade de robustez e desempenho em terrenos adversos. A durabilidade também é uma preocupação central, uma vez que os veículos são submetidos a esforços constantes durante as competições. Limpert (1999) argumenta que o *design* de componentes como freios e sistemas de transmissão deve levar em consideração os esforços de frenagem, aceleração e curvas, que impõem cargas significativas sobre os componentes mecânicos. A capacidade de dissipar calor e resistir ao desgaste são características essenciais para garantir que o veículo mantenha seu desempenho durante longas provas em competições *off-road*. Além disso, Kotzalas e Harris (2006) ressaltam a importância da seleção adequada de rolamentos para garantir a durabilidade dos componentes sob cargas dinâmicas, como aquelas geradas em terrenos acidentados. O uso de rolamentos de alta qualidade permite que os veículos suportem cargas extremas sem comprometer o desempenho, aumentando a vida útil dos componentes críticos.

Brunetti (2013) discute como os motores de combustão interna utilizados em veículos de competição devem ser otimizados para fornecer potência

suficiente sem sobrecarregar os componentes mecânicos. Isso se aplica particularmente aos veículos *off-road*, que dependem de um motor eficiente para superar obstáculos e manter a tração em terrenos difíceis

A dinâmica dos veículos *off-road* também envolve a consideração de cargas dinâmicas, como a transferência de peso durante curvas e frenagens bruscas. Jazar (2015) observa que a dinâmica veicular em competições *off-road* é significativamente diferente de outras competições devido à necessidade de lidar com superfícies irregulares e mudanças repentinas nas condições do solo. Essas variáveis impõem desafios adicionais ao *design* do veículo, exigindo uma análise cuidadosa das cargas aplicadas ao chassi, suspensão e pneus. Isso é crucial em competições Baja SAE, onde o cubo de roda precisa suportar cargas verticais e laterais sem falhas.

Além disso, a seleção de materiais é um fator determinante no desenvolvimento de veículos *off-road*. A fibra de carbono, embora mais cara, oferece um excelente compromisso entre rigidez e leveza, tornando-se uma opção viável para componentes de alto desempenho. Kaufman (2008) destaca que a escolha do material também deve levar em consideração o ambiente operacional do veículo, como a exposição a temperaturas extremas, umidade e sujeira, fatores comuns em competições Baja SAE.

Rovere e Wills (2014) argumentam que a análise estrutural precisa e a simulação de cargas reais são essenciais para garantir que os componentes sejam capazes de suportar as condições extremas das competições *off-road*, onde o impacto constante e a transferência de peso representam desafios significativos para a integridade estrutural do veículo.

2.2. SISTEMA DE SUSPENSÃO E COMPONENTES ASSOCIADOS

A concepção de sistemas de suspensão para veículos *off-road* é um dos aspectos mais desafiadores do desenvolvimento automotivo. Esses veículos, caracterizados por sua necessidade de operar em terrenos adversos, como lama, pedras e trilhas íngremes, exigem um desempenho que vai além da simples adequação a superfícies pavimentadas. A suspensão, nesse contexto, assume um papel de destaque, sendo responsável por garantir não só a absorção de impactos gerados pelos obstáculos presentes no terreno, mas também pela estabilização do veículo e pela manutenção do controle direcional

durante o deslocamento. Essa função complexa demanda que não apenas sejam projetados componentes robustos e duráveis, mas também que seja considerada a interação entre os diferentes elementos que compõem o sistema de suspensão.

O papel do sistema de suspensão em veículos *off-road* tem sido extensivamente discutido na literatura, com contribuições significativas de estudiosos como Gillespie (1992) e Pacejka (2002). Gillespie argumenta que o desempenho dinâmico de um veículo depende diretamente da eficácia da suspensão em manter as rodas em contato constante com o solo, mesmo em terrenos irregulares. Esse contato contínuo é essencial para garantir a tração e o controle do veículo, fatores que são críticos em competições *off-road*, onde a aderência do veículo ao terreno pode ser a diferença entre vencer e perder uma prova. No entanto, essa mesma suspensão deve ser capaz de absorver os impactos causados por pedras, buracos e outros obstáculos sem transmitir essas forças diretamente ao chassi, o que poderia comprometer a integridade estrutural do veículo e, ao mesmo tempo, o conforto do condutor. A robustez do sistema de suspensão deve, portanto, ser acompanhada por uma capacidade de dissipação de energia adequada, evitando que o veículo sofra danos irreversíveis ao longo das provas.

Pacejka (2002), por sua vez, complementa essa discussão ao enfatizar a importância da dinâmica do pneu e da sua interação com o sistema de suspensão. Embora a suspensão seja responsável por absorver os impactos mais severos, a capacidade do pneu em deformar-se para contornar pequenos obstáculos também desempenha um papel fundamental na manutenção do contato com o solo e na absorção de impactos menores. O desenho do pneu *all-terrain*, associado a uma suspensão calibrada para condições *off-road*, cria um sistema de amortecimento em camadas, no qual tanto o pneu quanto a suspensão trabalham em conjunto para garantir a integridade do veículo e o conforto do condutor. Nesse sentido, o papel da suspensão não pode ser analisado de forma isolada, mas como parte de um sistema integrado de absorção de choques e controle veicular.

Os tipos de suspensão mais comumente utilizados em veículos *off-road* são, em grande parte, derivados da necessidade de combinar flexibilidade e robustez. Gillespie (1992) aponta que suspensões independentes, como as

suspensões de duplo A ou McPherson, são amplamente utilizadas em veículos que enfrentam terrenos acidentados, devido à sua capacidade de permitir o movimento vertical das rodas de forma independente. Isso significa que, ao enfrentar um obstáculo em uma roda, a outra não é diretamente afetada, o que melhora a estabilidade geral do veículo. Esse tipo de suspensão é especialmente útil em competições *off-road*, onde o terreno irregular frequentemente coloca as rodas em contato com obstáculos de diferentes tamanhos e formas, exigindo que o veículo mantenha sua trajetória e sua estabilidade.

Outro tipo de suspensão comum em veículos *off-road* é a suspensão de eixo rígido, que, embora mais simples, oferece maior robustez em terrenos extremamente acidentados. Kotzalas e Harris (2006) argumentam que, em situações onde o terreno impõe cargas extremas sobre as rodas, como em subidas íngremes ou ao cruzar grandes obstáculos, a suspensão de eixo rígido proporciona uma resistência estrutural maior, já que ambos os lados do eixo compartilham a carga. No entanto, o compromisso nesse tipo de suspensão é a perda de independência no movimento das rodas, o que pode levar a uma redução na tração e no conforto do condutor em terrenos menos acidentados.

Os componentes da suspensão, como o cubo de roda, os rolamentos e os amortecedores, desempenham papéis específicos na absorção de impactos e na estabilização do veículo. O cubo de roda, por exemplo, é o componente responsável por conectar a roda ao sistema de suspensão, permitindo que ela gire livremente enquanto suporta o peso do veículo e absorve as cargas dinâmicas. Juvinal e Marshek (2000) destacam que o cubo de roda deve ser projetado para suportar tanto as cargas estáticas, resultantes do peso do veículo, quanto as cargas dinâmicas, geradas pela aceleração, frenagem e manobras de curvas. Esses esforços dinâmicos são particularmente elevados em veículos *off-road*, onde o impacto constante com o terreno gera uma série de forças que devem ser dissipadas de forma eficaz. O cubo de roda, juntamente com os rolamentos, deve garantir a suavidade da rotação da roda e a capacidade de suportar cargas pesadas, sem sofrer deformações ou falhas.

A seleção de rolamentos é igualmente importante para o sucesso do sistema de suspensão em veículos *off-road*. Segundo Kotzalas e Harris (2006), os rolamentos são componentes críticos que suportam as cargas radiais e axiais aplicadas às rodas, permitindo que elas girem suavemente mesmo sob

condições de operação severas. Em veículos *off-road*, onde as rodas estão constantemente expostas a impactos e variações de carga, a escolha de rolamentos de alta capacidade é essencial para garantir a durabilidade do sistema de suspensão. Esses rolamentos são projetados para operar em condições extremas, com proteção adicional contra poeira, lama e outros detritos que podem comprometer sua operação. A capacidade de dissipar calor gerado pelo atrito durante longas provas é outra característica importante dos rolamentos utilizados em competições *off-road*, onde a confiabilidade do sistema de suspensão é um fator determinante para o sucesso.

Os amortecedores, por sua vez, desempenham o papel crucial de controlar o movimento das rodas e do chassi durante a absorção de impactos. Limpert (1999) discute que, sem amortecedores adequadamente calibrados, o sistema de suspensão pode ficar suscetível ao movimento excessivo, o que comprometeria a estabilidade do veículo e reduziria sua capacidade de absorver impactos. Amortecedores bem ajustados são capazes de dissipar a energia gerada pelos impactos de forma eficaz, impedindo que o veículo sofra oscilações excessivas após passar por obstáculos (Bosch, 2005). Isso é particularmente importante em terrenos *off-road*, onde o veículo frequentemente enfrenta uma série de impactos consecutivos. Amortecedores de alto desempenho, capazes de ajustar sua rigidez conforme as condições do terreno, são comumente usados em veículos de competição, garantindo um equilíbrio entre controle e absorção de impactos.

A conexão entre o cubo de roda e os demais componentes da suspensão, como os braços de controle e os amortecedores, desempenha um papel fundamental no controle direcional do veículo. Jazar (2015) observa que a dinâmica veicular depende da capacidade de todos esses componentes trabalharem em conjunto para manter o veículo estável e previsível, especialmente em situações de manobras rápidas e mudanças bruscas de direção. Em competições *off-road*, onde as condições do terreno podem mudar repentinamente, a capacidade do sistema de suspensão em responder rapidamente a essas mudanças é essencial para garantir que o veículo mantenha sua trajetória e não perca o controle. Isso exige que o cubo de roda seja projetado para suportar cargas laterais elevadas, além de garantir que os

rolamentos e os braços de controle possam operar em sincronia para dissipar essas forças sem comprometer a estabilidade do veículo.

A importância da escolha de materiais para os componentes da suspensão também não pode ser subestimada. Kaufman (2008) destaca que o uso de materiais leves, mas resistentes, como ligas de alumínio e fibra de carbono, pode melhorar significativamente o desempenho do sistema de suspensão. Em veículos *off-road*, onde o peso não suspenso tem um impacto direto na capacidade do veículo de absorver impactos, a redução do peso dos componentes da suspensão pode resultar em um desempenho superior em terrenos acidentados. No entanto, essa redução de peso não deve comprometer a robustez dos componentes, que devem ser capazes de suportar impactos constantes e cargas dinâmicas elevadas. O uso de técnicas de fabricação avançadas, como a impressão 3D de componentes de suspensão em materiais compostos, tem se mostrado uma solução promissora para otimizar o equilíbrio entre peso e resistência em veículos de competição *off-road*.

Em suma, o sistema de suspensão em veículos *off-road* é um componente crítico que influencia diretamente o desempenho, a estabilidade e a segurança do veículo em competições. A escolha dos tipos de suspensão, dos materiais e dos componentes associados, como o cubo de roda, os rolamentos e os amortecedores, deve ser feita de forma cuidadosa, considerando as exigências específicas das competições Baja SAE e de outras provas *off-road*. A integração de todos esses elementos em um sistema coeso e bem calibrado é essencial para garantir que o veículo seja capaz de enfrentar os desafios impostos pelo terreno, mantendo sua integridade estrutural e proporcionando um desempenho competitivo.

2.3. CUBO DE RODA: FUNÇÕES E IMPORTÂNCIA

O cubo de roda desempenha um papel essencial no sistema de suspensão e direção de veículos, especialmente nos veículos *off-road*, onde a robustez, o controle e a absorção de impactos são determinantes para o desempenho. A função primordial do cubo de roda é fazer a conexão entre a roda e o veículo, permitindo a transferência de forças entre o chassi e o solo, garantindo que o veículo mantenha a aderência adequada e o controle direcional. Em competições *off-road*, essa função é amplificada pela

necessidade de o veículo suportar grandes variações de carga enquanto mantém a estabilidade e a integridade estrutural.

O cubo de roda, por ser o ponto de conexão entre o sistema de suspensão e a roda, é submetido a forças multidirecionais e precisa garantir a estabilidade direcional do veículo em diversas condições de condução. Essas forças podem ser classificadas em cargas radiais e axiais, sendo que as radiais correspondem ao peso total do veículo sobre a roda, enquanto as axiais derivam de manobras, frenagens e acelerações (Limpert, 1999). Para cumprir sua função de forma eficiente, o cubo de roda deve ser capaz de resistir a essas forças sem comprometer o alinhamento das rodas e o controle do veículo. O componente é projetado para suportar a carga total do veículo enquanto mantém a integridade estrutural da roda e sua conexão com o sistema de suspensão. Dessa forma, o cubo de roda exerce influência direta sobre a estabilidade do veículo e sua capacidade de manobra em ambientes desafiadores, como trilhas acidentadas ou terrenos com grande variação de altura.

Os componentes que formam o cubo de roda incluem a flange, os rolamentos, os parafusos de fixação e a conexão com a manga de eixo. A flange é a peça responsável por transmitir as forças do veículo para as rodas e é projetada para suportar cargas verticais e laterais. Sua integridade é fundamental para garantir a durabilidade do sistema e a segurança do veículo. Juvinal e Marshek (2000) apontam que a flange é submetida a grandes esforços durante manobras e mudanças de direção, sendo um componente crítico para a estabilidade do veículo. Além disso, os parafusos de fixação são responsáveis por manter a conexão entre a roda e o cubo, assegurando que a roda permaneça firme e alinhada, mesmo em condições de alto impacto. No entanto, esses componentes devem ser projetados para permitir uma manutenção eficiente, uma vez que a troca frequente de pneus é uma prática comum em veículos *off-road*, especialmente em competições onde o tempo de manutenção pode ser um fator decisivo.

A manga de eixo é um componente fundamental para o cubo de roda, que conecta o cubo ao sistema de suspensão e direção. A manga de eixo é responsável por manter o alinhamento adequado das rodas, garantindo que o veículo mantenha sua estabilidade direcional. Jazar (2015) observa que a manga de eixo é submetida a forças significativas durante manobras, frenagens e

acelerações, sendo um dos componentes mais críticos para o controle direcional do veículo. Em competições *off-road*, onde o terreno varia constantemente, a capacidade da manga de eixo de absorver forças laterais e verticais sem comprometer o alinhamento das rodas é essencial para o desempenho e a segurança do veículo.

A falha em manter o alinhamento adequado pode resultar em perda de tração, dificuldade de controle direcional e, em casos extremos, acidentes. Por isso, o *design* do cubo de roda deve ser otimizado para garantir que ele resista a impactos constantes sem sofrer deformações, mantendo o controle direcional do veículo em qualquer condição de terreno. Além disso, a interação entre o cubo de roda, os rolamentos e a manga de eixo é fundamental para garantir a suavidade da rotação das rodas e a precisão na direção, fatores que influenciam diretamente o desempenho do veículo em competições.

A discussão sobre os diferentes tipos de cubos de roda e sua aplicabilidade em veículos *off-road* revela que não existe uma solução única para todos os tipos de veículos. Em veículos de competição como os Baja SAE, o *design* do cubo de roda deve ser otimizado para garantir leveza, resistência e facilidade de manutenção. Juvinal e Marshek (2000) argumentam que o uso de materiais leves, como ligas de alumínio, pode melhorar o desempenho do veículo, reduzindo o peso não suspenso e, conseqüentemente, melhorando a resposta da suspensão. No entanto, materiais mais pesados, como o aço, são preferidos em situações onde a resistência à deformação é crítica, especialmente em terrenos extremamente acidentados, onde o veículo está sujeito a impactos constantes e grandes variações de carga. A escolha do material e do tipo de cubo de roda depende, portanto, das características específicas do veículo e das condições em que ele será utilizado.

Rovere e Wills (2014) discutem que a simulação de cargas dinâmicas, como as geradas por manobras bruscas e frenagens intensas, permite a identificação das áreas de concentração de tensões no cubo de roda, possibilitando melhorias no *design* antes da construção física do componente. Isso não só aumenta a eficiência do processo de *design*, mas também reduz os custos associados à prototipagem e testes físicos.

Em resumo, o cubo de roda é um componente fundamental para o desempenho de veículos *off-road*, desempenhando um papel crucial na conexão

entre a roda e o veículo, suportando cargas dinâmicas e estáticas, absorvendo impactos e garantindo a estabilidade direcional. A interação entre os componentes do cubo de roda, como a flange, os rolamentos e a manga de eixo, é essencial para garantir que o veículo mantenha sua integridade estrutural e sua capacidade de manobra em terrenos adversos. O projeto do cubo de roda, bem como dos materiais utilizados em sua construção, depende das características específicas do veículo e das condições em que ele será utilizado. Com a contínua evolução das tecnologias de *design* e fabricação, espera-se que os cubos de roda continuem a desempenhar um papel central no desenvolvimento de veículos *off-road* cada vez mais eficientes e competitivos.

2.4. DINÂMICA VEICULAR: TRANSFERÊNCIA DE CARGA E ESFORÇOS

A dinâmica veicular é um campo da engenharia automotiva que explora os princípios mecânicos e físicos que governam o comportamento de um veículo em movimento, incluindo as interações entre forças externas e internas que afetam sua estabilidade, controle e desempenho. Para os veículos *off-road*, como aqueles utilizados em competições Baja SAE, a compreensão da dinâmica veicular se torna essencial devido às condições extremas de operação, que envolvem terrenos acidentados, frequentes mudanças de direção e frenagens bruscas. Gillespie (1992) afirma que a análise dessas forças e sua influência no comportamento do veículo são fundamentais para projetar sistemas de suspensão, direção e transmissão que garantam tanto a segurança quanto a eficiência. A transferência de carga, os esforços de frenagem e as curvas desempenham papéis cruciais na estabilidade lateral e no controle direcional do veículo, especialmente em ambientes *off-road*, onde o contato irregular com o solo gera constantes variações nas forças aplicadas sobre o chassi e os componentes.

A transferência de carga é um dos fenômenos mais estudados dentro da dinâmica veicular, particularmente em veículos de alto desempenho. Ela ocorre sempre que há uma mudança na distribuição de peso sobre os eixos do veículo, o que acontece durante a aceleração, frenagem ou ao realizar curvas. Segundo Jazar (2015), durante a aceleração, a transferência de carga ocorre para a parte traseira do veículo, enquanto na frenagem, o peso se desloca para a frente. Esse movimento de massa afeta diretamente a maneira como o cubo de roda lida com

as forças aplicadas, uma vez que o aumento da carga em um dos eixos pode gerar tensões excessivas sobre esse componente. Nos veículos *off-road*, onde as frenagens são bruscas e a aceleração pode variar de forma intensa devido às condições do terreno, o cubo de roda deve ser projetado para suportar essas mudanças repentinas de carga, garantindo que as rodas permaneçam em contato com o solo e o veículo mantenha a tração necessária para enfrentar os obstáculos.

A transferência de carga longitudinal é particularmente relevante em situações de frenagem e aceleração intensas, que são comuns em competições *off-road*. Durante a frenagem, a carga é transferida para o eixo dianteiro, aumentando significativamente a força aplicada sobre os cubos de roda frontais. Limpert (1999) ressalta que esse fenômeno pode gerar sobrecargas nos componentes, especialmente nos rolamentos e na flange, que precisam suportar tanto a força vertical quanto as forças laterais causadas pelas manobras. Em contraste, durante a aceleração, a carga se desloca para o eixo traseiro, o que pode aliviar a pressão sobre os cubos dianteiros, mas aumenta a exigência sobre os cubos traseiros. Em ambos os casos, é crucial que o sistema de suspensão e o cubo de roda sejam projetados para suportar essas variações sem comprometer a integridade estrutural do veículo.

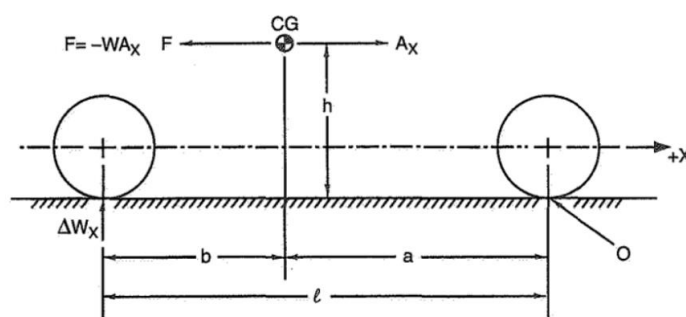


Figura 3. Transferência de Carga Longitudinal

Fonte: Milliken; Milliken, 1995

Além da transferência de carga longitudinal, a transferência lateral de carga também é um aspecto importante a ser considerado na dinâmica veicular, especialmente durante as curvas. Gillespie (1992) explica que, ao realizar uma curva, o veículo está sujeito a uma força centrífuga que tende a deslocar a massa

do veículo para o lado oposto da curva, resultando em uma redistribuição de peso entre as rodas internas e externas. Esse fenômeno, conhecido como transferência de carga lateral, gera forças significativas sobre os cubos de roda e a manga de eixo, que devem ser capazes de suportar essas cargas sem sofrer deformações ou falhas. Nos veículos *off-road*, onde as curvas são frequentemente realizadas em terrenos irregulares, essa transferência de carga pode ser ainda mais pronunciada, já que as rodas externas precisam lidar com a força adicional enquanto as rodas internas podem perder contato momentaneamente com o solo, o que pode comprometer a estabilidade do veículo.

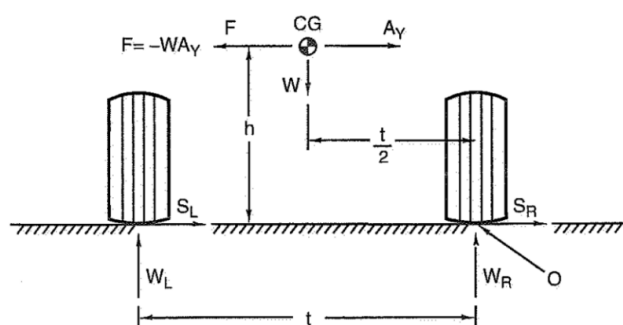


Figura 4. Transferência de Carga Lateral

Fonte: Milliken; Milliken, 1995

Kotzalas e Harris (2006) discutem que, durante curvas, os esforços aplicados sobre o cubo de roda não são apenas de natureza lateral, mas também envolvem forças verticais, causadas pela elevação ou compressão da suspensão. A manga de eixo, componente que conecta o cubo de roda ao sistema de suspensão e direção, também desempenha um papel crucial nesse processo. Ela é responsável por manter o alinhamento adequado das rodas e garantir que o veículo responda de forma previsível às entradas do motorista. Quando submetida a esforços laterais intensos, a manga de eixo pode sofrer torções que afetam negativamente a estabilidade do veículo. Em competições *off-road*, onde as mudanças de direção são rápidas e frequentes, a resistência da manga de eixo se torna um fator crítico para o desempenho.

Os esforços de frenagem e curvas afetam diretamente a estabilidade lateral do veículo, uma vez que a combinação dessas forças gera uma carga

significativa sobre os componentes do sistema de suspensão e direção. Durante a frenagem, a carga é transferida para as rodas dianteiras, o que pode resultar em sobrecargas nos cubos de roda e nos rolamentos, aumentando o risco de falhas mecânicas. Ao realizar uma curva sob frenagem, essas forças são combinadas, criando uma situação em que o veículo está sujeito a esforços simultâneos que podem comprometer sua estabilidade. Jazar (2015) argumenta que, para evitar a perda de controle em situações como essas, é fundamental que o sistema de suspensão seja capaz de dissipar essas forças de forma eficiente, mantendo as rodas em contato com o solo e garantindo que o veículo mantenha sua trajetória.

Além dos esforços de frenagem e curvas, os esforços de rolagem também têm um impacto significativo na estabilidade do veículo. A rolagem do veículo ocorre quando ele inclina lateralmente durante uma curva, devido à transferência de carga lateral. Esse movimento de rotação em torno do eixo longitudinal do veículo gera esforços adicionais sobre os cubos de roda e a suspensão, aumentando a carga sobre as rodas externas. Limpert (1999) destaca que o controle da rolagem é essencial para garantir a estabilidade lateral do veículo, especialmente em competições *off-road*, onde o terreno irregular pode amplificar esse efeito.

A influência dos esforços de rolagem na estabilidade do veículo é ainda mais pronunciada em veículos *off-road*, onde as condições do terreno podem fazer com que as rodas internas percam contato com o solo durante curvas fechadas. Essa perda momentânea de contato pode comprometer a tração e o controle do veículo, aumentando o risco de capotamento ou perda de controle. Kotzalas e Harris (2006) afirmam que, para minimizar esses riscos, os veículos *off-road* devem ser projetados com sistemas de suspensão que possam compensar os efeitos da rolagem, redistribuindo as cargas de forma a manter o veículo estável. Isso pode ser alcançado por meio da utilização de barras estabilizadoras e amortecedores ajustáveis, que ajudam a controlar o movimento da carroceria e a manter as rodas em contato com o solo.

A interação entre os diferentes tipos de esforços que atuam sobre o veículo – frenagem, aceleração, curvas e rolagem – cria um ambiente dinâmico em que o desempenho de cada componente é fundamental para a estabilidade e o controle do veículo. Os cubos de roda, em particular, desempenham um

papel central na absorção dessas forças e na manutenção do alinhamento adequado das rodas.

O uso de materiais leves e resistentes tem sido uma estratégia eficaz para melhorar o desempenho dos cubos de roda em competições *off-road*. Kaufman (2008) destaca que a escolha de materiais que combinam alta resistência com baixo peso permite que os veículos enfrentem condições extremas sem comprometer a durabilidade dos componentes. Nos veículos *off-road*, onde o peso não suspenso tem um impacto direto na capacidade de absorção de impactos e na resposta da suspensão, a utilização de materiais avançados pode melhorar significativamente o desempenho geral do veículo.

2.5. MATERIAIS PARA O PROJETO DE CUBO DE RODA

O projeto do cubo de roda é um aspecto crítico no desenvolvimento de veículos, especialmente em ambientes de competição e em aplicações *off-road*, onde as exigências de desempenho e durabilidade são elevadas. A seleção de materiais para a fabricação do cubo de roda impacta diretamente sua eficácia em suportar cargas, absorver impactos e manter a integridade estrutural sob condições adversas. O uso de materiais adequados é, portanto, um dos principais fatores que influenciam a qualidade e a funcionalidade dos componentes automotivos, incluindo o cubo de roda, que serve como o ponto de conexão entre a roda e o sistema de suspensão. Juvinal e Marshek (2000) destacam que a escolha do material deve levar em consideração as características mecânicas necessárias para suportar as tensões operacionais, além de fatores como o peso, custo e facilidade de fabricação. Neste contexto, o aço e o alumínio se destacam como os materiais mais comuns utilizados na produção de cubos de roda, cada um com suas vantagens e desvantagens que devem ser ponderadas na fase de projeto.

O aço é um dos materiais mais tradicionais utilizados na fabricação de componentes automotivos. Sua popularidade se deve principalmente à sua resistência e durabilidade. O aço é capaz de suportar cargas elevadas e tem uma excelente resistência à fadiga, o que o torna ideal para aplicações em que os componentes são submetidos a esforços repetitivos e intensos. Além disso, o aço é um material relativamente barato e amplamente disponível, o que contribui para a viabilidade econômica na fabricação de cubos de roda. Contudo, a

desvantagem do aço reside em seu peso, que pode ser um fator limitante em projetos onde a redução de massa é crucial para o desempenho, especialmente em veículos de competição onde cada grama conta. Kaufman (2008) discute que a escolha do aço deve levar em conta a liga específica utilizada, uma vez que diferentes composições químicas podem resultar em propriedades mecânicas diversas. A utilização de aços de alta resistência, por exemplo, pode proporcionar uma melhoria no desempenho geral, permitindo a construção de cubos de roda mais leves sem comprometer a resistência estrutural.

Por outro lado, o alumínio é frequentemente escolhido por sua leveza e resistência à corrosão, características que o tornam um material ideal para aplicações em que a redução de peso é uma prioridade. A utilização de ligas de alumínio na fabricação de cubos de roda pode resultar em componentes significativamente mais leves do que seus equivalentes em aço, sem sacrificar a resistência necessária para suportar as cargas operacionais. Juvinal e Marshek (2000) apontam que o alumínio também tem a vantagem de ser mais fácil de moldar e trabalhar, permitindo *designs* mais complexos e a incorporação de recursos adicionais, como dissipadores de calor e suportes integrados. No entanto, a resistência do alumínio à fadiga pode ser inferior à do aço, especialmente sob condições extremas, e seu custo pode ser maior, dependendo da liga utilizada. Portanto, enquanto o alumínio pode oferecer benefícios significativos em termos de peso e *design*, sua aplicabilidade em projetos de cubos de roda deve ser cuidadosamente avaliada, especialmente em contextos onde a durabilidade a longo prazo é uma preocupação.

A comparação entre diferentes ligas metálicas e materiais compostos revela que cada material tem suas próprias características que o tornam mais ou menos adequado para aplicações específicas.

A escolha do material para cubos de roda não deve ser feita de forma isolada, mas sim em consideração ao *design* global do veículo e às condições específicas em que ele será utilizado. O entendimento das propriedades de cada material e sua interação com os demais componentes do veículo, como o sistema de suspensão e os rolamentos, é essencial para garantir um desempenho otimizado. A combinação de aço e alumínio, por exemplo, pode resultar em um projeto que aproveita as vantagens de ambos os materiais,

oferecendo uma solução equilibrada que atende às exigências de resistência e leveza.

Os desafios enfrentados na escolha dos materiais para cubos de roda se intensificam à medida que os veículos se tornam mais sofisticados e exigentes em termos de desempenho. A interação entre os materiais, as propriedades mecânicas desejadas e as condições operacionais requerem uma abordagem multidisciplinar que considere não apenas a física do movimento, mas também a química dos materiais e as tecnologias de fabricação. A análise contínua das inovações nesse campo, combinada com a pesquisa sobre as necessidades específicas de cada aplicação, é crucial para o desenvolvimento de soluções eficazes e competitivas.

2.6. SELEÇÃO DE ROLAMENTOS PARA CUBO DE RODA

A seleção de rolamentos para cubos de roda é um aspecto crítico no projeto e na fabricação de veículos, especialmente em aplicações *off-road*, onde as exigências de desempenho e durabilidade são acentuadas. Os rolamentos desempenham uma função vital, atuando como componentes responsáveis por suportar tanto as cargas estáticas quanto as dinâmicas que o cubo de roda experimenta durante a operação. A escolha adequada desses componentes é essencial para garantir que o veículo mantenha sua eficiência e desempenho em condições adversas, como aquelas frequentemente encontradas em competições de alta intensidade e terrenos acidentados.

A função primordial dos rolamentos no cubo de roda é facilitar a rotação das rodas, minimizando o atrito entre as partes móveis. Eles suportam as cargas que atuam sobre o cubo de roda, que incluem tanto o peso do veículo quanto as forças resultantes da aceleração, frenagem e manobras. Essa função é especialmente crítica em veículos *off-road*, onde os componentes são frequentemente submetidos a tensões elevadas e variações rápidas de carga. A resistência e a durabilidade dos rolamentos são, portanto, fatores cruciais que influenciam o desempenho geral do veículo. A escolha de rolamentos adequados deve considerar sua durabilidade sob condições de operação exigentes e sua resistência ao desgaste, que é fundamental em ambientes onde a sujeira e a umidade podem afetar seu funcionamento (Limpert, 1999).

Entre os diversos tipos de rolamentos utilizados em sistemas automotivos, os de rolos cônicos se destacam por sua capacidade de suportar tanto cargas radiais quanto axiais, sendo amplamente empregados em componentes como cubos de roda. Suas características construtivas permitem um desempenho confiável mesmo em aplicações de alta exigência, onde fatores como resistência, durabilidade e precisão dimensional são cruciais. Além disso, as dimensões dos rolamentos são cuidadosamente projetadas para atender às especificações dos eixos, garantindo um encaixe seguro e uma distribuição eficiente das cargas aplicadas.

Além da capacidade de carga, a durabilidade dos rolamentos é um critério fundamental na seleção. A durabilidade é influenciada por diversos fatores, incluindo a qualidade dos materiais utilizados na fabricação dos rolamentos, o tipo de lubrificação e a forma como os rolamentos são montados e instalados. A utilização de lubrificantes de alta qualidade é essencial para reduzir o atrito e o desgaste dos rolamentos, prolongando sua vida útil e garantindo um desempenho confiável ao longo do tempo. Limpert (1999) destaca que a resistência ao desgaste dos rolamentos é um fator crítico, especialmente em aplicações onde a exposição a contaminantes, como poeira e sujeira, é alta. Nesse contexto, a escolha de marcas reconhecidas no mercado, como SKF, Timken, NSK e NTN, desempenha um papel crucial, já que essas fabricantes são amplamente conhecidas pela excelência no controle de qualidade de seus materiais e processos de fabricação. Optar por rolamentos dessas marcas, que oferecem vedação eficiente e tratamentos de superfície avançados, é uma estratégia eficaz para garantir maior durabilidade e confiabilidade dos componentes. O impacto dos rolamentos na eficiência e no desempenho do veículo em condições extremas não pode ser subestimado. A eficiência de rotação proporcionada pelos rolamentos afeta diretamente o consumo de combustível e a performance geral do veículo. Quando os rolamentos estão adequadamente selecionados e instalados, eles minimizam o atrito e permitem que as rodas girem livremente, melhorando a eficiência do sistema de transmissão e a resposta do veículo em manobras. Por outro lado, rolamentos mal selecionados ou danificados podem levar a um aumento do atrito, resultando em maior consumo de energia e, em última instância, afetando o desempenho do veículo. A eficiência dos rolamentos é, portanto, um fator determinante que

influencia não apenas a performance em pista, mas também a experiência geral do condutor em condições *off-road*.

A integração de todos esses fatores – a função dos rolamentos, os tipos utilizados, os critérios de seleção e seu impacto na eficiência do veículo – revela a complexidade envolvida na escolha dos componentes adequados para cubos de roda. O diálogo entre os autores destaca a necessidade de uma abordagem multifacetada na seleção de rolamentos, considerando não apenas as especificações técnicas, mas também as condições operacionais e as exigências específicas do projeto. A combinação de conhecimento teórico e prático é essencial para garantir que os rolamentos escolhidos proporcionem o desempenho esperado, contribuindo para a segurança e a eficiência do veículo em ambientes desafiadores.

2.7. CONCEITOS GERAIS SOBRE O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A análise estrutural de componentes veiculares é uma etapa essencial no processo de desenvolvimento de veículos, especialmente no que se refere à segurança e ao desempenho de partes críticas, como o cubo de roda. A aplicação de métodos numéricos de análise estrutural permite a avaliação de como os componentes se comportarão sob diversas condições de carga e como as tensões e deformações afetam sua integridade. Entre os métodos disponíveis, o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem se destacado por sua capacidade de simular de forma precisa as condições operacionais dos componentes, proporcionando uma compreensão detalhada do comportamento estrutural sob diferentes cenários. Jazar (2015) descreve o MEF como uma técnica poderosa que divide um modelo complexo em partes menores e mais simples, facilitando a análise de tensões, deformações e a resposta estrutural dos componentes em condições reais de operação.

No contexto do cubo de roda, a aplicação do MEF é especialmente relevante, uma vez que este componente é submetido a cargas variáveis durante o funcionamento do veículo. O cubo de roda deve suportar não apenas o peso do veículo, mas também as forças resultantes das acelerações, frenagens e manobras, o que exige uma análise cuidadosa de como essas forças afetam sua estrutura. O MEF permite a simulação do cubo de roda sob diferentes condições de carga, permitindo a avaliação de tensões e deformações em diferentes pontos

do componente. Essa análise é crucial para identificar potenciais falhas antes da fabricação, garantindo que o *design* final atenda aos padrões de segurança e desempenho exigidos.

Um dos principais benefícios da aplicação do MEF no projeto do cubo de roda é a identificação de pontos críticos onde a concentração de tensões pode ocorrer. Esses pontos críticos são áreas onde as tensões são significativamente mais altas do que nas demais partes do componente (tendo sempre como referências as tensões admissíveis dos materiais envolvidos), aumentando o risco de falhas estruturais. A identificação dessas áreas permite a realização de otimizações na geometria do cubo de roda, ajustando seu *design* para redistribuir as tensões e reduzir a probabilidade de falhas. Essa otimização pode incluir alterações na espessura do material, na forma do cubo ou na localização dos suportes, resultando em um componente mais eficiente e seguro. O uso de simulações para prever o comportamento do cubo de roda sob diferentes condições de carga e configurações é uma prática recomendada que contribui para o desenvolvimento de projetos mais robustos e confiáveis.

A discussão sobre a importância de testes estruturais também é fundamental para garantir a integridade e a durabilidade do cubo de roda. Embora a análise teórica oferecida pelo MEF forneça informações valiosas sobre o desempenho do componente, os testes práticos são essenciais para validar essas simulações e confirmar que o cubo de roda se comportará conforme o esperado nas condições reais de operação. Testes estruturais, que podem incluir ensaios de fadiga, ensaios de impacto e análises de durabilidade, fornecem dados empíricos que são cruciais para a validação do *design*. Limpert (1999) enfatiza que os testes estruturais ajudam a identificar falhas que podem não ter sido previstas durante a análise teórica, garantindo que o cubo de roda atenda aos requisitos de segurança e desempenho ao longo de sua vida útil.

Além disso, os testes estruturais permitem a realização de ajustes finos no *design* do cubo de roda. Com base nos resultados dos testes, é possível identificar áreas que precisam de reforço ou ajustes, resultando em um componente otimizado. A interação entre a análise teórica e os testes práticos é essencial para garantir que o projeto final não apenas atenda aos requisitos de desempenho, mas também seja seguro e confiável em condições de uso real.

Essa abordagem integrada é fundamental para o desenvolvimento de veículos, onde a segurança e a performance são sempre prioridades.

Outro aspecto importante da análise estrutural é a escolha adequada dos materiais utilizados na fabricação do cubo de roda. Os materiais selecionados devem ser capazes de suportar as cargas e tensões identificadas durante a análise, garantindo que o componente não sofra falhas prematuras. A combinação de técnicas de análise estrutural, como o MEF, e a seleção criteriosa de materiais resulta em um *design* eficiente e seguro. Juvinall e Marshek (2000) discutem como as propriedades dos materiais, incluindo resistência à tração, resistência ao desgaste e comportamento sob carga cíclica, influenciam diretamente a performance do cubo de roda e sua capacidade de suportar as condições adversas típicas de veículos *off-road*.

Adicionalmente, a utilização de tecnologias avançadas de simulações e testes continua a evoluir, proporcionando ferramentas cada vez mais sofisticadas para a análise estrutural de componentes veiculares. A integração de *software* de simulação com técnicas de teste físico permite um ciclo de desenvolvimento mais ágil e eficiente, onde os ajustes podem ser feitos rapidamente com base nos dados coletados. Essa abordagem não apenas melhora a precisão dos resultados, mas também acelera o processo de desenvolvimento, permitindo que novas soluções sejam testadas e implementadas com maior rapidez.

Em suma, a análise estrutural de componentes veiculares, especialmente do cubo de roda, é um processo multifacetado que combina teoria, prática e tecnologia. A aplicação do MEF proporciona uma compreensão profunda das tensões e deformações que o cubo de roda experimenta, permitindo a otimização de seu *design*. A identificação de pontos críticos de tensão e a realização de testes estruturais são essenciais para garantir que o componente atenda aos padrões de segurança e desempenho. Essa abordagem integrada não apenas contribui para a durabilidade do cubo de roda, mas também assegura que os veículos sejam seguros e eficientes em suas operações. À medida que a tecnologia avança, espera-se que novas técnicas de análise e testes continuem a aprimorar o desenvolvimento de componentes veiculares, resultando em veículos cada vez mais confiáveis e de alto desempenho.

2.8. NORMAS TÉCNICAS E REGULAMENTAÇÕES PARA PROJETOS VEICULARES

A compreensão das normas técnicas e regulamentações que regem o desenvolvimento de projetos veiculares é crucial para garantir a segurança, o desempenho e a durabilidade dos componentes automotivos, especialmente em aplicações exigentes como os veículos *off-road*. As normas SAE (*Society of Automotive Engineers*) desempenham um papel central nesse contexto, fornecendo diretrizes e padrões que orientam a concepção e fabricação de componentes como os cubos de roda. A norma SAE Brasil (2024) estabelece um conjunto de normas que abordam desde os requisitos de segurança até os procedimentos de teste e validação, sendo essencial para garantir que os componentes automotivos atendam às expectativas do mercado e às exigências regulatórias.

As normas SAE aplicáveis ao desenvolvimento de cubos de roda e outros componentes veiculares são elaboradas com base em um profundo entendimento das condições de operação enfrentadas por esses componentes. Os cubos de roda, por serem fundamentais na conexão entre as rodas e o sistema de suspensão, precisam atender a requisitos rigorosos de resistência e desempenho. As normas abordam aspectos como a resistência à fadiga, a durabilidade sob condições de carga cíclica e a capacidade de suportar impactos. Deve-se considerar essas normas em suas especificações, garantindo que os produtos finais sejam seguros e confiáveis.

Os requisitos gerais de segurança e desempenho para veículos *off-road* são especialmente rigorosos, dado que esses veículos operam em condições adversas que podem comprometer a integridade de seus componentes. A segurança é uma prioridade, e as normas SAE incluem diretrizes específicas para a resistência a impactos, a estabilidade em terrenos irregulares e a capacidade de tração. A importância de atender a esses requisitos é enfatizada por diversos autores, que argumentam que um projeto que não respeita as normas pode resultar em falhas catastróficas e em riscos à segurança dos usuários. Dessa forma, o cumprimento das normas SAE não é apenas uma questão de conformidade regulatória, mas uma responsabilidade ética.

Os procedimentos de teste e validação de componentes automotivos são uma parte fundamental do desenvolvimento de veículos. Esses testes visam garantir que os componentes atendam aos padrões de desempenho e segurança estabelecidos pelas normas técnicas. A resistência à fadiga é um dos principais critérios de avaliação, uma vez que os componentes veiculares estão sujeitos a ciclos repetitivos de carga durante sua vida útil. Testes de fadiga ajudam a determinar a durabilidade dos materiais utilizados na fabricação de cubos de roda, permitindo a identificação de potenciais pontos de falha antes da produção em larga escala. A implementação de testes de resistência à fadiga, conforme orientações das normas SAE, assegura que os componentes suportem as tensões impostas pelas operações típicas e extremas dos veículos *off-road*.

Além da resistência à fadiga, os testes de impacto são essenciais para avaliar como os cubos de roda e outros componentes reagem a forças repentinas, que são comuns em ambientes *off-road*. A capacidade de absorver e dissipar impactos é crucial para a segurança e a durabilidade do veículo. A corrosão também é um fator a ser considerado, especialmente em veículos que operam em condições onde a exposição à umidade e a elementos corrosivos é constante. A SAE estabelece diretrizes para a resistência à corrosão, que podem incluir testes de exposição a ambientes agressivos e avaliação do desempenho de revestimentos protetores. Deve-se, portanto, considerar a escolha de materiais e tratamentos de superfície que atendam a esses requisitos, garantindo que os componentes mantenham suas propriedades mecânicas e estéticas ao longo do tempo.

A interação entre as normas técnicas, os testes e a realidade prática do projeto veicular cria um ciclo de *feedback* contínuo que é vital para o desenvolvimento de produtos de alta qualidade. A adesão às normas SAE não apenas assegura que os cubos de roda e outros componentes atendam a padrões de segurança, mas também fornece um referencial para a inovação. À medida que novas tecnologias e materiais são introduzidos, as normas devem evoluir para incorporar esses avanços, desafiando a adaptação e a aplicação de soluções inovadoras em projetos. Essa dinâmica entre regulamentos e inovação é fundamental para o avanço da engenharia automotiva, permitindo que as

empresas desenvolvam veículos que não apenas atendam às exigências atuais, mas que também estejam preparados para o futuro.

Além disso, a aplicação de normas técnicas e regulatórias impacta a competitividade no mercado automotivo. Empresas que investem em conformidade com normas reconhecidas podem se destacar pela qualidade e segurança de seus produtos. A reputação adquirida por meio do compromisso com a segurança e o desempenho pode ser um diferencial significativo em um mercado cada vez mais exigente. Os consumidores estão cada vez mais conscientes da importância da segurança veicular, e a conformidade com as normas SAE pode ser um fator decisivo na escolha de um veículo, especialmente em segmentos que priorizam a performance em terrenos desafiadores, como os veículos *off-road*.

A análise estrutural de componentes veiculares, como os cubos de roda, deve ser integrada ao contexto das normas técnicas e regulamentações. Os resultados dessa análise, combinados com os dados obtidos por meio de testes práticos, fornecem uma base sólida para garantir que os projetos estejam em conformidade com as normas SAE. A interdependência entre análise teórica, testes práticos e conformidade normativa é fundamental para o desenvolvimento de produtos que não apenas atendam às expectativas do mercado, mas que também garantam a segurança e a confiança dos usuários.

À medida que o setor automotivo continua a evoluir, espera-se que a aplicação de normas técnicas e regulamentações se torne ainda mais crítica. A crescente ênfase na sustentabilidade e na eficiência energética exigirá o desenvolvimento de soluções inovadoras que atendam não apenas aos requisitos de desempenho, mas também aos objetivos ambientais. A integração de normas que abordam a eficiência energética e a sustentabilidade no desenvolvimento de veículos será essencial para o sucesso no futuro. As normas SAE e outras regulamentações relacionadas devem evoluir para incorporar essas novas prioridades, garantindo que as universidades estejam equipadas para enfrentar os desafios que surgem em um ambiente em constante mudança.

Em conclusão, as normas técnicas e regulamentações são fundamentais para o desenvolvimento de cubos de roda e outros componentes veiculares. A adesão a essas normas garante que os projetos atendam aos requisitos de segurança, desempenho e durabilidade, permitindo o desenvolvimento de

produtos de alta qualidade que atendam às exigências do mercado. A interação entre a teoria, a prática e as regulamentações criam um ciclo de *feedback* que é vital para a evolução contínua. À medida que novas tecnologias e prioridades emergem, a capacidade de se adaptar e inovar dentro do *framework* das normas técnicas será crucial para o sucesso no futuro do setor automotivo.

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi elaborada com o objetivo de desenvolver um projeto estrutural de um cubo de roda para veículos *off-road* do tipo mini Baja, considerando as especificações técnicas, a eficiência e a segurança. Este projeto se insere no contexto das competições Baja SAE, que exigem um elevado nível de desempenho dos componentes, especialmente em condições adversas. Para alcançar esse objetivo, a metodologia foi dividida em etapas claramente definidas, abordando desde a revisão da literatura até a análise final dos resultados.

3.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A primeira etapa consistiu na realização de uma revisão abrangente da literatura disponível sobre as tecnologias emergentes e as inovações no *design* automotivo, com foco específico nas metodologias aplicadas ao projeto de cubos de roda. Essa revisão permitiu entender as práticas atuais, as normas e as regulamentações que regem a fabricação e a análise estrutural desses componentes. Diversas fontes foram consultadas, incluindo livros, artigos acadêmicos e normativas técnicas, que forneceram uma base teórica sólida para a construção do projeto. Além disso, essa etapa ajudou a identificar as lacunas na literatura existente e a necessidade de novas abordagens que pudessem contribuir para a melhoria do *design* dos cubos de roda.

3.2. DEFINIÇÃO DE OBJETIVOS

Em seguida, os objetivos do trabalho foram definidos, priorizando a resistência, a durabilidade e a eficiência do cubo de roda. O objetivo principal foi desenvolver uma metodologia de projeto que não apenas atendesse aos requisitos obrigatórios, mas também incorporasse características desejadas para maximizar o desempenho do veículo. Esta definição de objetivos foi essencial para direcionar todas as ações subsequentes do projeto.

3.3. COLETA DE DADOS

A coleta de dados constituiu uma etapa essencial no desenvolvimento do projeto, sendo voltada à obtenção de informações detalhadas e precisas acerca

das condições de uso do cubo de roda, bem como do ambiente operacional em que o veículo estará inserido. Essa fase foi fundamental para assegurar que o projeto contemplasse todos os fatores que poderiam influenciar diretamente o desempenho e a durabilidade do componente.

Outro aspecto relevante foi a análise da interação do cubo de roda com os demais componentes do veículo, uma vez que sua funcionalidade está intrinsecamente relacionada ao desempenho integrado do sistema. Essa análise permitiu identificar potenciais interferências mecânicas, garantindo que o componente fosse projetado para operar de forma eficiente e segura em conjunto com elementos como rolamentos, eixos e rodas.

Os parâmetros iniciais considerados no projeto incluem, principalmente, o padrão de furação da roda do veículo e as dimensões do eixo da manga de suspensão. Esses dados foram avaliados cuidadosamente para assegurar a compatibilidade do cubo de roda com o restante do sistema mecânico, evitando ajustes posteriores que poderiam comprometer a eficiência do veículo.

3.4. ESCOLHA DO MATERIAL

A análise das características dos materiais disponíveis no mercado, como o aço e alumínio, foi realizada, levando em consideração fatores como resistência, peso, durabilidade e custo. A escolha do material adequado é fundamental para garantir que o cubo de roda suporte as exigências específicas dos veículos *off-road*, especialmente nas competições, onde as tensões aplicadas podem ser extremas. Para este projeto, foram avaliados os aços 1020 e 4130 e os aluminíums 6061 e 7075, mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Escolha de Materiais

Propriedade	AL 7075-T6	AL 6061	Aço 4130	Aço 1020
Densidade [g/cm ³]	2,81	2,70	7,85	7,87
Limite de Escoamento [MPa]	500	275	435	350
Resistência a tração [MPa]	572	310	560	420
Módulo elástico [GPa]	71	69	210	200
Relação força/peso MPa/(g/cm ³)	178	115	56	53

Dentre os materiais avaliados, o alumínio 7075-T6 destaca-se como a escolha mais adequada, sendo amplamente utilizado nas indústrias automotiva

e aeronáutica devido à sua combinação de elevada resistência mecânica e baixo peso. Este material demonstra excelente desempenho em aplicações sujeitas a tensões intensas e impactos repetitivos, como ocorre em componentes estruturais de veículos.

A combinação de resistência e leveza conferida pelo alumínio 7075-T6 permite que o cubo de roda atenda de maneira eficiente às exigências estruturais e de desempenho das competições *off-road*, onde a robustez e a redução de massa são aspectos fundamentais. Sua ampla adoção em setores que requerem alta confiabilidade estrutural reforça sua adequação a este projeto, garantindo um equilíbrio ideal entre desempenho mecânico, eficiência e durabilidade.

3.5. SELEÇÃO DE ROLAMENTOS

A seleção dos rolamentos também foi um aspecto importante do projeto. Os rolamentos escolhidos foram de rolos cônicos, que são projetados para suportar cargas combinadas, ou seja, cargas radiais e axiais simultaneamente. Especificamente, os modelos 32004X e 32005X da SKF, foram analisados em relação à sua capacidade de carga, resistência ao desgaste e ao ambiente operacional. A Tabela 2 apresenta os valores das capacidades dinâmicas e estática, além das aplicações de cada modelo.

Tabela 2: Características técnicas dos modelos

	32004X	32005X
Capacidade dinâmica [kN]	15,6	21,9
Capacidade estática [kN]	13,2	20,0

3.6. MODELAGEM

O desenvolvimento do projeto conceitual do cubo de roda seguiu a coleta de dados. Nessa fase, foi elaborada a geometria e a configuração geral do cubo, considerando as análises realizadas na etapa anterior. Um *software* de modelagem foi utilizado para criar um protótipo digital, permitindo simulações e ajustes antes da produção física. Essa abordagem digital facilitou a visualização

e a modificação do *design*, assegurando que todas as variáveis fossem consideradas antes de avançar para a análise estrutural.

Foi desenvolvida uma modelagem robusta, que serviu como base para o projeto (Figuras 3 e 4). Essa modelagem buscou atender aos pontos cruciais previamente definidos, como o padrão de furação para o contato com a roda e a incorporação dos rolamentos especificados. Nessa etapa, não foram aplicadas técnicas de otimização, de modo a priorizar a identificação e integração dos requisitos fundamentais do projeto.

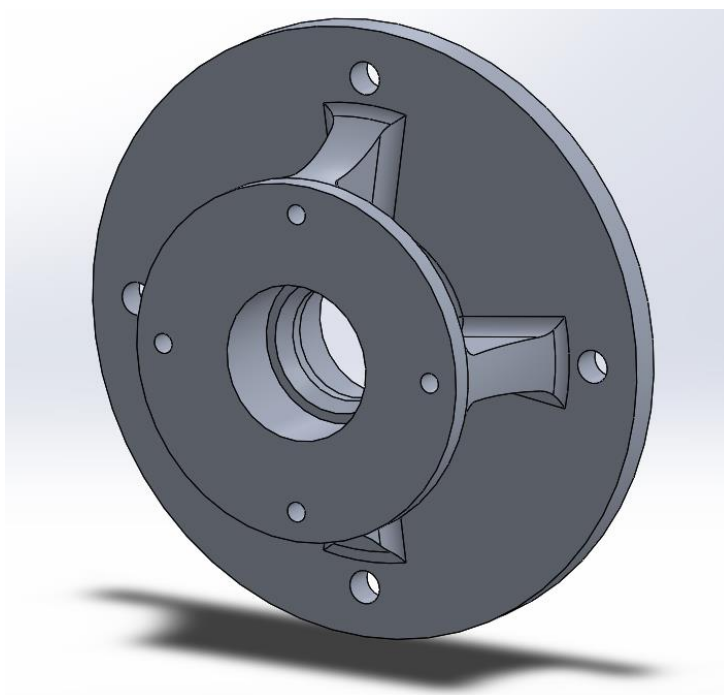


Figura 5. Protótipo

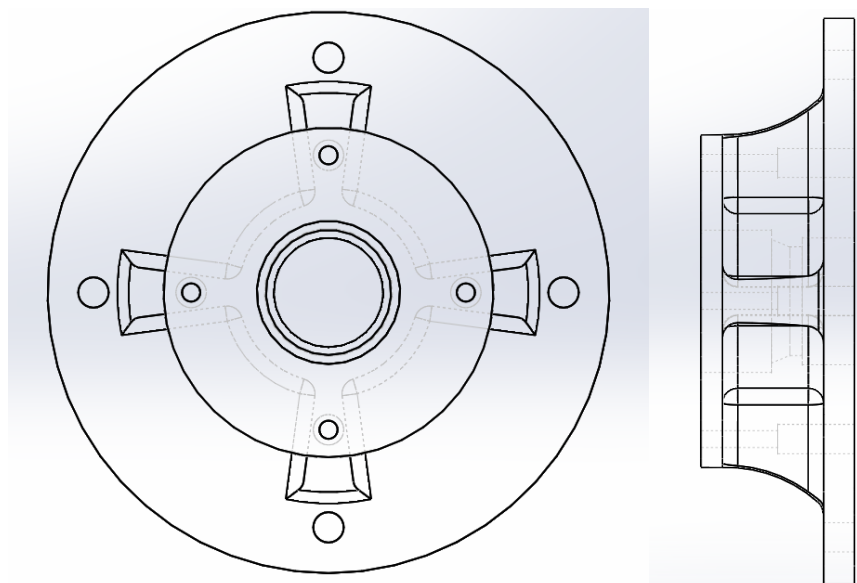


Figura 6. Protótipo com Linhas Ocultas Visíveis

Além disso, o *design* do cubo de roda considerou a inclusão de elementos essenciais, como filetes, que são indispensáveis para reduzir concentrações de tensões e melhorar o desempenho mecânico do componente. A aplicação criteriosa desses elementos contribui para a durabilidade do protótipo, minimizando o risco de falhas estruturais em pontos críticos.

Embora técnicas de otimização não tenham sido aplicadas neste projeto, elas constituem ferramentas valiosas que podem ser utilizadas em futuros desenvolvimentos para melhorar ainda mais a eficiência do componente. Entre essas técnicas, destaca-se a otimização topológica, amplamente reconhecida por sua capacidade de redistribuir o material de forma inteligente dentro de uma peça. A otimização topológica permite identificar regiões onde o material pode ser removido, reduzindo significativamente a massa do componente sem comprometer sua resistência estrutural. A implementação dessa técnica em etapas futuras poderá trazer benefícios adicionais ao projeto, aprimorando seu desempenho e alinhando às melhores práticas de engenharia.

3.7. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Após a elaboração do modelo digital, foram realizadas análises estruturais utilizando o MEF, que é uma técnica computacional que permite simular o comportamento do cubo de roda sob diversas condições de carga,

proporcionando uma análise de tensões, deformações e outros parâmetros mecânicos. Para este estudo, as simulações foram conduzidas no *software* ANSYS.

Antes de iniciar a análise, foram inseridos os dados referentes às propriedades do material (MATWEB, 2025), e demonstrados na Figura 7. A precisão na definição desses dados é essencial para garantir que os resultados da simulação sejam representativos do comportamento real do componente.

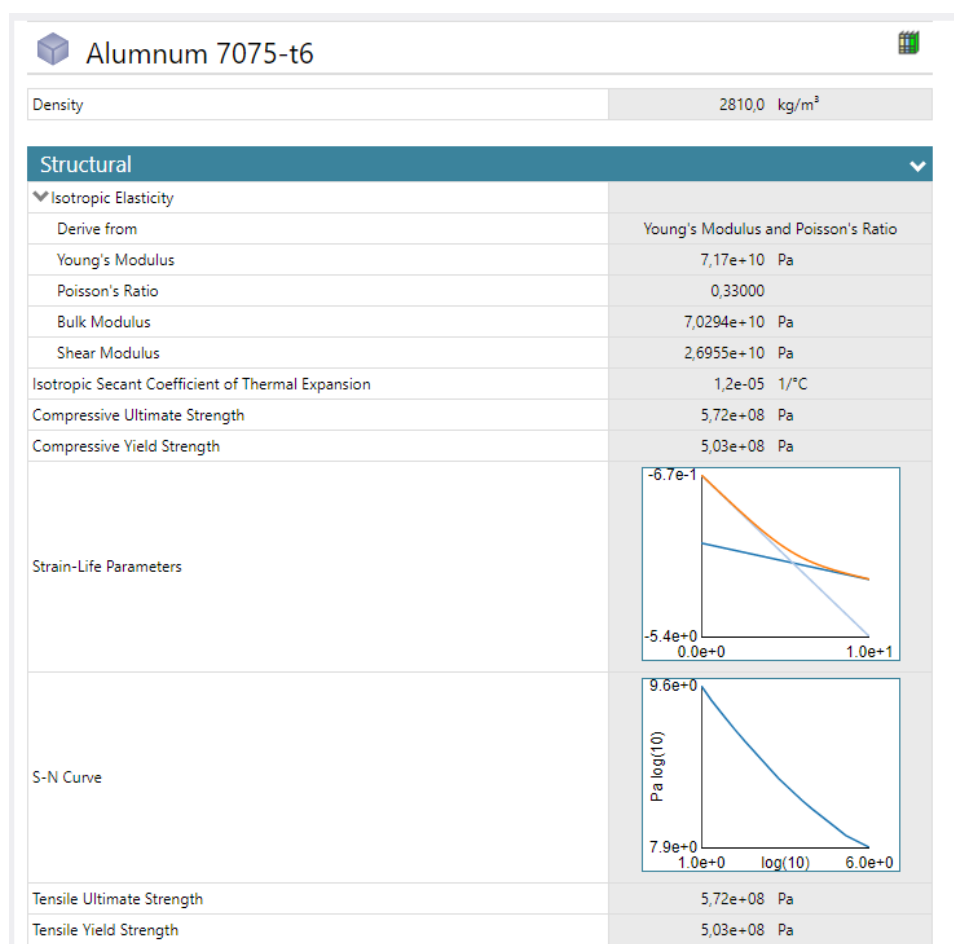


Figura 7. Dados do Material no *software* ANSYS

Na etapa inicial, foram definidos os parâmetros da malha de elementos finitos, com especial atenção à qualidade da malha. O valor de qualidade escolhido foi de 0,66, resultando em uma discretização que atendeu aos critérios desejados. A malha apresentou um refinamento em regiões críticas, como quinas e áreas próximas a furos, conforme ilustrado nas Figuras 8, 9, 10 e 11.

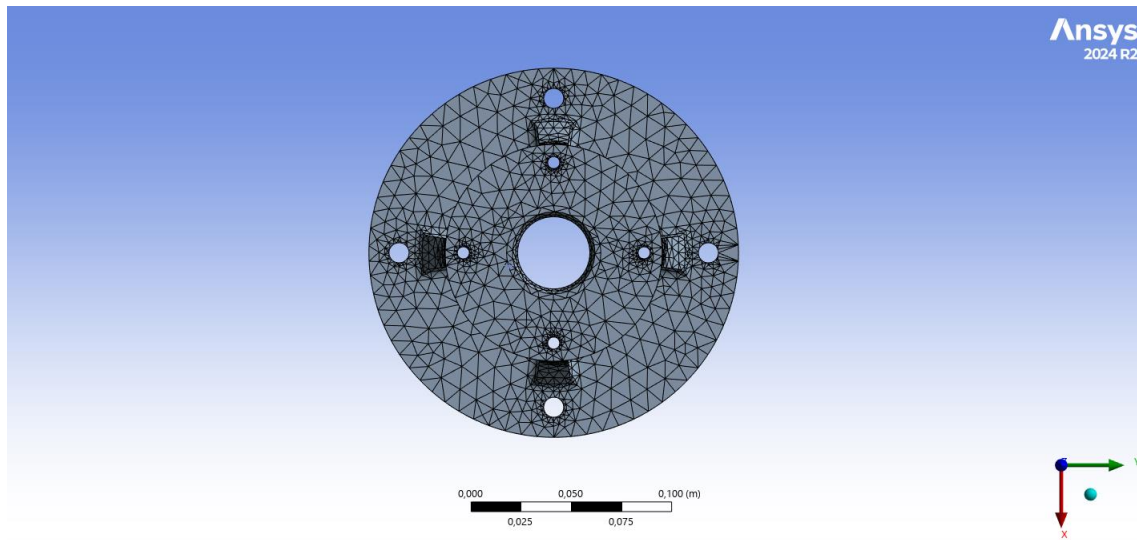


Figura 8. Malha - Vista Frontal

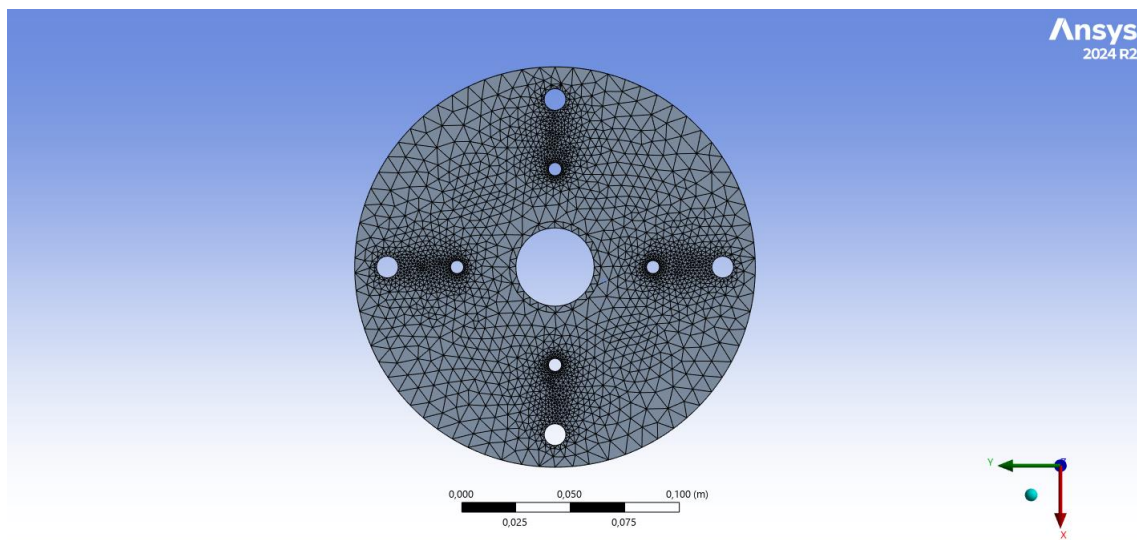


Figura 9. Malha - Vista Traseira

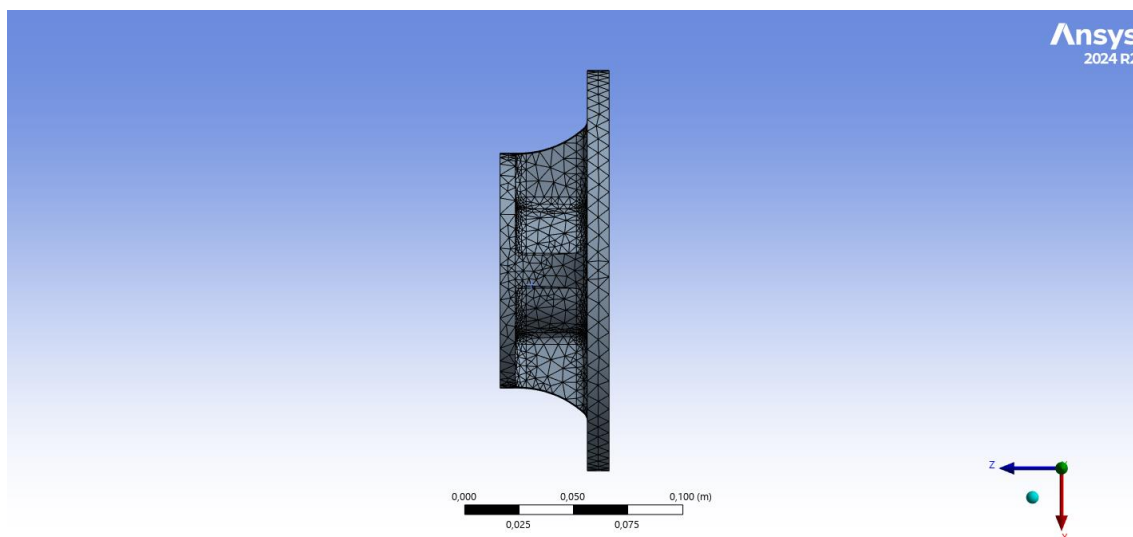


Figura 10. Malha - Vista Lateral

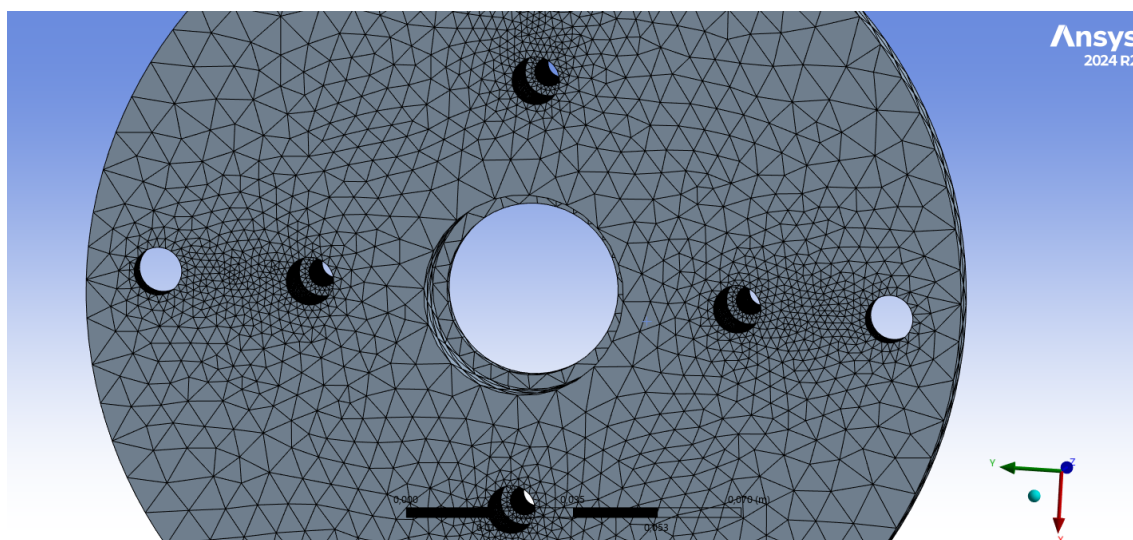


Figura 11. Malha - Vista Detalhada dos Furos

Para o estudo de caso, considerou-se a condição mais crítica: o impacto do veículo ao cair de uma altura de 1 metro, com a roda esterçada em 30° . Essa situação foi escolhida devido à sua relevância em competições, onde o veículo enfrenta obstáculos que demandam esterçamento elevado e quedas de até 1 metro.

A força remota foi aplicada no pneu, propagando-se pela roda e chegando ao cubo por meio dos rolamentos. As direções e magnitudes das forças estão representadas nas Figuras 12, 13 e 14.

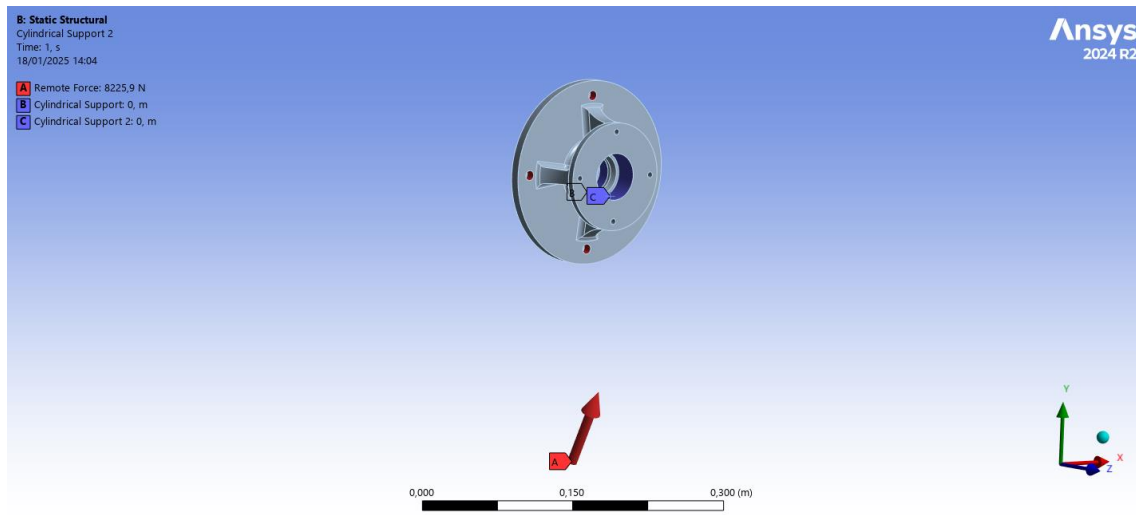


Figura 12. Força Aplicada - Vista Frontal

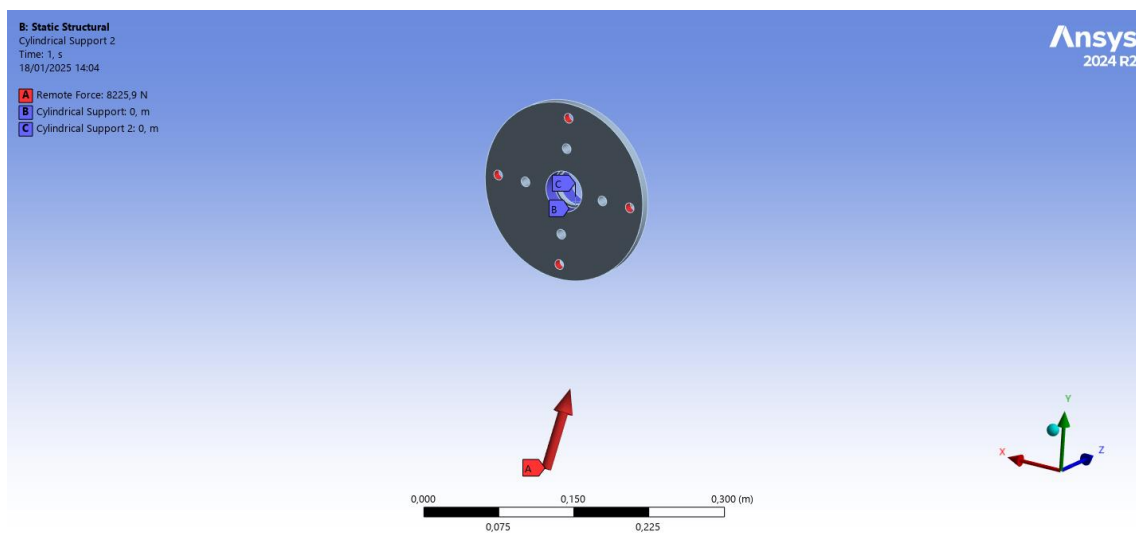


Figura 13. Força Aplicada - Vista Traseira

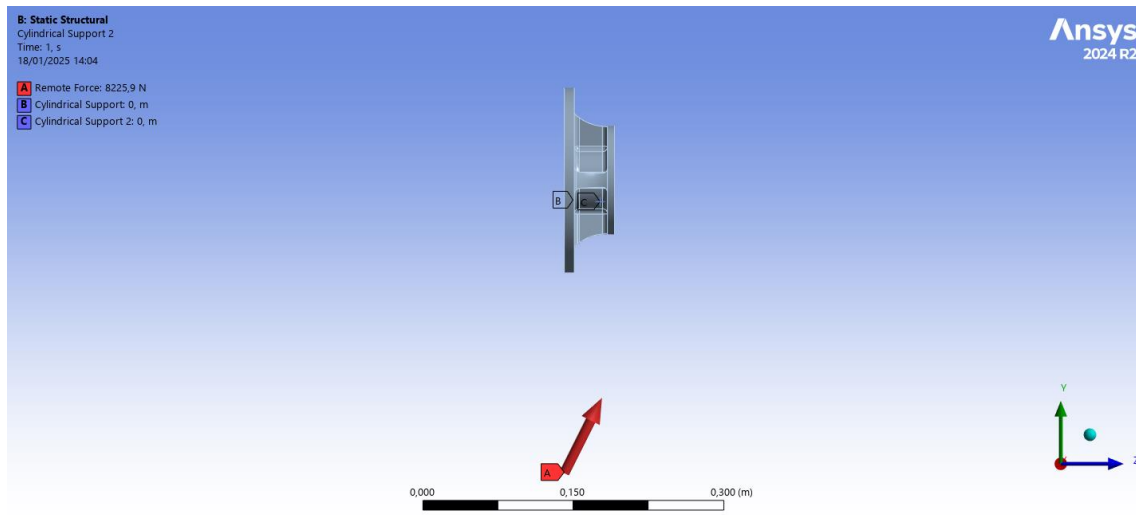


Figura 14. Força Aplicada - Vista Lateral

Em seguida, foram definidas as condições de contorno nos rolamentos externo e interno (identificados como B e C, respectivamente). As Figuras 15, 16, 17 e 18 ilustram a aplicação dessas condições de contorno e seus parâmetros detalhados.

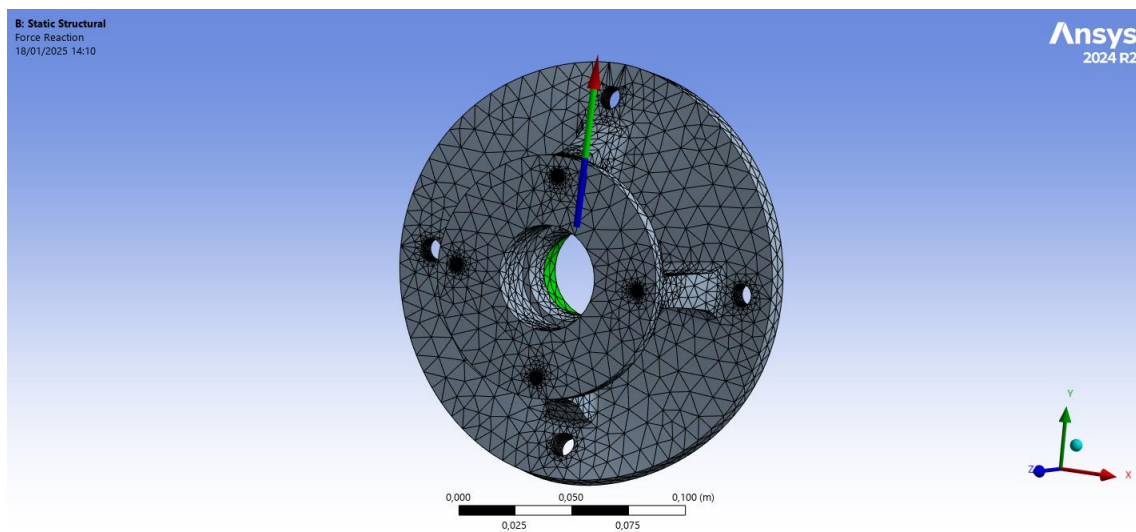


Figura 15. Condição de Contorno B

Details of "Force Reaction" ⌵ 🔍 🗑 ✕

[-] Definition

Shows the properties for the selected Item in the outline view

Type	Force Reaction
Location Method	Boundary Condition
Boundary Condition	Cylindrical Support
Orientation	Global Coordinate System
Suppressed	No

[-] Options

Result Selection	All
<input type="checkbox"/> Display Time	End Time

[+] Results

[-] Maximum Value Over Time

<input type="checkbox"/> X Axis	2,1638 N
<input type="checkbox"/> Y Axis	9517,8 N
<input type="checkbox"/> Z Axis	-624,24 N
<input type="checkbox"/> Total	9538,3 N

[-] Minimum Value Over Time

<input type="checkbox"/> X Axis	2,1638 N
<input type="checkbox"/> Y Axis	9517,8 N
<input type="checkbox"/> Z Axis	-624,24 N
<input type="checkbox"/> Total	9538,3 N

[+] Information

Figura 16. Detalhes da Condição de Contorno B

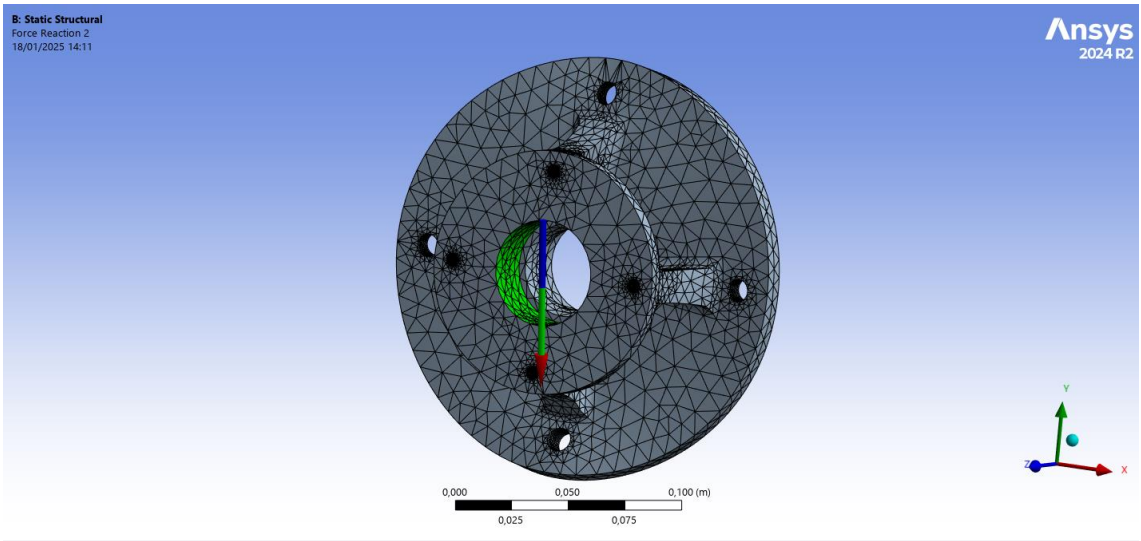


Figura 17. Condição de Contorno C

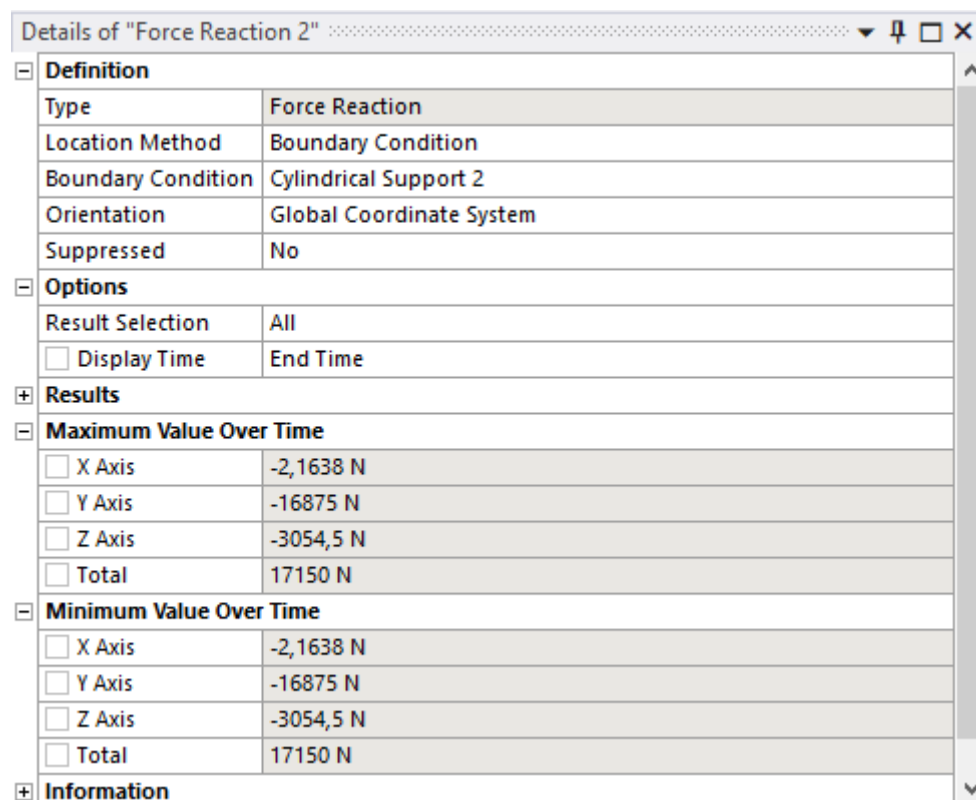


Figura 18. Detalhes da Condição de Contorno C

Com as condições de contorno estabelecidas, foi realizada uma análise estática, linear elástica, pelo MEF, obtendo-se os deslocamentos e a distribuição de tensões de von Mises, dando continuidade ao processo de simulação.

4. RESULTADOS

Após a inserção dos dados no *software* e a execução da simulação, avaliou-se a capacidade da geometria de atender aos requisitos estruturais. A maior tensão de von Mises obtida foi de $2,29 \times 10^8$ Pa, conforme ilustrado nas Figuras 19, 20, 21 e 22.

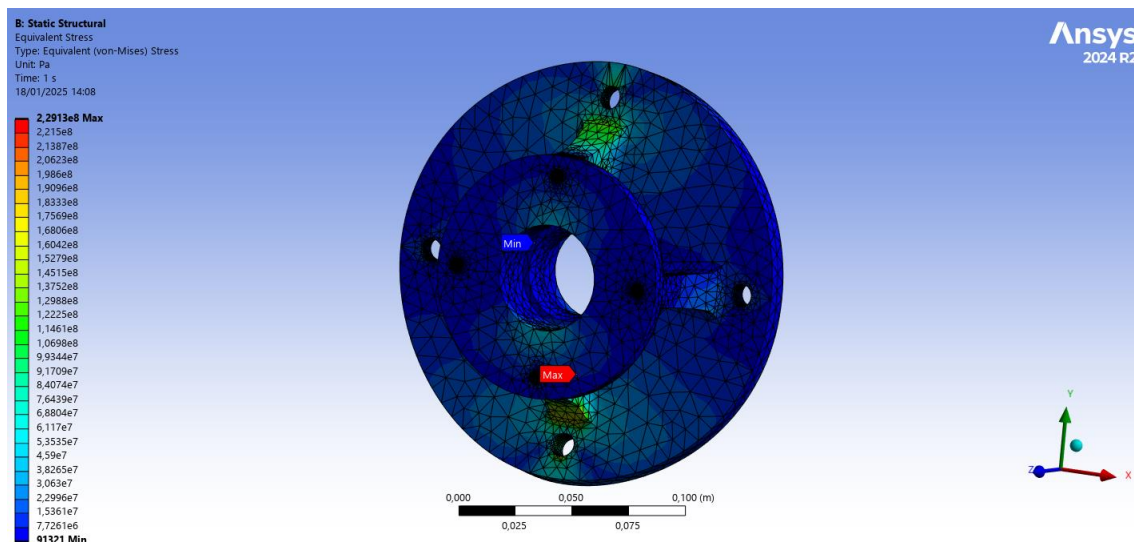


Figura 19. Resultado da Simulação

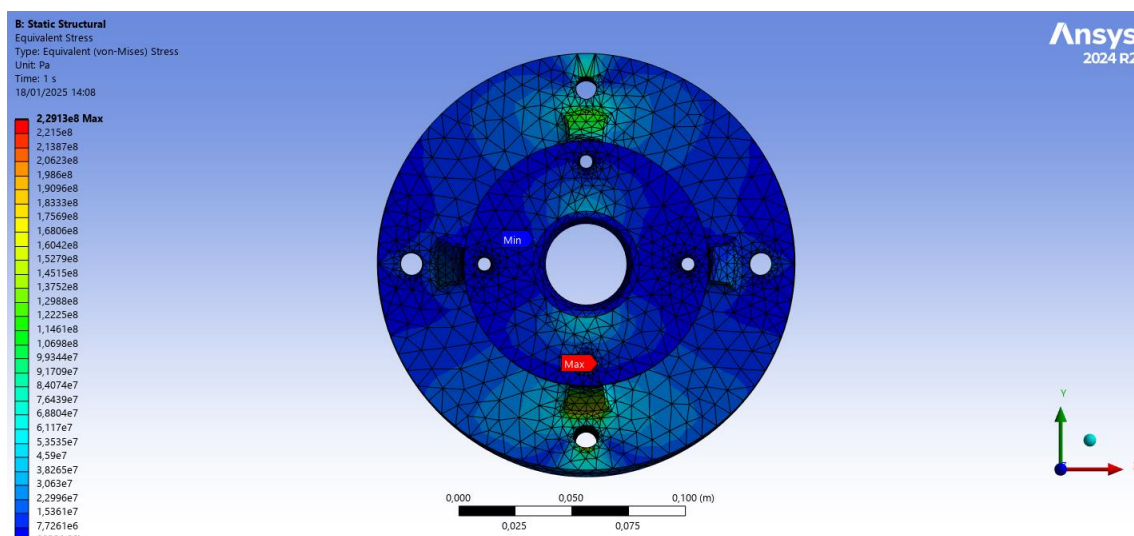


Figura 20. Resultado da Simulação - Vista Frontal

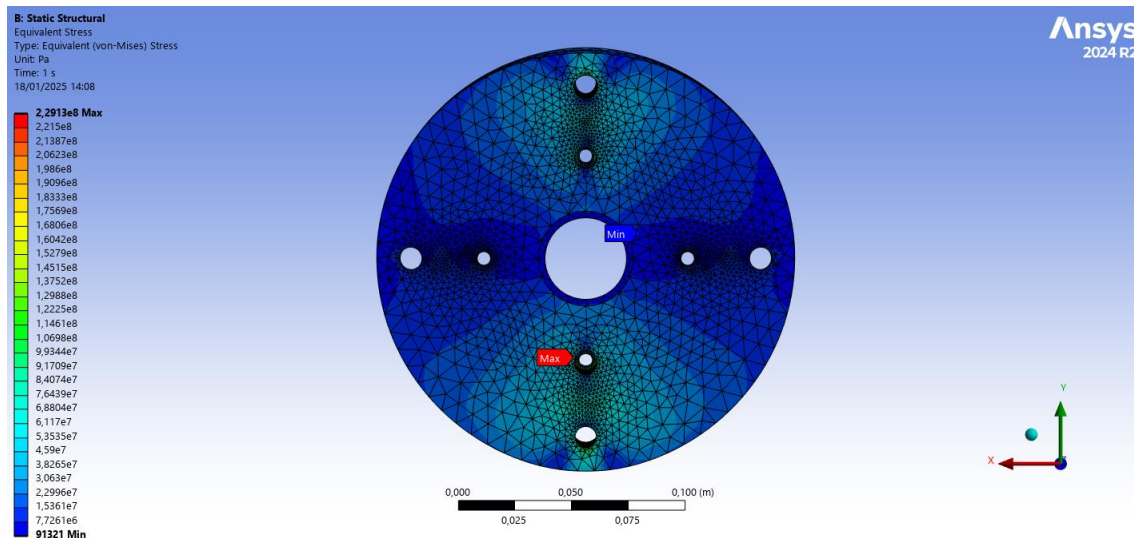


Figura 21. Resultado da Simulação - Vista Traseira

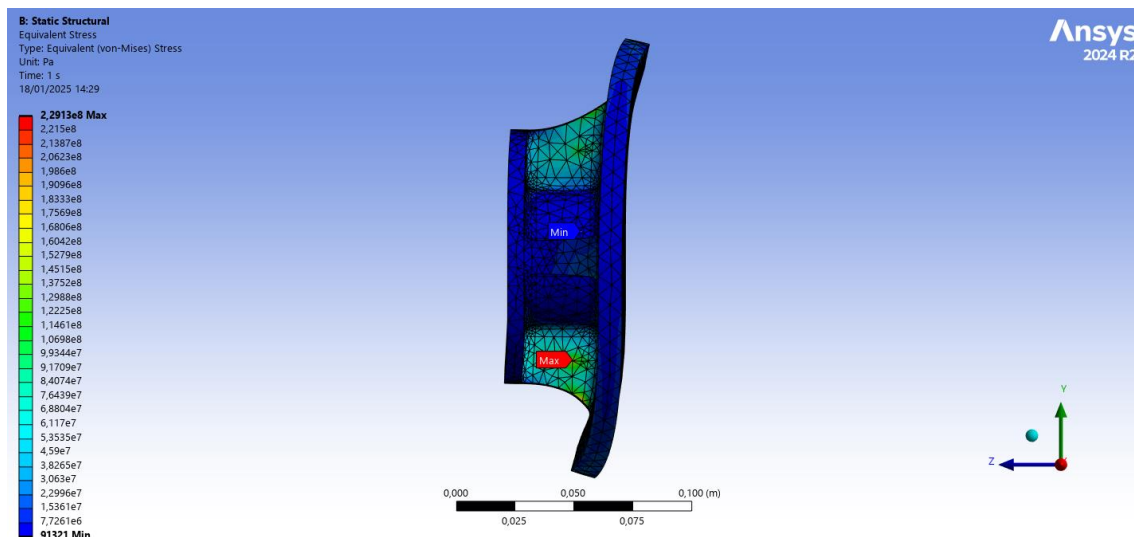


Figura 22. Resultado da Simulação - Vista Lateral

A região mais crítica, com relação à distribuição de tensões, foi identificada na entrada dos parafusos (Figura 23), o que era esperado devido à presença de quinas.

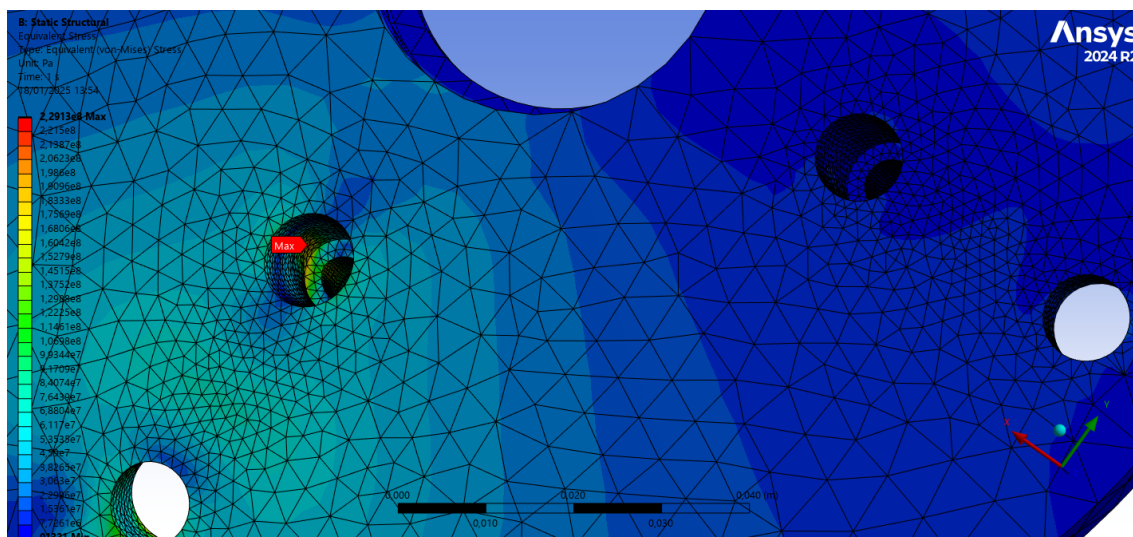


Figura 23. Ponto Crítico de Tensão

Além disso, as Figuras 24 e 25 mostram os cálculos das cargas máximas suportadas pelos rolamentos 32004 X (SKF, 2025) e 32005 X (SKF, 2025). Para determinar essas cargas, foram utilizados os valores máximos de força radial e axial obtidos na simulação. A análise foi complementada utilizando a ferramenta da SKF, que verifica a adequação dos rolamentos às cargas aplicadas e calcula o fator de segurança para a aplicação.

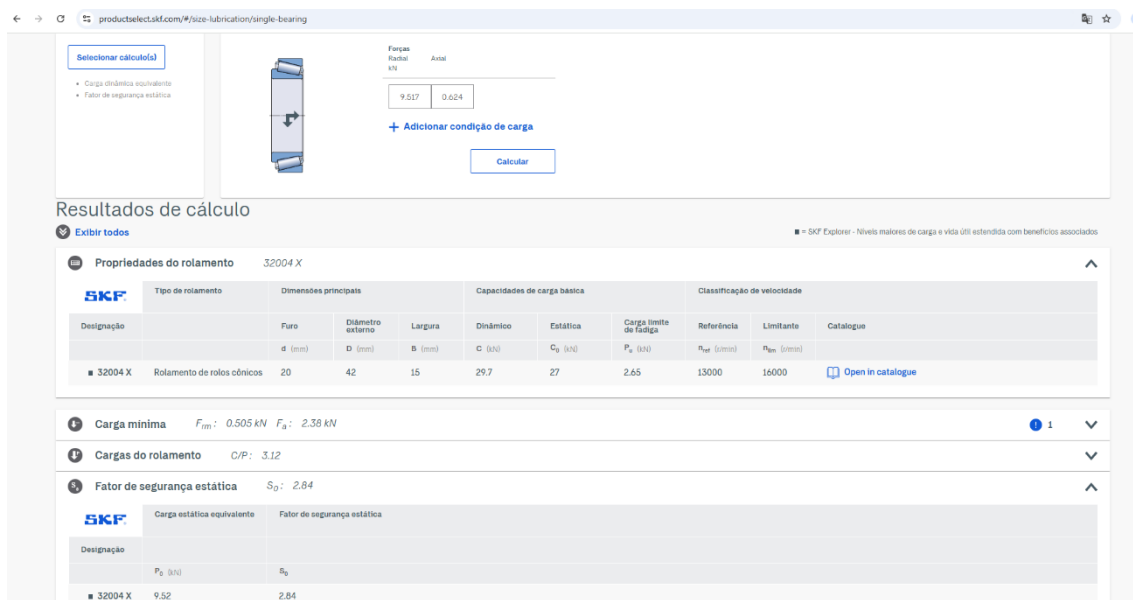


Figura 24. Cálculo do Rolamento 32004 X

productselect.skf.com/#/size-lubrication/single-bearing

Selecionar cálculo(s)

- Carga dinâmica equivalente
- Fator de segurança estática

Forças
Radial Axial
kN

16.875 3.084

+ Adicionar condição de carga

Calcular

Resultados de cálculo

Exibir todos

■ SKF Explorer - Níveis maiores de carga e vida útil estendida com benefícios associados

Propriedades do rolamento 32005 X

Designação	Tipo de rolamento	Dimensões principais			Capacidades de carga básica			Classificação de velocidade		
		Furo d (mm)	Diâmetro externo D (mm)	Largura B (mm)	Dinâmico C (kN)	Estática C ₀ (kN)	Carga limite de fadiga P _e (kN)	Referência P _{ref} (mm/s)	Limite P _{lim} (mm/s)	Catálogo
■ 32005 X	Rolamento de rolos cônicos	25	47	15	33.2	32.5	3.25	12000	14000	Open in catalogue

1 Carga mínima F_{rm} : 0.564 kN F_a : 4.82 kN

2 Cargas do rolamento C/P : 1.97

3 Fator de segurança estática S_0 : 1.93

Designação	Carga estática equivalente		Fator de segurança estática	
	P ₀ (kN)	S ₀	P ₀ (kN)	S ₀
■ 32005 X	16.9	1.93		

Figura 25. Cálculo do Rolamento 32005 X

Os resultados indicam que as tensões simuladas estão abaixo do limite de resistência do material, garantindo a segurança estrutural do componente. Da mesma forma, os rolamentos apresentaram tensões dentro de seus limites máximos, confirmando a adequação ao carregamento aplicado.

5. CONCLUSÃO

A modelagem desenvolvida para o cubo de roda mostrou-se eficiente e alinhada com os objetivos do projeto, enquanto a simulação computacional apresentou resultados consistentes e confiáveis, validando o desempenho do componente nas condições críticas estabelecidas. A escolha do material alumínio 7075-T6 destacou-se como uma decisão estratégica, dado seu equilíbrio entre leveza, resistência mecânica e durabilidade. Além disso, a revisão bibliográfica foi essencial para um embasamento técnico sólido para o desenvolvimento do modelo, enquanto a coleta precisa de dados garantiu que as análises realizadas não apresentassem interferências ou impactos negativos sobre os demais componentes do veículo.

A metodologia adotada neste trabalho, que integrou pesquisa teórica aprofundada e simulações computacionais, provou-se eficaz para o desenvolvimento de um cubo de roda que alia eficiência estrutural e segurança. O estudo permitiu a análise de tensões, deformações e demais parâmetros críticos, resultando em uma solução que atende aos requisitos técnicos. Além disso, o modelo desenvolvido constitui uma referência que pode ser adaptada e aplicada em projetos futuros.

Por fim, a constante evolução das tecnologias e dos materiais utilizados na fabricação de componentes automotivos requer uma abordagem metodológica flexível e adaptativa, que permita a incorporação de novas descobertas e inovações, garantindo assim que os projetos atendam às crescentes demandas do setor.

6. REFERÊNCIAS

BOSCH, R., *Manual de tecnologia automotiva*, 25.ed., São Paulo, Blucher, **2005**.

BRUNETTI, F., *Motores de combustão interna*, 3.ed., V.1, São Paulo, Blucher, **2013**.

COOK, R. D. *Concepts and applications of finite element analysis*, 2.ed., New York, John Wiley & Sons, **1981**.

GILLESPIE, T. D., *Fundamentals of vehicle dynamics*, Warrendale, SAE, **1992**.

JAZAR, R., *Vehicle dynamics: theory and application*, New York, Springer, **2015**.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M., *Fundamentals of machine component design*, 4.ed., New York, John Wiley & Sons, **2000**.

KAUFMAN, G. J., *Properties of aluminium alloys: fatigue data and the effects of temperature, product form, and processing*, OH: ASM International, **2008**.

KOTZALAS, M. N.; HARRIS, T. A., *Rolling bearing analysis*: 5.ed., V.2, Boca Raton, CRC Press, **2006**.

LIMPERT, R., *Brake design and safety*, 2.ed., Warrendale, SAE International, **1999**.

MATWEB, **2025**. Disponível em <<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4f19a42be94546b686bbf43f79c51b7d&ckck=1>>. Acesso em: 18 jan. 2025.

MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L., *Race car vehicle dynamics*, SAE International, **1995**.

ROVERE, E. L. L.; WILLS, W., *Eficiência energética e emissões de gases de efeito estufa (GEE)*, **2014**.

SAE BRASIL, *REGULAMENTO ADMINISTRATIVO E TÉCNICO BAJA SAE BRASIL: emenda 6*, **2024**.

SKF, **2025**. Disponível em <<https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/roller-bearings/tapered-roller-bearings/single-row-tapered-roller-bearings/productid-32004%20X>>. Acesso em: 18 jan. 2025.

SKF, **2025**. Disponível em <<https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/roller-bearings/tapered-roller-bearings/single-row-tapered-roller-bearings/productid-32005%20X>>. Acesso em: 18 jan. 2025.