

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS – UFGD

FACULDADE DE ENGENHARIA (FAEN)

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

THIAGO ANDRADE CAMPOS

**ANÁLISE TERMOMECÂNICA DE UM DISCO DE FREIO BAJA SAE UTILIZANDO
O SOFTWARE SALOME-MECA**

Dourados - MS

2026

THIAGO ANDRADE CAMPOS

**ANÁLISE TERMOMECAÂNICA DE UM DISCO DE FREIO BAJA SAE UTILIZANDO
O SOFTWARE SALOME-MECA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia (FAEN) da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Augusto Salomão Bornchlegell – Orientador.

Área de concentração: 30503019 ANÁLISE DE TENSÕES.

Dourados - MS

2026



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

ANEXO D - AVALIAÇÃO FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aluno: **THIAGO ANDRADE CAMPOS**

Título do trabalho e subtítulo (se houver): **ANÁLISE TERMOMECÂNICA DE UM DISCO DE FREIO BAJA SAE UTILIZANDO O SOFTWARE SALOME-MECA.**

BANCA EXAMINADORA

1. Presidente (orientador):

Prof. Dr. Augusto Salomão Bornschlegell, Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

2. Membro:

Prof. Dr. Edilson Nunes Pollnow, Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

3. Membro:

Prof. Dr. Rafael Ferreira Gregolin, Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

De acordo com o grau final obtido pelo aluno, nós da banca examinadora, declaramos **APROVADO** o aluno acima identificado, na componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso (TCC-II) de Graduação no Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Grande Dourados.

Dourados, 29 de junho de 2025.

Documento assinado digitalmente
 **AUGUSTO SALOMAO BORNSCHLEGELL**
Data: 29/06/2026 12:15:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Augusto Salomão Bornschlegell

Documento assinado digitalmente
 **EDILSON NUNES POLLNOW**
Data: 30/06/2026 13:37:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Edilson Nunes Pollnow

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL FERREIRA GREGOLIN**
Data: 30/06/2026 09:22:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rafael Ferreira Gregolin

Resumo

O sistema de freios de um protótipo Baja SAE atua não apenas na desaceleração, mas também como elemento fundamental de controle e manobrabilidade em condições off-road extremas. Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento estrutural e térmico do disco de freio dianteiro de um veículo Baja, fabricado em aço Hardox 450, garantindo a confiabilidade do projeto. Para isso, empregou-se a metodologia de análise termomecânica sequencialmente acoplada utilizando a plataforma de código aberto Salome-Meca e o solver Code_Aster. O modelo numérico avaliou três cenários críticos operacionais baseados na teoria de falha de von Mises: frenagem de pânico puramente mecânica, empenamento por um desalinhamento de 0,5 mm da pinça e acoplamento termomecânico. Os resultados obtidos demonstraram que o componente apresenta elevada robustez em condições normais de operação, alcançando um Fator de Segurança de 5,69 no travamento a frio e 3,21 sob severa dilatação térmica, validando a segurança do projeto. Contudo, a análise revelou alta vulnerabilidade ao desalinhamento, resultando em um Fator de Segurança de 0,73 e indicando deformação plástica. Conclui-se que o design é seguro e eficiente para a operação, desde que as tolerâncias de montagem sejam mantidas.

Palavras-chave: Termomecânica; Elementos finitos; Disco de freio.

Abstract

The braking system of a Baja SAE prototype acts not only in deceleration, but also as a fundamental element of control and maneuverability in extreme off-road conditions. This work aims to evaluate the structural and thermal behavior of the front brake disc of a Baja vehicle, manufactured in Hardox 450 steel, ensuring the reliability of the design. For this, the sequentially coupled thermomechanical analysis methodology was employed using the open-source Salome-Meca platform and the Code_Aster solver. The numerical model evaluated three critical operational scenarios based on von Mises failure theory: purely mechanical panic braking, warping due to a 0.5 mm caliper misalignment, and thermomechanical coupling. The results obtained demonstrated that the component exhibits high robustness under normal operating conditions, achieving a Safety Factor of 5.69 in cold braking and 3.21 under severe thermal expansion, validating the safety of the design. However, the analysis revealed high vulnerability to misalignment, resulting in a Safety Factor of 0.73 and indicating plastic deformation. It is concluded that the design is safe and efficient for operation, provided that the assembly tolerances are maintained.

Keywords: Thermomechanics; Finite elements; Brake disc.

ANÁLISE TERMOMECÂNICA DE UM DISCO DE FREIO BAJA SAE UTILIZANDO O SOFTWARE SALOME-MECA

Thiago Andrade Campos ⁽¹⁾ (thiago.campos076@academico.ufgd.edu.br), Augusto Salomão Bornchlegell ⁽¹⁾ (augustosalomao@ufgd.edu.br)

⁽¹⁾ Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD); Faculdade de Engenharia (FAEN)

RESUMO: *O sistema de freios de um protótipo Baja SAE atua não apenas na desaceleração, mas também como elemento fundamental de controle e manobrabilidade em condições off-road extremas. Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento estrutural e térmico do disco de freio dianteiro de um veículo Baja, fabricado em aço Hardox 450, garantindo a confiabilidade do projeto. Para isso, empregou-se a metodologia de análise termomecânica sequencialmente acoplada utilizando a plataforma de código aberto Salome-Meca e o solver Code_Aster. O modelo numérico avaliou três cenários críticos operacionais baseados na teoria de falha de von Mises: frenagem de pânico puramente mecânica, empenamento por um desalinhamento de 0,5 mm da pinça e acoplamento termomecânico. Os resultados obtidos demonstraram que o componente apresenta elevada robustez em condições normais de operação, alcançando um Fator de Segurança de 5,69 no travamento a frio e 3,21 sob severa dilatação térmica, validando a segurança do projeto. Contudo, a análise revelou alta vulnerabilidade ao desalinhamento, resultando em um Fator de Segurança de 0,73 e indicando deformação plástica. Conclui-se que o design é seguro e eficiente para a operação, desde que as tolerâncias de montagem sejam mantidas.*

PALAVRAS-CHAVE: TERMOMECÂNICA, ELEMENTOS FINITOS, DISCO DE FREIO

THERMOMECHANICAL ANALYSIS OF A BAJA BRAKE DISC USING THE SALOME-MECA SOFTWARE

ABSTRACT: *The braking system of a Baja SAE prototype acts not only in deceleration, but also as a fundamental element of control and maneuverability in extreme off-road conditions. This work aims to evaluate the structural and thermal behavior of the front brake disc of a Baja vehicle, manufactured in Hardox 450 steel, ensuring the reliability of the design. For this, the sequentially coupled thermomechanical analysis methodology was employed using the open-source Salome-Meca platform and the Code_Aster solver. The numerical model evaluated three critical operational scenarios based on von Mises failure theory: purely mechanical panic braking, warping due to a 0.5 mm caliper misalignment, and thermomechanical coupling. The results obtained demonstrated that the component exhibits high robustness under normal operating conditions, achieving a Safety Factor of 5.69 in cold braking and 3.21 under severe thermal expansion, validating the safety of the design. However, the analysis revealed high vulnerability to misalignment, resulting in a Safety Factor of 0.73 and indicating plastic deformation. It is concluded that the design is safe and efficient for operation, provided that the assembly tolerances are maintained.*

KEYWORDS: THERMOMECHANICS, FINITE ELEMENTS, BRAKE DISC

1. INTRODUÇÃO

As competições Baja SAE consistem em desafios voltados a estudantes universitários de diversos cursos, cujo principal objetivo é projetar, construir e testar veículos off-road, como ilustrado na Figura 1. Esses protótipos são submetidos a provas em terrenos irregulares e condições severas, de modo a avaliar sua resistência estrutural, durabilidade, desempenho dinâmico e a capacidade da equipe em comercializá-los como um produto. Segundo Limpert (2011), a operação segura de um veículo requer ajustes contínuos de sua velocidade. Logo, no contexto da competição, o sistema de frenagem assume papel fundamental, pois, em provas off -road, o freio não se limita à função de desaceleração e parada do veículo, atuando também como elemento de controle e manobrabilidade, contribuindo diretamente para a estabilidade, dirigibilidade e, conseqüentemente, para a segurança do piloto.

FIGURA 1: Veículo em competição off-road.



Fonte: SAE Brasil (2025).

Para atender a essas exigências, a equipe Baja Guaicurus projetou um disco de freio maciço fabricado em aço Hardox 450, dotado de recortes agressivos para alívio de massa. Este material foi selecionado por sua elevada tenacidade e resistência antidesgaste, em detrimento de sua condutividade térmica, que é inferior à dos ferros fundidos tradicionalmente empregados em sistemas de freio. Contudo, as cargas mecânicas extremas, somadas à menor capacidade térmica do material e à complexidade geométrica dos recortes, tornam o componente suscetível a falhas graves, como empenamento e ruptura. Embora estudos como o de Talati e Jalalifar (2009) apresentem soluções analíticas avançadas para o comportamento térmico transiente do conjunto disco-pastilha,

a aplicação prática dessas formulações matemáticas torna-se inviável diante de geometrias não axissimétricas e customizadas como as do projeto Baja, tornando indispensável o uso de ferramentas numéricas avançadas de simulação computacional.

Na literatura de simulação de freios, abordagens totalmente acopladas (*fully coupled*), como as utilizadas por Belhocine *et al.* (2016) para eventos de parada única, buscam resolver simultaneamente a geração de calor e o contato mecânico dinâmico. Entretanto, esse método demanda alto custo computacional e apresenta severas instabilidades numéricas por lidar com matrizes extensas, tornando-o frequentemente inviável para análises com recursos computacionais convencionais. Como alternativa, Strömberg e Rashid (2012) propuseram a abordagem sequencialmente acoplada (*sequentially coupled*), na qual o modelo é desacoplado em um problema térmico transiente e um problema estrutural estático, reduzindo drasticamente o esforço de processamento sem perda significativa de precisão.

Para a implementação eficaz desse método, a modelagem das condições de contorno exige simplificações estratégicas suportadas pela literatura. Mackin *et al.* (2002) utilizam o princípio da simetria radial sob fluxo de calor contínuo para homogeneizar a injeção térmica sobre a pista de frenagem, enquanto Belhocine *et al.* (2016) validam a aplicação localizada dos esforços mecânicos de esmagamento. Adicionalmente, Adamowicz e Grzes (2011) ressaltam que, no modelo sequencial, os valores de entrada, como o fluxo de calor transiente e a carga mecânica equivalente, devem ser previamente determinados de forma analítica, uma vez que o atrito gerador de calor não é resolvido nativamente pela interação de contato na malha. Para suprir essa exigência, recorre-se às formulações clássicas de dinâmica veicular estabelecidas por Limpert (2011), que fornecem as equações analíticas para as cargas térmicas e mecânicas no limiar de travamento. No entanto, embora a literatura consolide a eficiência da análise termomecânica sequencial, nota-se uma escassez de trabalhos que estructurem essas metodologias através de plataformas numéricas de código aberto (*open-source*) aplicadas especificamente à previsão de cenários reais de falha em protótipos da categoria Baja SAE.

1.1. Objetivos

Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento estrutural e termomecânico do disco de freio dianteiro da equipe Baja Guaicurus utilizando o software *open-source* Salome-Meca. Para isso, a análise simula o pior cenário possível em três casos operacionais distintos: (i) o travamento total e instantâneo do sistema, avaliando a resistência sob carga puramente mecânica; (ii) o travamento instantâneo sob condição de desalinhamento do suporte da pinça, investigando a deflexão lateral do componente; e (iii) a frenagem no limiar de travamento com deslizamento contínuo, de modo a capturar os efeitos severos do acoplamento termomecânico. Os resultados obtidos visam garantir a segurança e a confiabilidade do projeto da equipe e,

simultaneamente, fornecer um roteiro metodológico acessível e validado para a aplicação de plataformas *open-source* em projetos automobilísticos acadêmicos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Ferramental computacional e discretização da malha

O Salome-Meca é uma plataforma *open-source* de simulação para engenharia, configurando-se como uma adaptação da plataforma SALOME (utilizada para modelagem CAD e geração de malhas) integrada a módulos de análise mecânica. Essa plataforma foi desenvolvida pela EDF (*Électricité de France*), estatal francesa e uma das maiores produtoras de energia nuclear do mundo, que também é a desenvolvedora do Code_Aster, o motor matemático (*solver*) responsável por calcular a física do problema. Este software foi escolhido devido à sua natureza de código livre, garantindo ampla acessibilidade para a replicação dos estudos. Adicionalmente, por sua origem na indústria nuclear, o código passou por uma validação rigorosa, o que assegura robustez e precisão aos resultados. Outro ponto relevante é que, devido à sua natureza não comercial, o software apresenta uma interface menos automatizada. Embora na indústria isso possa ser considerado uma desvantagem, no ambiente acadêmico essa característica exige que o analista possua um sólido conhecimento da física aplicada, incentivando o aprofundamento teórico na formulação do problema.

Com a ferramenta definida, a rotina de preparação do modelo foi iniciada pela importação do CAD do disco para o módulo *Geometry* do Salome-Meca. Nesta etapa, realizou-se a definição das condições de contorno por meio da criação de grupos (*groups*). Estes consistem em pontos, arestas, faces e volumes previamente determinados pelo usuário, atuando como referências geométricas. Mecanicamente, o disco é fixado ao cubo da roda por meio de três parafusos, assentado diretamente contra a face de apoio do componente, enquanto o seu furo central atua como guia no eixo para garantir o alinhamento concêntrico do conjunto, como mostrado na Figura 2.

FIGURA 2: Montagem do disco de freio.



Fonte: Autor (2026).

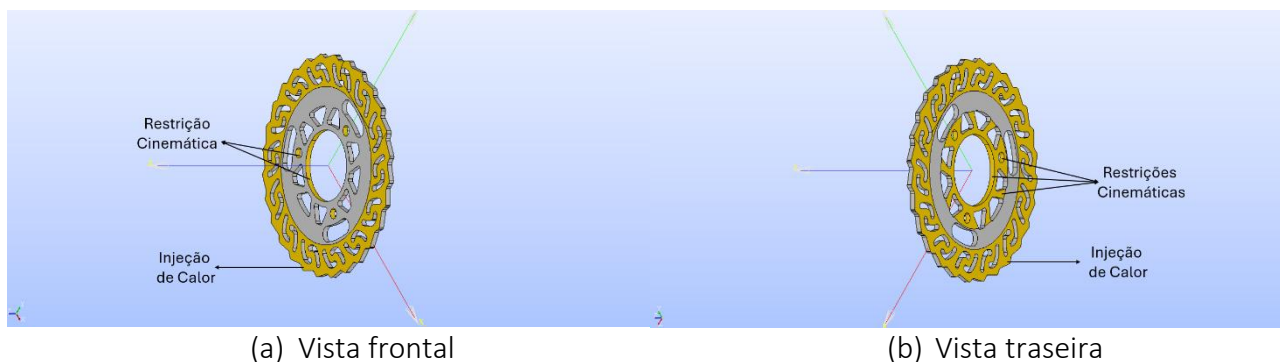
Para representar fielmente essas interações, o domínio CAD foi subdividido em dez grupos, englobando: o domínio volumétrico, os furos de fixação e o furo central (regiões de restrição cinemática), as pistas de frenagem interna e externa (regiões de injeção da fonte de calor e contato mecânico), a interface de apoio da face do cubo, e as superfícies livres designadas exclusivamente para a convecção térmica. Os grupos são apresentados nas Figuras 3 e 4.

FIGURA 3: Grupos de aplicação de convecção (superfícies destacadas em laranja).



Fonte: Autor (2026).

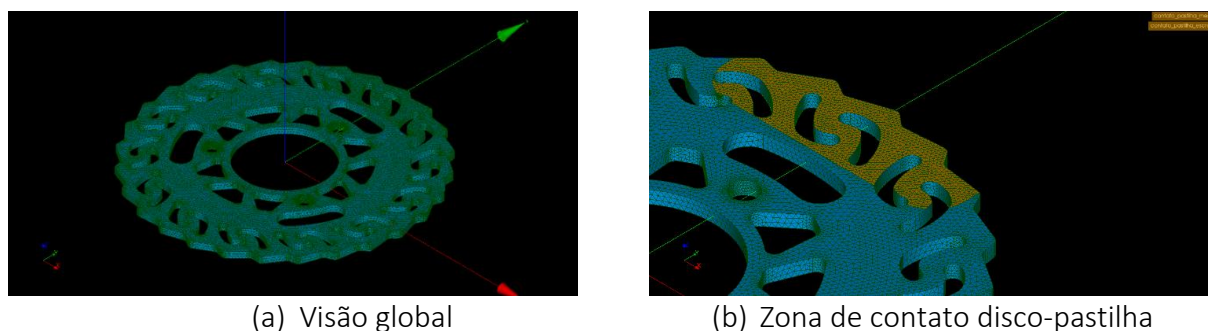
FIGURA 4: Grupo para restrições, aplicação de calor e estresse mecânico (superfícies destacadas em laranja).



Fonte: Autor (2026).

Na sequência, o modelo geométrico foi transferido ao módulo *Mesh* para a discretização de seu domínio. Devido à presença de recortes não axissimétricos e furos de fixação, optou-se pela geração de uma malha tridimensional não estruturada utilizando o algoritmo NETGEN 1D-2D-3D, nativo do Salome-meca. Esse método hierárquico discretiza inicialmente as arestas e superfícies do modelo, utilizando-as como fronteiras para o preenchimento do volume interno com elementos finitos tetraédricos, garantindo adaptabilidade geométrica ao redor dos concentradores de tensão. Para definir a espessura da malha, os parâmetros de elementos foram restringidos a um tamanho máximo de 1,5 mm e mínimo de 0,3 mm, com refinamento local nas áreas de contato das pastilhas (máximo de 1,0 mm e mínimo de 0,2 mm). Empregou-se também formulação quadrática (*Second Order*), a qual introduz nós intermediários nas arestas dos tetraedros, elevando a precisão da interpolação em detrimento do custo computacional. O domínio discretizado resultou em uma malha densa composta por 273.021 elementos e 335.007 nós, como pode ser visto na Figura 5. Durante a computação dessa malha, os grupos previamente criados no módulo geométrico foram importados e mapeados automaticamente pelo software, convertendo as superfícies CAD originais em agrupamentos precisos de nós e elementos finitos, prontos para a leitura do *solver*.

FIGURA 5: Malha discretizada.



Fonte: Autor (2026).

2.2. Parâmetros geométricos e propriedades do material

Para garantir a fidelidade da simulação computacional, o domínio virtual deve replicar com exatidão as características dimensionais e metalúrgicas do componente físico. O disco de freio do protótipo Baja apresenta um diâmetro externo de 168 mm e uma espessura de 4 mm.

Quanto à composição metalúrgica, o componente é fabricado em aço Hardox 450. Uma liga martensítica de alta resistência à abrasão, amplamente empregada no setor automotivo e de maquinário pesado devido à sua excelente relação tenacidade-dureza, apresentando características ideais para suportar o severo desgaste mecânico imposto pelo atrito das pastilhas de freio.

No contexto da análise por Elementos Finitos, o solver matemático (Code_Aster) requer a inserção das propriedades termomecânicas isotrópicas do material para a correta formulação das matrizes de rigidez estrutural e de condutividade térmica. Os parâmetros físicos adotados para o aço Hardox 450 estão consolidados na Tabela 1.

TABELA 1. Propriedades do Hardox 450.

Propriedades	Valor	Unidade
Densidade	7850	kg/m ³
Modulo de Elasticidade (Young)	210	GPa
Coefficiente de Poisson	0,30	-
Tensão de Escoamento	1250	MPa
Tensão de Ruptura	1400	MPa
Condutividade Térmica	29	W/(m·K)
Calor Específico	470	J/(kg·K)
Coefficiente de Expansão Térmica	$1,1 \cdot 10^{-5}$	K ⁻¹

Fonte: SSAB (2024).

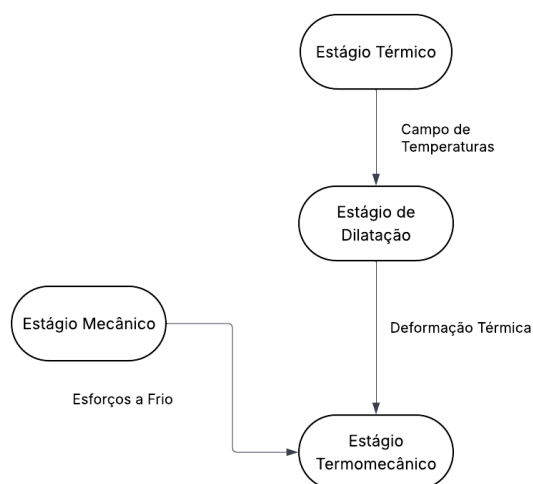
2.3. Rotina de processamento sequencial

Para a organização da rotina computacional, o módulo AsterStudy, ambiente da interface gráfica no qual os parâmetros físicos são configurados e submetidos ao *solver*, utiliza a lógica de estágios de resolução (*Stages*). Essa arquitetura permite subdividir o processamento global em etapas de análise independentes e sequenciais. Dessa forma, é possível validar a convergência matemática de cada fenômeno isoladamente antes de acoplá-los, evitando que uma instabilidade numérica localizada comprometa a simulação em sua totalidade.

Com base nessa diretriz, a modelagem termomecânica foi estruturada na seguinte sequência lógica: inicialmente, executa-se o estágio térmico transiente para a obtenção do campo de tempera-

turas. Em seguida, esses dados alimentam o estágio de dilatação, responsável por calcular as tensões e deformações de origem puramente térmica. Paralelamente, processa-se o estágio estrutural, que resolve a resposta do componente aos esforços mecânicos puros. Por fim, o fluxo culmina no estágio termomecânico, no qual os resultados térmicos e estruturais são acoplados em uma única matriz de resolução para avaliar o cenário de falha crítica. A sequência hierárquica dessa formulação está ilustrada no fluxograma da Figura 6.

FIGURA 6: Fluxograma do processo



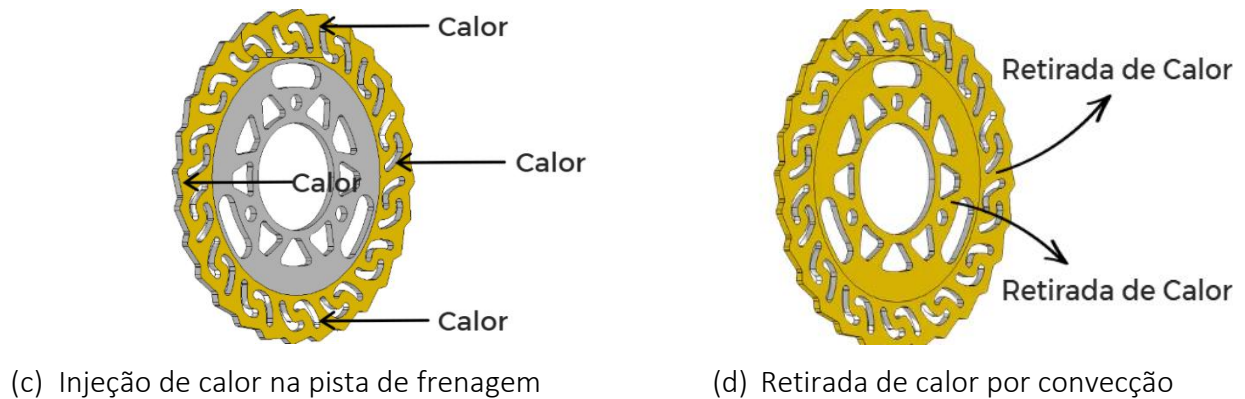
Fonte: Autor (2026)

Essa estrutura de fluxo de trabalho possibilita a avaliação individual da magnitude de cada fenômeno físico, permitindo isolar cenários operacionais complexos, como frenagens com ou sem travamento das rodas. Além disso, a execução preliminar da análise térmica é estratégica: ela serve para constatar se o disco alcança temperaturas críticas que alterem a microestrutura do aço Hardox 450 durante o deslizamento contínuo. Ao confirmar a integridade metalúrgica da peça nesta etapa, garante-se que as premissas e propriedades corretas do material sejam adotadas na resolução do estágio mecânico.

2.4. Modelo térmico

Para a resolução do cenário de frenagem no limiar de travamento (deslizamento), o carregamento térmico imposto ao componente foi estabelecido de forma analítica, fundamentando-se nos princípios de dinâmica veicular propostos por Limpert (2011). A Figura 7 ilustra esquematicamente as superfícies do domínio numérico destinadas à injeção do fluxo de calor por atrito e à subsequente dissipação por convecção.

FIGURA 7: Condições de contorno do modelo térmico.



Fonte: Autor (2026).

Durante o evento de frenagem, o sistema deve ser capaz de absorver e dissipar a energia cinética total E do protótipo, descrita matematicamente pela Equação 1:

$$E = \frac{k \cdot m \cdot V_1^2}{2} \quad (1)$$

Sendo k o fator de inércia das massas rotativas, m é a massa total do veículo e V_1 é a velocidade inicial no instante da aplicação dos freios.

Sob a premissa de uma taxa de desaceleração constante a , a potência média de frenagem P_{bav} dissipada ao longo do tempo de parada é obtida por meio da Equação 2:

$$P_{bav} = \frac{k \cdot m \cdot a \cdot V_1}{2} \quad (2)$$

Contudo, a injeção de energia térmica no sistema não é constante ao longo do tempo. A dissipação atinge seu valor de pico absoluto $P_b(0)$ no exato instante inicial da frenagem ($t = 0$), sendo determinada pela Equação 3:

$$P_b(0) = k \cdot m \cdot a \cdot V_1 \quad (3)$$

Como o objeto do presente estudo é o disco de freio dianteiro, a modelagem deve contabilizar a transferência de carga dinâmica longitudinal que ocorre durante a desaceleração. Logo, a potência total é multiplicada pelo fator de distribuição de frenagem do eixo dianteiro Φ_{eixo} , considerada 60% para fins de projeto, segundo Belhocine *et al.* (2016).

A partir dessa potência isolada por eixo, estabelece-se o carregamento a ser inserido na malha do Salome-Meca. Utilizando a estratégia de simetria radial proposta por Mackin *et al.* (2002), como foi exemplificada por Limpert (2011), a potência térmica inicial foi convertida em fluxo de calor $q''(0)$ dividindo-a pelo número de discos no eixo N_{disco} e pela área total da pista de varredura $A_{varrida}$, conforme a Equação 4:

$$q''(0) = \frac{P_b(0) \cdot \phi_{eixo}}{N_{disco} \cdot A_{varrida}} \quad (4)$$

A fim de estabelecer um critério conservador e avaliar a integridade do disco sob as condições mais severas, assumiu-se que 100% do calor friccional gerado é absorvido pelo disco, desconsiderando-se a pequena parcela de particionamento térmico conduzida para as pastilhas e para a pinça.

Por fim, à medida que a velocidade do protótipo decai em função do tempo t até o momento de parada total t_s , o calor gerado diminui proporcionalmente. Dessa forma, a condição de contorno transiente imposta ao *solver* térmico seguiu o decaimento linear descrito na Equação 5:

$$q''(t) = q''(0) \cdot \left(1 - \frac{t}{t_s}\right) \quad (5)$$

No motor matemático Code_Aster, o valor absoluto de $q''(0)$ foi atribuído como uma carga térmica superficial restrita aos grupos representantes das pistas de frenagem interna e externa. Essa simplificação macroscópica dispensa o proibitivo custo computacional de simular a cinemática discreta do contato móvel da pastilha. Para mimetizar o comportamento dinâmico, essa carga nominal é modulada por uma função temporal, que atua como um multiplicador iterativo da matriz de carregamento ao longo do tempo de integração transiente.

Paralelamente à injeção de calor, modelou-se a dissipação de energia para o meio nas superfícies livres do componente. O coeficiente de transferência de calor por convecção (h) foi calculado analiticamente através das correlações propostas por aus der Wiesche (2007) para escoamentos paralelos sobre discos em rotação.

Para capturar a natureza mista do escoamento, o método avalia simultaneamente o Número de Reynolds linear (Re_D), associado à velocidade de translação do protótipo de acordo com a Equação 6, e o Número de Reynolds rotacional (Re_ω), associado à velocidade angular do disco de freio conforme a Equação 7:

$$Re_D = \frac{V \cdot D}{\nu_{ar}} \quad (6)$$

$$Re_{\omega} = \frac{\omega \cdot r^2}{\nu_{ar}} \quad (7)$$

Sendo V a velocidade longitudinal do veículo, D e r representam o diâmetro e o raio do disco, respectivamente, ω é a velocidade angular e ν é a viscosidade cinemática do ar.

Para a condição operacional do protótipo, a qual se caracteriza por um regime com $Re_D > 5 \cdot 10^4$ para o escoamento linear e $Re_{\omega} < 2 \cdot 10^5$ para o rotacional, o Número de Nusselt (Nu) para o escoamento assimétrico desenvolvido sobre a camada limite de Ekman do disco é calculado pela Equação 8, conforme proposto por aus der Wiesche (2007):

$$Nu = \sqrt{(0.0127 \cdot Re_D^{0.8})^2 + (0.015 \cdot Re_{\omega}^{0.5})^2} \quad (8)$$

Com o Número de Nusselt definido, o coeficiente convectivo global h aplicado ao grupo de convecção da malha no Salome-Meca é extraído da Equação 9, com k_{ar} representando a condutividade térmica do ar:

$$h = \frac{Nu \cdot k_{ar}}{D} \quad (9)$$

Como a velocidade do veículo decai continuamente até o repouso absoluto, a capacidade de extração de calor por convecção também diminui. Para refletir essa física no modelo numérico com exatidão, desenvolveu-se um estudo analítico de sensibilidade do coeficiente h em função da velocidade, mapeando o decaimento em intervalos de 10 km/h até a parada total, onde o sistema se aproxima das condições de convecção natural (cerca de 5,00 W/(m²·K)), conforme mostra a Tabela 2.

TABELA 2. Variação do coeficiente convectivo em função da velocidade.

Velocidade [km/h]	h [W/(m ² ·K)]
60	25,38
50	21,83
40	18,16
30	14,32
20	10,25
10	5,79
0	5,00

Fonte: Autor (2026).

Esses valores são utilizados no solver Code_Aster para a criação de uma função de decaimento. Esta rotina atua como um multiplicador iterativo da matriz de carregamento, reduzindo a intensidade da troca térmica de forma gradativa, acompanhando a curva de desaceleração cinemática do protótipo ao longo do tempo de integração transiente.

Ao final da integração transiente, o *solver* fornece a evolução temporal completa da penetração de calor e dos gradientes térmicos no componente. O mapa tridimensional de temperaturas correspondente ao instante crítico de maior acúmulo de energia térmica foi então extraído e armazenado. Este campo escalar serve diretamente como o carregamento de dilatação térmica de entrada para a etapa final do método sequencialmente acoplado: a resolução do modelo estrutural.

2.5. Modelo mecânico

Segundo Belhocine *et al.* (2016), o estado de tensões ao qual o disco de freio é submetido pode ser decomposto em três naturezas principais de carregamento: compressão, cisalhamento e forças centrífugas. A compressão é originada pela pressão mecânica de esmagamento (*clamping force*) exercida pelas pastilhas. O cisalhamento (esforço tangencial) é gerado pelas forças de atrito na interface pastilha/disco, atuando em oposição à cinética do veículo. Por fim, as forças centrífugas são provenientes da rotação do componente, contudo, a literatura consolida a prática de negligenciá-las em simulações de frenagem, devido a sua magnitude extremamente pequena quando comparada aos esforços de compressão e cisalhamento induzidos pela desaceleração. A Figura 8 apresenta a disposição espacial dessas cargas mecânicas primárias sobre a pista de atrito.

FIGURA 8: Condições de contorno do carregamento mecânico.



(a) Pressão normal de esmagamento

(b) Força de atrito tangencial

Fonte: Autor (2026).

Dessa forma, para a correta configuração das condições de contorno mecânicas no *solver*, é necessário determinar analiticamente a magnitude dessas forças aplicadas ao sistema. A metodologia para a obtenção da pressão hidráulica e da força normal de esmagamento baseia-se na geometria dos componentes do protótipo, conforme estruturado por Limpert (2011). O cálculo inicia-se pela força mecânica ampliada pela haste do pedal (F_{amp}), determinada pela Equação 10:

$$F_{amp} = F_{pedal} \cdot AMP \quad (10)$$

Sendo AMP a relação de amplificação mecânica do pedal e F_{pedal} é a força de acionamento exercida pelo piloto. Para fins de projeto e dimensionamento de pânico, adota-se o valor normatizado de 425 N para a força no pedal, conforme afirmado por Limpert (2011) e demonstrado por Souza *et al.* (2018).

Com a força ampliada definida, calcula-se a pressão efetiva gerada nas linhas do sistema hidráulico (P_r) através da Equação 11:

$$P_r = \frac{F_{amp}}{A_{cm}} \quad (11)$$

sendo A_{cm} a área da seção transversal do êmbolo do cilindro mestre. A partir da pressão hidráulica do sistema, determina-se a força normal total (F_n) aplicada sobre o disco, de acordo com a Equação 12:

$$F_n = P_r \cdot A_{êmbolo} \cdot N \quad (12)$$

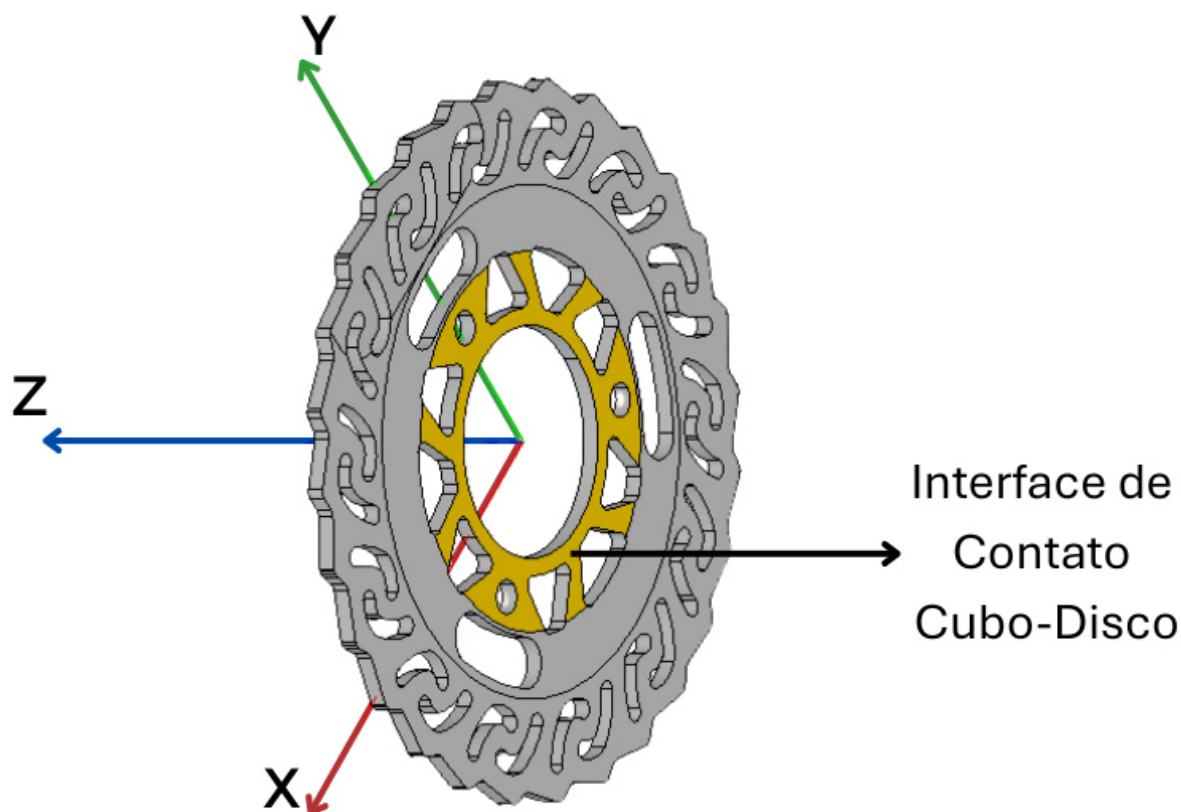
Sendo $A_{\text{êmbolo}}$ a área do êmbolo da pinça de freio e N o número de êmbolos atuantes. Por fim, a força de atrito tangencial F_{at} gerada na pista de frenagem é quantificada pela Equação 13:

$$F_{at} = F_n \cdot \mu \quad (13)$$

sendo μ o coeficiente de atrito cinético entre a pastilha e o disco de freio, adotado como 0,25. Este valor corresponde ao limite inferior da classe normativa 'E' da norma SAE J866, sendo representativo de compostos orgânicos comumente presentes em pastilhas de veículos de baixa cilindrada.

Uma vez consolidados os parâmetros analíticos, o modelo estrutural foi configurado no Salome-Meca para avaliar a resposta mecânica do material sob o critério de falha de von Mises e a deflexão geométrica. Em todas as simulações, aplicou-se uma restrição cinemática de engastamento perfeito nos furos de fixação, simulando o rígido acoplamento do disco ao cubo da roda, em conjunto com o bloqueio do grau de liberdade de translação axial (eixo Z) na face de contato entre o disco e cubo, como mostra a Figura 9.

FIGURA 9: Orientação espacial e detalhamento da face disco-cubo.



Fonte: Autor (2026).

A injeção das cargas analíticas sobre a malha foi ramificada em três cenários operacionais distintos para abranger as piores condições de projeto.

Caso A (Frenagem de Pânico): Simula o travamento total e instantâneo do sistema a frio. A pressão nominal máxima derivada da Equação 12 é aplicada simultaneamente e de forma simétrica nas pistas de atrito interna e externa. O objetivo é avaliar a resistência do componente sob compressão extrema e cisalhamento torcional nos parafusos do cubo, sem a presença de gradientes térmicos.

Caso B (Empenamento por Desalinhamento): Como a pinça de freio adotada no projeto possui característica construtiva de montagem flutuante, qualquer falha ou flexão de seu suporte exige que o disco absorva a deformação, deslocando-se na direção do eixo Z. Para simular esta condição crítica, a pressão de esmagamento é aplicada de forma assimétrica (em apenas uma das faces do disco de freio), forçando a flexão lateral do componente até a pastilha batente. Avalia-se o estresse causado por um desalinhamento de 0,5 mm.

Caso C (Acoplamento Termomecânico): Simula a condição de deslizamento contínuo sob frenagem severa. A malha estrutural recebe a importação do mapa tridimensional de temperaturas extraído ao final da análise transiente, o qual atua como carga de dilatação térmica no Code_Aster. Simultaneamente, aplica-se a pressão de esmagamento e a carga tangencial nas pistas de frenagem. Este cenário avalia a sinergia destrutiva entre as tensões residuais térmicas, a perda de resistência do material em altas temperaturas e os esforços puramente mecânicos.

2.6. Critérios de avaliação de fator de segurança

Para que os resultados extraídos das simulações computacionais possam ser validados frente à integridade estrutural do projeto, é imprescindível o estabelecimento de um critério de falha adequado. A simulação foi configurada assumindo um modelo de comportamento elástico linear para o material, uma vez que o objetivo do dimensionamento é garantir que o componente opere estritamente dentro de seu regime elástico. Embora o aço Hardox 450 seja uma liga martensítica de alta dureza e elevada resistência ao desgaste abrasivo, seu processo de fabricação garante tenacidade suficiente para que o material apresente uma fase de escoamento plástico bem definida antes da ruptura. Por não se tratar de um material de ruptura frágil (como os ferros fundidos convencionais), a metodologia de avaliação adotada fundamentou-se na Teoria da Energia de Distorção Máxima, universalmente conhecida como Critério de von Mises.

Segundo Budynas e Nisbett (2016), este critério considera que o escoamento de um componente dúctil submetido a um estado multiaxial de tensões ocorre quando a energia de distorção atinge o mesmo valor da energia de distorção no escoamento durante um ensaio de tração simples. Dessa forma, o software Code_Aster compila o tensor de tensões tridimensionais (compressão e ci-

salhamento) calculado em cada nó da malha e o converte em uma única tensão equivalente, a Tensão de von Mises (σ_{vm}). O critério afirma que o componente estará seguro desde que essa tensão equivalente máxima não ultrapasse o limite de escoamento do material (S_y).

A partir desse critério, a robustez do disco de freio sob os cenários operacionais A, B e C é quantificada por meio do Fator de Segurança FS . O coeficiente é calculado pela razão entre a tensão de escoamento do Hardox 450 e a tensão máxima imposta pelo carregamento, conforme a Equação 14:

$$FS = \frac{S_y}{\sigma_{vm}} \quad (14)$$

Segundo Juvinall e Marshek (2008), para materiais cujas propriedades sejam conhecidas em termos de médias e sujeitos a cargas e tensões que possam ser determinadas, deve-se utilizar um FS de 2,0 a 2,5. Dada a criticidade do sistema de freios para a segurança do piloto e a natureza dinâmica e extrema das cargas atuantes no ambiente de competição *off-road*, o projeto adota um Fator de Segurança mínimo admissível de 2,0. Caso as simulações apontem um FS inferior a este limite, o design do disco será considerado inadequado, necessitando de revisões em sua espessura ou na topologia de seus recortes de alívio de massa.

3. RESULTADOS

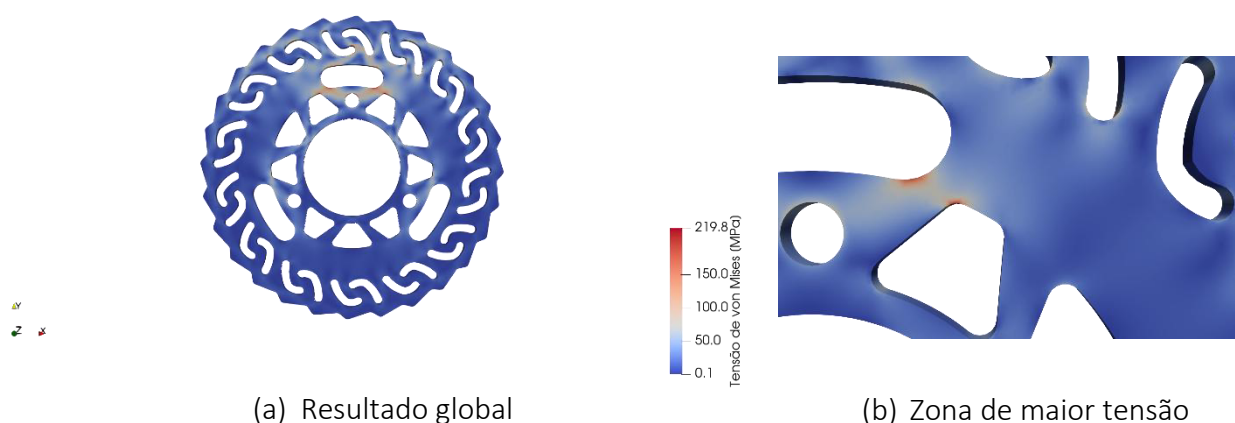
Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações computacionais realizadas no software Salome-Meca. Os campos de temperatura tridimensionais e os tensores de tensão extraídos do *solver* Code_Aster foram pós-processados no módulo ParaViS. A integridade estrutural do disco de freio em aço Hardox 450 foi avaliada com base no Critério de von Mises, confrontando os picos de tensão atuantes com o limite de escoamento do material (1250 MPa) para a determinação do Fator de Segurança em três cenários operacionais distintos, apresentados em ordem cronológica de complexidade mecânica.

3.1. Caso A

O Caso A consistiu na simulação do travamento total do sistema a frio, cenário no qual a pressão hidráulica máxima do projeto (8 MPa) é aplicada de forma perfeitamente simétrica nas faces da pista de atrito, acompanhada da força tangencial de cisalhamento, sem a injeção de cargas térmicas. O objetivo primário foi avaliar a resistência intrínseca da geometria sob esforços de compressão extrema e torção pura.

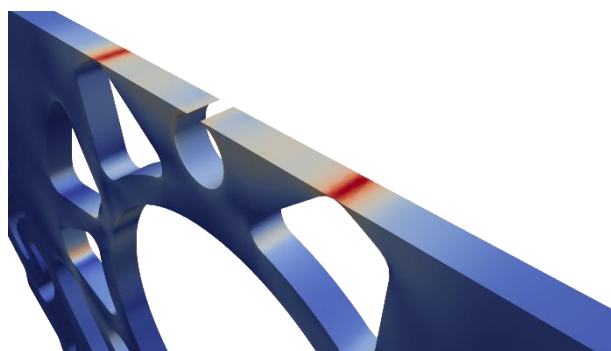
A Figura 10 ilustra o campo de tensões equivalentes gerado no componente. Observa-se que a distribuição de carga é majoritariamente homogênea na pista externa, com concentrações de tensão localizadas predominantemente nas interfaces dos furos de fixação e nos recortes, devido à reação ao torque de frenagem. Já a Figura 11 apresenta um detalhamento em corte transversal dessa zona crítica. A inspeção interna da chapa revela que a concentração de tensão não é um fenômeno puramente superficial, mas propaga-se de maneira contínua ao longo de toda a espessura do material. Esse comportamento evidencia o severo efeito de entalhe gerado pela proximidade geométrica dos recortes de alívio, que estrangulam o fluxo de tensões estruturais nos estreitos ligamentos da peça.

FIGURA 10: Tensões de von Mises para o caso A.



Fonte: Autor (2026).

FIGURA 11: Vista em corte transversal detalhando a distribuição interna das tensões de von Mises para o Caso A.



Fonte: Autor (2026).

O pico de tensão de von Mises registrado pelo *solver* foi de 219,8 MPa. Aplicando o critério de falha estabelecido na Equação 14, obtém-se o Fator de Segurança para este cenário:

$$FS = \frac{1250}{219,8} = 5,69$$

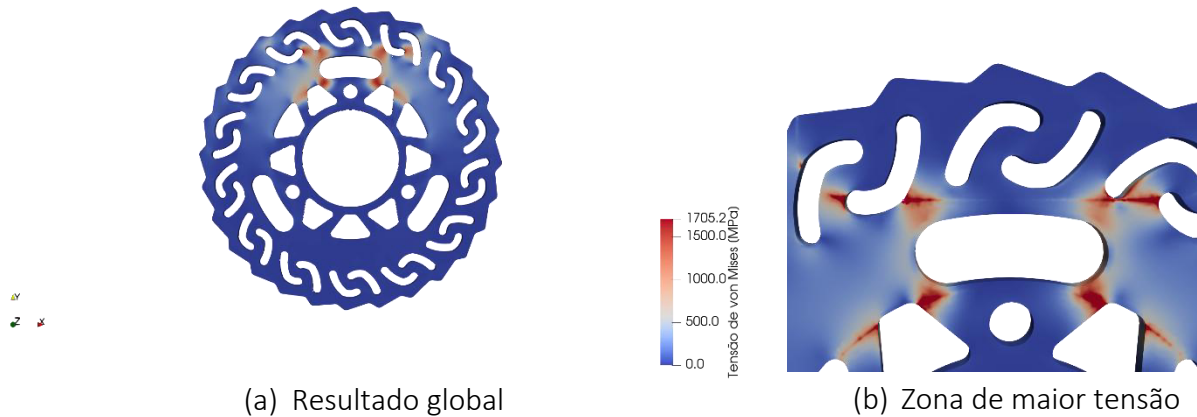
Com um FS de 5,69, conclui-se que o disco de freio é estruturalmente superdimensionado para suportar forças brutas de frenagem em linha reta e em condições ideais de alinhamento. A ausência de deformações expressivas comprova que a geometria e a espessura do disco são altamente eficientes para lidar com esforços no plano (eixos X e Y).

3.2. Caso B

Em contrapartida ao cenário ideal, o Caso B investigou a resposta do componente frente a uma anomalia construtiva: o desalinhamento do suporte da pinça de freio. O disco foi submetido à carga total de 8 MPa, com um desalinhamento de 0,5 mm, forçando a estrutura a absorver o deslocamento lateral na direção do eixo Z.

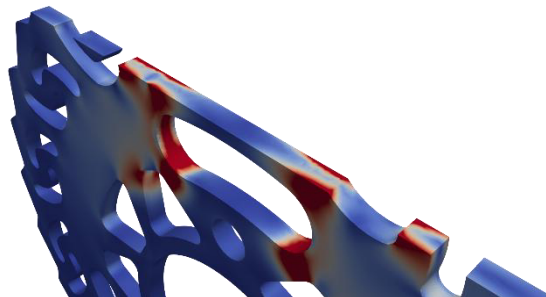
Como evidenciado pelos gradientes em vermelho na Figura 12, a assimetria da carga alterou drasticamente o comportamento estrutural do componente. Em vez de compressão pura, a carga unilateral gerou um momento fletor no disco. A área de aplicação de pressão e a face de contato do cubo criaram uma alavanca mecânica, concentrando as tensões de forma crítica. Para investigar esse fenômeno em profundidade, a Figura 13 apresenta o detalhamento em corte transversal dessa região. A inspeção interna da espessura indica que as tensões máximas concentram-se nas faces superficiais da chapa, enquanto o núcleo do material, posicionado próximo à linha neutra do perfil, permanece com níveis de solicitação significativamente menores. Esse gradiente evidencia que o agravamento do efeito de entalhe provocado pela dobra lateral atua de forma mais severa na superfície da peça, sem saturar completamente o miolo da seção transversal.

FIGURA 12: Tensões de von Mises para o caso B.



Fonte: Autor (2026).

FIGURA 13: Vista em corte transversal detalhando a distribuição interna das tensões de von Mises para o Caso B.



Fonte: Autor (2026).

O pico de tensão equivalente neste cenário atingiu alarmantes 1705,2 MPa. O Fator de Segurança resultante demonstra o colapso do projeto sob estas condições:

$$FS = \frac{1250}{1705,2} = 0,73$$

Um Fator de Segurança inferior a 1,0 indica que o material ultrapassou seu limite elástico, sofrendo deformação plástica (escoamento). Como o modelo computacional adotado é elástico linear, o valor de 1705,2 MPa consiste em uma extrapolação matemática da Lei de Hooke. Na realidade, sabendo que a tensão limite de ruptura do Hardox 450 é de aproximadamente 1400 MPa, o componente não apenas empenharia, mas entraria em colapso estrutural antes mesmo de atingir a

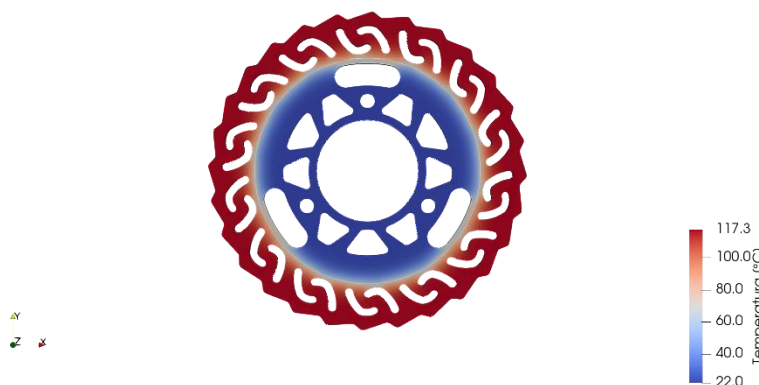
tensão calculada pelo *solver*. Na prática, este resultado comprova de forma incontestável que o disco falharia catastróficamente caso a pinça não estivesse milimetricamente alinhada.

3.3. Caso C

O Caso C representou o cenário físico mais complexo: uma frenagem de emergência a 60 km/h até a parada total, englobando a injeção transiente de calor por atrito e a posterior aplicação das cargas mecânicas sobre o metal já aquecido e dilatado.

A primeira etapa (simulação térmica transiente) revelou que a capacidade de extração convectiva e a massa do componente limitaram o pico de temperatura a 117,3 °C, como mostra a Figura 14, no instante crítico de parada. Este é um resultado termodinâmico extremamente positivo. Temperaturas nessa faixa não promovem alterações microestruturais ou perda de resistência no aço Hardox 450, garantindo a integridade metalúrgica da peça.

FIGURA 14: Campo da temperatura no instante crítico.



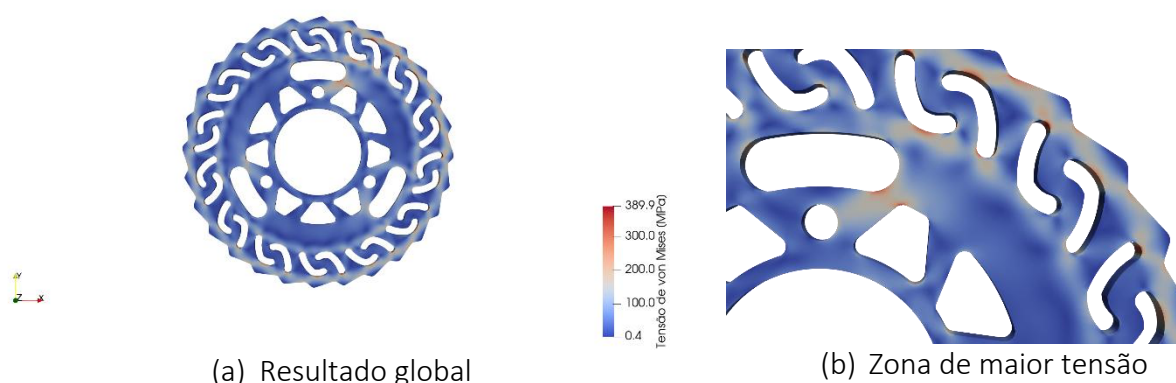
Fonte: Autor (2026).

Na segunda etapa, o mapa de temperaturas foi importado como carga de dilatação térmica simultaneamente à carga mecânica.

A Figura 15 ilustra o campo de tensões equivalentes de von Mises gerado pelo acoplamento termomecânico durante o processo de frenagem com deslizamento. O pico de tensão localizou-se nas bordas internas dos recortes de alívio de massa, atingindo 389,9 MPa. Esse comportamento é resultado da atuação simultânea dos esforços mecânicos estruturais da frenagem e das tensões de compressão induzidas pela expansão radial da pista aquecida contra a porção central fria do disco. Para avaliar a distribuição interna dessa solicitação combinada, a Figura 16 apresenta o detalhamento em corte transversal correspondente. A inspeção interna revela que o estado de tensões termome-

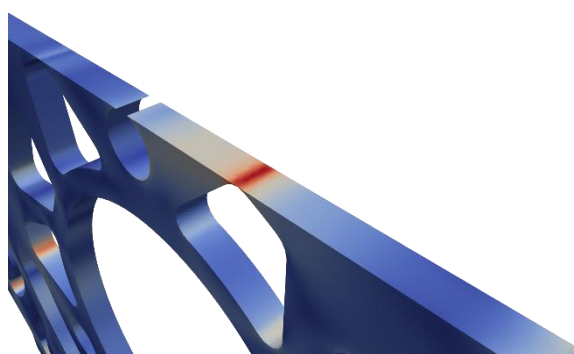
cônicas atravessa integralmente a espessura do material. Diferentemente do cenário puramente mecânico sujeito a desalinhamento, a combinação do bloqueio cinemático à dilatação com as forças de frenagem atua predominantemente como um esforço no plano da chapa, saturando toda a seção transversal da estrutura. Fica evidente que a geometria dos recortes de alívio funciona como um concentrador crítico, estrangulando o fluxo dessas tensões combinadas ao longo de toda a profundidade da peça.

FIGURA 15: Tensões de von Mises para o caso C.



Fonte: Autor (2026).

FIGURA 16: Vista em corte transversal detalhando a distribuição interna das tensões de von Mises para o Caso C.



Fonte: Autor (2026).

Ainda assim, ao avaliar o limite de escoamento da liga:

$$FS = \frac{1250}{389,9} = 3,21$$

O Fator de Segurança final de 3,21 valida o design do sistema para operações severas de pista. O acréscimo de tensão causado pela dilatação térmica (de 219,8 MPa no Caso A para 389,9 MPa no

Caso C) reforça a justificativa acadêmica de que simulações de freio puramente estruturais subestimam os esforços reais, tornando a abordagem termomecânica adotada neste trabalho essencial.

4. CONCLUSÕES

A partir do processamento numérico dos três cenários estipulados, extraem-se as seguintes conclusões fundamentais:

Robustez em condições nominais alinhadas (Casos A e C): O design atual do disco mostrou-se altamente seguro e superdimensionado quando submetido a frenagens com distribuição perfeitamente simétrica de carga. No Caso A, o Fator de Segurança de 5,69 provou excelente resistência mecânica pura. No Caso C, mesmo sob a severa restrição cinemática imposta pela dilatação térmica da pista, o Hardox 450 atingiu o pico de 117,3 °C e estabilizou-se com um Fator de Segurança de 3,21, valor substancialmente superior ao limite de 2,0 definido pelo projeto. Os recortes de alívio validaram sua função: reduzir a massa rotativa sem comprometer a integridade estrutural do disco.

Vulnerabilidade ao desalinhamento (Caso B): A simulação expôs a sensibilidade da geometria atual frente às imperfeições construtivas. Sob uma carga assimétrica decorrente de um desalinhamento de 0,5 mm da pinça, o disco experimentou tensões de flexão fora do plano que culminaram em um pico de 1705,2 MPa. O Fator de Segurança resultante de 0,73 confirmou a ocorrência de deformação plástica (escoamento), atestando que o componente empenaria permanentemente nessa condição crítica.

Um fator determinante que eleva a relevância e o otimismo sobre esses resultados diz respeito às premissas cinemáticas adotadas na modelagem analítica. O fluxo transiente de calor foi calculado com base em uma velocidade inicial de frenagem de 60 km/h, enquanto a pressão hidráulica considerou o valor máximo do projeto, configurando um severo cenário de pior caso. No entanto, considerando as características operacionais típicas das pistas de competição Baja SAE, marcadas por terrenos de baixa aderência, relevo acidentado e circuitos sinuosos de enduro, o protótipo dificilmente atingirá velocidades dessa magnitude ou executará desacelerações plenas a partir deste patamar na realidade de pista.

Dessa forma, o fato de o disco ter sido integralmente aprovado com margens folgadas nos cenários de alinhamento ideal sob condições tão severas indica que, na prática, os resultados são extremamente positivos. Sob as velocidades reais de pista (substancialmente menores que 60 km/h), os gradientes térmicos e as tensões mecânicas atuantes serão significativamente inferiores aos simulados, garantindo uma confiabilidade operacional ainda maior ao sistema de frenagem do veículo.

Por fim, como sugestão para o desenvolvimento de trabalhos futuros, recomenda-se a expansão deste modelo numérico para contemplar a análise de fadiga do componente. Como o sistema atua sob frequentes ciclos de acionamento mecânico e severos gradientes térmicos intermitentes, o

disco está inerentemente suscetível à falha por fadiga mecânica e térmica. A implementação de rotinas de carregamento cíclico, utilizando os tensores de tensão mapeados neste estudo estático como ponto de partida, permitirá estimar a vida útil do componente durante as prolongadas horas de competição, complementando a validação de segurança do projeto.

REFERÊNCIAS

- ADAMOWICZ, A.; GRZES, P. Analysis of disc brake temperature distribution during single braking under non-axisymmetric load. *Applied Thermal Engineering*, v. 31, p. 1003-1012, 2011.
- AUS DER WIESCHE, S. Heat transfer from a rotating disk in a parallel air crossflow. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 46, p. 745-754, 2007.
- BELHOCINE, A.; ABU BAKAR, A. R.; BOUCHETARA, M. Thermal and structural analysis of disc brake assembly during single stop braking event. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, v. 14, p. 26-38, 2016.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. Elementos de máquinas de Shigley. AMGH Editora Ltda, Porto Alegre, Brasil, 10ª edição, 2016.
- CHEN, Y.; XIE, Q.; HE, C.; LIN, Q.; LI, P.; LIU, J. Research on the friction performance and structural optimization of brake pads considering train brake disc temperature. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 163, 108707, 2025.
- CHEN, Y.; XIE, Q.; ZHANG, J.; HE, C.; LIN, Q.; LI, P.; LIU, J. Thermal response analysis of aluminum matrix composite brake Discs: Numerical and experimental study with pad geometry Considerations. *Thermal Science and Engineering Progress*, v. 63, 103754, 2025.
- JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. Fundamentos do projeto de componentes de máquinas. LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 4ª edição, 2008.
- LATOUR, B.; BOUVIER, P.; HARMAND, S. Convective Heat Transfer on a Rotating Disk With Transverse Air Crossflow. *Journal of Heat Transfer*, v. 133, 2011.
- LIMPERT, R. Brake Design and Safety. SAE International, Warrendale, PA, EUA, 3rd ed., 2011.
- MACKIN, T. J. *et al.* Thermal cracking in disc brakes. *Engineering Failure Analysis*, v. 9, p. 63-76, 2002.
- MENG, D.; ZENG, X.; ZHANG, L.; LI, B. A novel approach to analyzing thermoelastic behavior of brake disc under the combined action of thermal and mechanical loads. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 224, 112155, 2025.
- MORGEM, C.; SILVA, M. F. Dimensionamento de freio com válvula proporcionalizadora de pressão de um protótipo Baja SAE. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

ÖZTURAN, A. B.; İRSEL, G.; GÜZEY, B. N. Study of the microstructure and mechanical property relationships of gas metal arc welded dissimilar Hardox 450 and S355J2C+N steel joints. *Materials Science & Engineering A*, v. 856, 143486, 2022.

PASQUAL, G. V. F.; MALCHER, L. Thermal analysis of brake discs for baja SAE vehicle. *Proceedings of the 18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, Online, 2020.

QI, G.; JIAO, P.; DU, W.; ZHANG, Y.; CHEN, B. Simulation and optimization of train brake disc based on coupling characteristics of FEM and thermal flow density method. *Scientific Reports*, 2024.

RAI, A. K.; PINNINTI, R. R.; JABBAR, A. Structural Design and Analysis of Disc brake in Automobiles. *ResearchGate*, 2014.

SHEN, J.; PAN, Y.; ZUO, J. Study on thermal fatigue damage mechanisms for high-speed train's wheel-mounted brake disc considering multiaxial stress state. *Engineering Failure Analysis*, v. 174, 109525, 2025.

SIVAPRAKASAM, P.; ABEBE, E.; ČEP, R.; ELANGO VAN, M. Thermo-Mechanical Behavior of Aluminum Matrix Nano-Composite Automobile Disc Brake Rotor Using Finite Element Method. *Materials*, v. 15, 6072, 2022.

SOUZA, Y. G.; SILVA, R. E. P.; BORNSCHLEGELL, A. S. Estudo analítico do comportamento térmico dos componentes do sistema de freio do Baja SAE. *Anais do XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica*, Brasília, Brasil, 2018.

SSAB. Data sheet 168br Hardox 450. 2024.

STRÖMBERG, N.; RASHID, A. An Efficient Sequential Approach for Simulation of Thermal Stresses in Disc Brakes. *Proceedings of the 15th Nordic Symposium on Tribology*, Trondheim, Norway, 2012.

TALATI, F.; JALALIFAR, S. Analysis of heat conduction in a disk brake system. *Heat Mass Transfer*, v. 45, p. 1047-1059, 2009.

YANG, Z.; FANG, D.; SUN, M.; WANG, Y.; LI, Z. Experimental and simulation investigation of the thermal crack formation mechanism on the friction surface of SiCp/A356 brake discs. *Engineering Failure Analysis*, v. 171, 109341, 2025.

ZHU, H.; XU, J.; TA, Z.; XIAO, Q.; ZHANG, W. Numerical and experimental analysis of aluminum matrix composite brake disc performance for metro trains based on multiple physical field coupling. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 168, 109438, 2025.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.