

Artigo

Análise da influência da redução de área na distribuição de calor em um disco de freio por meio de simulação com elementos finitos

Francisco das Chagas Duarte Neto ^[1] e Zoroastro Torres Vilar ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Engenharia Mecânica; Francisco das Chagas Duarte Neto; duarte.neto@hotmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Engenharia Mecânica; Zoroastro Torres Vilar; zoroastro@ufersa.edu.br

Data da defesa: 25/10/2024;

Resumo: O freio a disco é um componente utilizado em um sistema de frenagem para reduzir a velocidade de um veículo. Durante a frenagem o disco de freio é responsável por converter energia cinética em energia térmica, gerando uma quantidade de calor que pode ser prejudicial ao sistema. Dessa forma é preferível a utilização de discos ventilados, possuindo furos ou aletas para permitir o fluxo de ar elevando a sua capacidade de dissipar calor. O objetivo desse artigo é analisar a distribuição de calor no disco de freio no momento da frenagem, verificando de que forma a redução de área na superfície do disco favorece a dissipação de calor, o que influencia diretamente no sistema de frenagem e no desgaste do sistema como um todo. As equações de calor governantes para o disco foram extraídas de literaturas, considerando parâmetros como duração da frenagem, velocidade do veículo, materiais do disco e da pastilha e distribuição da pressão de contato. Os modos de transferência de calor considerados para as percas térmicas foram de condução e convecção. Esta análise térmica em discos de freio foi realizada através de uma simulação computacional utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) no software comercial ANSYS® Workbench na sua versão estudantil, verificando a distribuição de calor no disco de freio feito em um software de modelagem 3D. Os resultados obtidos foram satisfatórios e demonstram que com a redução da área superficial do disco de freio a temperatura no sistema é reduzida devido ao aumento do fluxo de ar e dissipação de calor, comprovando a eficiência do método computacional proposto e proporcionando a análise térmica em diferentes geometrias de discos de freio que levariam um grande esforço para serem realizadas analiticamente. Este estudo contribui para uma compreensão mais aprofundada do comportamento térmico em um disco de freio à medida que variamos a área de sua superfície.

Palavras-chave: Disco de freio; Análise térmica; Simulação computacional.

1. INTRODUÇÃO

O sistema de freio em um automóvel desempenha um papel crucial na redução de velocidade de forma segura, convertendo energia cinética em energia térmica via atrito. Devido ao aumento da potência dos veículos, a dissipação de calor requerida aumentou, a alta temperatura no momento da frenagem pode causar a perda de eficiência devido a diminuição do coeficiente de atrito, ocasionando falhas ao sistema [13]. Para lidar com essa dificuldade, foi desenvolvido o freio a disco, cujo funcionamento é dado por um embolo que ao ser deslocado provoca o contato entre a pastilha de freio e as faces externa e interna do disco gerando atrito e força necessária para reduzir a velocidade do veículo [12]. Sua utilização é observada na maioria dos veículos, especialmente na parte dianteira, devido a melhor capacidade de dissipar calor, manter alta eficiência de frenagem em altas temperaturas e fácil manutenção. Existem quatro tipos de discos de freio: Disco sólido, perfurado, ventilado e ranhurado, com características próprias que devem ser analisadas durante o projeto de freio, como a capacidade de dissipar calor [1].

Dentre os principais fatores que influenciam o processo de frenagem, o efeito da temperatura nos componentes do sistema se destaca. O superaquecimento do sistema pode provocar além da perda de atrito (conhecido como *brake fade*), a formação de bolhas no fluido, reduzindo a pressão na linha, um desgaste irregular dos componentes, deformação geométrica, trincas térmicas nos elementos em fricção, endurecimento do material devido a formação de martensita ocasionada pelo aumento de pressão e temperatura pontual (chamados de *hot spots*) e, consequentemente, redução da vida dos componentes [2,3]. Dessa forma, a análise numérica-computacional se apresenta como uma das principais formas de solucionar esse problema, pois permite levar em consideração as propriedades termofísicas (condutividade térmica, densidade, calor específico) do material variando com a temperatura, os modos de transferência de calor (condução, convecção e radiação), além da possibilidade de modelar estruturas com geometrias complexas.

Com base nestes fatos, o presente trabalho apresenta uma análise térmica numérica dos processos de aquecimento e resfriamento de um disco de freio sólido, perfurado e ranhurado, com a intenção de obter as curvas de ciclo térmico para cada geometria. O software ANSYS® foi utilizado para simular o processo de frenagem via utilização do método dos elementos finitos (MEF) para discretizar o problema, utilizando o modelo matemático para regime transiente (*Transient Thermal*) para simular processos de transferência de calor, escoamento de fluidos e os demais fenômenos relacionados ao momento da frenagem.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Em situações extremas de frenagem, o disco de freio pode superaquecer, provocando a falha temporária ou total do processo de frenagem. Neste trabalho, as análises foram feitas apenas no disco do eixo dianteiro, por receber a maior carga no momento da frenagem e, consequentemente, maiores esforços mecânicos e térmicos durante a frenagem. A distinção entre eixo traseiro e dianteiro se deve ao fato de que durante a frenagem, há uma transferência de carga dinâmica do eixo traseiro para o eixo dianteiro, devido a distribuição de massa do veículo.

2.1. Caracterização Geométrica dos Discos de Freio

O disco de freio designado como base de estudo é do tipo sólido, utilizado no veículo Uno Mille Fire 1.0, da fabricante Fiat entre os anos de 1990 a 2013. As dimensões foram retiradas do catálogo da fornecedora FREMAX que fornece as medidas de um disco novo sem qualquer desgaste devido ao uso, como mostra a Figura 1.



FIGURA 1. Disco de freio FREMAX [4].

O disco foi modelado em um software CAD com todas as dimensões estabelecidas. Na Figura 2 é possível visualizar a (a) vista isométrica, (b) seção isométrica e (c) seção lateral do disco sólido, enquanto a Figura 3 mostra as principais cotas da vista lateral e frontal.

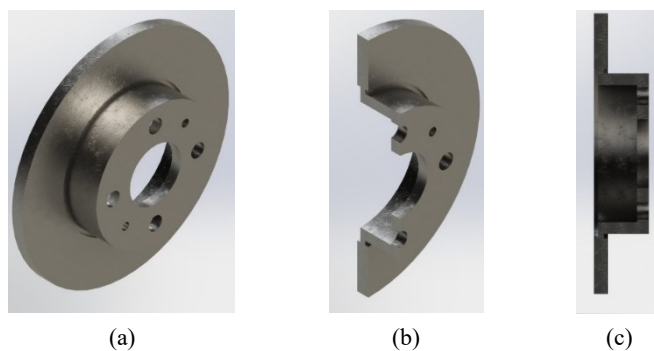


FIGURA 2. Vista isométrica, seção isométrica e seção lateral do disco sólido. (Autoria própria)

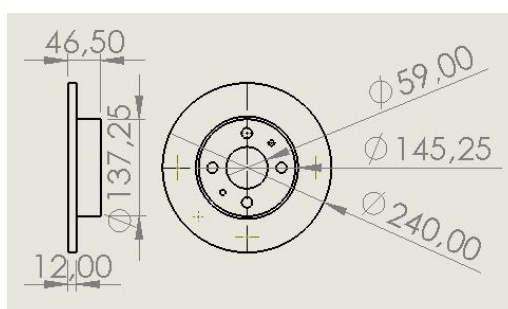


FIGURA 3. Dimensões do disco sólido. (Autoria própria)

Dimensões idênticas foram utilizadas para modelar um disco perfurado e um disco ranhurado, com diferença apenas na geometria dos canais para ventilação. O disco sólido, perfurado e ranhurado foram denominados de disco 1, 2 e 3 respectivamente. A Figura 4 ilustra a (a) vista isométrica, (b) seção isométrica e, (c) seção lateral do disco 2. Enquanto a Figura 5 mostra suas principais cotas da vista lateral e frontal.

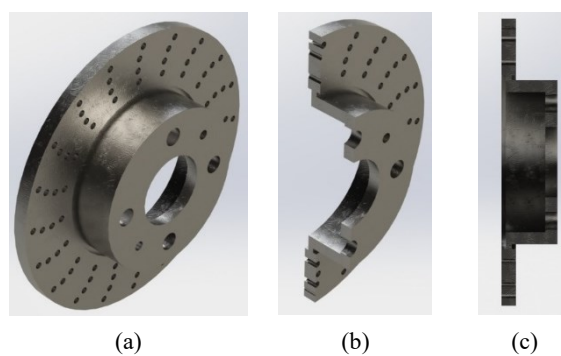


FIGURA 4. Vista isométrica, seção isométrica e seção lateral do disco perfurado. (Autoria própria)

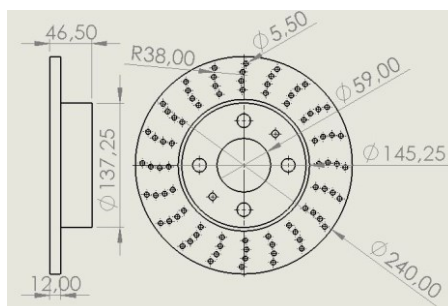


FIGURA 5. Dimensões do disco perfurado. (Autoria própria)

O disco ranhurado, devido aos seus canais, apresenta a menor área de contato de frenagem dos três modelos. A Figura 6 ilustra (a) vista isométrica, (b) seção isométrica e, (c) seção lateral do disco 3. Enquanto a Figura 7 mostra suas principais cotas da vista superior e frontal.

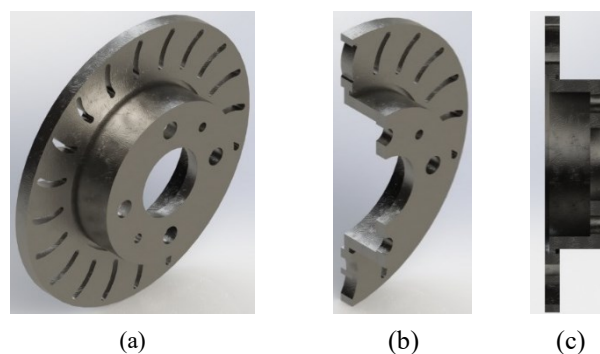


FIGURA 6. Vista isométrica, seção isométrica e seção lateral do disco ranhurado. (Autoria própria)

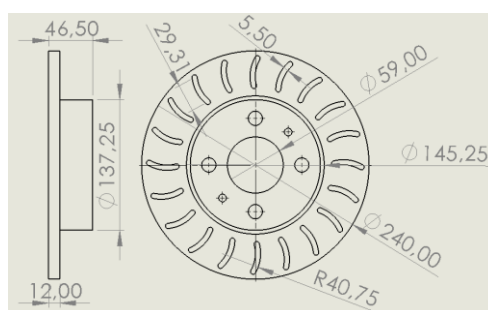


FIGURA 7. Dimensões do disco ranhurado. (Autoria própria)

2.2. Material

O disco de freio escolhido é fabricado com o ferro fundido do tipo FC-150. O principal elemento de sua composição é a grafita, o que possibilita uma boa capacidade de amortecimento de vibrações e condutividade térmica. As principais propriedades relacionadas a análise térmica do ferro fundido FC-150, como massa específica (ρ), calor específico (c), coeficiente de expansão térmica linear (α) e a condutividade térmica (k), estão representadas na Tabela 1.

TABELA 1. Propriedades termofísicas do ferro fundido cinzento FC-150 variando com a temperatura [5].

Propriedade		Valores
ρ (kg/m ³)		7100
c (J/kg * K)	Entre 20 e 200 °C	460
	Entre 20 e 600 °C	535
α (μm/m * K)	Entre -100 e +20 °C	10
	Entre 20 e 200 °C	11,7
	Entre 20 e 400 °C	13
k (W/m * K)	A 100 °C	52,5
	A 200 °C	51,0
	A 300 °C	50,0
	A 400 °C	49,0
	A 500 °C	48,5

2.3. Dinâmica de Frenagem

A dinâmica de frenagem é uma das características mais importantes do sistema para a segurança do veículo, pois está diretamente ligado ao seu comportamento no momento da frenagem. Os principais parâmetros de interesse na dinâmica de frenagem é a máxima desaceleração, distância de frenagem e o tempo de frenagem [6]. Esses parâmetros dependem de fatores como a distribuição da força de frenagem, tipo de freio, geometria do veículo e características do pneu e pavimento.

Para calcular os parâmetros de interesse, é fundamental informar alguns dados que serão necessários aos cálculos.

- A massa específica do ar (ρ_{ar}) é $1,165 \text{ (kg/m}^3\text{)}$;
- A massa total do veículo (m) é 810 kg , acrescido de cinco passageiros com 80 kg cada, resultando em um total de 1210 kg ;
- A velocidade inicial (v_i) no momento da frenagem é 100 km/h ;
- O veículo trafega em uma pista plana;
- A velocidade do ar será desconsiderada;
- O coeficiente de arrasto (C_x) é $0,36$;
- Área projetada da seção frontal do veículo (A_f) é $1,9 \text{ m}^2$;
- A área de contato do disco que sofre fricção da pastilha ($A_{contato}$) é $0,0273 \text{ m}^2$ para a face posterior e anterior.

Dessa forma é possível obter os valores dos parâmetros principais para a dinâmica de frenagem, que terá influência direta na análise térmica desse experimento.

2.3.1 Máxima desaceleração

Em um projeto de sistema de freios é de fundamental relevância que seja feito para que não ocorra o travamento das rodas, especialmente as traseiras, pois pode ocasionar a perda de estabilidade e controle do veículo [7]. Enquanto o travamento das rodas dianteiras causa a perda do controle de direção do veículo, impossibilitando que o motorista realize movimentos para desviar de obstáculos durante o trajeto de frenagem.

A desaceleração de um veículo pode ser calculada conforme a segunda lei de Newton, na qual as forças consideradas no momento da desaceleração do veículo serão o peso do veículo (W), a resistência aerodinâmica (R_a), a desaceleração do veículo (a_x), a força de frenagem no eixo dianteiro (F_{bf}), a força de frenagem no eixo traseiro (F_{br}), a resistência à rolagem no pneu dianteiro (R_{rf}) e a resistência à rolagem no pneu traseiro (R_{rr}). Todas as forças citadas estão ilustradas na Figura 8.

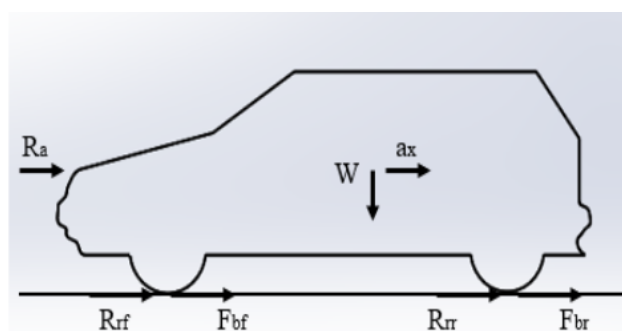


FIGURA 8. Forças atuando sobre o veículo no momento da frenagem. [1]

As forças de resistência à rolagem podem ser consideradas iguais nos dois eixos, e denominada R_r , dessa forma pode ser calculada com o coeficiente de resistência à rolagem f_r multiplicado pelo peso do veículo, como mostra a Equação 1 [8].

$$R_r = f_r * W \quad (1)$$

O coeficiente de resistência à rolagem pode ser calculado considerando o efeito da velocidade do veículo e as constantes a e b , como mostra a Equação 2 [8]. As constantes estão relacionadas ao tipo de pneu utilizado no veículo, variando conforme a capacidade do pneu se deformar e aquecer quando estiver em contato com a pista, como ilustra a Tabela 2 [8]. Pneus com alta histerese possuem valores para a constante a maiores. O presente trabalho realiza a análise considerando pneus normais.

$$f_r = a + b \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (2)$$

TABELA 2. Constantes a e b variando em função do pneu [8].

Tipo de pneu	a	b
Pneu normal	0,0150	0,052
Pneu com alta histerese	0,0258	0,052

A resistência aerodinâmica está relacionada a ação de fluidos sobre o veículo no momento da frenagem, pode ser calculada conforme a Equação 3. Enquanto a força de frenagem pode ser encontrada conforme a Equação 4, onde μ representa o coeficiente de atrito entre pneu e pista [7].

$$R_a = \left(\frac{1}{2} \right) * \rho_{ar} * v^2 * C_x * A_f \quad (3)$$

$$F_b = F_{bf} + F_{br} = W * \mu \quad (4)$$

O coeficiente de atrito pode ser influenciado por diversos fatores como o tipo de pista, tipo de pneu, velocidade do veículo e estado da banda de rolagem. Os valores para o coeficiente de atrito podem ser retirados da Figura 9, que mostra diferentes valores para coeficiente de atrito em função do tipo de pista [8].

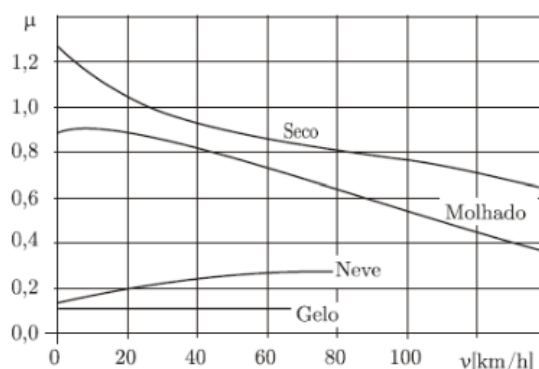


FIGURA 9. Coeficiente de atrito variando em função da velocidade e do tipo de pista [7].

O presente trabalho considera a análise em pista seca a uma velocidade de 100 *km/h*, resultando em um coeficiente de atrito de 0,8.

Considerando que as forças atuando no veículo no momento da frenagem são constantes e com todos os resultados obtidos anteriormente, é possível calcular a máxima desaceleração do veículo como mostra a Equação 5 [7].

$$a_x = \frac{R_a + R_r + F_b}{m} \quad (5)$$

2.3.2 Distância de frenagem e tempo de frenagem

A distância de frenagem pode ser calculada através da junção do tempo de reação do motorista e o tempo em que os freios estão acionados. Como o foco nesse trabalho é apenas realizar uma análise térmica em diferentes tipos de discos de freio, o tempo de reação do motorista será desconsiderado.

A distância de frenagem (d) e o tempo de frenagem (t_f) podem ser calculados conforme a Equação 6 e Equação 7, respectivamente [9].

$$d = \frac{v^2}{2 * a_x} \quad (6)$$

$$t_f = \frac{v}{a_x} \quad (7)$$

2.3.3 Energia de frenagem, potência de frenagem e fluxo térmico

Durante o processo de frenagem a energia cinética do veículo é convertida em energia térmica, a energia cinética do veículo pode ser calculada como mostra a Equação 8 [10].

$$E_b = \frac{kmv(t)^2}{2} \quad (8)$$

Onde k é um coeficiente de correção para a inércia dos componentes que sofrem rotação no veículo, podendo variar de 1,05 a 1,15 para veículos leves e $v(t)$ é a velocidade variando com o tempo. Para o presente trabalho foi escolhido $k = 1,10$ [10]

Os discos de freios dianteiros são responsáveis por 70% da frenagem total em casos de frenagem de emergência. Dessa forma, apenas um disco dianteiro será responsável por 35% da frenagem, logo para encontrar a energia cinética em apenas um disco é necessário multiplicar a Equação 8 por 35%, conforme a Equação 9 [11].

$$E_{bd} = 0,35 * E_b \quad (9)$$

Para obtermos o fluxo de calor na superfície do disco é necessário calcular a potência de frenagem, que é a energia cinética no disco dividido pelo tempo de frenagem, conforme Equação 10. As pastilhas não atuam igualmente na superfície interna e externa do disco, pois ocorre uma perda de paralelismo ao entrar em contato com o disco, na maioria das vezes a superfície externa do disco tende a realizar um maior contato correspondendo a 57,5% da frenagem. Desse modo, a potência de frenagem na superfície externa e interna do disco pode ser calculada conforme as Equações 11 e 12, respectivamente [2].

$$P_{bd} = \frac{E_{bd}}{t_f} \quad (10)$$

$$P_{bde} = 0,575 * P_{bd} \quad (11)$$

$$P_{bdi} = 0,425 * P_{bd} \quad (12)$$

A partir das equações para o cálculo de potência de frenagem, é possível obter o fluxo térmico aplicado a superfície do disco de freio. Onde o fluxo de calor aplicado será a potência de frenagem dividida pela área de contato entre a pastilha e o disco. As Equações 13 e 14 representam o fluxo térmico na superfície externa e interna do disco de freio, respectivamente [2].

$$q_e'' = \frac{P_{bde}}{A_c} \quad (13)$$

$$q_i'' = \frac{P_{bdi}}{A_c} \quad (14)$$

2.3.4 Metodologia da simulação térmica do processo de frenagem

Para a realização da análise numérica computacional, o presente trabalho utilizou o software *ANSYS®* para simular a conversão de energia cinética em energia térmica no processo de frenagem fazendo o uso do método dos elementos finitos para discretizar o problema, introduzindo o modelo matemático para regime transiente (*Transient Thermal*). As condições de contorno utilizadas foram o fluxo de calor gerado pelo atrito entre as pastilhas e o disco de freio, a temperatura do ar ambiente e o coeficiente de convecção de calor determinado de forma empírica para o aquecimento de discos de freio no momento da frenagem [10].

Para a modelagem do processo, algumas simplificações foram admitidas. Foi determinado que o fluxo de calor é distribuído de maneira uniforme na superfície do disco, toda a energia cinética é convertida em energia térmica, os modos de transferência de calor atuantes no processo são a condução e convecção, não ocorre deslizamento de pneu ou travamento de rodas, a frenagem ocorre a desaceleração constante e após o veículo parar totalmente o mesmo ainda é acelerado até atingir uma velocidade de 100 km/h em 14,2 s.

O fluxo de calor é inserido nas superfícies externas e internas do disco, conforme ilustra a Figura 10. O processo de resfriamento ocorre por convecção forçada com o ar, a Figura 11 mostra as faces responsáveis por realizar a transferência de calor para o ambiente.

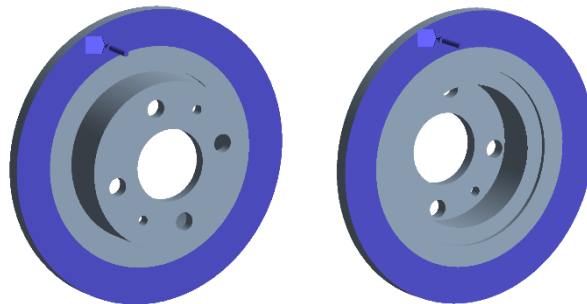


FIGURA 10. Regiões de aplicação do fluxo de calor. (Autoria própria)

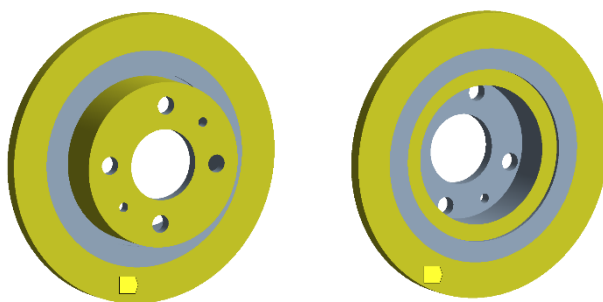


FIGURA 11. Regiões de convecção nos discos de freio. (Autoria própria)

3. RESULTADOS

O procedimento adotado para elaboração dos resultados ocorreu da seguinte forma, primeiro foi realizado uma análise térmica por meio da simulação com o método dos elementos finitos para comparar o modelo com os resultados da literatura, com os resultados da simulação obtidos foi possível perceber que o erro foi de 0,7%, validando a simulação [1]. Dessa forma é possível afirmar que o modelo adotado para a simulação convergiu com os resultados esperados, possibilitando a alteração da geometria do disco de freio para realizar diferentes análises térmicas.

3.1. Parâmetros adotados na simulação térmica

Utilizando as equações e considerações descritas no presente trabalho, os resultados dos parâmetros relacionados a dinâmica de frenagem estão expostos na Tabela 3.

TABELA 3. Parâmetros da dinâmica de frenagem.

<i>Parâmetros</i>	<i>Valores</i>
v_i (m/s)	27,78
Massa do disco sólido (kg)	4,30
Massa do disco perfurado (kg)	4,13
Massa do disco ranhurado (kg)	3,97
a_x (m/s ²)	8,15
t_f (s)	3,35
F_b (N)	9493,17
d (m)	47,34

É perceptível dentre os resultados que há uma alta taxa de desaceleração, isso ocorre devido ao processo de frenagem no experimento simular uma situação de emergência. A massa dos discos passou por uma alteração significativa, sendo o disco ranhurado o mais leve e com uma massa aproximadamente 8% menor, a redução de massa advém dos canais gerados em sua superfície.

O processo modelado pode ser representado conforme mostra a Figura 12, inicialmente a velocidade é de 100 km/h, a frenagem ocorre e em 3,35 s o veículo é parado e após a frenagem o veículo chega a uma velocidade de 100 km/h novamente em 14,2 s.

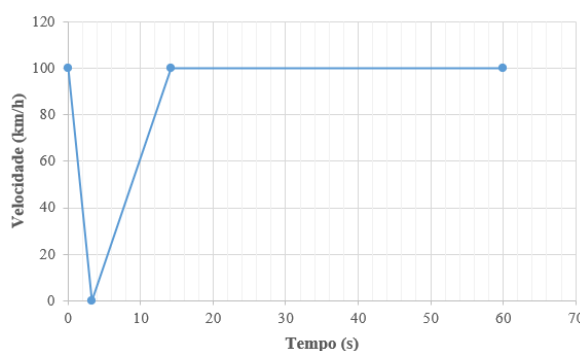


FIGURA 12. Processo de frenagem com velocidade variando no tempo. Adaptado de [1].

Os parâmetros relacionados a análise térmica estão dispostos na Tabela 4, esses parâmetros levam em consideração o peso do veículo, área de contato entre pastilha e disco de freio, velocidade e desaceleração. Os valores para fluxo de calor obtidos foram inseridos como condição de contorno na análise numérica-computacional.

TABELA 4. Parâmetros da análise térmica.

Parâmetros	Valores
E_b (kJ)	513,50
E_{bd} (kJ)	359,50
P_{bde} (kW)	60,65
P_{bdi} (kW)	44,82
q_e'' (kW/m ²)	2221,58
q_i'' (kW/m ²)	1642,04

3.2. Disco sólido

Utilizando os parâmetros calculados, foi possível realizar a simulação térmica em regime transiente do disco de freio. Os resultados obtidos mostram uma temperatura máxima de 204,6 °C no fim da frenagem e temperatura mínima de 88,3 °C após o resfriamento. A Figura 13 (a) mostra as zonas de diferentes temperaturas no disco logo após a frenagem e a Figura 13 (b) após o resfriamento, sendo a região com maior temperatura representada pela cor vermelha e menor temperatura representada pela cor azul.

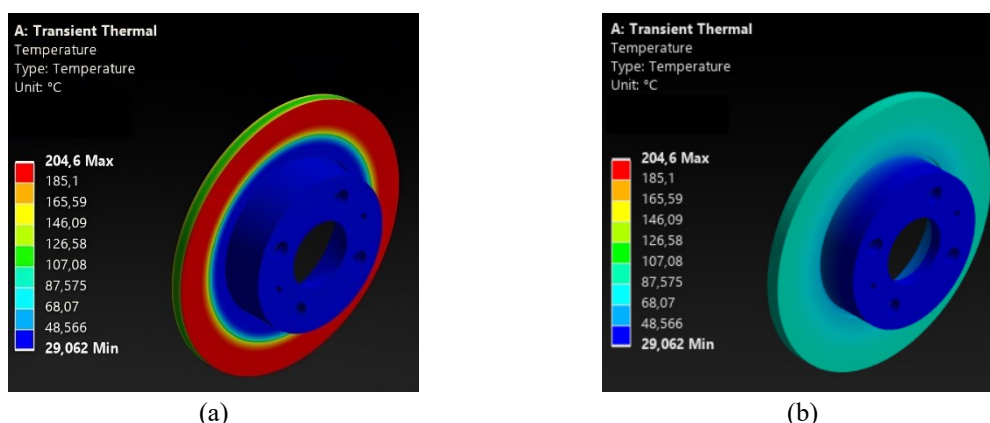


FIGURA 13. Temperatura do disco sólido após aquecimento e resfriamento. (Autoria própria)

3.3. Disco perfurado

Os resultados obtidos para o disco perfurado mostram uma temperatura máxima de 237,01 °C no fim da frenagem e temperatura mínima de 75,74 °C após o resfriamento. A Figura 14 (a) ilustra as temperaturas obtidas logo após a frenagem e a Figura 14 (b) após o resfriamento. É possível perceber um aumento da temperatura máxima que advém da redução de área ocasionada pelos furos.

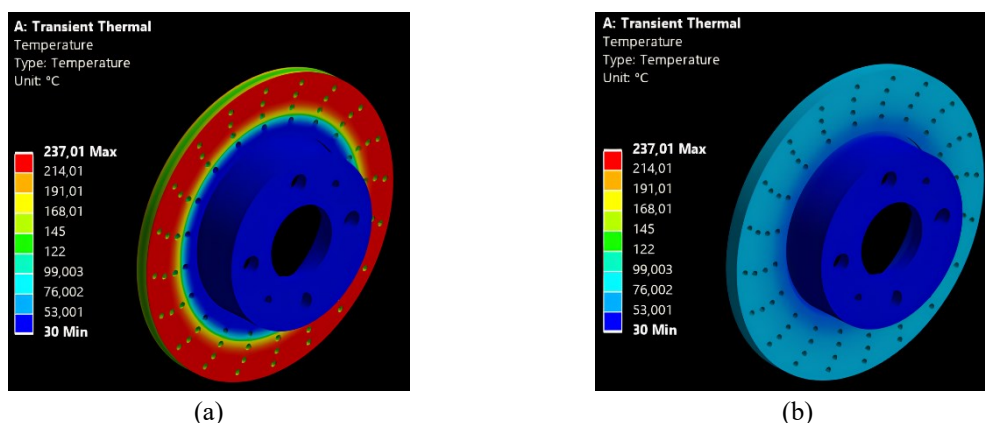


FIGURA 14. Temperatura do disco perfurado após aquecimento e resfriamento. (Autoria própria)

3.4. Disco ranhurado

Os resultados obtidos para o disco ranhurado mostram uma temperatura máxima de 254,84 °C no fim da frenagem e temperatura mínima de 52,73 °C após o resfriamento. A Figura 15 (a) ilustra as temperaturas obtidas logo após a frenagem e a Figura 15 (b) após o resfriamento. É possível perceber um aumento ainda maior da temperatura máxima, validando a ideia que a temperatura na superfície do disco de freio é inversamente proporcional à área de contato entre a pastilha e o disco.

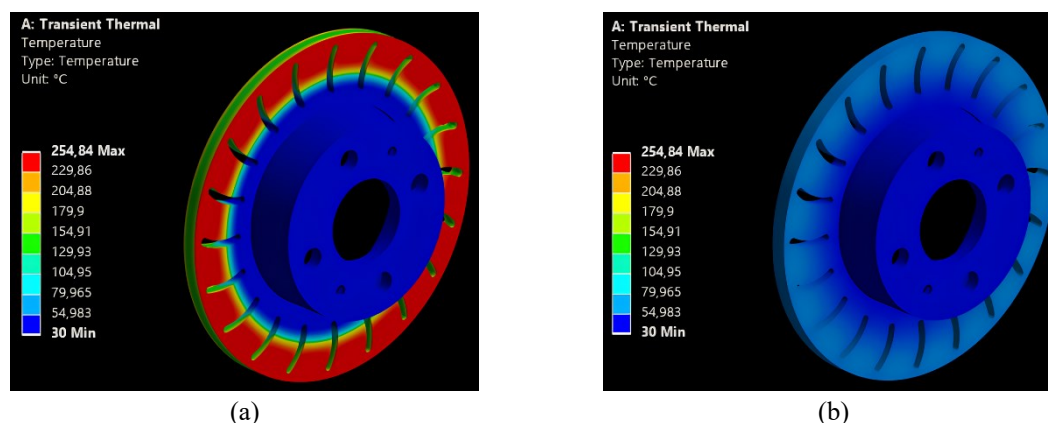


FIGURA 15. Temperatura do disco ranhurado após aquecimento e resfriamento. (Autoria própria)

O ciclo térmico gerado no momento da frenagem está representado na Figura 16. É possível perceber uma melhora significativa no resfriamento do disco quando comparado ao disco sólido. O formato das ranhuras realizadas de maneira espiral é proposital, pois facilita o movimento das partículas ocasionado pela força centrífuga e resfriando ainda melhor o disco.

3.5. Comparando desempenhos térmicos dos discos de freio

Com base nos resultados obtidos é possível comparar o desempenho térmico dos três tipos de discos analisados e verificar qual obteve uma melhor eficiência em seu aquecimento e resfriamento. Para isso, é necessário verificar alguns parâmetros como a temperatura máxima, temperatura mínima e a taxa de calor dissipada no momento da frenagem.

Os ciclos térmicos das três configurações de discos estão sendo comparados na Figura 16. Dessa forma é possível perceber a maior temperatura de pico e o resfriamento de cada um. É possível perceber que os discos que possuem uma ventilação em sua superfície atingem uma temperatura de pico maior, porém resfriam mais rápido. Esse comportamento é dado devido a alguns fatores como uma menor quantidade de massa nos discos ventilados para uma mesma quantidade de fluxo de calor, ocasionando uma maior temperatura e, a presença dos canais facilitam a dissipação de calor, consequentemente o disco resfria mais rápido.

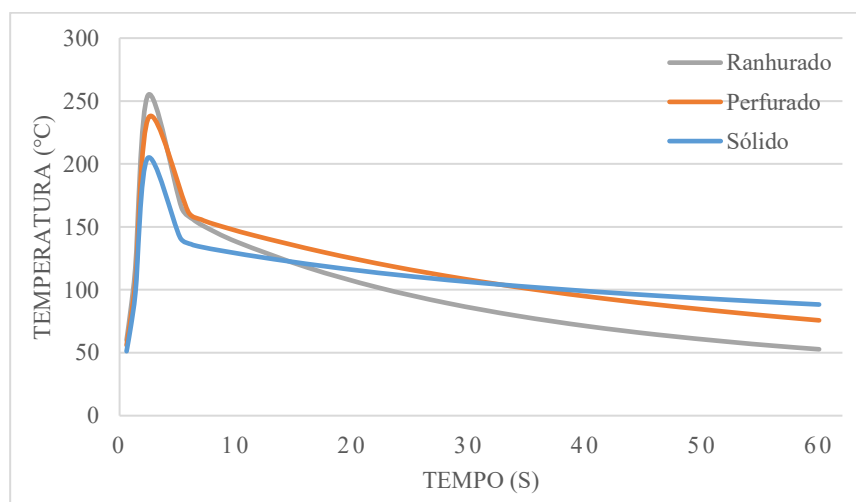


FIGURA 16. Curva de ciclo térmico para as três configurações de disco. (Autoria própria)

4. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o desenvolvimento deste trabalho foi possível realizar uma análise numérica-computacional do processo de frenagem, a geometria de referência utilizada foi um disco de freio sólido do veículo Mille Fire 1.0 da fabricante Fiat. O disco foi submetido a uma frenagem de emergência de 100 km/h até 0 km/h e em seguida acelerado até 100 km/h e mantido um período a velocidade constante. O material do disco foi o ferro fundido cinzento FC-150 e o fluido de arrefecimento foi o ar.

A geometria dos discos foi modificada em três formatos, onde o primeiro foi mantido o disco sólido, em seguida um disco perfurado e ao final o disco ranhurado. Os três discos possuíam as mesmas dimensões e foram submetidos aos mesmos parâmetros de teste, obtendo resultados diferentes. O disco ranhurado apresentou uma maior eficiência na taxa de dissipação de calor, contudo uma maior temperatura de pico.

Dentre os três discos analisados, o disco ranhurado apresentou uma temperatura de 254,84 °C, 50,24 °C maior que o disco sólido e 17,83 °C maior que o disco perfurado, porém durante o resfriamento dentro do tempo de 60 segundos, atingiu uma temperatura de 52,72 °C, 35,57 °C menor que o disco sólido e 23,01 °C menor que o disco perfurado.

Dessa forma, com este trabalho foi possível perceber a importância de se estudar o comportamento térmico de um sistema de freios a disco, por se tratar de um dos principais mecanismos de segurança de qualquer veículo. Com relação as diversas geometrias de discos de freio, foi comprovado que o desempenho térmico dos discos sólidos é bem inferior quando comparado a geometrias que possuem canais de ventilação.

5. REFERÊNCIAS

- [1] HOFFMANN, GABRIEL JULIO. Análise numérica do desempenho térmico de discos de freio do tipo sólido e ventilado. Orientador: Diogo Lôndero da Silva. 2018. 66 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em engenharia mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2018.
- [2] CIOLFI, M. José. Simulação computacional do comportamento térmico de um disco de freio ventilado. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário da Fei, São Bernardo do Campo, 2010.
- [3] IOMBRILLER, Silvia Faria. Análise térmica e dinâmica do sistema de freio a disco de veículos comerciais pesados. 2002. 196 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- [4] FREMAX (Santa Catarina). Catálogo e loja virtual. 2018. Disponível em: <<https://www.fremax.com.br/br/peca/BD1815?c=BD1815&ordem=1737>>. Acesso em: 05 mai. 2024.
- [5] GUESSER, Wilson Luiz et al. Ferros Fundidos Empregados para Discos e Tambores de Freio. Sae Brasil. Gramado, Rs, p. 1-6. 2003.
- [6] NETO, A. C. Dinâmica Veicular. São Carlos, [2000]. 165 p.
- [7] WONG, J.Y. Theory of Ground Vehicles. Hoboken, N.J. Wiley, 2008.
- [8] NICOLAZZI, L. C.; ROSA, E.; LEAL, L. C. M. Uma introdução à modelagem quaseestática de veículos automotores. Florianópolis: Publicação interna do GRANTE – Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, 2012. 347 p.
- [9] GILLESPIE, T. D. Fundamental of Vehicles Dynamics. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1992.
- [10] LIMPET, R. Brake and design and safety. 2.ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers Inc., 1999.
- [11] SILVA, F. O. F. Dinâmica de frenagem e análise térmica de freio a disco ventilado automotivo. 2016. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- [12] GARDINALLI, G. J. Comparação do desempenho de frenagem simulada x experimental de um veículo de passeio com freios hidráulicos e ABS. 2005. 96 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de mestrado em Engenharia Automotiva, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.
- [13] STEPHENS, A. Aerodynamic cooling of automotive disc brakes. 2006. 117 f. Thesis of Master Engineering, School of Aerospace, Mechanical e Manufacturing, RMIT, University. Melbourne, mar. 2006.