

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO – Engenharia Mecânica
Disciplina MEC041 - Trabalho Final de Graduação II

ANÁLISE COMPARATIVA TÉRMICA E DINÂMICA DO SISTEMA DE FREIO A DISCO DE VEÍCULOS POPULARES.

Autor 1 – Guilherme Gassen Wagner
163532@upf.br

Autor 2 – Prof. Me. Auro Candido Marcolan
marcolan@upf.br

Comissão Examinadora – Dr. William Haupt, Me Lucas Zavistanovicz

RESUMO

A criação do sistema de freio foi um grande avanço para a humanidade pois tornou segura a locomoção e o transporte de cargas para várias áreas do desenvolvimento. Atualmente possui-se dois tipos de sistema, o com freio a tambor e o freio a disco, os quais consistem em remover a energia cinética de veículo e transformá-la em energia térmica via atrito, permitindo assim a diminuição da velocidade de modo seguro. Devido a isso, o sistema de freio é constantemente estudado, visando evitar possíveis falhas do sistema e também na busca de melhorias do mesmo. Com base nesses fatos, o presente trabalho tem por objetivo a análise comparativa dinâmica e térmica dos dois veículos populares mais vendidos no Brasil no ano de 2020, sendo eles o Chevrolet Onix e o Hyundai HB20 1.6. Os resultados mostram que as propriedades geométricas dos veículos e dos seus respectivos discos alteram os valores térmicos de fluxo de calor, número de Reynolds e o seu coeficiente de transferência por convecção, sendo que, o Chevrolet Onix possui uma seção frontal 6,6% maior que o HB20, fazendo com que obtenha uma maior potência de frenagem e um menor fluxo de calor, e conseqüentemente uma maior taxa de resfriamento. Posto isso, é possível concluir que maiores áreas de canais de ventilação promovem uma maior troca de calor entre o disco de freio e o ar, fazendo com que haja um maior arrefecimento do disco, evitando assim possíveis problemas.

Palavras chave: freio a disco; análise comparativa; análise dinâmica; análise térmica.

1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, tornou-se notória a evolução mecânica e tecnológica empregada nos veículos automotores. Conforme Belhocine (2014) estas melhorias vão desde o aumento da potência até a diminuição no arrasto aerodinâmico, itens estes aprimorados com o intuito de reduzir o consumo de uma forma geral, priorizando a redução dos gastos com combustível. Através desta evolução mecânica e segundo Belhocine (2014) notou-se que a velocidade média, principalmente dos automóveis de passeio, tem se elevado cada vez mais. Em contrapartida, é interessante enfatizar que em paralelo a esta evolução obteve-se também uma evolução dos sistemas de segurança, o que proporciona um maior conforto e segurança operacional abordo dos veículos, mesmo através de maiores velocidades empregadas.

Devido à tamanha evolução mecânica ocorrida nos últimos anos, o sistema de freio vem sendo cada dia mais exigido mecânica e termicamente, sendo o mais mencionado e de maior importância em grande escala tratando-se da segurança operacional de um veículo automotor.

Em virtude da necessidade de sistemas de freio com uma maior qualidade empregada, torna-se muito importante a precisão no desenvolvimento do sistema como um todo. Segundo Stephens (2006), considera-se todos os aspectos empregados na sua utilização, sendo principalmente os aspectos mecânicos e térmicos, é de suma importância a busca por um aperfeiçoamento de projeto, uma mão de obra qualificada para o desenvolvimento técnico e construção mecânica dos itens, bem como com uma diversificação de produto, entregando diversas alternativas ao consumidor final, priorizando sempre a qualidade e a segurança operacional embarcada por trás de cada item.

Conforme Stephens (2006), o sistema de freio consiste basicamente em remover a energia cinética do veículo e transformá-la em energia térmica via atrito, permitindo assim a diminuição da velocidade de uma forma segura. Referente a evolução mecânica e a constante necessidade e exigência do sistema de freio do veículo, Stephens (2006) também menciona que devido essa maior exigência operacional, a dissipação de calor necessária nas frenagens aumentou, a qual se não realizada de forma correta gera problemas, como a perda temporária do sistema de freios devido tamanho calor gerado no material de fricção, o qual provoca a diminuição do coeficiente de atrito entre o sistema, provocando assim o fenômeno chamado de “fade”. Conforme Belhocine (2014), o principal fator para a variação acentuada da temperatura é induzido pelo atrito entre a pastilha de freio contra o disco.

Conforme Dike (1974), em um projeto de freio a disco o espaço disponível e o peso máximo permitido são fatores que influenciam no projeto. Devido a estes fatores e com a constante evolução se fez necessário o aperfeiçoamento dos projetos, ampliando as formas de avaliação e as análises necessárias, portanto não é mais possível que sejam apenas avaliados os aspectos básicos, como distância de frenagem e eficiência mecânica para o desenvolvimento de um sistema de freio. Um dos principais fatores necessários no projeto e execução dos novos sistemas de freio a disco são os cálculos referentes a produção e a dissipação de calor gerado no sistema como um todo, com o principal objetivo de prever possíveis problemas na operação do mesmo, como a vitrificação em consequência dos dejetos no ambiente de utilização, bem como uma possível falha por fadiga advinda da grande variação térmica e até mesmo a evaporação do fluido de freio do sistema, problema que pode gerar a falha temporária ou permanente do mesmo.

Tendo por necessidade tamanhas análises, este presente trabalho tem por objetivo a pesquisa e o desenvolvimento analítico sobre a variação dinâmica e térmica do sistema de freio a disco dos principais veículos populares vendidos no Brasil, tendo como base a bibliografia existente e o desenvolvimento de cálculos e gráficos comparativos com o auxílio de softwares apropriados, com o principal intuito de entender e demonstrar o veículo melhor preparado para as principais condições de necessidades diárias. Os veículos utilizados no estudo foram os dois mais vendidos no ano de 2020, que são: Chevrolet Onix 1.0 2020 e HB20 1.6 2020.

1.1 Objetivos Gerais

Realizar um estudo analítico comparativo através da bibliografia existente e desenvolvimento de cálculos e gráficos acerca da variação térmica e dinâmica de ambos veículos. Criação de uma planilha semiautomática para futuros cálculos, alterando apenas as propriedades do veículo em estudo e as suas condições de contorno.

1.2 Objetivos Específicos

- Analisar o surgimento e a necessidade do sistema de freio;
- Analisar de forma qualitativa os melhores parâmetros empregados no sistema de freio a disco;
- Analisar a variação dinâmica e térmica ocorrida nos diversos modelos de discos de freio;

- Validar resultados obtidos por meio de comparação com a finalidade de julgar o veículo que emprega maior segurança;
- Analisar os melhores parâmetros a serem aplicados e os principais pontos de atenção no desenvolvimento do projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao considerar o desenvolvimento de um estudo comparativo, é necessário conhecimento base para que se possa desenvolver e aplicar o mesmo. Sendo assim, apresenta-se os principais conceitos de pesquisa acerca do sistema de freio a disco, os seus materiais de fricção e os principais problemas térmicos possíveis do sistema.

2.1 Sistemas de freio

O sistema de freio tem por objetivo reduzir, manter ou cessar a velocidade vigente no veículo. Conforme Bosch (2005), o freio é um elemento pertencente ao sistema de segurança com a principal finalidade de se opor ao movimento do veículo.

Segundo Rocha (2009), o sistema de freios de um veículo deve suportar o peso do mesmo e todas as forças que agem sobre ele, tal funcionamento consiste em transformar a energia cinética do movimento do veículo em energia térmica por meio do atrito, gerando assim uma grande quantidade de calor, a qual deve ser dissipada.

A frenagem tem relação direta com o peso do veículo, ou seja, um veículo com determinado peso tem capacidade de dissipar a energia de frenagem gerada para essa condição. Caso o peso seja duplicado, gerando uma sobrecarga, a energia necessária para frear o veículo também deve ser dobrada. Nesse caso, como o sistema de freio não possui capacidade para dissipar energia suficiente, resultará em uma distância maior de parada, além de produzir superaquecimento (NICOLLAZI; ROSA; LEAL, 2012).

Em relação à velocidade, a energia cinética se manifesta de forma quadrática na quantidade de calor gerada no momento da frenagem, ou seja, ao duplicar a velocidade do veículo, é necessário quadruplicar a potência de frenagem (NICOLLAZI et al., 2012).

2.2 Freio a disco

O sistema de freio a disco é um dos mais utilizados atualmente, podendo ser utilizado em todas as rodas do veículo, principalmente em veículos leves ou intermediários de carga. Atualmente no Brasil grande parte dos veículos saem de fábrica com o freio a disco no eixo dianteiro e freio a tambor no eixo traseiro, visto que a qualidade no sistema de freio a disco é superior ao freio a tambor. Seu funcionamento consiste basicamente em realizar o acionamento do pedal de freio, o qual provoca um aumento na pressão interna do sistema, o que faz com que ocorra a movimentação da pinça de freio contra a pastilha, a qual é atritada contra o disco de freio, gerando assim um atrito entre os componentes, o que provoca a desaceleração gradual e total do veículo.

O freio a disco tem apresentado características positivas perante os demais tipos de freio, o que leva a sua maior utilização. Tais características são: a facilidade operacional, visto que o sistema de freio a disco gera uma menor variação na frenagem independente da velocidade empregada; possuir uma curva de torque plana ligada diretamente à característica anterior operacional, visto que possui uma pequena mudança no seu torque no momento do acionamento dos freios; e, uma das características mais importantes deste tipo de freio, a permanência de sua eficiência operacional, até mesmo em altas temperaturas e diversas repetições de frenagem, o que remete segurança na operação dos veículos.

Segundo Dusi & Adas (2001) o freio a disco representa um projeto estrutural mais compacto que os demais tipos de freio, gerando uma redução em torno de 60 kg em um veículo leve que possa também utilizar outro tipo de freio.

Segundo Boiochi (1999), as principais características que levam o freio a disco a ser um dos mais seguros e mais utilizados na gama de veículos são:

- Maior força de frenagem – Característica que é geralmente utilizada pelos fabricantes para aumentar o desempenho operacional do veículo e reduzir a sua distância de frenagem, trazendo consigo sua excelência operacional.
- Insensibilidade ao coeficiente de fricção da pastilha – Tal efeito se remete de forma positiva, visto que proporciona uma maior estabilidade do veículo, mantendo assim constante a força de frenagem, fatos que geram além da segurança, um maior conforto para os ocupantes.

Em relação ao dimensionamento necessário para um freio a disco, é preciso seguir alguns parâmetros como: o desempenho térmico necessário, o desempenho mecânico que o veículo necessita, a durabilidade, o acondicionamento, a massa, a sua facilidade construtiva e a facilidade de manutenção. Estes fatores levam ao melhor dimensionamento do sistema, gerando assim uma melhor qualidade operacional.

O sistema de freio a disco possui uma maior área superficial exposta do que os demais tipos de freio, como por exemplo o freio a tambor. Devido a essa maior superfície de contato, o resfriamento ocorre de melhor forma e com maior eficiência, entretanto Newcomb (1960), através de experimentos práticos, provou que a eficiência térmica de dissipação do calor gerado na frenagem só ocorre em casos que há diversas repetições no acionamento do freio, pois em frenagens de emergência a redução térmica é muito pequena comparada aos demais tipos de freio, apenas 6% de um resfriamento maior. No mesmo experimento Newcomb (1960) notou e comprovou que as razões de resfriamento dos freios dianteiros é 20% maior que a dos freios traseiros, e que os freios a disco possuem uma taxa de resfriamento 25% maior que os freios a tambor.

Seguindo as características dimensionais do sistema de freio a disco, um ponto importante e que gera também uma grande utilização dele é a facilidade na manutenção geral. Isto ocorre pois o principal componente que tem seu maior desgaste é a pastilha de freio que atrita constantemente contra o disco quando acionada, pastilha essa que é de fácil remoção e substituição, sendo retirada de forma radial e substituída, diferente do sistema de freio a tambor, que dificulta a sua manutenção devido a necessidade de retirar e reinstalar rebites de fixação para ter acesso e substituir as lonas e sapatas de freio.

No entanto há um ponto negativo do sistema de freio a disco. Como já mencionado, um dos componentes que sofre maior desgaste é a pastilha de freio, a qual pode sofrer diversos tipos de desgastes, variando conforme a força de aplicação gerada com a pinça e até mesmo a distribuição do material da pastilha, provocando algumas vezes um desgaste desuniforme, problema esse que pode diminuir a vida útil da pastilha e encarecer para o consumidor final. Em resultado disso, é de suma importância que o sistema como um todo esteja regulado em relação às suas forças aplicadas e o material da pastilha seja de boa qualidade para que haja um desgaste uniforme. Um ponto importante a mencionar é que, caso haja um desgaste desuniforme da pastilha, muitas vezes a segurança operacional é comprometida, visto a diminuição da eficácia dele.

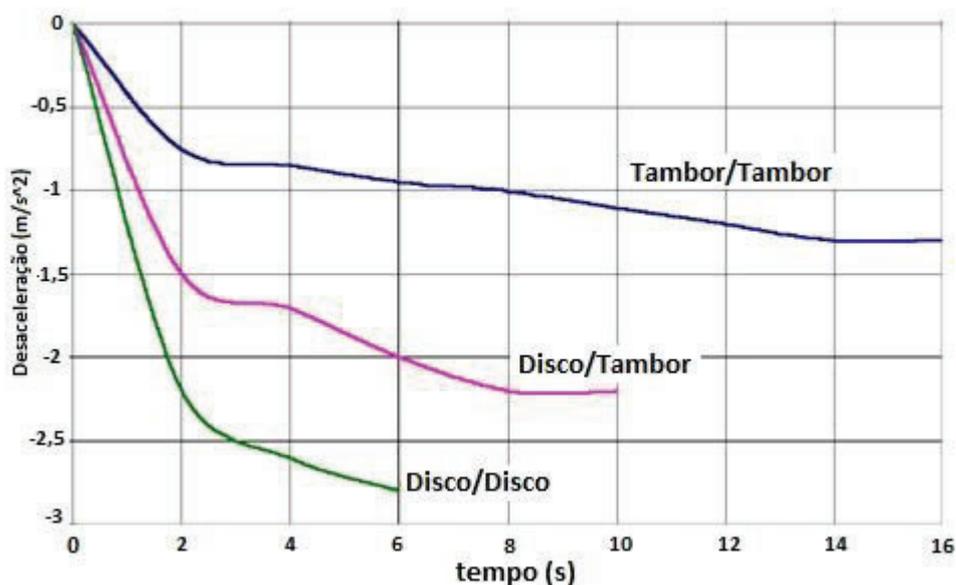
Conforme Canale & Ruffino (1993) a condição de máximo desempenho de um sistema de freios em um veículo automotor se dá somente quando a força de distribuição entre o eixo dianteiro e traseiro estão na mesma proporção dos seus pesos dinâmicos de frenagem. Esta dinâmica ocorre quando as rodas de cada eixo utilizam a máxima fricção longitudinal entre o pneu e a pista durante a frenagem, condição que coloca as rodas em seu limite de escorregamento. Para isto a força de frenagem deve seguir a distribuição das forças verticais nos eixos do veículo durante a frenagem.

Alguns aspectos acerca da comparação e as principais características entre os sistemas de freio disponíveis no mercado foram apresentados por Gohring & Von Glasner (1990):

- Quando ocorre um aumento na temperatura inicial e aumenta a velocidade de frenagem ocorre nos freios a tambor uma redução em 14% no torque de freio em relação ao freio a disco.
- Em uma ocasião de superaquecimento do sistema, o freio a disco alcançando uma temperatura de aproximadamente 750 °C, tem uma redução máxima de 15% no seu torque de frenagem, enquanto o freio a tambor quando chega na temperatura aproximada de 580°C já perdeu 51% no seu torque de frenagem.
- O freio a disco possui uma maior qualidade e uma maior eficiência de frenagem quanto ao freio a tambor quando ambos são submetidos a uma alta carga térmica.
- Quando o veículo possui todas as rodas com freio a disco, possui uma redução no seu tempo de frenagem, visto seu maior torque de frenagem.

Na figura 1 pode-se observar a diferença entre a desaceleração em relação ao tempo conforme uma possível configuração do sistema de freios, sendo notória a diferença entre veículos equipados somente com freio a disco para veículos que possuem somente freio a tambor.

Figura 1 – Desaceleração em relação ao tempo.



Adaptado de: Gohring & Von Glasner (1990)

2.2 Materiais de fricção

No desenvolvimento de projetos de sistemas de freio, várias são as características importantes no momento de iniciar o projeto. Podemos citar suas dimensões necessárias, sempre com o intuito de reduzir o tamanho e o peso aplicado, as características térmicas, que é o principal objeto de estudo do trabalho e, não menos importante, o material a ser utilizado, priorizando os materiais do disco e pastilha de freio e suas características de fricção, fator que provoca o atrito entre ambos gerando assim a desaceleração esperada.

Tais propriedades de fricção são muito diferentes dependendo de cada material utilizado e a sua correlação entre componentes, os quais variam principalmente em relação a temperatura

empregada no sistema. Portanto, para que se possua um excelente sistema de freio, é de suma importância a escolha do material que melhor se adequa a necessidade, por ser um dos principais componentes na segurança operacional. Um ponto importante e que merece ressalva é de que não basta apenas o material ser de boa qualidade, mas o projeto do sistema como um todo necessita muita atenção visto que o conjunto da obra é o mais importante quando se trata de segurança.

Na área de pesquisa e projeto de materiais, alguns fatores são postos na balança no momento da escolha e desenvolvimento do material mais adequado. Neste momento é muito importante levar em conta a necessidade de redução de custo como um todo para o consumidor final, a diminuição no peso embarcado no sistema, gerando assim uma maior economia na operação do veículo e, como maior ponto de atenção, a melhoria nas características de desempenho e segurança.

Algumas das características importantes em relação ao freio a disco e seus materiais de fricção são descritas por Naerheim, Pan & Min (1999):

- Grande tempo de vida sem necessidade de manutenção;
- Curta distância de frenagem;
- Baixo ruído na operação;
- Sem produção de vibração no momento da frenagem;
- Fricção estável sob todas as condições de frenagem;
- Baixo desgaste das pastilhas e discos de freio;
- Sem causar danos para o meio ambiente.

As características mais desejadas para o material de fricção são: que ele tenha um coeficiente de fricção constante, algo que dificilmente é encontrado na prática, e que ele tenha a melhor durabilidade, ou seja, que possua a melhor vida útil de trabalho.

Como mencionado anteriormente, a variação da temperatura afeta diretamente as propriedades do material de fricção, pois ativa características físico-químicas do material. Esta variação de temperatura também pode afetar a sua forma estrutural, fazendo com que ocorra uma mudança na fase de estado do material, sem contar que pode vir a gerar um maior desgaste do par de fricção, perdendo assim a sua eficácia. Trichês Jr., Jordan, Guges & Toussi (2001), concluíram que a temperatura afeta diretamente as características do material de fricção e apontaram que o módulo da elasticidade é o parâmetro mais afetado, causando assim um aumento nos fatores de amortecimento da pastilha. É importante mencionar que as propriedades dos materiais são complexas de se obter devido à dificuldade da influência direta da temperatura e do tempo sobre as características do material.

Conforme Day & Newcomb (1984) pode-se verificar diferentes comportamentos nas propriedades dos materiais de fricção entre novo e usado. Estes comportamentos são percebidos principalmente durante a sua expansão térmica, parâmetro esse que é muito importante na determinação do contato na interface e na distribuição de pressão. Segundo as análises químicas feitas pelos autores, o material de fricção usado tem apresentado uma fina camada de aproximadamente 0.5mm, carbonizada devido a degradação térmica resultante das altas temperaturas geradas na superfície, camada essa que pode ocasionar tensões físicas e baixa condutividade. As pesquisas ainda indicam que o desgaste no material de fricção está ligado de forma diretamente proporcional à pressão aplicada na interface do material e interligada de forma exponencial a temperatura em que o material está trabalhando.

Durante o desenvolvimento do projeto é de suma importância a principal análise da utilização do veículo em questão; visto o possível comportamento do mesmo que muitas vezes pode exigir mais a respeito do material utilizado. Por exemplo, no desenvolvimento do projeto de um freio a disco para um ônibus ou veículo urbano onde está claro que a aplicação é constante no

trânsito tendo picos de aceleração e desaceleração, é de suma importância a escolha do material de fricção que mais se adeque à sua utilização, visto a baixa velocidade empregada e, por consequência, uma baixa taxa de resfriamento do sistema de freio, além da necessidade de segurança operacional.

2.3 Disco de freio sólido

Os discos de freio do tipo sólido são discos inteiros e maciços conforme a Figura 2. Estes discos também são geralmente mais baratos devido a sua concepção mais antiga e utilizados na maioria das vezes nos eixos traseiros e, em alguns casos, nos carros mais simples e mais antigos podem aparecer no eixo dianteiro. Não se recomenda muito a utilização deste tipo de acordo com a sua baixa capacidade de refrigeração, e também ao fato de ser inteiro e maciço, recomenda-se a utilização apenas em projetos que necessitam de um baixo custo empregado, visto o seu preço de mercado ser menor que os demais discos.

Figura 2 – Disco de freio sólido.



Fonte: Hipper freios (2021)

2.4 Disco de freio ventilado

O disco de freio ventilado, demonstrado na Figura 3, é composto por dois discos unidos e acoplados por uma câmara interna com vários canais que possibilitam a sua refrigeração. Segundo Heisler (2002) o freio a disco possui uma menor massa, o que ocasiona um maior aquecimento durante a frenagem, porém as forças inerciais geradas na sua rotação e os seus canais permitem uma maior entrada de ar, resultando assim em uma maior taxa de refrigeração e troca de calor, sendo assim maior que a do disco sólido. Tais discos são encontrados geralmente no eixo dianteiro de veículos mais potentes pelas suas características, além do eixo traseiro de carros esportivos, por sua alta performance necessária.

Figura 3 – Disco de freio ventilado.



Fonte: Hipper freios (2021)

2.5 Disco de freio perfurado

O disco de freio perfurado (Figura 4) é um disco ventilado acrescido de furos nas suas pistas internas e externas. Conforme Rodriguez (2018), as pastilhas de freio em sua atuação acabam por depositar detritos advindos do atrito gerado entre os componentes, sujeira esta que fica impregnada sobre as pistas do disco, fazendo com que aumente a temperatura de frenagem e prejudique a eficiência do sistema. Esse aumento de temperatura exige a criação e necessidade dos furos nas pistas do disco, para que seja feita a limpeza necessária, além de auxiliar na dissipação do calor gerado na frenagem devido a maior superfície de acesso ao ar. Um ponto negativo existente nos freios perfurados é a diminuição na sua resistência mecânica, por ação da menor área de contato entre pastilha e disco. Discos perfurados são geralmente utilizados em veículos especiais de competição.

Figura 4 – Disco de freio perfurado.



Fonte: Quatro rodas (2017)

2.6 Disco de freio ranhurado

O disco de freio ranhurado é semelhante ao disco de freio perfurado, conforme é possível observar na Figura 5. Segundo Marketing (2017) os discos ranhurados são considerados os melhores do mercado pois, da mesma forma que o disco perfurado, realizam a limpeza do material depositado pela pastilha, promovem uma maior taxa de refrigeração devido a maior superfície de contato com o ar e, diferente do disco perfurado, o ranhurado não perde a resistência mecânica no atrito entre disco e pastilha não diminuindo assim a possível taxa de eficiência. Seu ponto negativo é que ele provoca um maior desgaste da pastilha de freio, em razão do formato e disposição das ranhuras sobre as pistas externas e internas. A maior utilização do disco de freio ranhurado é em veículos que são utilizados em competições especiais.

Figura 5 – Disco de freio ranhurado.



Fonte: AeClassic (2011)

2.7 Problemas térmicos

Os problemas térmicos já foram citados muitas vezes neste trabalho em consequência ao seu perigo para o funcionamento geral do sistema de freio. Sabe-se que o superaquecimento do disco de freio pode gerar graves problemas no par de fricção, alguns dos principais e mais recorrentes problemas serão apresentados na sequência.

- Fade – Problema advindo do superaquecimento que gera a perda de atrito entre o disco e a pastilha de freio em casos de excessivas frenagens. Segundo Limpert (1999) em discos de freio este problema aparece de uma forma significativa acima dos 400°C, no entanto, em temperaturas nessa faixa a taxa de perda de atrito fica dentro do aceitável fazendo com que o sistema de freio a disco ainda apresente uma boa eficiência de frenagem.
- Distorções cônicas – Da mesma forma que o Fade também são responsáveis pela diminuição do atrito entre disco e pastilha de freio. Ocorrem principalmente em trechos urbanos, onde a utilização do freio é em maior escala e a capacidade de refrigeração do sistema é em menor escala. Este problema pode gerar uma instabilidade durante a frenagem devido a diminuição do atrito e da segurança operacional.
- Mudança do coeficiente de fricção – O coeficiente de fricção é uma característica particular de cada pastilha utilizada e o seu material de confecção, sendo assim varia conforme o material aplicado. Quando o limite térmico do material é ultrapassado ocorre um aumento no desgaste natural da pastilha, diminuindo assim a sua vida útil e a eficiência do sistema de freio.
- Variação do fator de freio – O fator de freio é definido como a razão entre a força de frenagem exercida pelo contato do disco/pastilha e a força aplicada para comprimir as pastilhas contra o disco. As principais variáveis que interferem no fator de freio são a temperatura, a velocidade de frenagem e a pressão exercida, sendo a temperatura o que mais define a variação no fator de freio, fazendo com que a eficiência do sistema de freio diminua.
- Pontos de aquecimento no disco – Advindo do superaquecimento gerado no disco, tal calor gerado provoca pontos de aquecimento espalhados no disco, estes pontos ocasionam em uma mudança no metal, gerando assim uma descoloração na região. O principal problema que ocorre nestes pontos é que o metal se torna mais duro do que o restante da superfície pela transformação metalúrgica ocorrida e a formação de martensita.
- Trincas no disco – Com o superaquecimento e da criação de pontos de aquecimento no disco de freio, ocorrem trincas em virtude do escoamento plástico do material da superfície, induzindo tensões após o resfriamento. A contínua utilização do veículo, gerando superaquecimento, também gera tensões cíclicas de fadiga que juntamente com o enfraquecimento do material podem provocar e propagar as trincas fazendo com que ocorra a quebra do disco.
- Desgaste – Quando ocorre uma grande utilização e vários ciclos de superaquecimento do material ocorrem os problemas citados anteriormente, então o desgaste do material de fricção não ocorre de forma normal, mas sim em alguns pontos específicos. Assim, caso não haja a substituição de tal componente, o sistema de freio irá cada vez mais se desgastar e perder a eficiência necessária de frenagem, colocando em risco a operação do veículo. Os principais tipos de desgaste que ocorrem no disco e pastilha de freio são o desgaste tangencial, radial e côncavo.

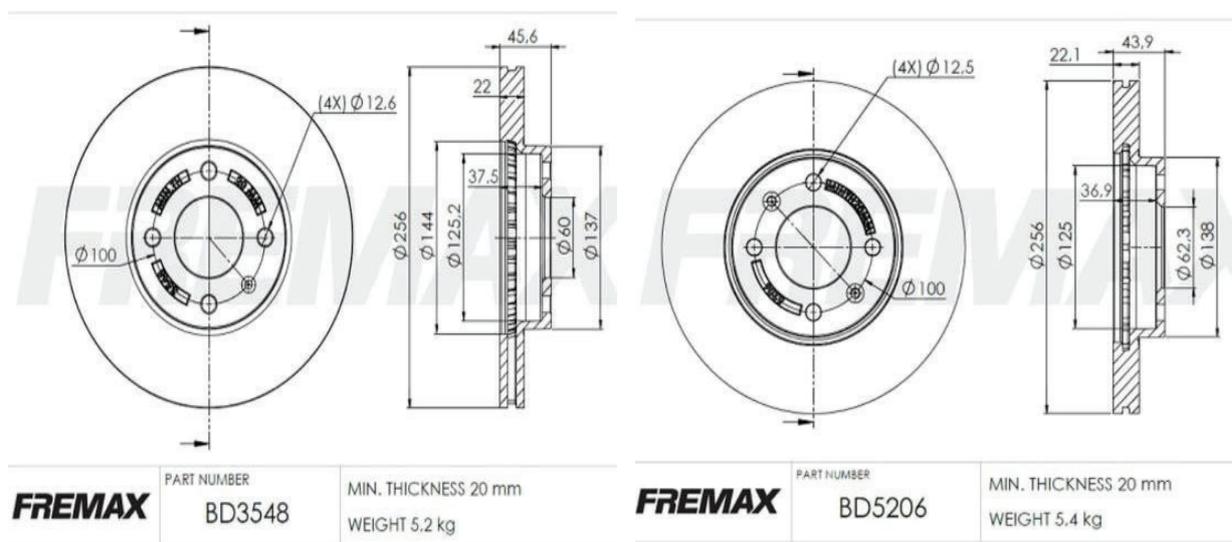
3 METODOLOGIA

Durante situações extremas de frenagem, o disco de freio é um dos componentes mais exigidos no processo de diminuição da velocidade, tal feito que pode provocar um superaquecimento do componente e ocasionar uma possível falha temporária ou até mesmo total. Neste trabalho, os processos dinâmicos de frenagem e os processos térmicos de aquecimento e resfriamento do disco de freio ventilado serão estudados de forma analítica e comparativa através de cálculos, gráficos e uma planilha semiautomatizada. A análise consiste em comparar numericamente o desempenho dinâmico e térmico dos dois principais veículos populares mais vendidos no ano de 2020, Onix 1.0 e HB20 1.6, afim de se obter uma conclusão de qual veículo é mais eficiente e quais as condições de contorno que mais facilitam ou dificultam o resfriamento.

3.1 Geometria, modelo, material e dimensões do disco de freio

Os modelos de veículos selecionados como já mencionado anteriormente, foram o Onix 1.0 2020 e o HB20 1.6 2020, ambos os mais vendidos no ano de 2020 na categoria de carros populares no Brasil. A escolha se da pelo fato de o mercado de veículos seminovos estar aquecido e ao grande número de vendas dos respectivos modelos. Os discos de freio estudados se assemelham em muito em suas características gerais, possuem dimensões muito próximas, sendo assim, os pequenos detalhes que os diferenciam são as principais características e condições de contorno que apontam seus resultados diferentes. As dimensões e principais características dos discos estudados foram colhidas no catálogo da fabricante Fremax conforme Figura 6.

Figura 6 – Discos de freio ventilado.



a) Chevrolet Onix

b) Hyundai HB20

Fonte: Fremax (2022)

Na Tabela 1 a seguir é possível verificar as dimensões acerca do disco de freio do Chevrolet Onix. Na Tabela 2 é apresentado as dimensões do Hyundai HB20.

Tabela 1 – Dimensões do disco de freio – Chevrolet Onix.

Dimensão	Comprimento
Diâmetro externo (mm)	256
Diâmetro interno (mm)	125,2
Quantidade de canais	30
Largura de entrada do canal (mm)	14,8
Largura de saída do canal (mm)	7,2
Altura do canal (mm)	6,6

Fonte: Autor (2022)

Tabela 2 – Dimensões do disco de freio – Hyundai HB20.

Dimensão	Comprimento
Diâmetro externo (mm)	256
Diâmetro interno (mm)	125
Quantidade de canais	30
Largura de entrada do canal (mm)	14,2
Largura de saída do canal (mm)	6,9
Altura do canal (mm)	5,9

Fonte: Autor (2022)

As principais dimensões dos canais dos dois discos ventilados utilizados no presente trabalho, como o comprimento do canal (l), área de entrada (A_e), área de saída (A_s), perímetro de entrada (p_e), perímetro de saída (p_s), área média (A_m), perímetro médio (p_m) são representados na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões dos canais de ventilação.

Dimensão	Onix	HB20
Comprimento do canal (mm)	65,40	65,50
Área de entrada (mm²)	97,68	83,78
Área de saída (mm²)	47,52	40,71
Perímetro de entrada (mm)	42,80	40,20
Perímetro de saída (mm)	27,60	25,60
Área média (mm²)	72,60	62,24
Perímetro médio (mm)	35,20	32,90

Fonte: Autor (2022)

O material escolhido para estudo foi o ferro fundido do tipo FC-150, que apresenta a grafita como principal elemento, elemento esse que possui a característica e capacidade de amortecimento de vibrações e condutividade térmica. As propriedades físicas do ferro fundido utilizados, como a densidade (ρ_f), calor específico (c_f), coeficiente de expansão térmica linear (α_f) e condutividade térmica (k_f) são representados a seguir na Figura 7.

Figura 7 – Propriedades Físicas de Ferros Fundidos Cinzentos

Característica			Classe (EN-GJL-)									
			150	200	250	300	350					
Densidade	ρ	g/cm ³	7,10	7,15	7,20	7,25	7,30					
Calor específico	C	J/(kg.K)	460									
								535				
Coefic. expansão térmica linear	α	$\mu\text{m}/(\text{m.K})$	10,0									
								11,7				
								13,0				
Condutividade térmica	λ	W/(m.K)	52,5	50,0	48,5	47,5	45,5					
			a 200°C	51,0	49,0	47,5	46,0	44,5				
			a 300°C	50,0	48,0	46,5	45,0	43,5				
			a 400°C	49,0	47,0	45,0	44,0	42,0				
			a 500°C	48,5	46,0	44,5	43,0	41,5				

Fonte: Guesser (2003)

3.2 Dinâmica de frenagem

A dinâmica de frenagem, conforme Wong (2008) pode ser considerada uma das características mais importantes do comportamento de um veículo, pois está diretamente relacionada com a segurança onde há cada vez mais estudos em busca da melhoria do seu desempenho. Na dinâmica de frenagem, os aspectos mais importantes são a distância de frenagem, o tempo de frenagem e a sua máxima desaceleração, aspectos esses que dependem diretamente das características do sistema de freio, bem como o seu tipo, sua distribuição da força de frenagem, geometria do veículo e características do pavimento que o pneu irá rodar. No presente trabalho os cálculos foram desenvolvidos seguindo as características e condições de contorno apresentadas a seguir e complementadas na Tabela 4.

- A massa específica do ar (ρ_a) é de 1,165 kg/m³;
- Frenagem de emergência;
- A velocidade inicial (ϑ_i) no processo de frenagem é igual a 80 km/h;
- A velocidade do ar será desconsiderada;

Tabela 4 – Condições de contorno.

Condição de contorno	Onix	HB20
Massa do veículo (kg)	1037	990
Massa dos ocupantes (5 pessoas – 80 kg) (kg)	400	400
Massa total (kg)	1437	1390
Coeficiente de arrasto (Cx)	0,33	0,33
Área projetada da seção frontal (Af) (m ²)	2,44	2,29
Área de contato pista/disco (Acontato) (m ²)	0,0254	0,0233

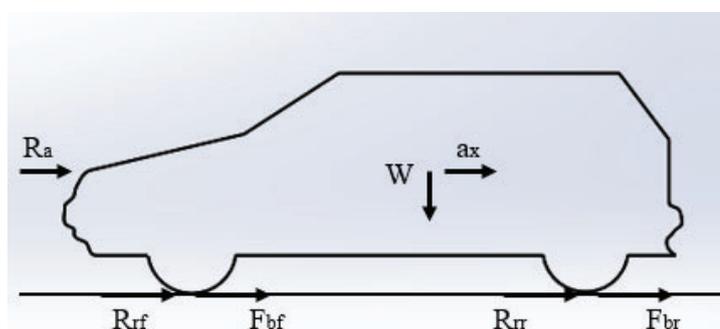
Fonte: Autor (2022)

3.2.1 Máxima desaceleração

Conforme mencionado anteriormente, a máxima desaceleração é um dos aspectos mais importantes na dinâmica de frenagem, tal importância se justifica, pois, para projetar um sistema de frenagem, é importante que a roda não trave prematuramente em um dos eixos, principalmente no eixo traseiro, segundo Wong (2008), isso faz com que o veículo perca a estabilidade de direção. Em caso de travamento primário do eixo dianteiro, resultará na perda do controle da direção, impedindo o motorista de manobrar neste ponto, mas sem perder a estabilidade direcional.

A desaceleração do veículo pode ser calculada utilizando-se a segunda lei de Newton. No presente trabalho as principais forças consideradas são: peso do veículo (W), resistência aerodinâmica (R_a), desaceleração do veículo (a_x), força de frenagem no eixo dianteiro (F_{bf}), força de frenagem do eixo traseiro (F_{br}), resistência à rolagem no pneu dianteiro (R_{rf}) e resistência à rolagem no pneu traseiro (R_{rr}). A Figura 8 ilustra as forças aplicadas no veículo.

Figura 8 – Forças agindo durante o processo de frenagem.



Fonte: Hoffmann (2018)

Segundo Hoffmann (2018), as forças de resistência à rolagem podem ser simplificadas e consideradas iguais para os dois eixos, portanto a força de resistência à rolagem (R_r) pode ser calculada em Newton (N) através da Equação 1, onde (f_r) é o coeficiente de resistência a rolagem e W o peso do veículo (N).

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

Conforme Nicolazzi et al (2012), o coeficiente de resistência a rolagem pode ser calculado através da Equação 2.

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

Onde v é a velocidade (m/s) e os coeficientes a e b variam conforme o tipo de pneu utilizados de acordo com a Tabela 5 onde segundo Nicolazzi et al (2012) os valores de a são mais elevados para pneus de alta histerese, que é a capacidade do pneu se deformar e aquecer ao entrar em contato com a pista, consumindo energia em forma de calor. No presente trabalho a análise será realizada considerando os coeficientes para pneus normais.

Tabela 5 - Coeficientes a e b em função do tipo de pneu.

	a	b
Pneus normais	0,0150	0,052
Pneus de alta histerese	0,0258	0,052

Fonte: Nicolazzi et al (2012)

Segundo Wong (2008) a resistência aerodinâmica (R_a) é o estudo de fluidos gasosos, que se resume ao fluxo de ar e das forças exercidas por ele sobre o veículo e pode ser calculada em Newton (N) através da Equação 3.

$$R_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot v^2 \cdot C_x \cdot A_f \quad (3)$$

Onde ρ_a é a massa específica do ar (kg/m^3), C_x é coeficiente de arrasto e A_f é a área projetada da seção frontal do veículo (m^2).

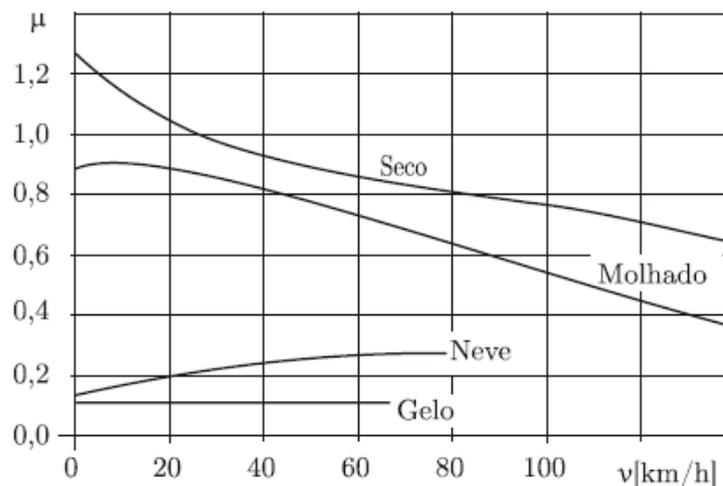
Wong (2008) conclui que a força de frenagem (F_b), calculada em Newton (N) pode ser representada, portanto, pela Equação 4.

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

Onde μ indica o coeficiente de atrito entre o pneu e a pista. Um ponto importante a ressaltar é que no presente trabalho a força de frenagem calculada na Equação 4 não ocasionará o travamento das rodas.

Nicolazzi et al (2012) mostra que vários fatores influenciam o valor do coeficiente de atrito, sendo os principais: o tipo de pista, tipo de pneu, velocidade do veículo e estado da banda de rodagem. Os valores do coeficiente de atrito entre pneu/pista em função da velocidade para diferentes tipos de pista podem ser obtidos na Figura 9.

Figura 9 – Coeficiente de atrito entre pneu/pista para diferentes condições.



Fonte: Nicolazzi et al (2012)

No presente trabalho, o valor para o coeficiente de atrito será de 0,85 que corresponde a velocidade de 80 km/h em uma situação de pista seca.

Através dos cálculos desenvolvidos anteriormente é possível calcular a desaceleração do veículo através da Equação 5. Como mencionado anteriormente, a desaceleração do veículo também é um aspecto muito importante para a dinâmica de frenagem, pois correlacionam à resistência aerodinâmica, resistência à rolagem e a força de frenagem com a massa (m) do veículo em quilogramas. A desaceleração do veículo é obtida em (m/s^2).

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

3.2.2 Distância e tempo de frenagem

O estudo da distância de frenagem, como mencionado anteriormente, é um aspecto de grande importância no projeto do sistema de frenagem, visto que, está diretamente relacionado ao tempo do processo de frenagem, aspecto esse também já mencionado e de suma importância. O tempo de frenagem é a soma do tempo de reação do motorista e o tempo de frenagem, como o presente trabalho tem como foco o estudo dinâmico e térmico dos veículos mencionados anteriormente, o tempo de reação não será considerado no desenvolvimento dos cálculos.

Segundo Gillespie (1992), o cálculo da distância de frenagem (d) em metros pode ser expressado pela Equação 6, já o tempo de frenagem (t_f) em segundos pela Equação 7.

$$d = \frac{v^2}{10 \cdot \mu} \quad (6)$$

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

3.2.3 Energia de frenagem, potência de frenagem e fluxo térmico

Conforme Limpert (1999) durante o processo de frenagem, a energia cinética do veículo é convertida em energia térmica através da força de atrito gerada entre as pastilhas de freio e o disco de freio. A energia cinética (E_b) medida em Joule pode ser obtida através da Equação 8.

$$E_b = \frac{k \cdot m \cdot v(t)^2}{2} \quad (8)$$

Onde $v(t)$ é a velocidade do veículo variando com o tempo e k indica uma correção para a massa de inércia dos componentes do veículo que sofrem rotação, que varia entre 1,05 a 1,15 para veículos leves. Para o presente trabalho, foi escolhido um valor intermediário de $k = 1,10$.

Conforme Silva (2016) os freios dianteiros são responsáveis por aproximadamente 70% da frenagem total, sendo assim, a porcentagem de energia cinética para apenas um disco de freio (E_{bd}) que será utilizada é de 35%, portanto, a Equação 8 pode ser reescrita por meio da Equação 9.

$$E_{bd} = \frac{(0,7 \cdot E_b)}{2} \quad (9)$$

Devido a energia cinética aplicada em apenas um disco de freio, é possível, através da Equação 10, obter-se a potência de frenagem (P_{bd}) a qual correlaciona a energia cinética com o tempo de frenagem e é medido em Watt (W).

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

O próximo passo a ser realizado é o cálculo da velocidade do veículo variando com o tempo, o qual considera a desaceleração do veículo como constante. A Equação 11 elucida o respectivo cálculo.

$$v(t) = v_i - a_x \cdot t_f \quad (11)$$

Por fim, realizando todas as substituições necessárias com as Equações 9, 10 e 11, é possível obter-se a potência de frenagem final aplicada no disco de freio, a mesma é apresentada na Equação 12.

$$P_{bd} = \frac{0,7 \cdot k \cdot m \cdot a_x \cdot (\vartheta_i - a_x \cdot t_f)}{2} \quad (12)$$

É importante ressaltar que conforme Ciolfi (2010), as pastilhas de freio não trabalham igualmente na parte externa e interna do disco, devido à perda de paralelismo ao entrar em contato com o disco de freio, com tendência em possuir maior contato na região externa, gerando maior fluxo de calor nessa região. No presente trabalho, a área de contato em ambos os lados do disco é considerada a mesma, mas o fluxo de calor atribuído a cada pista segue os resultados segundo Ciolfi (2010), onde a potência de frenagem das pistas externa e interna corresponde a 57,5% e 42,5%, respectivamente. Portanto, a Equação 12 pode ser reescrita e representada pelas Equações 13 e 14.

$$P_{bdexterna} = 0,575 \cdot P_{bd} \quad (13)$$

$$P_{bdinterna} = 0,425 \cdot P_{bd} \quad (14)$$

Conforme Hoffmann (2018), através das Equações 13 e 14 é possível obter o fluxo de calor aplicado em cada pista do disco durante a frenagem, onde a potência de frenagem em cada pista deve ser dividida pela área de contato do disco que recebe a fricção ($A_{contato}$). Sendo assim, a Equação 15 elucida o fluxo de calor aplicado na pista externa do disco e a Equação 16 o fluxo de calor aplicado na pista interna do disco de freio. Ambas as equações remetem o valor em (W/m^2).

$$q''_{externa} = \frac{P_{bdexterna}}{A_{contato}} \quad (15)$$

$$q''_{interna} = \frac{P_{bdinterna}}{A_{contato}} \quad (16)$$

3.3 Coeficiente de transferência de calor por convecção

Para a análise desejada no respectivo trabalho, acerca do resfriamento do disco de freio, é necessário obter o coeficiente de transferência de calor por convecção. Neste trabalho, a principal forma de troca de calor do disco de freio é a convecção forçada, sendo assim, não será considerado para fins de cálculo a transferência de calor por condução e irradiação. Para analisar o coeficiente de convecção, devem ser previstos alguns parâmetros, sendo as propriedades do fluido, geometria da superfície e condição de escoamento.

Segundo Limpert (1999), as equações para convecção forçada que serão apresentadas a seguir, foram obtidas de maneira experimental e se aplicam para freios a disco que não estejam obstruídos pelo pneu, aro ou pinça. Limpert (1999) ainda afirma que os resultados obtidos são de valor aproximado, podendo variar entre 10 a 30%.

Conforme Limpert (1999) o cálculo do valor do coeficiente de convecção (h) é dado por meio das Equações 17 e 18, que dependerão do tipo de escoamento existente (laminar ou turbulento). A Equação 17 apresenta o cálculo para o escoamento laminar e a Equação 18 apresenta o cálculo para o escoamento turbulento. O escoamento só será turbulento para valores de $Re > 10^4$.

$$h = 1,86 \cdot (Re \cdot Pr)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{d_h}{l}\right)^{0,33} \cdot \left(\frac{k_a}{d_h}\right) \quad (17)$$

$$h = 0,023 \cdot \left[1 + \left(\frac{d_h}{l} \right)^{0,67} \right] Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{k_a}{d_h} \right) \quad (18)$$

Onde Pr é o número de Prandtl, d_h é o diâmetro hidráulico (m), k_a é a condutividade térmica do ar (W/m.K), l o comprimento do canal (m) e Re é o número de Reynolds, o qual é calculado através da Equação 19.

$$Re = \frac{\rho \cdot d_h \cdot \vartheta_{canal,m}}{\mu_d} \quad (19)$$

Onde $\vartheta_{canal,m}$ é a velocidade média do ar dentro dos canais (m/s) e μ_d é a viscosidade dinâmica do ar (kg/m.s).

Limpert (1999) propõem que, para calcular o valor da velocidade média do ar nos canais, é necessário obter o valor da vazão volumétrica de ar na entrada (\dot{V}_e) e na saída (\dot{V}_s). As Equações 20 e 21 representam os respectivos cálculos visto que, os discos de freio em estudo possuem área de entrada e saída diferentes.

$$\dot{V}_e = 0,00147 \cdot n_t [(D^2 - d_i^2) A_e]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

$$\dot{V}_s = 0,00147 \cdot n_t [(D^2 - d_i^2) A_s]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Onde n_t é a rotação por minuto do disco (RPM), D é o diâmetro externo (m) e d_i o diâmetro interno do disco (m). A rotação do disco de freio é obtida através da Equação 22.

$$n_t = \frac{60 \cdot \vartheta(t)}{2\pi \cdot r_{pneu}} \quad (22)$$

Onde r_{pneu} é o raio do pneu. No presente trabalho o pneu utilizado foi o 185/55R15, que possui um raio de 310 mm.

Segundo Limpert (1999), com as equações 20, 21 e 22 é possível determinar a velocidade do ar na entrada do canal (ϑ_e), velocidade do ar na saída do canal (ϑ_s), resultando assim na velocidade média dos canais (ϑ_m). As Equações, 23, 24 e 25 elucidam o mencionado em (m/s).

$$\vartheta_e = \frac{\dot{V}_e}{A_e} \quad (23)$$

$$\vartheta_s = \frac{\dot{V}_s}{A_s} \quad (24)$$

$$\vartheta_{canal,m} = \frac{\vartheta_e + \vartheta_s}{A_{m,x}} \quad (25)$$

Conforme Silva (2016) o diâmetro hidráulico (d_h) é um parâmetro utilizado para estimar o raio/diâmetro de tubos e canais que não possuam seção transversal circular. Sua representação pode ser observada através da Equação 26, que remete seu valor em metros.

$$d_h = \frac{4 \cdot A_{m,x}}{P_{m,x}} \quad (26)$$

Onde $A_{m,x}$ é a área média dos canais e $P_{m,x}$ o perímetro médio dos canais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir deste, serão apresentados os resultados acerca dos cálculos dinâmicos e térmicos desenvolvidos sobre a bibliografia de referência. Para a resolução dos respectivos cálculos, foi desenvolvido uma planilha via software Excel com a intenção de semi automatizar futuros cálculos, sendo necessário apenas entrar com as informações sobre as condições de contorno do disco de freio a ser estudado. Os respectivos resultados obtidos no trabalho serão apresentados em forma de gráficos e tabelas.

4.1 Parâmetros da dinâmica de frenagem

Utilizando as equações e o desenvolvimento apresentados na seção 3 do presente trabalho, foram obtidos os valores apresentados na Tabela 6, que representam os principais aspectos acerca da dinâmica de frenagem.

Tabela 6 – Aspectos dinâmicos.

Aspectos dinâmicos	Onix	HB20
ϑ_i (m/s)	22,22	
R_a (N)	231,62	217,38
R_r (N)	46,64	45,11
f_r	0,0033	0,0033
F_b (N)	11.982,42	11.590,52
A_x (m/s ²)	8,53	8,52
d (m)	58,09	

Fonte: Autor (2022)

Analisando os resultados dinâmicos gerais apresentados na Tabela 6, pode-se observar um valor alto para ambos os veículos acerca da desaceleração, porém o valor elevado é justificado visto que os veículos foram colocados em uma situação de frenagem de emergência em alta velocidade. A distância de frenagem é correlacionada com a taxa de desaceleração, sendo que, conforme apontado por Belhocine e Bouchetara (2011), os valores obtidos estão dentro do recomendado.

A Tabela 7 demonstra a seguir os valores obtidos com a velocidade em relação ao tempo de frenagem.

Tabela 7 – Velocidade em relação ao tempo

Tempo (s)	Onix		HB20	
	Velocidade (m/s)	Velocidade (km/h)	Velocidade (m/s)	Velocidade (km/h)
ϑ_i	22,22	80	22,22	80
0,5	17,95	64,64	17,96	64,65
1	13,69	49,28	13,70	49,30
1,5	9,42	33,92	9,43	33,95
2	5,15	18,56	5,16	18,60
2,5	0,89	3,21	0,90	3,25
ϑ_f	0	0	0	0

Fonte: Autor (2022)

4.2 Parâmetros da análise térmica

Utilizando as equações apresentadas na seção 3, foi possível obter os resultados da energia cinética, a potência de frenagem e o fluxo de calor aplicado no disco durante o período de frenagem. Os resultados para o Chevrolet Onix são apresentados na Tabela 8, bem com os resultados para o Hyundai HB20 na Tabela 9.

Tabela 8 – Parâmetros térmicos – Chevrolet Onix

Chevrolet Onix							
Tempo (s)	E_b (kJ)	E_{bd} (kJ)	P_{bd} (kW)	$P_{bd\text{externa}}$ (kW)	$P_{bd\text{interna}}$ (kW)	q''_{externa} (W/m ²)	q''_{interna} (W/m ²)
ϑ_i	390,29	136,603	104,89	60,31	44,58	2374,63	1755,16
0,5	254,83	89,189	84,75	48,74	36,02	1918,76	1418,22
1	148,13	51,84	64,62	37,15	27,46	1462,90	1081,28
1,5	70,19	24,56	44,48	25,58	18,90	1007,03	744,33
2	21,03	7,35	24,34	13,99	10,35	551,17	407,38
2,5	0,628	0,220	4,21	2,42	1,78	95,30	70,44
ϑ_f	0	0	0,04	0,02	0,01	0,91	0,67

Fonte: Autor (2022)

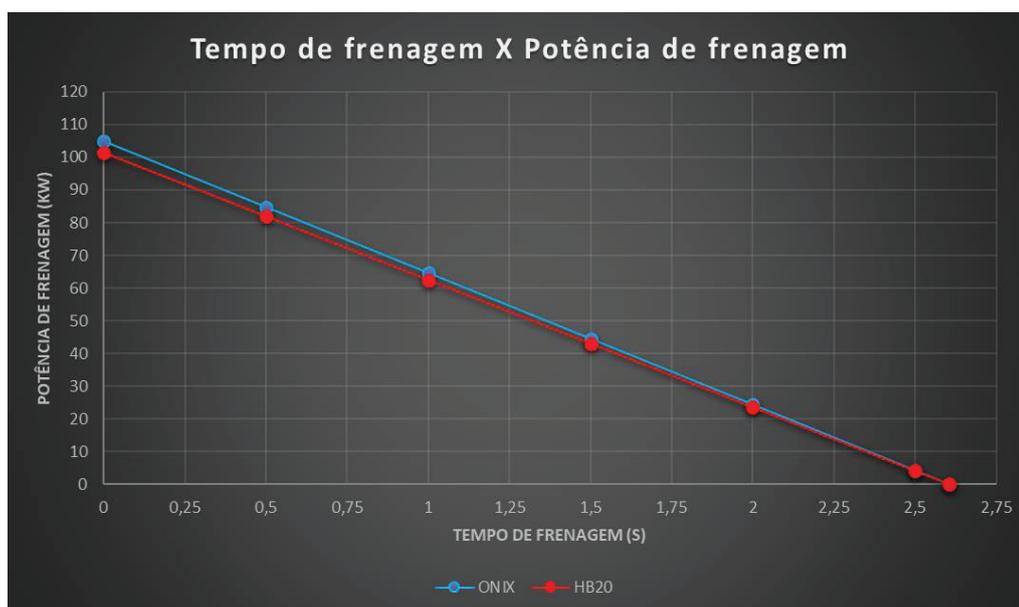
Tabela 9 – Parâmetros térmicos – Hyundai HB20

Hyundai HB20							
Tempo (s)	E_b (kJ)	E_{bd} (kJ)	P_{bd} (kW)	$P_{bd\text{externa}}$ (kW)	$P_{bd\text{interna}}$ (kW)	q''_{externa} (W/m ²)	q''_{interna} (W/m ²)
ϑ_i	377,53	132,14	101,40	58,31	43,09	2502,58	1849,74
0,5	246,55	86,29	81,95	47,12	34,83	2022,43	1494,83
1	143,38	50,18	62,49	35,94	26,56	1542,26	1139,93
1,5	68,01	23,80	43,03	24,75	18,29	1062,11	785,04
2	20,42	7,14	23,58	13,56	10,02	581,95	430,14
2,5	0,624	0,218	4,12	2,37	1,75	101,78	75,24
ϑ_f	0	0	0,11	0,06	0,04	2,76	2,04

Fonte: Autor (2022)

Através dos Gráficos 1, 2 e 3 pode-se observar de uma forma mais clara a variação dos valores obtidos nos respectivos cálculos.

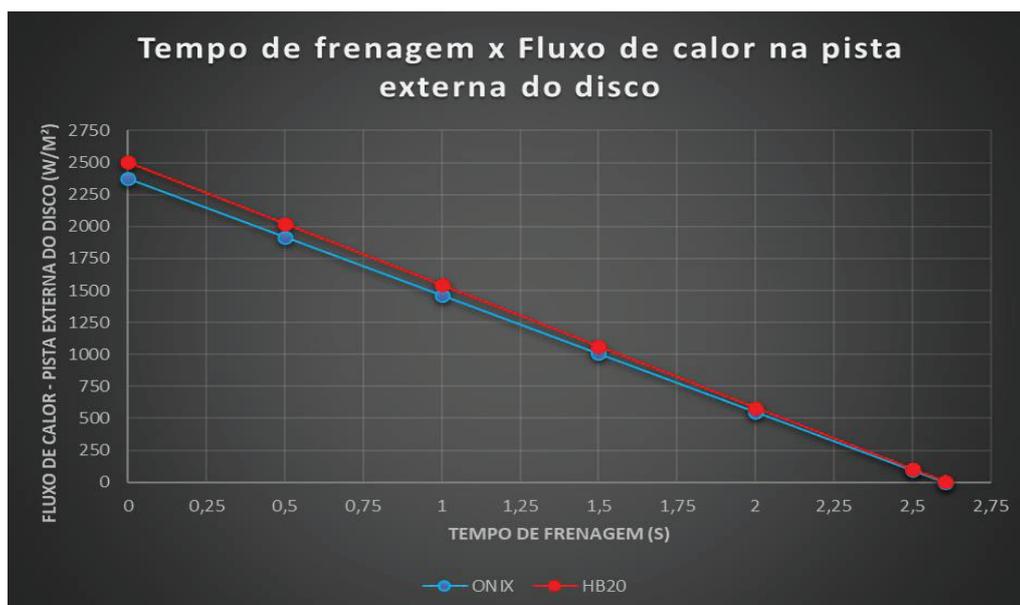
Gráfico 1 – Tempo de frenagem X Potência de frenagem



Fonte: Autor (2022)

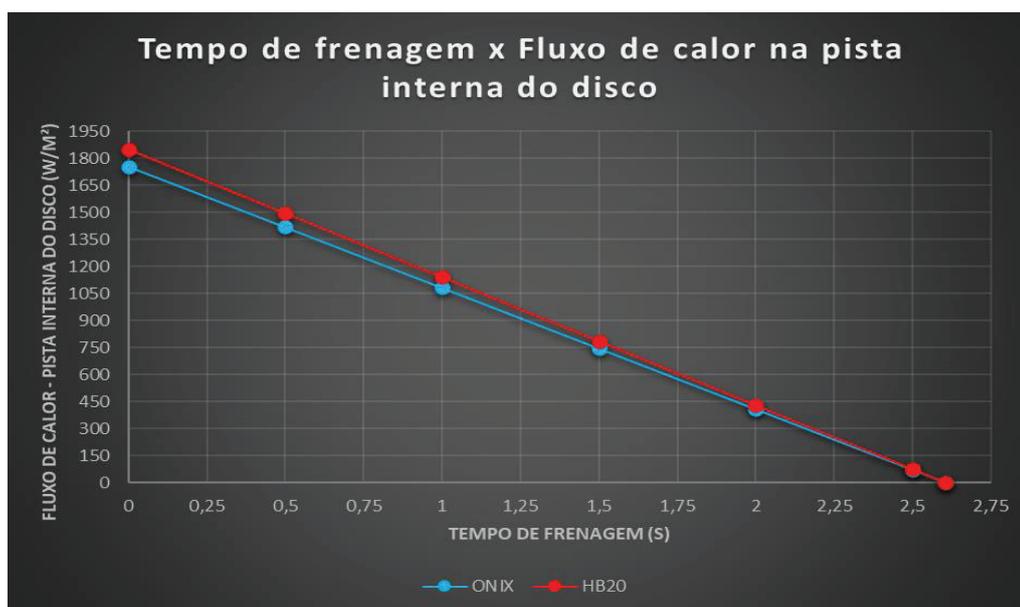
O Gráfico elucidada de forma prática a variação geométrica existente entre ambos os veículos, fator esse que faz com que o Chevrolet Onix possua uma maior potência de frenagem, sendo superior em aproximadamente 450 Watts.

Gráfico 2 – Tempo de frenagem X Fluxo de calor na pista externa do disco



Fonte: Autor (2022)

Gráfico 3 – Tempo de frenagem X Fluxo de calor na pista interna do disco



Fonte: Autor (2022)

Os Gráficos 2 e 3 demonstram a variação no fluxo de calor interno e externo da pista do disco de freio, em ambos os gráficos é possível observar a menor taxa para o Chevrolet Onix devido as suas propriedades geométricas, aonde o mesmo possui uma seção frontal 6,6% maior que o HB20 e possui canais de ventilação em seu disco de freio com dimensões maiores, fazendo com que se obtenha uma maior taxa de resfriamento e consequentemente um menor fluxo de calor.

Em seguida, foi realizado o cálculo de parâmetros físicos e coeficientes de transferência de calor necessários para a realização das comparações térmicas. Na Tabela 10 são apresentados os resultados obtidos para o Chevrolet Onix, bem como na Tabela 11 são apresentados os resultados do Hyundai HB20.

Tabela 10 – Parâmetros físico – Chevrolet Onix

Chevrolet Onix							
Tempo (s)	\dot{V}_e (m ³ /s)	\dot{V}_s (m ³ /s)	n_t (RPM)	ϑ_e (m/s)	ϑ_s (m/s)	Re	h (W/m ² .K)
ϑ_i	0,00222	0,00154	684,54	22,73	32,59	3921,29	42,18
0,5	00,179	0,00125	553,12	18,37	26,33		
1	0,00136	0,00092	421,71	14,01	20,08		
1,5	0,00094	0,00065	290,29	9,64	13,82		
2	0,00051	0,00035	158,88	5,28	7,57		
2,5	0,00001	0,00002	27,47	0,91	1,30		
ϑ_f	0	0	0,26	0,008	0,012		

Fonte: Autor (2022)

Tabela 11 – Parâmetros físico – Hyundai HB20

Hyundai HB20							
Tempo (s)	\dot{V}_e (m ³ /s)	\dot{V}_s (m ³ /s)	n_t (RPM)	ϑ_e (m/s)	ϑ_s (m/s)	Re	h (W/m ² .K)
ϑ_i	0,00205	0,00143	684,54	24,56	35,23	4533,94	46,88
0,5	0,00166	0,00115	553,19	19,84	28,47		
1	0,00126	0,00088	421,86	15,13	21,71		
1,5	0,00087	0,00061	290,52	10,42	14,95		
2	0,00047	0,00033	159,18	5,71	8,19		
2,5	0,00001	0,00002	27,84	0,99	1,43		
ϑ_f	0	0	0,75	0,027	0,038		

Fonte: Autor (2022)

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta a análise numérica comparativa do desempenho dinâmico e térmico do sistema de freio a disco dos dois veículos populares mais vendidos no Brasil no ano de 2020. A geometria de referência tem por base os modelos Chevrolet Onix 2020 e HB20 1.6 2020, ambos submetidos a uma frenagem de emergência de 80 km/h até 0 km/h. O material dos discos considerado nas análises foi o ferro fundido cinzento FC-150 e o ar como fluido de arrefecimento.

A ferramenta utilizada para o desenvolvimento dos cálculos e dos gráficos foi o programa Microsoft Excel, o qual permitiu a criação de uma planilha semi automatizada. Nesta planilha os valores de entrada e as condições de contorno devem ser fornecidas, após alimentar a planilha com todas as informações, os cálculos e os gráficos saem prontos.

Acerca dos resultados obtidos no presente trabalho e demonstrados anteriormente, compara-se os veículos selecionados e alguns parâmetros são discutidos. É importante salientar que ambos os veículos estão submetidos as mesmas condições de contorno e operação, sendo assim, chama a atenção que, apenas as pequenas variações geométricas de cada disco e de cada veículo fazem com que o número de Reynolds, o coeficiente de transferência de calor por convecção e o fluxo de calor se distanciem em questão de valores.

O veículo Chevrolet Onix possui uma área de seção frontal 6,6% maior que o seu concorrente, fato esse que provoca uma variação nos resultados obtidos. Sendo assim tal área maior fez com que a sua potência de frenagem seja maior que a do HB20. Em relação ao fluxo de calor, o Onix possui valores menores devido a sua maior área de canal, fato esse que provoca uma maior troca de calor entre o ar e o disco de freio a ser refrigerado gerando assim um menor fluxo de calor.

Desta forma, compreende-se que através deste trabalho foi possível entender a importância do estudo e da atenção, que se tem em relação ao sistema de freio a disco e suas análises dinâmicas e térmicas. Conclui-se então, que as propriedades geométricas dos veículos como um todo, bem como do disco de freio ventilado, alteram diretamente os principais aspectos térmicos do sistema de freio a disco.

A sugestão para trabalhos futuros é realizar a validação experimental do modelo utilizado neste trabalho e comparar os resultados obtidos com os resultados calculados, bem como o aperfeiçoamento da planilha de cálculos no Excel.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BELHOCINE, A.; ABDULLAH, O. I. Finite Element Analysis of Automotive Disc Brake and Pad in Frictional Model Contact. **Int J of Advanced Design and Manufacturing Technology**, v. 7/ n. 4, 2014, p. 27-42, 2014.
- BOSCH, R. **Manual de tecnologia automotiva**. 25. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.
- CANALE, A. C.; RUFINO, R. T. (1993). Estudo teórico do desempenho de um autoveículo rodoviário utilizando um sistema semi-automático. In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAIS DA TECNOLOGIA DA MOBILIDADE, 2, São Paulo, 1983. SAE Technical Paper Series 931620.
- 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.
- DAY, A. J.; NEWCOMB, T. P. (1984). The dissipation of frictional energy from the interface of an annular disk brake. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part D*. vol. 198, n. 11, p.201-209.
- DIKE, G. (1974). On optimum design of disc brake. *Journal of engineering for industry*. Vol. 96, n. 3, p.863-869.
- DUSI, F. C.; ADAS, C. A.(2001). Segurança vehicular: tendencias mundiais para sistemas de freios em veículos comerciais. In: INTERNATIONAL BRAKE COLLOQUIUM, 5, Caxias do Sul, 2001. P. 67-70.
- GILLESPIE, T. D. **Fundamental of Vehicles Dynamics**. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1992.
- GOHRING, E.; VON GLASNER, E. C. (1990). Performance comparison of drum and disc brakes for heavy-duty commercial vehicles. In: TRUCK AND BUS MEETING AND EXPOSITION, Detroit, 1990. SAE Technical Paper Series 902206.
- GUESSER, Wilson Luiz et al. Ferros Fundidos Empregados para Discos e Tambores de Freio. **Sae Brasil**. Gramado, Rs, p. 1-6. 2003.
- HEISLER, Heinz. *Advanced vehicle technology*. Warrendale: Butterworth-Heinemann, 2002. 656 p.
- HOFFMANN, Gabriel Julio. **Análise numérica do desempenho térmico de discos de freio do tipo sólido e ventilado**. 2018. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.
- 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.

LIMPERT, R. **Brake and design and safety**. 2.ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers Inc., 1999.

MARKETING. **Quais são os tipos de discos de freio?** 2017. Disponível em: <<http://www.grupopmz.com/sistema-de-freio/quais-sao-os-tipos-de-discos-de-freio/>>. Acesso em: 17 abr. 2021.

NAERHEIM, Y.; PAN, J.; MIN, P. (1999). A tribometer for studying friction films in brakes. In: COLOQUIUM INTERNACIONAL DE FREIOS, 4, Caxias do Sul, 1999, p.7-20.

NEWCOMB, T. P. (1960). Temperatures reached in disc brakes. *Journal of mechanical engineering Science*, vol.2, n.3, p.167-177.

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.

ROCHA, G. **Componentes de um sistema de freio**. 2009. Disponível em: <<http://www.infomotor.com.br/site/2009/04/componentes-do-sistema-de-freio/>>. Acesso em: 14 abr. 2021.

RODRIGUEZ, H. **Qual a diferença entre freios ventilados, perfurados e sólidos?** 2018. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/qual-a-diferenca-entre-os-freios-ventilados-perfurados-e-solidos/>>. Acesso em: 17 abr. 2021.

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.

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.

TRICHÊS JR, M.; JORDAN, R.; GERGES, S. N. Y.; TOUSSI, S. (2001). Análise modal de pastilhas de freio considerando os efeitos do amortecimento e da temperatura. In: International Brake Colloquium, 5, Caxias do Sul, 2001. P. 52-58.

Wong, J.Y. **Theory of Ground Vehicles**. Hoboken, N.J. Wiley, 2008.

Anexo A

Em anexo planilha desenvolvida para os respectivos cálculos apresentados no trabalho.