

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUÍS FELIPE MACEDO SILVA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL DA TEMPERATURA DE
DISCOS DE FREIO VENTILADOS E SÓLIDOS**

SÃO LUÍS
2017

LUÍS FELIPE MACEDO SILVA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL DA TEMPERATURA DE
DISCOS DE FREIO VENTILADOS E SÓLIDOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Esp. Marco Selner
Mesquita Viana

SÃO LUÍS
2017

LUÍS FELIPE MACEDO SILVA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL DA TEMPERATURA DE
DISCOS DE FREIO VENTILADOS E SÓLIDOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: ___/___/2017

BANCA EXAMINADORA

Prof. Esp. Marco Selner Mesquita Viana (Orientador)

Universidade Estadual do Maranhão

Prof^a. Msc. Núbia Célia Bergê Cutrim

Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Carlos Ronyhelton Santana de Oliveira

Universidade Estadual do Maranhão

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pelo dom da vida e por tudo e todos que Ele tem colocado em minha vida, pelos ensinamentos e oportunidades que me levaram a mais esta conquista.

Aos meus familiares, mãe e pai, e aos demais, pelo incentivo, dedicação, e palavras de conforto nos momentos necessários.

Ao meu orientador e a todo o quadro de professores da Universidade Estadual do Maranhão, que de forma direta e indireta cooperaram com minha pessoa e para o desenvolvimento de excelentes profissionais oriundos desta instituição.

Aos funcionários de toda esta instituição, que contribuíram de modo significativo, durante toda essa jornada, meu muito obrigado.

Aos amigos e outros companheiros que colaboraram substancialmente para a realização deste trabalho, os meus mais sinceros agradecimentos.

*“ Os dias prósperos não vêm por acaso;
nascem de muita fadiga e persistência. ”*

Henry Ford

RESUMO

Este trabalho apresenta uma concepção a respeito da temperatura gerada pelo atrito nos discos de freio automotivo. Tendo em vista a necessidade da experimentação na melhor visualização dos fenômenos de aquecimento e resfriamento, além da distribuição de zonas de calor, atrito gerado e eficiência do conjunto de frenagem frente as mais diversas situações rotineiramente enfrentadas pelos mesmos, foram colocados à prova dois tipos de discos de freio automotivos: sólido e ventilado. Após os testes práticos realizados em um veículo, foram feitas simulações computacionais dos dois discos, afim de desenvolver, aprimorar e/ou comparar os resultados obtidos através da experimentação, em prol de um maior conhecimento dos princípios e fenômenos que circundam os componentes de frenagem de equipamentos.

Palavras-chave: Freios automotivos, temperatura, simulação computacional, calor, atrito.

ABSTRACT

This paper presents a conception about the temperature generated by the friction in the automotive brake discs. Considering the necessity of experimentation in the best visualization of the phenomena of heating and cooling, in addition to the distribution of zones of heat, generated friction and efficiency of the braking set in front of the most different situations routinely faced by them, two types of Automotive brake discs: solid and ventilated. After the practical tests carried out on a vehicle, computational simulations of the two disks were made to develop, improve and/or compare the results obtained through experimentation, to gain a better knowledge of the principles and phenomena that surround the braking components of equipment.

Key Words: Automotive brakes, temperature, computational simulation, heat, friction.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de atrito dinâmico para diferentes materiais de fricção.	21
Tabela 2 - Propriedades de diferentes materiais de fricção.	21
Tabela 3 - Prototipação virtual na área automobilística.....	30
Tabela 4 - Pontos de Ebulição de fluidos de freio.	40
Tabela 5 - Resultados das medições das temperaturas.	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação de freios e embreagens.	14
Figura 2 - Funcionamento do Freio a disco.....	15
Figura 3 - Sistema de freio automotivo.....	16
Figura 4 - Detalhe dos componentes de um sistema de freio.	16
Figura 5 - Disco de freio riscado, causado por sujeira ou material de fricção inadequado.....	17
Figura 6 - Freio a disco ventilado no sistema.....	17
Figura 7 - Desgaste por adesão.....	22
Figura 8 - Desgaste por abrasão.....	23
Figura 9 - Desgaste por corrosão.....	23
Figura 10 - Transferência de Calor por Condução Unidimensional.....	25
Figura 11 - Condução de Calor Unidimensional em placa plana: Sistema e volume de controle.....	25
Figura 12 - Transferência de Calor por Convecção.....	26
Figura 13 - Placa semi-finita sob efeito de transferência de calor por Condução e Convecção.	26
Figura 14 - Simulação de distribuição de Calor em um disco de freio.....	29
Figura 15 - Servo Freio: Componentes.	31
Figura 16 - Vista do disco de freio.....	33
Figura 17 - Funcionamento: ação do êmbolo e pastilha contra o disco.	33
Figura 18 - Dimensões dos discos de freio segundo catálogo.	34
Figura 19 - Pastilhas de freio.....	35
Figura 20 - Pinça de freio Fixa (esquerda) e Pinça de freio Deslizante (direita).....	36
Figura 21 - Vista explodida da pinça de freio flutuante.....	37
Figura 22 – Cilindro-mestre em corte.	38
Figura 23 – Pirômetro.....	41
Figura 24 - Temperatura obtida na frenagem com disco ventilado à 40 km/h.....	45
Figura 25 - Temperatura obtida na frenagem com disco ventilado a 80 km/h.....	46
Figura 26 - Temperatura obtida na frenagem com disco sólido a 40 km/h.....	47
Figura 27 - Temperatura obtida na frenagem com disco sólido a 80 km/h.....	47
Figura 28 - Temperatura após frenagens consecutivas com disco ventilado.	48
Figura 29 - Temperatura após frenagens consecutivas com disco sólido.....	48

Figura 30 - Disco de freio ventilado: Vistas geométricas e resultado para 40 km/h. .50	
Figura 31 - Disco de freio ventilado: Detalhe da malha e gradientes de temperatura (40 km/h).	51
Figura 32 - Disco de freio ventilado: Vistas geométricas e resultado para 80 km/h. .51	
Figura 33 - Disco de freio ventilado: Detalhe da malha e gradientes de temperatura (80 km/h).	52
Figura 34 - Disco de freio sólido: Vistas geométricas e resultado para 40 km/h.	52
Figura 35 - Disco de freio sólido: Detalhe da malha e gradientes de temperatura (40 km/h).	53
Figura 36 - Disco de freio sólido: Vistas geométricas e resultado para 80 km/h.	53
Figura 37 - Disco de freio sólido: Detalhe da malha e gradientes de temperatura (80 km/h).	54

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Objetivos	13
1.1.1. Geral:.....	13
1.1.2. Específicos:	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1. Conceitos gerais	14
2.2. Taxa de desaceleração	18
2.3. Princípio de funcionamento: atrito	19
2.3.1. Desgaste dos materiais de atrito	22
2.4. Ponto de vista térmico e transferência de calor	24
3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DE DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS	28
4. MATERIAL E MÉTODOS	31
4.1. Servo freio	31
4.2. Disco de freio	32
4.3. Pastilhas de freio	34
4.4. Pinça de freio	36
4.5. Cilindro mestre	37
4.6. Fluido de freio	39
4.7. Pirômetro	41
4.8. Proposição dos experimentos e formulação matemática	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
6. CONCLUSÃO	56
REFERÊNCIAS	57

1. INTRODUÇÃO

Os primeiros freios automotivos eram simples adaptações dos freios usados nas carruagens na virada do século, onde uma alavanca e uma sapata externa atuavam diretamente no pneu. Posteriormente surgiram os freios de cinta de aço externa envolvendo o cubo da roda ou tambor. Na década de 1920, com os automóveis ganhando mais potência e velocidade, os freios passaram a ter acionamento hidráulico.

Atualmente existem os mais variados tipos de freios, além de variados tipos de acionamento, materiais abrasivos, entre outros componentes. Neste trabalho pretende-se abordar a variação quanto a forma de construção um desses componentes: o disco de freio – componente que gira solidário a roda e que recebe os esforços de frenagem provenientes de outros componentes que serão melhor abordados no decorrer do trabalho – possui aletas para seu arrefecimento propiciando assim uma melhor eficácia de frenagem, além da redução do peso do componente. Tais aletas podem ser radialmente ao disco (comumente utilizadas em veículos populares e menos necessitados de carga de frenagem, tendo em vista a questão financeira), como também axialmente (geralmente quando se necessita maior arrefecimento e carga de frenagem, os quais o outro modelo não supriria).

As tecnologias presentes na indústria automotiva com relação a sistemas de freio têm evoluído significativamente ao longo dos anos. Segundo INFANTINI (2008), apesar da elevada tecnologia agregada e do avanço tecnológico das últimas décadas na indústria automobilística, o projeto de novos materiais de fricção, lonas e pastilhas de freio é um constante desafio.

Haja visto que as necessidades do homem moderno com relação ao transporte de um valor superior de carga em equipamentos com mais segurança e mais rapidamente, só tendem ao crescimento, é de fundamental importância que sejam desenvolvidas técnicas cada vez mais eficientes e eficazes para a utilização dos sistemas de freios em tais veículos.

Deve-se também, atentar-se ao fato de que existem vários fatores a serem levados em consideração para se obter materiais de frenagem utilizáveis, bem como fatores externos que podem comprometer a vida útil e a utilização dos mesmos, como declives muito acentuados, tempo excessivo de utilização, condições inadequadas de

instalação e utilização, condições de pavimentação para o caso de veículos automotores.

Os principais requisitos que um sistema de freios tem que atender estão resumidos como segue (segundo manual COBREQ):

- Estabilidade do coeficiente de fricção em uma faixa extensa de temperatura;
- Baixa dependência do coeficiente de fricção na pressão de contato, velocidade e fatores ambientais;
- Boa resistência mecânica e estabilidade dimensional;
- Estado de desgaste dentro dos valores limites especificados;
- Tolerâncias do componente dentro dos valores limites especificados;
- Comportamento de desgaste aceitável dos discos e pastilhas de freio.

A temperatura é um parâmetro indispensável quando se estuda a eficiência de frenagem, pois existe uma faixa ideal de trabalho para esse sistema, ou seja, em determinadas situações o sistema de freio pode não ser tão eficaz quanto é esperado, como também pode deixar de funcionar ocasionando a não imobilização do veículo, e conseqüentemente trazendo riscos aos envolvidos.

Em virtude disso, tem-se a necessidade do aperfeiçoamento do conhecimento a respeito de tais fenômenos, os quais necessitam de instrumentos, equipamentos, métodos e mecanismos bem aplicados para que sejam bem compreendidos pelos que assim o fazem e desejam. Observando-se a oportunidade do desenvolvimento de uma bancada para o estudo desta temática, em função de certa indisponibilidade de recursos por parte dos provedores de conhecimento, tal recurso é de suma importância para o aprendizado.

O presente trabalho justifica-se em buscar respostas plausíveis e embasadas em testes prático/científicos para os questionamentos a respeito dos fenômenos relacionados ao processo de frenagem e imobilização de veículos automotores.

Tal motivo deve-se ao fato da dificuldade em se obter tais respostas de modo irrefutável em livros, sites especializados, entre outros; pois ao se fazer uma pesquisa a respeito, é muito comum se alcançar as mais variadas conclusões a respeito de tais eventos, bem como a apresentação ao corpo discente de uma nova ferramenta de estudo e aprendizado deste indispensável sistema veicular.

1.1. Objetivos

1.1.1. Geral:

- Aprofundar os conhecimentos da comunidade acadêmica a respeito de freios automotivos, aliada ao processo de prototipagem virtual, visando incentivar novos estudos e pesquisas a respeito, com os esforços voltados para obter resultados que indiquem novas formas de se utilizar os conceitos até aqui desenvolvidos ou até mesmo, se possível, fazer adaptações que possibilitem novas opções ao mercado automotivo.

1.1.2. Específicos:

- Verificar a variação de temperatura na superfície dos discos de freio utilizados nos testes, e fazer comentários a respeito, avaliando se tal variação de temperatura é benéfica ou não e quais são as vantagens ou desvantagens de tal resultado.
- Aprimorar os conhecimentos a respeito da construção, montagem, requisitos básicos para funcionamento, pontos a serem observados, além de se poder observar experimentalmente como trabalham os freios automotivos.
- Realizar comparação dos efeitos da temperatura nos discos de freio que passaram pelo processo de experimentação, com os resultados obtidos através da simulação em software de CAD/CAM (SolidWorks).

2. REVISÃO DE LITERATURA

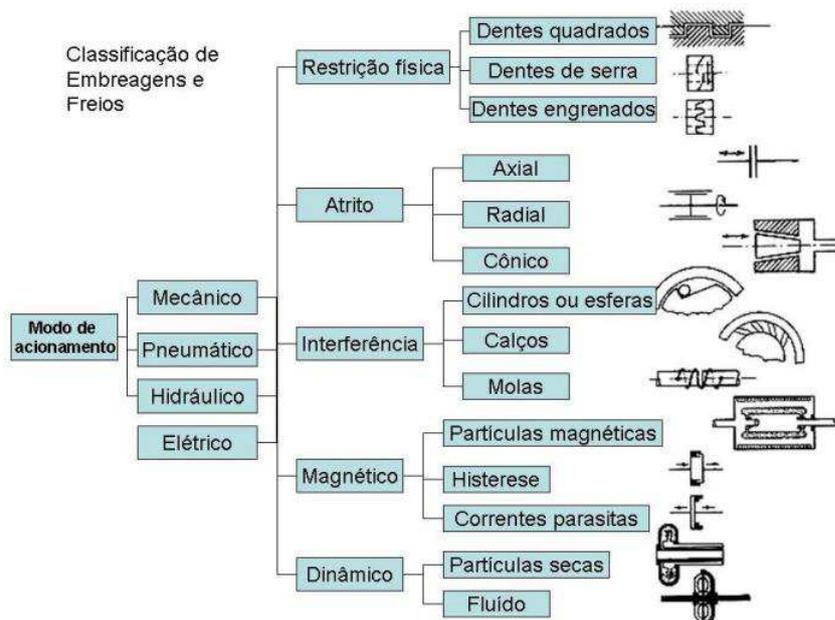
2.1. Conceitos gerais

O sistema de freio é parte fundamental de um veículo, pois permite seu uso adequado e seguro em condições de tráfego nas ruas e estradas. Devido a sua importância na segurança do veículo, requisitos legais regulamentam o seu funcionamento e o seu desempenho são estabelecidos por vários órgãos reguladores do tráfego de automóveis em diversos países (KAWAGUCHI, 2005).

Para Norton (2004) freios e embreagens são, conceitualmente, o mesmo dispositivo. Cada um deles provê uma conexão de atrito, magnética, hidráulica, ou mecânica entre dois elementos. Se os dois componentes são rotativos, possuem velocidades angulares distintas, e o objetivo é acoplá-los de modo que atinjam a mesma velocidade angular, diferente de zero, esse dispositivo é uma embreagem. Se um dos elementos possui velocidade angular, enquanto o outro é fixo com velocidade zero, e o objetivo é acoplá-los de modo que alcancem o repouso, esse dispositivo é um freio.

Freios podem ser ranqueados em diversas categorias, por meio da forma de atuação, pela maneira como transferem energia entre elementos e pelo caráter de acoplamento (NORTON, 2004), conforme apresentado a seguir (figura 1).

Figura 1 - Classificação de freios e embreagens.



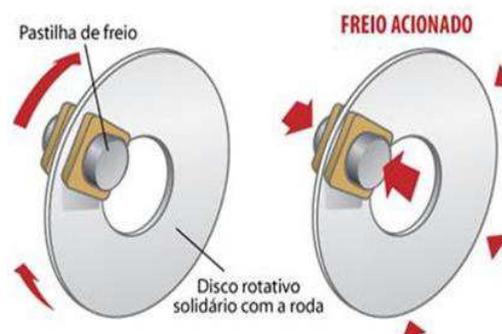
Fonte: NORTON, 2004.

Limpert (1999 apud GRADELA, 2013) sugere classificações para os freios de acordo com a forma de transferência de energia entre atuador e pastilha/sapata:

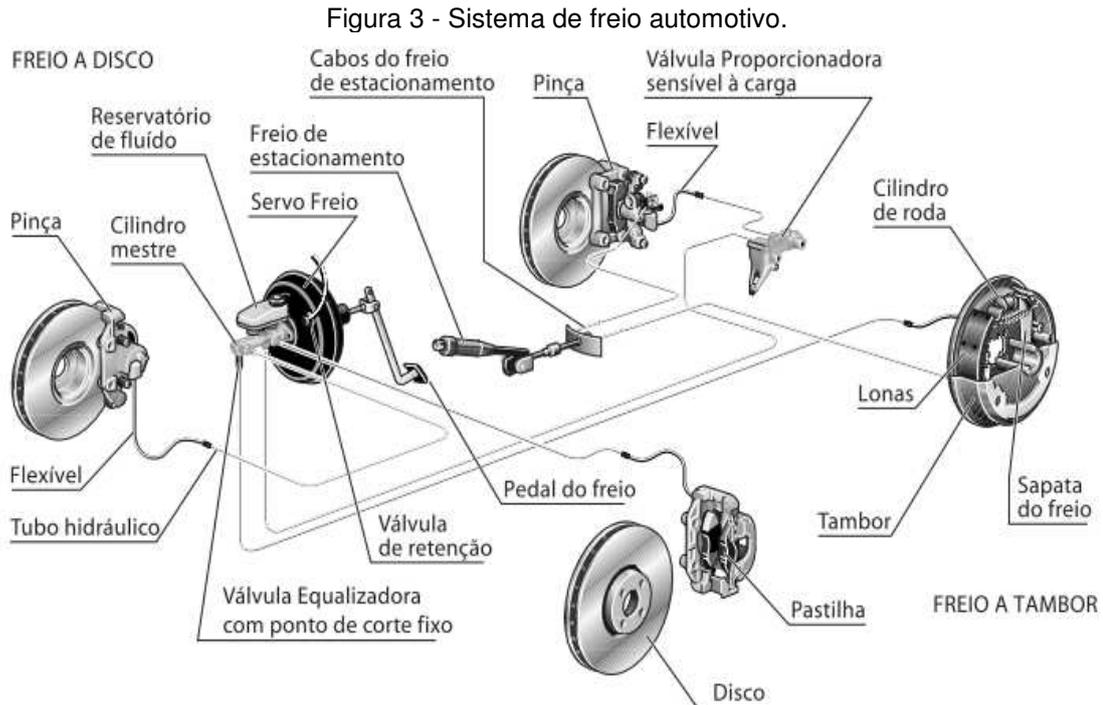
1. Freios mecânicos: envolvem projetos nos quais apenas dispositivos mecânicos, como por exemplo, barras, cabos ou cames são utilizados para transmitir energia para os freios das rodas. Em muitas aplicações, freios de estacionamento são freios mecânicos.
2. Freios hidráulicos: utiliza um fluido como meio de transmissão de energia para os freios das rodas.
3. Freios a ar: utilizam ar para transmitir energia para os freios. Quando utilizado em freios automotivos, o ar é pressurizado. Freios a vácuo são utilizados em trens como meio de transmissão de energia para os freios das rodas.
4. Freios elétricos: utilizam corrente elétrica como meio de transmissão de energia para os freios das rodas.
5. Freios mistos: utilizam dois ou mais dos meios pelos quais energia pode ser transmitida para os freios.

O atrito produzido entre o tambor e a lona e no caso do freio a tambor, bem como entre a pastilha de freio e o disco no caso do freio a disco, transformando a energia cinética do veículo ou objeto em movimento, em energia térmica, é o fenômeno que ocorre no processo de frenagem de tal componente, causando a diminuição de velocidade do mesmo. O disco (ou tambor) gira solidariamente a roda. Assim, quando este tem sua rotação reduzida, o conjugado, ou seja, a roda do veículo também sofre uma redução na sua rotação, a exemplo da figura 2.

Figura 2 - Funcionamento do Freio a disco.

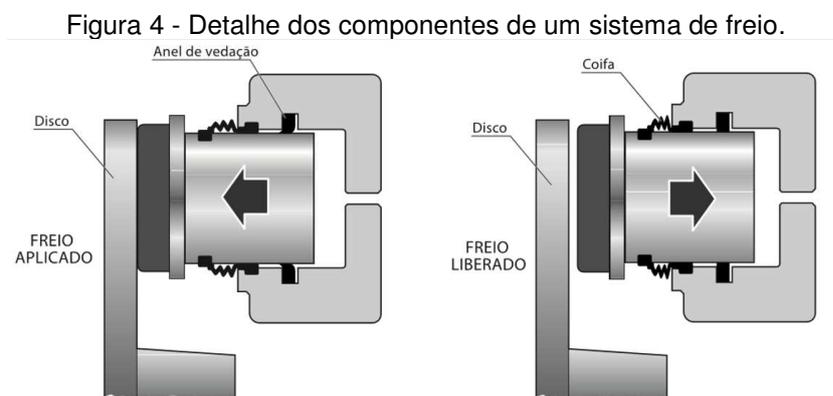


Fonte: manualdoautomovel.com.br (2009).



Fonte: Manual NAKATA para sistemas de freios (2016).

O princípio de funcionamento de freios são praticamente os mesmos desde as primordiais utilizações no decorrer da história da humanidade. O principal fenômeno explorado no exercício da frenagem é o atrito. A energia que um corpo possui por estar em movimento é conhecida como energia cinética, e quando se aciona um dispositivo de frenagem ocorre a transformação da energia cinética deste corpo em calor, pelo atrito gerado com a intenção de retardar este movimento. As figuras 2 e 4 a seguir remetem ao modo de funcionamento do freio a disco.



Fonte: Manual NAKATA para sistemas de freios (2016).

O referido dispositivo trabalha de modo que se tenha um componente fixo na estrutura, ou seja, com velocidade angular nula, e também se tenha outro

componente rotativo. No caso de um veículo, sua estrutura assim como componentes específicos do sistema de freio (como suporte para a pinça, que é fixa na manga de eixo, que por sua vez é fixa na suspensão do veículo) servem como este componente fixo, de modo que o sistema de freio seja responsável por diminuir o movimento das rodas, que por sua vez, através dos pneus, também gera atrito entre pneus e solo e imobilizando o veículo.

O calor em excesso gerado no ato da frenagem pode ser prejudicial em diversos casos, sobretudo quando se trata do risco de falha do sistema por elevada temperatura de trabalho, bem como desgaste excessivo dos elementos que entram em contato com os discos – as pastilhas (além dos próprios discos, figura 5), aumentando a necessidade de se atentar ao bom funcionamento deste componente, haja visto situações que envolvem risco de vida as pessoas.

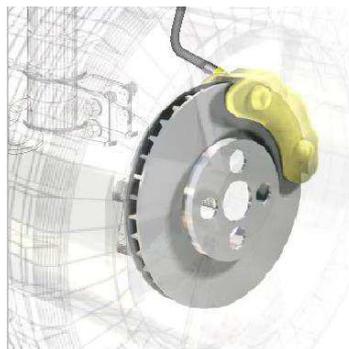
Figura 5 - Disco de freio riscado, causado por sujeira ou material de fricção inadequado.



Fonte: Manual Cobreq (2015).

Desse modo tem-se a carência de um sistema de ventilação, ou arrefecimento do disco de freio, justamente para resfriamento mais acelerado proveniente do atrito causado, reduzindo o risco de superaquecimento das pastilhas e do conjunto.

Figura 6 - Freio a disco ventilado no sistema.



Fonte: manualdoautomovel.com.br (2009).

Aletas, ou dutos (figura 6) minunciosamente estudados e testados estão localizados radialmente ao disco de freio, propiciando uma maior área de contato entre o ar e o disco, facilitando a transferência de calor, haja visto que a localização do disco de freio (no interior da roda e da caixa de roda) não proporciona uma ventilação natural satisfatória. Além disso, com esta estrutura vazada, tem-se uma redução do peso do disco.

2.2. Taxa de desaceleração

A taxa de desaceleração pode ser entendida como a aceleração negativa ao qual o veículo é submetido, ou seja, quando se está efetuando a frenagem do veículo, este sofre uma redução de sua velocidade e desacelera em um certo período de tempo.

As literaturas consultadas apontam diferentes taxas de desaceleração em função do modo como esta é obtida (sendo por observação ou veículo instrumentado), bem como apresentam os valores de outros trabalhos, entretanto, a maioria dos estudos que calcularam as taxas de desaceleração seguem o valor sugerido pelo Traffic Engineering Handbook (ITE, 2009) para uma desaceleração confortável, que é de aproximadamente $3,0 \text{ m/s}^2$.

Em todos os casos, as taxas de desaceleração foram obtidas em função da distância do veículo até a faixa de retenção e da velocidade que o carro se encontra no instante em que o freio é acionado. A razão entre a variação da velocidade e o tempo necessário para a parada do veículo é definido como desaceleração média. Através da cinemática, obtém-se a Equação 1 que é usada para o seu cálculo:

$$d = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1)$$

Sendo d = desaceleração em m/s^2 ,

Δv = variação da velocidade no período, em m/s e

Δt = duração do período em s .

A variação da velocidade é a diferença entre a velocidade final e a inicial do veículo. Nesse estudo a velocidade final considerada é zero, pois o freio do veículo será acionado até sua imobilização total.

A desaceleração será importante para se obter a duração aproximada do tempo de frenagem Δt , que também será utilizada como duração da simulação dos discos em software. Portanto, a duração do período Δt , em s (segundos), será considerada como sendo a terça parte da velocidade (em m/s), ou seja:

$$\Delta t = \frac{v(m/s)}{3} \quad (2)$$

Em função do que foi mencionado anteriormente que diz que uma desaceleração confortável deve ser de -3 m/s^2 .

2.3. Princípio de funcionamento: atrito

Segundo Tavares (2002), Sempre que a superfície de um corpo escorrega sobre outro, cada corpo exerce sobre o outro uma força paralela às superfícies. Essa força é inerente ao contato entre as superfícies e chamamos de *força de atrito*. A força de atrito sobre cada corpo tem sentido oposto ao seu movimento em relação ao outro corpo.

Ainda segundo Tavares (2002), as forças de atrito que atuam entre superfícies em repouso relativo são chamadas de forças de atrito estático, em contraposição às forças de atrito cinético (ou dinâmico) que acontece entre superfícies que têm movimento relativo. Existe atrito entre superfícies em repouso quando acontece uma tendência ao movimento. Iniciado o movimento, as forças de atrito que atuam entre as superfícies usualmente decrescem, passando a atuar a força de atrito cinético, de modo que uma força menor será suficiente para manter o movimento.

No que diz respeito à imobilização de um veículo em geral, precisamos considerar diferentes sistemas que se relacionam em função do objetivo em comum supracitado, e para entender a dinâmica da frenagem, segundo Abeid et. al. (2014), precisamos estudar a interação entre os pneus do automóvel e a pista. O coeficiente de atrito, μ , entre eles, depende da velocidade do veículo em relação ao solo, e da velocidade angular do pneu, ω . Segundo Denny (2005), μ não depende separadamente de v e ω , mas dos dois juntos. O coeficiente de atrito é uma função do coeficiente de deslizamento, s .

Para Gradela (2013) as superfícies de atrito são geralmente forradas com um material que possua boas características em condições de altas temperaturas e

altos esforços aplicados. Essas características dependem da severidade do serviço e podem ser resumidas nos seguintes itens:

- Alto coeficiente de atrito dinâmico relativamente estável ao longo de toda a faixa de temperatura de trabalho;
- Alto coeficiente de atrito estático;
- Impermeabilidade às condições ambientais, principalmente à umidade, poeira e óleos lubrificantes;
- Capacidade de resistir a altas temperaturas, juntamente com alta condutibilidade e difusividade térmica, assim como alta capacidade térmica;
- Boa resiliência para melhor distribuição de pressão ao longo da lona;
- Alta resistência ao desgaste abrasivo e adesivo;
- Alta resistência à fadiga térmica;
- Flexibilidade. A maioria das aplicações usa materiais de atrito classificados como moldados, trançados ou metal sinterizado.

Os materiais moldados são os mais comuns e mais baratos. Eles consistem de um material ligante, fibras de reforço, aditivos de fricção e materiais de preenchimento. O material ligante é geralmente uma resina termorrígida ou borracha com a função de aglomerar os outros componentes em um composto resistente ao calor. As fibras de reforço podem ser compostas de asbestos, material que vem sendo substituído pela aramida devido ao risco causado pelo fato de ser cancerígeno.

Os materiais trançados têm mais flexibilidade, assim como requerido pelos freios de cinta, e não perdem muito suas características na presença de poeiras, lama e gotas de óleo. São produzidos por longos fios de fibras, reforçados com arames de zinco, cobre e bronze para dar mais resistência e, principalmente, aumentar a condutibilidade térmica. Esses arames e fibras são introduzidos em trançados ou fitas, saturados com resinas e elementos de atrito e, então, são curados sob calor e pressão.

Os materiais de atrito classificados como metais sinterizados são os mais caros, porém são os mais adequados (no sentido de suportarem uma maior faixa de temperatura e possuírem um maior coeficiente de atrito) em serviços pesados, particularmente quando o trabalho é contínuo a temperaturas elevadas. Eles são compostos por pó de metais e materiais de preenchimento inorgânicos moldados sob

alta pressão e, assim, sinterizados. No processo de sinterização, as partículas metálicas são aquecidas para se misturarem ao composto, mas não chegam ao ponto de fusão. Existem, ainda, materiais sinterizados compostos de cerâmica e metal, com a diferença de que o pó de cerâmica é adicionado junto ao pó metálico antes da sinterização.

Nas tabelas a seguir (tabelas 1 e 2) seguem alguns pré-requisitos inerentes ao dimensionamento e projeto de freios a disco, levando em conta o coeficiente de atrito dinâmico para diferentes materiais de fricção, além da pressão máxima e temperatura máxima de compressão.

Tabela 1 - Coeficiente de atrito dinâmico para diferentes materiais de fricção.

Material de Fricção ^a	Coeficiente de Atrito Dinâmico f
Moldado	0,06–0,09
Trançado	0,08–0,10
Metal sinterizado	0,05–0,08
Papel	0,10–0,14
Grafítico	0,12 (méd.)
Polimérico	0,11 (méd.)
Cortiça	0,15–0,25
Madeira	0,12–0,16
Ferro fundido, aço duro	0,03–0,06

^aQuando atritado contra ferro fundido ou aço, ambos lisos.

Fonte: Gradela (2013).

Tabela 2 - Propriedades de diferentes materiais de fricção.

Material de Fricção ^a	Coeficiente de Atrito Dinâmico f^b	Pressão Máxima ^c		Temperatura Máxima de Compressão	
		psi	kPa	°F	°C
Moldado	0,25–0,45	150–300	1030–2070	400–500	204–260
Trançado	0,25–0,45	50–100	345–690	400–500	204–260
Metal sinterizado	0,15–0,45	150–300	1030–2070	450–1250	232–677
Cortiça	0,30–0,50	8–14	55–95	180	82
Madeira	0,20–0,30	50–90	345–620	200	93
Ferro fundido, aço duro	0,15–0,25	100–250	690–1720	500	260

^aQuando atritado contra ferro fundido ou aço liso.

^bOs valores experimentais de f variam com a composição, velocidade de atrito, pressão, temperatura e umidade. Consulte o fabricante ou obtenha os dados a partir de ensaios. Para efeito de projeto, utilize, em geral, 50 a 75% dos valores de testes para propiciar um fator de segurança.

^cO uso dos valores mais baixos fornecerá uma vida mais longa. Consulte o fabricante ou obtenha dados de ensaios. Calcule a pressão média nas superfícies cilíndricas com base na área de contato projetada (como ocorreu para as tensões nos mancais e para as pressões nos mancais de deslizamento — veja a Seção 13.3).

Fonte: Gradela (2013).

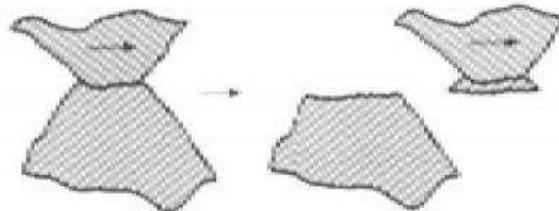
2.3.1. Desgaste dos materiais de atrito

Segundo Nascimento e Batista, em freios por atrito, as falhas ocorrem devido a três fatores principais: elevadas pressões de interfaces, deslizamentos relativos e elevada geração de calor na interface. No que diz respeito às elevadas pressões e deslizamentos relativos, os principais tipos de desgaste são o adesivo, o abrasivo, o corrosivo e por fricção. Já, com relação às elevadas temperaturas, as falhas podem ocorrer por empenamento, fadiga térmica, escoamento e fluência.

O desgaste adesivo, ocorre quando duas superfícies são pressionadas uma contra a outra, e algumas das asperezas em contato tenderão a aderir umas às outras devido às forças de atração entre os átomos superficiais dos dois materiais.

À medida que se introduz um escorregamento entre as superfícies, essas adesões são quebradas, tanto ao longo da interface original, como em um novo plano. Nesse caso, um pedaço de uma peça é transferido à outra, causando rompimento superficial e danos, assim como no exemplo a seguir.

Figura 7 - Desgaste por adesão.



Fonte: Mecanismos de Desgaste (2015).

Ainda segundo Nascimento e Batista, é quando as superfícies em contato são removidas por cisalhamento devido ao atrito e os resíduos do desgaste se juntarão ao desgaste. Esses resíduos formam uma fina camada que endurece durante o atrito, de modo que o contato pode iniciar altamente elástico.

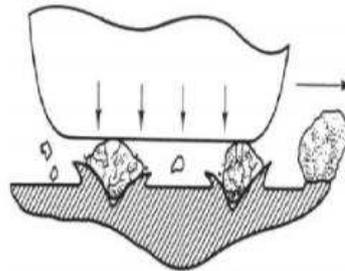
O desgaste abrasivo em freios ocorre de dois modos distintos: a dois corpos ou a três corpos. A abrasão a dois corpos, no caso em que as superfícies do tambor e da lona encontram-se limpas, refere-se a um material duro e rugoso deslizando sobre um material mais mole. A superfície mais dura penetra na superfície mais mole e dela retira material. A abrasão a três corpos, no caso em que há poeira e detritos entre as superfícies do tambor e da lona, refere-se à introdução de partículas duras entre duas superfícies deslizantes, sendo pelo menos um dos dois corpos mais

mole do que as partículas. As partículas duras causam, assim, abrasão em uma das superfícies ou em ambas, como podemos ver na figura a seguir.

Nascimento e Baptista (p.15), a respeito do desgaste por abrasão:

É resultado de uma interface atritando que pode apanhar restos de desgaste ou areia e/ou pó do ambiente circunvizinho. Ou seja, ocorre quando o material é removido da superfície do componente pela ação de corte ou goivagem de partículas duras ou pelo rolamento de metal contra metal. A taxa de desgaste depende do grau de penetração da partícula na superfície do componente e é também proporcional a dureza do mesmo.

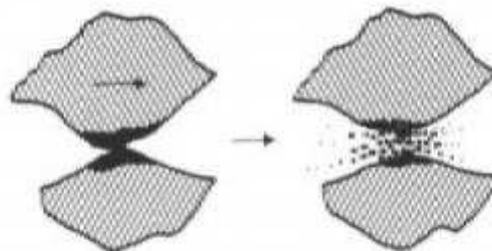
Figura 8 - Desgaste por abrasão.



Fonte: Mecanismos de Desgaste (2015).

Para Gradela (2013) O desgaste por corrosão, como na figura 9, ocorre principalmente no tambor do freio. A forma mais comum de corrosão é a oxidação presente na maioria dos metais, pois possuem elevado potencial de reagir com a água ou com o oxigênio, formando os óxidos. No caso do tambor, constituído de ferro fundido cinzento, assim como a maioria das ligas de ferro, é formado um filme de óxido descontínuo e poroso na superfície, que facilmente se lasca e expõe novamente mais substrato a elementos reativos, aumentando, assim, a taxa de corrosão. Se os produtos da reação química forem duros e frágeis (como os óxidos), as lascas dessa camada podem se tornar partículas livres na interface e contribuir para o desgaste abrasivo.

Figura 9 - Desgaste por corrosão.



Fonte: Mecanismos de Desgaste .pdf (2015).

Para Gradela (2013), das falhas relacionadas à temperatura, a fadiga térmica é o modo mais provável da falha de um freio. A fadiga térmica é provocada por solicitações térmicas cíclicas (variações de temperatura), tais como resfriamentos ou aquecimentos bruscos repetitivos ao longo da vida do freio. As tensões atuantes, principalmente no tambor de freio na expansão ou na compressão térmicas são dadas por (GRADELA, 2013):

$$\sigma = E \times \alpha \times \Delta T \quad (3)$$

Observa-se que o método para a atenuação das tensões atuantes segue o caminho da redução módulo de elasticidade do material do disco (E), redução do coeficiente de dilatação térmica (α), bem como a redução do gradiente de temperatura (T). A condutividade térmica do material do tambor interfere substancialmente neste último termo desta equação. Segundo Gradela (2013), se ocorrerem deformações plásticas no aquecimento, resultam tensões de tração no resfriamento, o que pode conduzir à formação de trincas. Deste modo, é importante que a resistência a quente do material não seja ultrapassada.

2.4. Ponto de vista térmico e transferência de calor

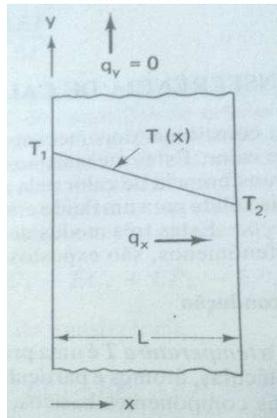
Segundo Thomas (1985), a transferência de calor define-se como a transferência de energia através de uma fronteira de um sistema e provocada exclusivamente pela diferença de temperatura. Observando tal conceito e aplicando o mesmo ao estudo dos equipamentos de frenagem, tem-se a necessidade de se conhecer alguns princípios e leis que regem os fenômenos de transferência de calor que ocorrem nos discos, pastilhas, assim como em demais equipamentos submetidos a diferenças de temperatura em seu local de operação.

A análise dos processos de transferência de calor exige o uso de várias leis fundamentais, as quais são de natureza global e independentes dos mecanismos de transferência de calor. Por outro lado, também as leis particulares de cada mecanismo de transferência de calor devem ser obedecidas.

A transferência de calor por condução que, segundo Thomas (1985), é a transferência de energia provocada por uma interação física entre moléculas adjacentes de uma substância em temperaturas diferentes (níveis de energia cinética molecular). A figura 10 mostra um esquema representativo da transferência de calor

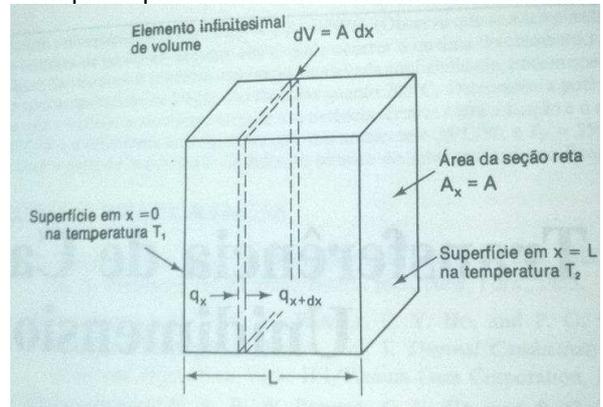
por condução, e na figura 11 temos o elemento diferencial de volume para a transferência de calor por condução.

Figura 10 - Transferência de Calor por Condução Unidimensional.



Fonte: Thomas (1985).

Figura 11 - Condução de Calor Unidimensional em placa plana: Sistema e volume de controle.



Fonte: Thomas (1985).

Pode-se ter uma noção do fluxo de calor transferido por condução, na direção x , através de uma área finita A_x onde T é apenas uma função de x por

$$q_x = -kA_x \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

Onde A_x é a normal em *direção da transferência* x e k é a *condutividade térmica*. Tal equação é conhecida atualmente como a *lei de Fourier* para a condução, com a ressalva de que esta diz respeito somente a *condução unidimensional* – quando se trata de condução em mais de uma direção (que é o caso de maior ocorrência) deve-se adotar a forma mais geral da lei da condução de Fourier.

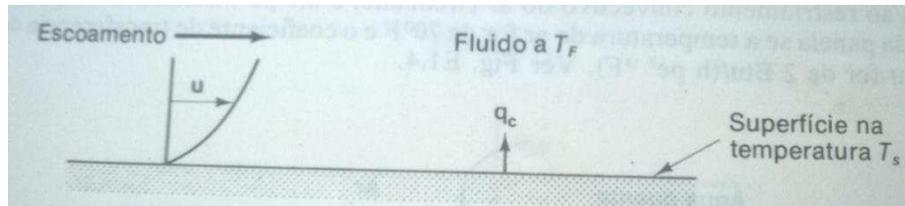
As condutividades térmicas dos sólidos possuem um grande intervalo de valores numéricos dependendo do sólido ser um bom condutor de calor tal como um metal ou um condutor pobre tal como o asbesto (estes sendo considerados como *isolantes*), KERN (1980).

Já a transferência de calor por convecção, segundo Thomas (1985), é a transferência de calor para um fluido em movimento. Tais conceitos e aplicações são amplamente abordados neste estudo, como é exemplificado na figura 12.

Para Kern (1980), na convecção ocorre a transmissão de calor entre uma porção quente e uma quantidade fria de um fluido através do processo de mistura. Da mesma forma que acontece quando se aquece um fluido dentro de um recipiente com uma chama, ou mesmo, no caso deste trabalho, quando um disco de freio automotivo está sujeito as forças de atrito das pastilhas e tem sua temperatura aumentada, ocorre

que este deve ser resfriado pelo vento, num processo de convecção, para que o mesmo atue na frenagem conforme o desejado.

Figura 12 - Transferência de Calor por Convecção.



Fonte: Thomas (1985).

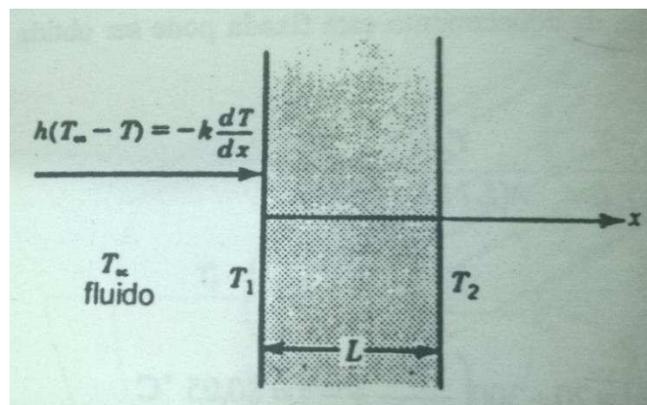
Este tipo de transmissão de calor pode ser representado por uma equação que imita a forma da equação de condução e é dada por:

$$dQ = h \cdot A \cdot dt \quad (5)$$

Ainda segundo Kern (1980), a constante de proporcionalidade h é um termo influenciado pela natureza do fluido e pela natureza da agitação e deve ser avaliada experimentalmente, a qual é denominada *coeficiente de transmissão de calor*. E quando tal equação é descrita sob a forma integral $Q = h \cdot a \cdot \Delta t$, é então denominada *lei de resfriamento de Newton*.

De forma análoga à eletricidade, podemos fazer analogias das mais variadas situações de transferência de calor, além disso, quando se tem a situação em que ocorrem diferentes processos de transmissão de calor – como na figura 13 a seguir, podemos ter a seguinte representação, tal qual pode ser encontrada no objeto de estudo deste trabalho, a transferência de calor em discos de freios automotivos, sujeitos à ações convectivas do ar, além da condução gerada pelo atrito de formas.

Figura 13 - Placa semi-finita sob efeito de transferência de calor por Condução e Convecção.



Fonte: Schmidt et. al.

Há também um terceiro modo de transmissão de calor, denominado transferência de calor por Radiação, que nada mais é do que quando ocorre a transmissão de energia radiante de uma fonte para um receptor, e que quando tal radiação emana de uma fonte, uma parte é absorvida pelo receptor e outra é refletida pelo mesmo. Este trabalho não pretende abordar profundamente este conceito, devido a sua forma mais complexa de estudo bem como sua aplicação no referido tema em estudo.

3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DE DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS

Assim como em todos os processos pelos quais o homem sempre busca facilitar os meios de assimilação de conhecimento, a simulação computacional, mostrou-se ao longo dos anos uma ferramenta indispensável/imprescindível ao desenvolvimento, bem como aprimoramento e modelagem (no que diz respeito a concepção de um modelo genérico do objeto de estudo).

Com este pensamento que foram desenvolvidos ao longo dos anos ferramentas computacionais, baseadas em softwares, que evidenciam aspectos relevantes em função dos dados a serem fornecidos a respeito do modelo e das características de cada projeto.

Na década de 80, os sistemas de CAD (Computer Aided Design – Desenho com Auxílio de Computador) comerciais, tais como o Autodesk AutoCAD, para desenho 2D, e o PTC Pro-Engineer, para modelagem 3D foram desenvolvidos. Na década de 90, a Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corp. surge com ferramentas inovadoras combinando modelagem 3D com a facilidade de uso em desktops. Atualmente, esses e muitos outros sistemas CAD estão sendo largamente utilizados na engenharia, no design e na manufatura, incluindo modelagem geométrica, análise estrutural e de movimentos, usinagem CNC e prototipagem rápida (XUE, 2005 apud CASTELAN, 2016).

Netto et al. (1998, p.112) afirma que com um software de realidade virtual sofisticado, pode-se modelar maquinários, veículos e dispositivos, simulando o comportamento real do equipamento. Isto economiza dinheiro, ciclos de desenvolvimento e permite que se efetuem sessões de treinamento com o produto virtual.

Chwif e Medina (2010, p.5) afirmam que “um modelo é uma abstração da realidade, que se aproxima do verdadeiro comportamento do sistema, mas sempre mais simples do que o real”. Ainda finalizam com “a intenção principal da modelagem é capturar o que realmente é importante no sistema para a finalidade em questão. ”

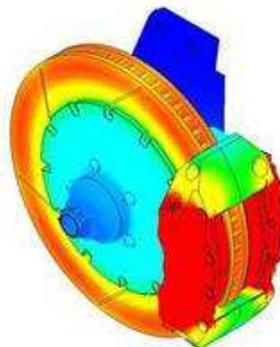
O simulador, para Castelan (2016), é uma máquina que responde a impulsos e gera respostas de acordo com entradas definidas pelo utilizador. Deste pensamento logo infere-se que mesmo o projeto sendo feito por software, está sujeito

à erros, devido à muitas variáveis complexas que muitas das vezes são subtraídas e/ou desconsideradas.

Por conseguinte, o indivíduo responsável por tal manipulação deve sempre estar atento as peculiaridades de cada simulação, visando minimizar tais margens de erro. Em razão disto, se faz necessário conhecer os fundamentos dos métodos analíticos que circundam e explicam os métodos numéricos, assim como Castelan (2016) menciona que métodos analíticos desenvolvem o raciocínio, dão fundamentos científicos ao resultado e funcionam como contraprova aos resultados da simulação numérica.

Neste sentido, a engenharia automotiva, com relação às empresas de desenvolvimento e manufatura de peças e artigos automotivos, vem cada vez mais utilizando as ferramentas computacionais nos seus processos, tendo em vista o contexto socioeconômico globalizado em que as mesmas estão inseridas, além da tendência de obtenção da eficiência máxima de seus produtos.

Figura 14 - Simulação de distribuição de Calor em um disco de freio.



Fonte: SolidSolutions.co.uk (2017).

A prototipação virtual (NETTO et. al., 1998) na área automotiva é bastante desenvolvida e disseminada, tendo em vista os resultados supracitados, bem como uma interação virtual com o produto nas várias etapas pertinentes à sua confecção.

A seguir, apresenta-se uma tabela com aplicações da prototipagem virtual na engenharia automotiva.

Tabela 3 - Prototipação virtual na área automobilística.

Empresa	Aplicação
Renault Design	Testar o produto antes de ser fabricado. Foi feita uma simulação da performance do protótipo de um de seus carros, o Racoon, utilizando uma técnica de filmagem que mistura ambientes reais com objetos virtuais.
Chrysler-Jeep	Desenvolveram modelos dinâmicos de seus veículos. Esses modelos passam por uma rigorosa análise dos possíveis problemas que podem ocorrer e que só poderiam ser gerados e duplicados em grandes terrenos ao ar livre com vários protótipos dos veículos a serem testados.
Ford Motors	Sofisticados ambientes tecnológicos virtuais para projeto e engenharia de automóveis, trata-se da divisão CAVSE (Core & Advanced Vehicle System Engineering) que utiliza a RV para simulação e prototipação virtual, tomando como principais pontos de pesquisa, a aerodinâmica, a ergonomia e a modelagem de superfície do protótipo do veículo a ser construído.
General Motors	Projeto que utiliza um sistema CAVE, denominado VirtualEye, para facilitar o desenvolvimento de novos modelos de veículos e sua unidade de montagem de caminhões (Detroit, Michigan) utiliza softwares da empresa Deneb Robotics (Deneb Robotics, 1997) para prototipação e avaliação da montagem de seus veículos.
Land Rover	Utiliza a realidade virtual para projetar e validar rápidas prototipagens dos seus novos modelos de veículos e para auxiliar na ampliação de sua fábrica.
Caterpillar	Ambiente virtual para testes de novos projetos e melhoria dos processos de montagem de equipamentos pesados. Esses testes são para avaliar o design do veículo e determinar a visibilidade proveniente da cabine de comando do trator. Neste projeto, o operador senta-se numa plataforma equipada com os mesmos controles de uma cabine real de um trator. Esta plataforma está localizada num CAVE, que é um sistema baseado em RV que possui o formato de um cubo e tem suas paredes forradas com telas, onde são exibidas as animações gráficas.

Fonte: Netto et. al. (1998).

O presente estudo se baseia na ferramenta disponibilizada pela Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corp, o Software SolidWorks, o qual é um poderosíssimo programa no qual é possível realizar diferentes atividades, tais como: criação e simulação dos mais variados gêneros, como térmica, análise estática, fadiga, e etc. além de muitos outros recursos. Sendo que a análise térmica é o objeto de estudo deste trabalho.

4. MATERIAL E MÉTODOS

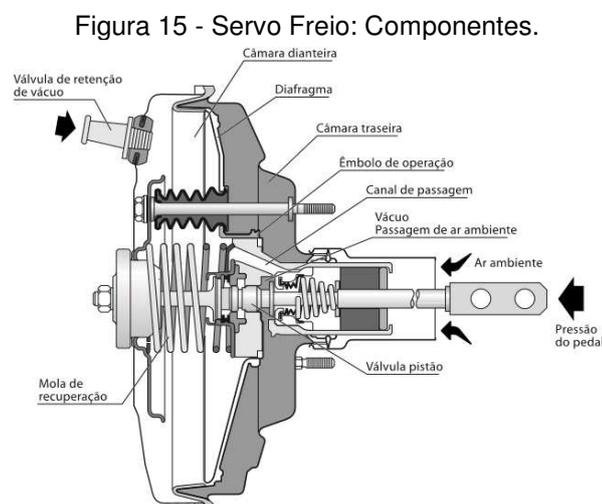
O estudo desenvolvido neste trabalho consiste em um experimento, simulando uma situação mais próxima da realidade possível, ou seja, procurou-se ao máximo reduzir as diferenças entre um modelo encontrado em veículos em comparação ao demonstrado ao longo deste.

A seguir, temos uma descrição dos materiais e componentes utilizados neste estudo, bem como suas aplicações, características, e modos de funcionamento; haja visto a observação que os sistemas de freio atualmente são compostos de dezenas de componentes mecânicos, hidráulicos, pneumáticos e eletrônicos, entretanto, optou-se por abordar somente os componentes mais indispensáveis e utilizados na maioria dos veículos.

4.1. Servo freio

Entre os itens que compõem a “segurança ativa” do veículo, o sistema de frenagem é um dos mais importantes. Qualquer falha em seus componentes pode ocasionar sérios acidentes e colocar em risco a vida dos ocupantes do carro.

A evolução da indústria automotiva tornou os veículos mais velozes e exigiu o aprimoramento do sistema de frenagem como, por exemplo, o freio a disco, também chamado de pinças, muito mais eficientes para a desaceleração, mas que precisavam de uma ajuda extra para obter os altos níveis de esforços necessários para atuar junto ao conjunto de rodas e pneus.



Fonte: Manual NAKATA para sistemas de freios (2016).

Por esta razão, utiliza-se um dispositivo conhecido como Servo Freio ou popularmente conhecido como hidrovácuo. Este dispositivo tem a finalidade de multiplicar a força aplicada no pedal do freio, afim de garantir um esforço menor por parte do motorista.

Tal componente opera da seguinte forma: com a depressão produzida pela ação dos pistões em direção ao ponto morto inferior do motor, o ar entra na câmara de combustão; acontece que no coletor de escape é acoplada uma tubulação ao servo freio, de modo que seja gerada um vácuo no interior das câmaras do servo freio. A peça possui duas câmaras separadas por um êmbolo e um diafragma, com uma passagem controlada por uma válvula.

Em outras palavras, essa força de multiplicação é produzida através da criação de depressão (pressão negativa ou vácuo) na parte anterior e posterior do diafragma da câmara, sendo que na parte anterior da mesma propicia-se a atuação de pressão absoluta ou atmosférica, e pela diferença entre a Pressão absoluta (ou atmosférica, que a nível do mar é de 760 mmHg) e a Depressão produzida pelo vácuo do motor, teremos uma resultante positiva de pressão que multiplicada pela área do diafragma ou membrana da câmara, traduz-se na força de multiplicação agente sobre a haste do cilindro mestre.

Portanto, infere-se que a magnitude da força de acionamento criada pelo servo-freio vai variar em função do valor da depressão (vácuo) criado pela sucção do coletor de admissão e também do tamanho do servo-freio e. Os servos-freios atualmente podem possuir diversos tamanhos, sendo geralmente utilizados de 7, 8, 9 e 10 polegadas.

A relação do servo, isto é, a taxa com que a força aplicada ao pedal é ampliada, depende de fabricante para fabricante, mas um valor normalmente adotado hoje em dia é de 1:5.

4.2. Disco de freio

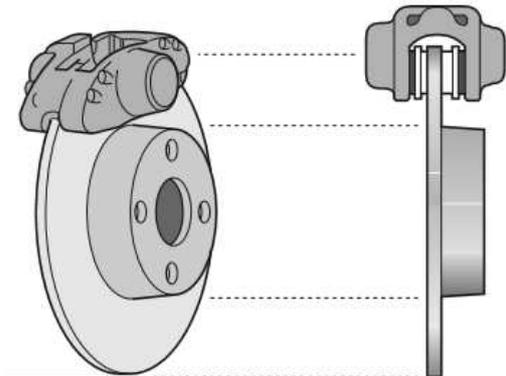
Outro componente de extrema importância no sistema de frenagem automotiva são os discos de freio.

Em função dos seus detalhes de construção, os discos conseguem dissipar rapidamente o calor pois grande parte de sua superfície está em contato com o ar

exterior. Dissipar calor rapidamente influi em recuperar a capacidade de frenagem após o uso contínuo, ou seja, evitando fadiga térmica.

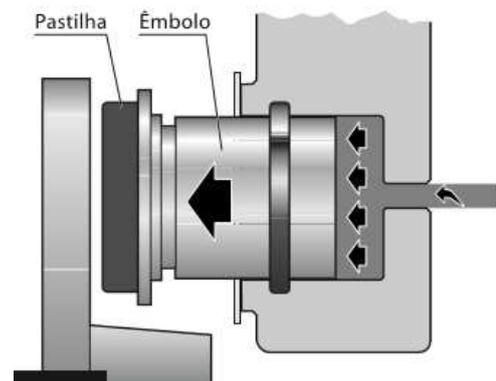
Durante a frenagem ocorre a transferência de peso do veículo do eixo traseiro para o dianteiro. Essa maior participação no eixo dianteiro exige também uma maior dissipação do calor gerado na frenagem pelo atrito entre pastilhas e discos.

Figura 16 - Vista do disco de freio.



Fonte: Manual NAKATA para sistemas de freios (2016).

Figura 17 - Funcionamento: ação do êmbolo e pastilha contra o disco.



Fonte: Manual NAKATA para sistemas de freios (2016).

Pensando neste aspecto, veículos de maior desempenho ou que necessitam de uma maior capacidade de frenagem utilizam discos ventilados, que melhoram ainda mais essa característica. Em situações onde há contato com água, os discos também são mais eficientes na recuperação da frenagem, permitindo a secagem das pastilhas mais rapidamente, comparados aos freios a tambor.

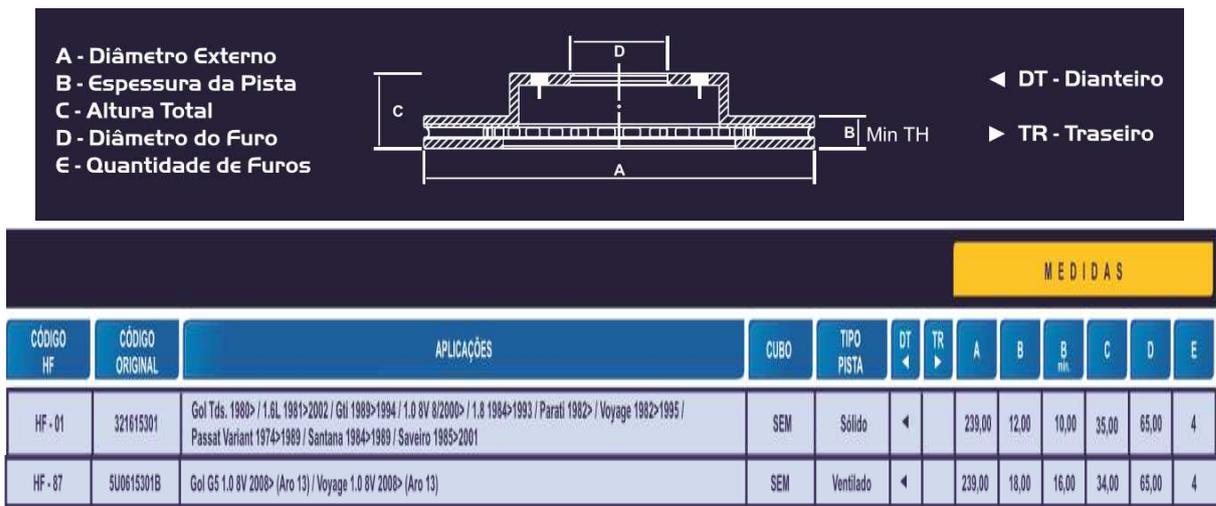
O funcionamento do freio se dá em função do bom estado de conservação dos discos de freio, já que este gira entre as pinças – cada pinça contém duas pastilhas formando uma espécie de “sanduíche”, conforme ilustram as figuras 16 e 17. Quando o pedal do freio é pressionado, a força hidráulica do fluido pressiona(m) o(s) êmbolo(s) das pinças contra as pastilhas e estas contra uma seção do disco que é envolvida por esse “sanduíche”, criando o atrito necessário para barrar seu movimento.

Segundo Manual NAKATA para sistemas de freios, discos de freio devem ser substituídos sempre que apresentarem trincas ou empenamento ou atingirem a espessura mínima determinada pelo fabricante. A negligência quanto a estes aspectos pode acarretar: Travamento do êmbolo da pinça, superaquecimento dos

freios em função da menor quantidade de material para dissipar o calor ou mesmo a diminuição da resistência mecânica, provocando trincas e até a quebra do disco.

Neste trabalho estão sendo utilizados discos de freio da marca Hiper Freios, códigos HF-01(sólido) e HF-87 (ventilado), os quais possuem as seguintes dimensões de construção – que podem ser encontradas em catálogos disponíveis online, como o apresentado a seguir.

Figura 18 - Dimensões dos discos de freio segundo catálogo.



Fonte: Catálogo Hiper Freios (2013).

4.3. Pastilhas de freio

Este elemento é de fundamental importância no que diz respeito ao sistema de frenagem. A pastilha de freio é o elemento que entra em contato direto com o elemento girante, isto é, objeto ao qual se deseja uma redução na sua velocidade.

Ao ser acionado o dispositivo de freio (pedal de freio, ou outro dispositivo acionador), é necessário que este comando chegue a um elemento acionador do dispositivo de frenagem, geralmente essa transmissão de força é feita através de um fluido (ar ou óleo) que por sua vez aciona um êmbolo – ou outro mecanismo acionador – cujo movimento empurra, ou contrapõe as pastilhas de freio ao elemento em rotação.

A folga entre o disco e as pastilhas se auto ajusta à medida que as pastilhas se desgastam. Dependendo do projeto, a pinça pode ter um, dois, três ou quatro êmbolos, com carcaça fixa ou deslizante.

Figura 19 - Pastilhas de freio.



Fonte: Revista O Mecânico (2014).

Quanto aos materiais constituintes de uma pastilha de freio, podemos citar as pastilhas de face de atito cerâmica – em razão do avanço tecnológico dos processos de manufatura – além das mais utilizadas pastilhas de compósitos variados.

Os materiais de fricção mais avançados tecnologicamente visam atender os atuais requisitos de segurança e desempenho, os quais podemos citar maior e melhor eficácia na frenagem, menores riscos com o uso de materiais nocivos à saúde (como é o caso do amianto, que causava câncer, bem como o chumbo, antimônio, entre outros), o coeficiente de atrito mais adequado e ruído menor possível, sem deixar de lado a competitividade do produto em relação a quão oneroso ele se torna.

Materiais de atrito das pastilhas podem conter fibras minerais biossolúveis, fibras sintéticas, lubrificantes, cargas minerais, metais, resinas e abrasivos.

Materiais de fricção classificados como *Orgânicos* são feitos à base de Celulose e Resina Fenólica, se desgastam mais rapidamente que o disco, são geralmente empregadas para o uso urbano.

As *Semi-metálicas* têm geralmente latão, ferro e/ou alumínio adicionados à resina, sendo mais duráveis e eficientes que a anterior, porém mais ruidosas.

Já as *Metálicas* possuem uma carga maior de metais para que sejam ainda mais eficientes, tendo alto desempenho principalmente em altas temperaturas.

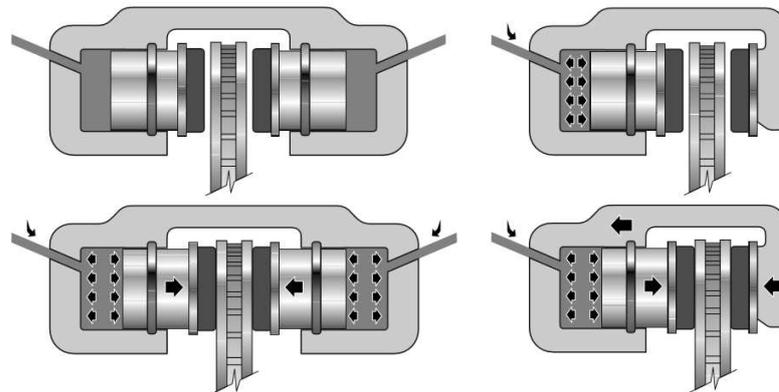
As *Sinterizadas* são confeccionadas de metais em pó, geralmente alumínio, ferro, cobre, bronze e cerâmicas, possuindo altíssima eficiência em altas temperaturas, além do alto coeficiente de atrito e baixos danos ao disco.

4.4. Pinça de freio

A pinça ou caliper de freio é o componente que fica montado próximo ao disco de freio e que contém, isto é, onde são fixadas as pastilhas de freio para que possam ser pressionadas contra o disco de freio, como podemos ver adiante.

Existem basicamente dois tipos construtivos de pinças de freio: as pinças tipo fixa ou flutuante. A pinça com carcaça fixa tem um êmbolo para cada pastilha, ou seja, temos dois êmbolos que preferencialmente devem ser acionados simultaneamente, dispostos opostamente um ao outro, com uma de cada lado do disco de freio, como observado na figura 20 (à esquerda). Sendo assim, proporcionam uma maior força aplicada, sendo utilizados em alguns caminhões e veículos de alta performance, além de consumir menos fluido de freio, em função do diâmetro menor em relação ao caliper flutuante.

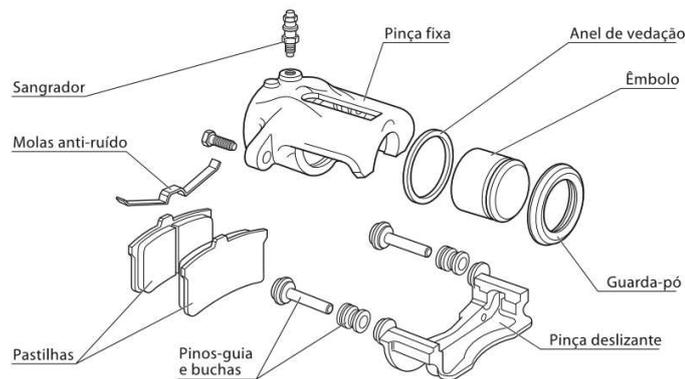
Figura 20 - Pinça de freio Fixa (esquerda) e Pinça de freio Deslizante (direita).



Fonte: Manual NAKATA para sistemas de freios (2016).

A pinça flutuante ou deslizante geralmente possui um único êmbolo para ambas as pastilhas e se movimenta sobre parafusos-guia ou superfícies usinadas, de modo que se tem as duas pastilhas dispostas cada qual em uma face do disco, sendo friccionadas contra o mesmo (figura 20 – à direita). Além de ser menos complexo, este modelo é mais leve e barato, por este motivo é amplamente utilizado pelas montadoras. Também é possível ver com detalhes os elementos que compõem a pinça deslizante na figura 21.

Figura 21 - Vista explodida da pinça de freio flutuante.



Fonte: Manual NAKATA para sistemas de freios (2016).

Segundo Manual NAKATA para sistemas de freios, acompanhado da troca das pastilhas, se deve verificar as pinças, êmbolos, anéis de vedação, guarda pó, e pinos deslizantes, já que se estiverem desgastados ou com indícios de corrosão devem ser substituídos. Um êmbolo emperrado mantém a pastilha sempre encostada no disco, desgastando-a rapidamente, superaquecendo o freio, além de comprometer a trajetória do veículo durante a frenagem, complementa o Manual.

4.5. Cilindro mestre

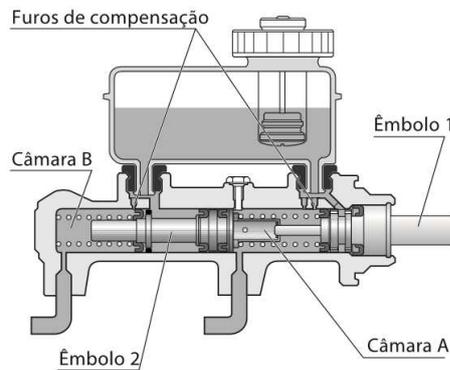
O cilindro-mestre dos automóveis comerciais, caminhões leves assim como em alguns equipamentos, é o componente que tem a responsabilidade de iniciar o processo de pressurização do sistema hidráulico do acionamento do freio, pois quando se aciona o pedal de freio, o mesmo aciona a haste do servo-freio, que por sua vez aciona o cilindro-mestre, o qual aciona os êmbolos dos calipers. É sua função também, manter a pressão residual nos circuitos de freio.

Em outras palavras, segundo Manual NAKATA para sistemas de freios, seu papel é gerar e manter a pressão hidráulica em todo o sistema. Por questão de segurança os veículos utilizam cilindros-mestres com sistemas de duplo circuito diagonais ou paralelos para conduzir o fluido até as rodas. Dessa forma, se um dos circuitos falhar, o outro circuito terá pressão suficiente para a frenagem.

Funciona como se tivéssemos dois cilindros simples interligados. As duas câmaras estão ligadas ao reservatório e cada uma delas possui um furo de alimentação e outro de compensação. Entre os êmbolos está montada uma mola. Quando se pisa no freio, o pedal empurra o êmbolo 1 e este empurra o êmbolo 2

através da mola, fazendo com que haja pressão simultânea nas duas câmaras. Cada câmara irá fornecer pressão hidráulica para duas rodas do veículo, como é visto na figura 22.

Figura 22 – Cilindro-mestre em corte.



Fonte: Manual NAKATA para sistemas de freios (2016).

Inicialmente o cilindro mestre possuía uma carcaça composta de um único pistão que alimentava simultaneamente os dois circuitos de freio, o do eixo dianteiro e do eixo traseiro, e no caso de falhas internas do sistema o processo da transmissão de pressão era interrompido, ocasionando assim a perda de frenagem.

Quando pressionamos o pedal de freio, a haste do servo empurra o pistão primário que transmite pressão ao circuito primário. A pressão existente entre o pistão primário e o secundário força o pistão secundário a comprimir o fluido alimentando assim o circuito secundário. Claro que a pressão operante é a mesma em ambos circuitos, e é estabilizada após desaplicarmos o pedal de freio, uma vez que as gaxetas possuem orifícios que permitem o escoamento do fluido residual na câmara do cilindro.

No cilindro mestre duplo escalonado os circuitos primário e secundário são montados em paralelo (circuito primário alimenta o eixo dianteiro, e o circuito secundário alimenta o eixo traseiro) uma vez que o seu corpo possui áreas diferentes, o que possibilita um aumento de pressão para o circuito traseiro em caso de falha do dianteiro, sem aumento na força de pedal.

Já no caso dos cilindros mestres duplos os circuitos são montados em diagonal, ou seja, o circuito primário alimenta a roda dianteira esquerda e a roda traseira direita, e o circuito secundário exatamente o oposto. No caso de falha de

qualquer um dos circuitos o motorista terá ação de frenagem pelo menos em uma das rodas dianteiras, que possui maior efetividade de frenagem.

Os cilindros mestres são encontrados em diversos diâmetros, entre os mais usados, 21, 22, 23 e 25,4 mm.

Observação: Segundo os fabricantes, para os veículos equipados com ABS, o cilindro mestre duplo contém em seu interior uma válvula compensadora montada junto à câmara do circuito secundário, o qual vai receber o excesso de fluido proporcionado pelo alívio da pressão dos freios das rodas (válvulas do ABS). A válvula compensadora foi adotada em função de possíveis danos as gaxetas, que podem ser ocasionados pelas constantes oscilações dos pistões por causa do funcionamento do ABS.

4.6. Fluido de freio

O fluido de freio é o responsável pela transmissão da força atuante no cilindro mestre (força proveniente do acionador e ampliada pelo servo), a qual segue para os circuitos de freio, e por fim até os pistões das pinças e os cilindros das rodas, sejam em automóveis comerciais leves e caminhões leves, ou mesmo em qualquer sistema de freios de atuação hidráulica.

É um óleo com múltiplas propriedades: resistência a altas e baixas temperaturas, neutralidade para não atacar os componentes de borracha, plástico e materiais metálicos que compõem o sistema de freio e resistência a altas pressões.

Tal fluido fica alocado em um reservatório, além de estar nos dutos de utilização, até ser necessária sua utilização, segundo o princípio de Pascal – que diz respeito aos vasos comunicantes, e que diz que qualquer variação de pressão exercida num fluido, transmite-se integralmente a todos os pontos do fluido e as paredes que o contém. Sendo assim, fica constatado que tal fluido é incompressível (uma propriedade importante que permite a utilização do mesmo), visto que a pressão é transmitida integralmente ao destino de utilização.

Uma característica importante para os fluidos de freios é o seu alto ponto de ebulição, assim como o seu ponto de congelamento, apesar de que essa variável física não afeta os veículos no Brasil, ao contrário de países onde o inverno é muito rigoroso. Entretanto, se o fluido de freio entrar em ebulição pela ação da transferência de altas temperaturas à ele, irá se vaporizar, perdendo assim a sua capacidade de

transmissão de pressão, uma vez que os gases são fluídos incompressíveis, e esse fato pode ocasionar perda total ou parcial dos freios.

As especificações do ponto de ebulição são encontradas nas embalagens precedidas pela sigla DOT – *Department of Transportation* – Departamento de Transporte – órgão americano que estabelece normas de segurança para o setor automotivo.

Tabela 4 - Pontos de Ebulição de fluidos de freio.

Classificação	DOT 3	DOT 4	DOT 5	DOT 5.1
Ponto de ebulição - Seco	205 °C (401 °F)	230 °C (446 °F)	260 °C (500 °F)	270 °C (518 °F)
Ponto de ebulição - Úmido	140 °C (284 °F)	155 °C (311 °F)	180 °C (356 °F)	190 °C (374 °F)

Fonte: Manual NAKATA para sistemas de freio (2016).

Sendo que DOT 3 e DOT 4 são produzidos à base de glicol, e o DOT 5 à base de silicone. A principal diferença é que o DOT 3 e DOT 4 absorvem água, e o DOT 5 não.

De acordo com o DOT as cores do fluido de freio são:

- DOT 3, DOT 4, e DOT 5.1 sem silicone (SBBF) – sem cor a âmbar.
- DOT 5 com silicone (SBBF) – roxo
- Óleo mineral de sistema hidráulico – verde

Uma vez que os fluídos de freios DOT 3 ou DOT 4 absorvem água, seu ponto de ebulição diminui, e como ele pode absorver essa água do ar, é conveniente não abrir com muita frequência o reservatório de fluído, fazendo isso somente durante as inspeções. O fluído DOT 5 não absorve água e como consequência seu ponto de ebulição permanece mais estável.

A importância de um fluído com alto ponto de ebulição se faz quando utilizamos o freio em condições muito extremas, como descidas de serra, onde a transferência de calor gerado pelos freios pode influenciar as partes internas do sistema de freios, principalmente através do material de atrito.

Uma característica comum do fluido é a absorção da umidade do ar. A essa característica damos o nome de higroscópico. A partir do momento que se abre uma embalagem nova, a umidade do ar já promoveu alguma alteração no seu ponto de ebulição, que com o passar do tempo diminuirá ainda mais, contribuindo também para

oxidar componentes internos das pinças, do cilindro mestre e do cilindro de roda. Essa é a razão de os fabricantes recomendarem a substituição do fluido a cada 12 meses.

Testes comprovam que nesse intervalo de tempo é possível encontrar cerca de 4% de água em sua composição. A contaminação do fluido com água cria bolhas de ar no circuito, comprometendo o funcionamento de todo o sistema.

4.7. Pirômetro

Um termômetro é um instrumento que mede quantitativamente a temperatura de um sistema. O pirômetro é um dispositivo capaz de fazer a medição de temperatura de outros equipamentos superficialmente, isto é, tem-se a possibilidade de se conhecer a temperatura de um elemento em pleno funcionamento, muitas vezes mesmo sem tocá-lo.

. O termômetro infravermelho é capaz de averiguar a temperatura de uma superfície pela energia infravermelha irradiada da superfície mirada, a qual é captada através do feixe de laser disparado pelo equipamento.

Neste estudo estamos utilizando o pirômetro a laser da marca Instrutherm, modelo TI-920. Este termômetro foi desenvolvido para ter baixíssimo consumo de bateria, que assegura o longo tempo de operação, livrando o usuário da troca frequente de bateria e de erros provenientes da operação em tensão abaixo do especificado.

Figura 23 – Pirômetro.



Fonte: Autor (2017).

4.8. Proposição dos experimentos e formulação matemática

Um experimento realizado foi o de comparação de situações de frenagem, colocando-se a prova dois tipos de disco de freios diferentes: um disco ventilado e outro sólido, afim de se comprovar experimentalmente as constatações já conhecidas e já discutidas a respeito dos mesmos.

Os discos de freio foram submetidos aos seguintes experimentos:

- *Experimento nº 1*: Frenagem regular, com redução gradativa da temperatura, simulando uma condição normalmente enfrentada pelo usuário, numa redução da velocidade de 40 km/h até a imobilização total.
- *Experimento nº 2*: Utilização intermitente dos freios, ou seja, ao atingir 80 km/h o freio é acionado até reduzir para 40 km/h, sendo que o veículo é imediatamente guiado para retomar a maior velocidade e repetir-se o processo por 4 vezes.

O procedimento logo após as frenagens é a utilização do pirômetro a laser para verificação da temperatura na superfície dos discos de freio, para posterior análise.

A segunda parte do estudo dar-se-á realizando a simulação computacional dos discos de freio (ventilado e sólido) com o recurso do software SolidWorks denominado Análise térmica – localizado na aba *Simulation*, em seguida pressionando em *consultor de estudos*.

O estudo térmico ocorre primeiramente projetando-se primeiramente os discos supracitados no programa, definindo suas medidas além de definir também o material o qual ele é confeccionado, neste caso o ferro fundido maleável.

Em seguida são definidas os valores das variáveis, as cargas térmicas atuantes no objeto de estudo, sendo estas: *temperatura inicial* (considerada como a temperatura ambiente, 31 °C, cujo disco está sujeito), *potência térmica* (a quantidade de energia que é dissipada no momento da frenagem, energia essa que é atuante nas superfícies de contato das pastilhas de freio com o disco), e *coeficiente de convecção* (valor que representa quanto o disco com o fluido o qual ele está imerso, o ar, sendo que ocorre a definição das áreas sujeitas a convecção, no caso, o disco inteiro).

É importante ressaltar que o disco está sujeito a uma simulação transiente, ou seja, ela ocorre não instantaneamente, mas num período definido como sendo a

terça parte da velocidade (em m/s), ou seja, $\frac{v(m/s)}{3}$. Esta razão se dá pelo fato citado no *item 2.2*, em que diz que uma desaceleração confortável deve ser de -3 m/s^2 . Além disso, as variáveis são inteiramente dependentes das curvas de temperatura, que permitem criar ou importar uma curva de temperatura para definir quantidades dependentes da temperatura para estudos térmicos transientes.

Em seguida basta definir a malha, cujo solver se utiliza do método de elementos finitos, e executar o estudo.

Para o valor da *potência térmica*, foram utilizados os seguintes cálculos, lembrando que a potência térmica pode ser calculada levando-se em consideração a Energia Cinética E_c do veículo. E tal energia teve seu valor obtido levando-se em consideração uma massa que se assemelha à dos veículos que foram realizados os testes de frenagem, ou seja, 950 kg.

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (6)$$

A Potência térmica total pode ser entendida como:

$$Pot. \text{ térmica}_{total} = \frac{E_c}{\Delta t} \quad (7)$$

Em que E_c é a energia Cinética do Veículo e Δt é o tempo de simulação (que é aproximadamente igual ao de frenagem).

E a potência térmica para somente um disco de freio é:

$$Pot. \text{ térmica}_{para \text{ um freio}} = \frac{(.6) \cdot Pot. \text{ térmica}_{total}}{2} \quad (8)$$

Considerando que a razão de frenagem em um veículo comum é de 60% na dianteira e 40% na traseira (em função do seu centro de massa que é deslocado para a frente), e como os discos são dianteiros e são aos pares divide-se por dois.

Como a velocidade considerada na primeira situação de frenagem é de 40 km/h, que equivale a 11,11 m/s, tem-se que:

$$E_c = \frac{1}{2} 950 \cdot 11,11^2$$

$$E_c = 58.641,97 \text{ J}$$

E como o tempo total adotado de ensaio do estudo transiente foi de 3,70 s, tem-se:

$$Pot. \text{ térmica}_{total} = \frac{58.641,97}{3,70}$$

$$Pot. \acute{t}ermica_{total} = 15.836,34 \text{ W}$$

Por conseguinte, deve-se extrair o valor individual, ou seja, para somente um disco de freio. Ent\~ao tem-se que:

$$Pot. \acute{t}ermica_{para \text{ um freio}} = \frac{(.6) \cdot 15.836,34}{2}$$

$$Pot. \acute{t}ermica_{para \text{ um freio}} = 4.750,9 \text{ W}$$

Ent\~ao, entende-se que a pot\~encia t\~ermica a qual o disco est\~a sendo submetido para uma velocidade de 40 km/h \acute{e} da ordem de 4.750,9 W.

De maneira an\~aloga, baseando-se nos mesmos c\~alculos, para uma velocidade de 80 km/h (que equivale a 22,22 m/s), e um tempo de simula\~cao de 7,4s, sendo este obtido atrav\~es da Equa\~cao (2).

Na primeira situa\~cao, como a velocidade de frenagem considerada \acute{e} de 80 km/h, que equivale a 22,22 m/s, tem-se que:

$$E_c = \frac{1}{2} 950 \cdot 22,22^2$$

$$E_c = 234.567,9 \text{ J}$$

E como o tempo total adotado de ensaio do estudo transiente foi de 7,4s, tem-se:

$$Pot. \acute{t}ermica_{total} = \frac{234.567,9}{7,4}$$

$$Pot. \acute{t}ermica_{total} = 31.698,36 \text{ W}$$

Por conseguinte, deve-se extrair o valor individual, ou seja, para somente um disco de freio. Ent\~ao tem-se que:

$$Pot. \acute{t}ermica_{para \text{ um freio}} = \frac{(.6) \cdot 31.698,36}{2}$$

$$Pot. \acute{t}ermica_{para \text{ um freio}} = 9.509,5 \text{ W}$$

Ent\~ao, entende-se que a pot\~encia t\~ermica a qual o disco est\~a sendo submetido \acute{e} da ordem de 9.509,5 W.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise térmica realizada após simulação dos discos de freios ventilado e sólido, como são mostrados nas figuras a seguir, tem os seguintes resultados. Estes resultados obtidos através de simulação no programa *SolidWorks* descrevem a distribuição de temperatura em toda a superfície do disco, especialmente na área de atrito com a pastilha, detalhando os pontos em que se tem um maior gradiente de temperatura.

5.1. Análise experimental

A análise experimental da temperatura na superfície dos discos de freio postos à prova em uma pista da Universidade Estadual do Maranhão, permitiu obter-se os seguintes resultados para o experimento nº 1:

Figura 24 - Temperatura obtida na frenagem com disco ventilado à 40 km/h.



Fonte: Autor (2017).

Como pode-se observar, a temperatura no momento imediatamente após a redução da velocidade do veículo de 40 km/h à zero é de 57,9 °C. Vale ressaltar que apesar de ser mostrado no display que a temperatura máxima obtida foi de 80,9 °C (figura 24), esta não foi considerada no momento, em função do laser do aparelho ter atingido outros componentes que não são contemplados como objeto de estudo deste

trabalho. O relevante é se observar a temperatura no instante em que a mesma é mensurada.

Em seguida, o mesmo teste foi realizado com uma velocidade de 80 km/h o resultado foi de 86,3 °C, como podemos ver na figura 25.

Figura 25 - Temperatura obtida na frenagem com disco ventilado a 80 km/h.



Fonte: Autor (2017).

Em relação a figura 24, é notório o aumento da temperatura em função da maior energia cinética do conjunto, o qual resulta em um maior esforço para o disco ter sua velocidade reduzida, implicando em um maior atrito gerado, assim elevando a temperatura.

Dando continuidade à experimentação, apresenta-se a seguir, nas figuras 26 e 27, os resultados das temperaturas obtidas nas frenagens utilizando-se os discos sólidos.

Na figura 26, que representa a temperatura obtida com uma frenagem utilizando-se discos de freio sólidos à velocidade de 40 km/h, obteve-se a temperatura de 68,9 °C. Infere-se que esta temperatura é cerca de 10 °C mais alta do que a temperatura observada na figura 24, a cuja temperatura foi obtida na mesma velocidade. Isto ocorre em justamente em função da maior dissipação de calor que o disco ventilado possui, podendo assim trabalhar com temperaturas mais baixas.

Figura 26 - Temperatura obtida na frenagem com disco sólido a 40 km/h.



Fonte: Autor (2017).

Já a figura 27 a seguir, a temperatura de 134,3 °C foi observada numa frenagem a 80 km/h, com mesmo disco sólido do caso anterior, porém em função da maior velocidade, observou-se também uma maior dificuldade na frenagem do veículo no sentido de um maior espaço para que ele tenha a sua parada completa).

Figura 27 - Temperatura obtida na frenagem com disco sólido a 80 km/h.



Fonte: Autor (2017).

Nas figuras 28 e 29 a seguir, apresentam-se os resultados experimento nº 2, a que foram submetidos os discos. Neste momento em questão, foram realizados quatro testes consecutivos de acelerações e reduções de velocidade, com o objetivo de observar-se o comportamento do disco em relação à sua dissipação de calor.

Figura 28 - Temperatura após frenagens consecutivas com disco ventilado.



Fonte: Autor (2017).

Como esperado, o disco ventilado (figura 28) obteve uma performance superior ao disco sólido (figura 29) em função da sua maior troca de calor proporcionada pelas aletas localizadas entre as superfícies de atrito. Os dois discos, entretanto, foram submetidos ao mesmo trecho e anterior à frenagem, logo, o sólido alcançou uma temperatura mais elevada, justamente pela sua inferior troca de calor com o ambiente.

Figura 29 - Temperatura após frenagens consecutivas com disco sólido.



Fonte: Autor (2017).

5.2. Análise computacional

Em diversos ramos da engenharia, a utilização de Softwares de modelagem mostrou-se ao longo dos anos imprescindível ao desenvolvimento, aprimoramento e simulação de novas tecnologias, bem como de novos equipamentos e dispositivos a serviço da mesma. Esta opção além de propiciar economia de tempo quanto a solução de eventuais percalços dos projetos, é de fundamental importância quando se visa poupar investimento de capital, ainda também podendo reduzir riscos físicos ao se realizar testes totalmente computacionais, entre outros benefícios.

A simulação em softwares de CAD/CAM (*Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing*) apresenta como característica a utilização de parâmetros pré-estabelecidos baseados em no comportamento real e/ou ideal do objeto em questão. Dessa forma, tem-se a possibilidade de variar tais parâmetros podendo obter-se os mais variados resultados de acordo com o(s) objetivo(s) do estudo.

Na área em questão neste trabalho, cada vez mais é relevante a simulação em ambiente computacional dos dispositivos que formam um dos sistemas mais importantes de um veículo, a sistema de freios (sendo o indispensável a segurança e integridade do mesmo), tendo em vista os benefícios supracitados, além de ser uma fase primordial do projeto (não somente de cunho automotivo, mas também dos mais diversos maquinários móveis). É nesta fase de projeto que se podem ser detectados erros estruturais de desenho, falhas a diferentes esforços, adequação dos materiais do qual o dispositivo é feito, proporcionando economia no tempo de desenvolvimento e redução nos custos.

Dentre os mais variados softwares usados pelas indústrias de desenvolvimento de peças automotivas, o *SolidWorks*, uma ferramenta amplamente divulgada e utilizada pelo mundo acadêmico na área de engenharia, foi a que se mostrou mais palpável e prática neste estudo (tendo em vista a prévia habilidade do autor em manusear o software). A Dassault Systèmes SolidWorks Corp. oferece ferramentas de software 3D que permitem criar, simular, publicar e gerenciar os dados.

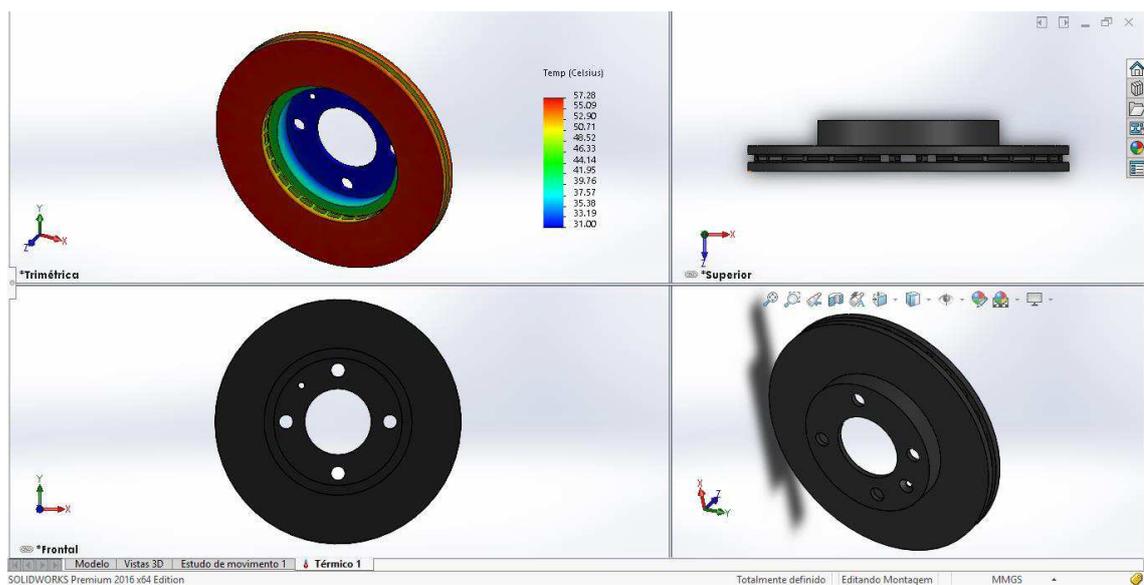
O programa possui uma seção voltada inteiramente a análise de estudos dos fenômenos envolvendo diversos tipos de simulação: Térmica, de fadiga, flambagem, análise estática, escoamento de fluidos, etc. Neste estudo em especial,

se volta a atenção a análise térmica do componente que recebe a maior parte dos esforços de frenagem, além da propriamente dita exposição à altas taxas de calor residual provenientes do atrito do material abrasivo da pastilha, objetivando sua redução de rotação: o disco de freio.

Apresentam-se a seguir os resultados gráficos de uma análise térmica em regime transiente sendo que a simulação ocorre em um período de tempo de 3.7 e 7.4 segundos (vide tópico 4.8) com base em parâmetros estimados e calculados para os dois tipos de disco de freio já discutidos neste trabalho, sólido e ventilado.

A figura a seguir (figura 30), apresenta as vistas geométricas do disco de freio ventilado, simulando uma frenagem partindo de 40 km/h até o repouso. A figura 31, diz respeito a temperatura atingida na simulação, além de mostrar os detalhes da malha.

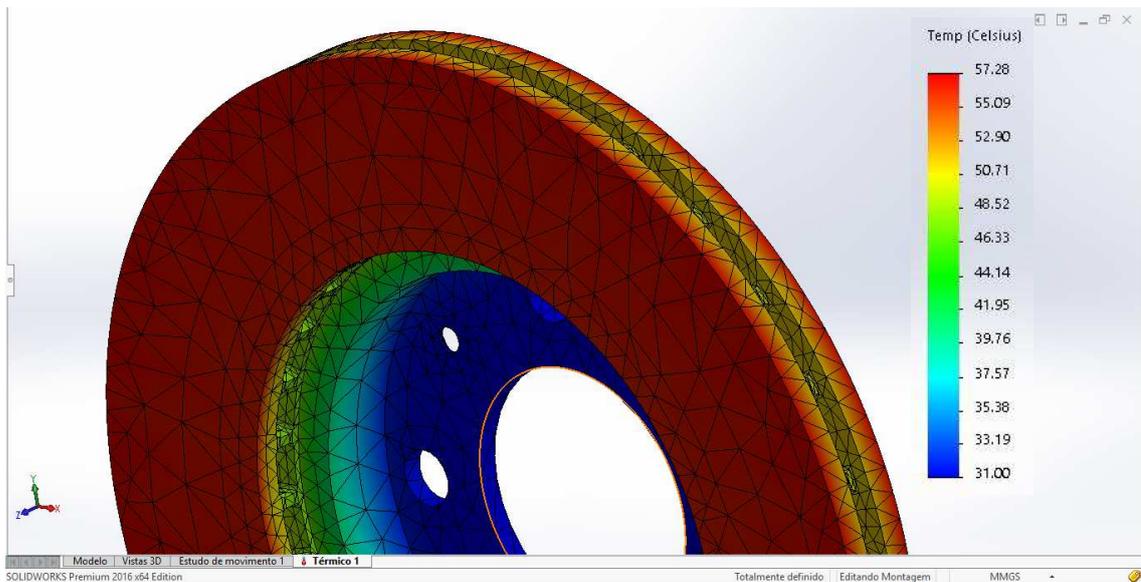
Figura 30 - Disco de freio ventilado: Vistas geométricas e resultado para 40 km/h.



Fonte: Reprodução SolidWorks/Autor (2017).

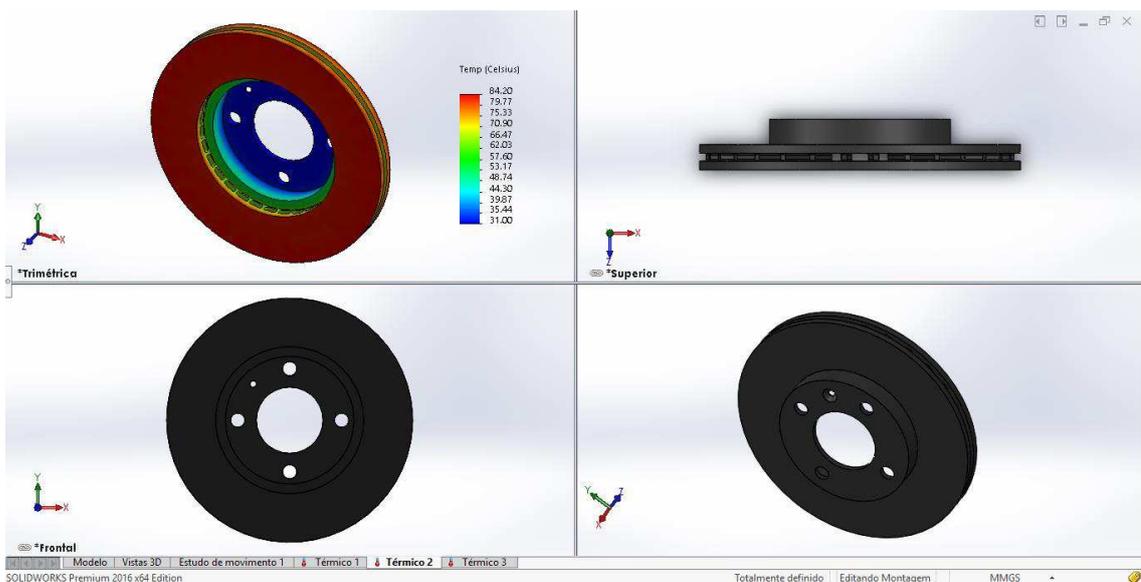
Nota-se que a temperatura na superfície do disco em questão, atingiu a casa dos 57,2 °C e, em comparação com o resultado do experimento à mesma velocidade (figura 24), que atingiu 57, 9 °C, logo, tendo um erro de apenas 1,2%.

Figura 31 - Disco de freio ventilado: Detalhe da malha e gradientes de temperatura (40 km/h).



Fonte: Reprodução SolidWorks/Autor (2017).

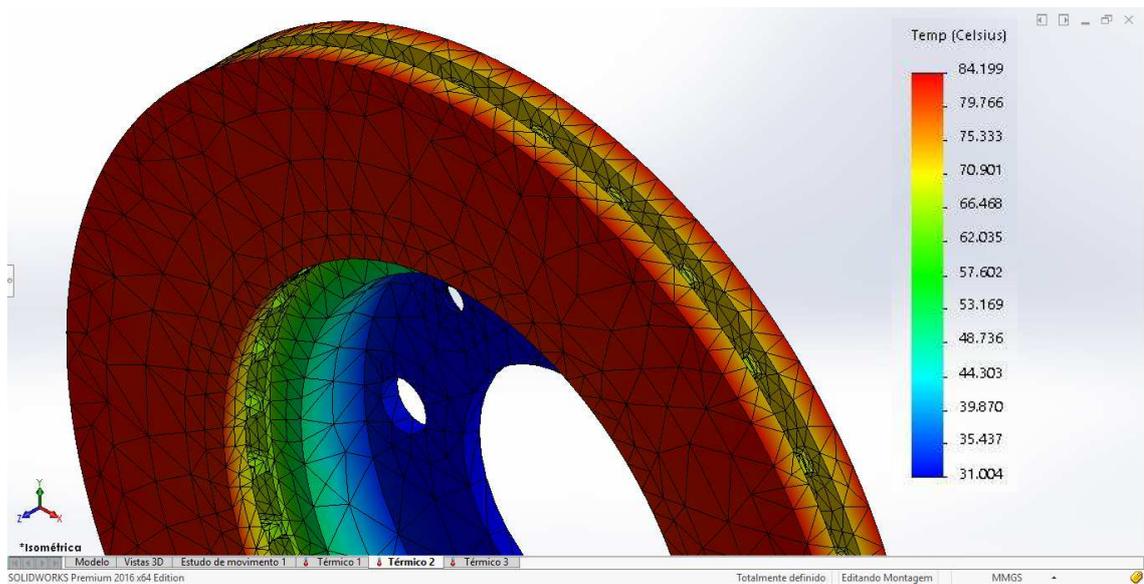
Figura 32 - Disco de freio ventilado: Vistas geométricas e resultado para 80 km/h.



Fonte: Reprodução SolidWorks/Autor (2017).

Nas figuras 32 e 33 apresentam-se os resultados a partir de uma velocidade de 80 km/h, e como é observado, a temperatura máxima obtida foi de 84,2 °C. Tomando-se como base a temperatura que é mostrada na figura 25, com o valor de 83,2 °C, infere-se que a discrepância entre simulação e experimentação foi de somente 1,1%.

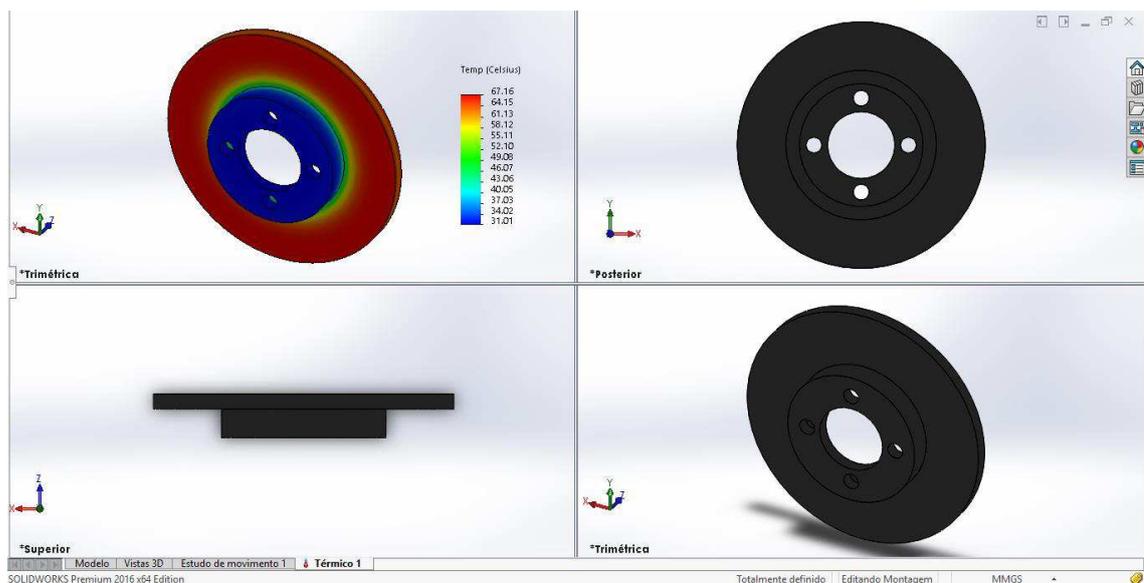
Figura 33 - Disco de freio ventilado: Detalhe da malha e gradientes de temperatura (80 km/h).



Fonte: Reprodução SolidWorks/Autor (2017).

A seguir são apresentadas em detalhe (figuras de 34 a 37) os resultados dos estudos térmicos para o disco de freio tipo sólido, levando-se em consideração as velocidades semelhantes à simulação anterior, que são de 40 km/h e 80 km/h, assim como os tempos de simulação supracitados.

Figura 34 - Disco de freio sólido: Vistas geométricas e resultado para 40 km/h.

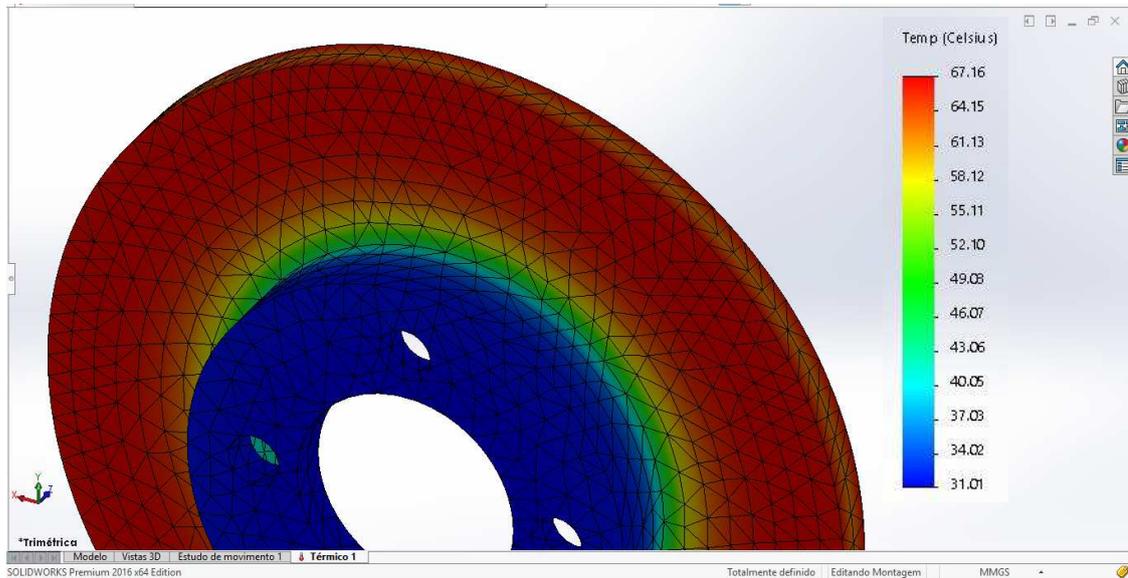


Fonte: Reprodução SolidWorks/autor (2017).

A figuras 34 e 35 revelam os resultados, vistas geométricas e detalhes da malha de elementos finitos da simulação para o disco de freio sólido à uma velocidade de 40 km/h.

Com relação à margem de erro entre a simulação e experimentação, esta ficou na casa dos 2,6%, tendo como referência a figura 26 que mostra uma temperatura atingida de 68,9 °C.

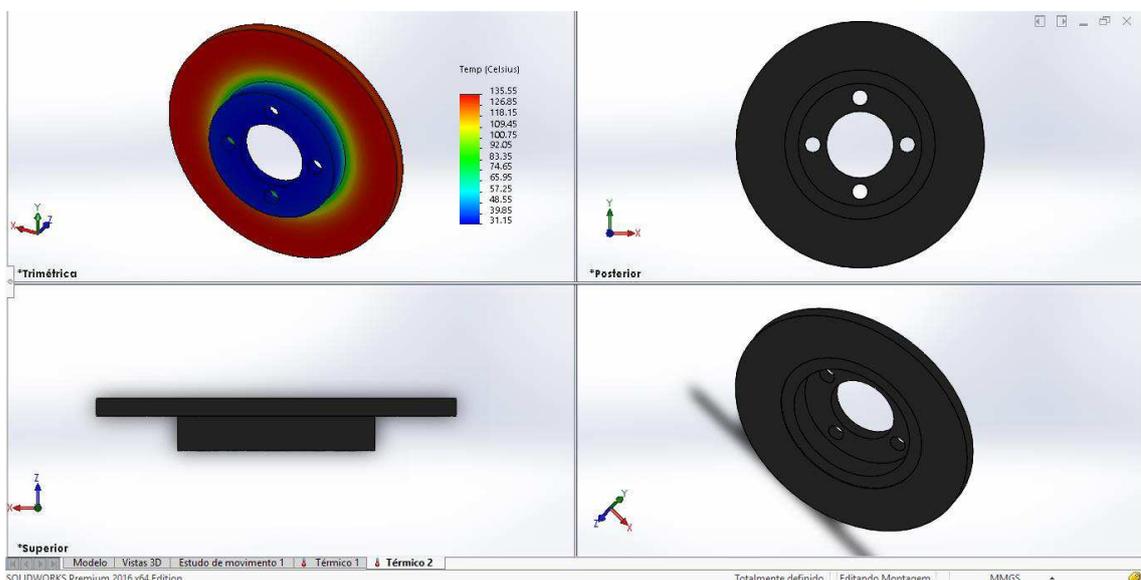
Figura 35 - Disco de freio sólido: Detalhe da malha e gradientes de temperatura (40 km/h).



Fonte: Reprodução SolidWorks/Autor (2017).

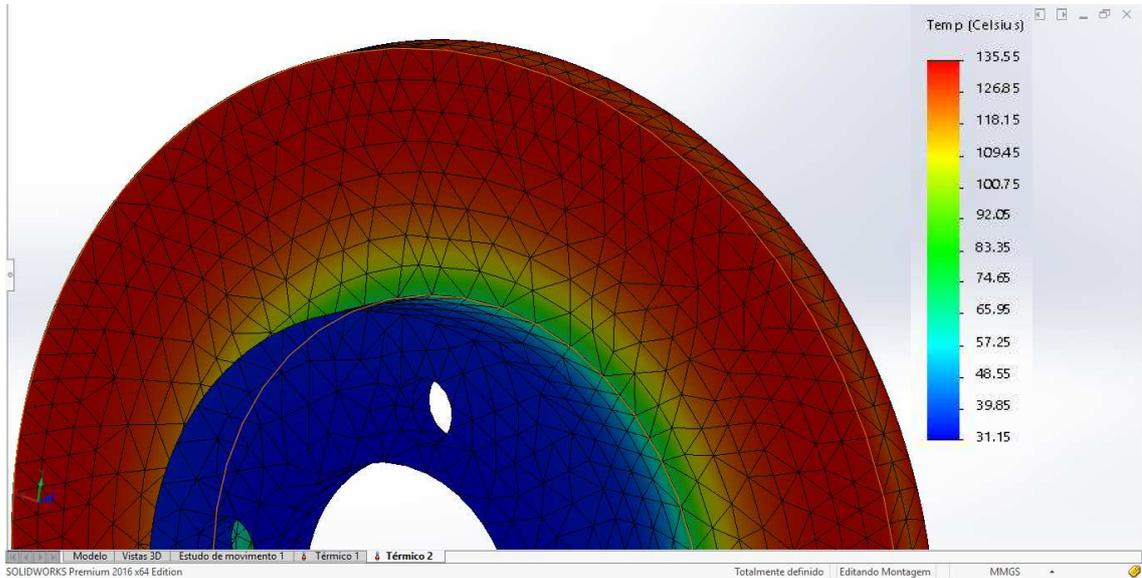
As figuras a seguir (figuras 36 e 37) indicam os resultados da simulação do disco de freio sólido para uma frenagem de 80 km/h até o repouso. A temperatura máxima atingida foi de 135,5 °C. Em comparação com o resultado prático mostrado na figura 27, de 134,3 °C, tem-se uma diferença de singelos 0,8%.

Figura 36 - Disco de freio sólido: Vistas geométricas e resultado para 80 km/h.



Fonte: Reprodução SolidWorks/Autor (2017).

Figura 37 - Disco de freio sólido: Detalhe da malha e gradientes de temperatura (80 km/h).



Fonte: Reprodução SolidWorks/Autor (2017).

Diante de todos os resultados apresentados, as considerações a respeito da utilização de discos de freio sólidos ou ventilados, são as seguintes:

Tabela 5 - Resultados das medições das temperaturas.

	Experimental		Computacional	
	40 km/h	80 km/h	40 km/h	80 km/h
Disco Ventilado	57,9 °C	83,2 °C	57,2 °C	84,2 °C
Disco Sólido	68,9 °C	134,3 °C	67,1 °C	135,5 °C

Fonte: Autor (2017).

Para uma redução de velocidade de 40 km/h até o repouso, segundo as taxas de desaceleração recomendadas para conforto na frenagem, além de possíveis variáveis não abordadas neste trabalho, a redução na temperatura máxima na superfície do disco ventilado em relação ao disco sólido obtida experimentalmente foi de 11 °C, representando uma redução de 15,9 % estatisticamente.

Já no caso de uma redução de velocidade de 80 km/h até a parada total, nas mesmas condições citadas anteriormente, a redução chega a 51 °C, o que significa dizer que o disco ventilado atingiu uma temperatura superficial 38% mais baixa em relação ao sólido.

Em função da complexidade do experimento nº 2 – o qual consiste em desacelerar o veículo partindo de 60 km/h até 40km/h com quatro repetições – sua simulação seria provavelmente impraticável, tendo em vista a indisponibilidade de tal recurso no programa utilizado. Entretanto, partindo do seu objetivo que foi mensurar o quão significativo é a ineficiência dos freios em altas temperaturas, infere-se que a afirmativa é verdadeira, pois apesar de não ocorrer a perda dos freios, notou-se uma leve dificuldade em parar o veículo ao final, além da temperatura obtida ser 69 % (diferença de 70,5 °C) maior no disco sólido (figura 28) do que em relação ao disco de freio ventilado (figura 29).

6. CONCLUSÃO

Os discos de freio assim como os demais componentes formam uma unidade primordial de qualquer dispositivo de mobilidade cuja funcionalidade é essencial para a segurança. A manutenção correta pode evitar riscos à segurança e perdas em termos de conforto e vida útil.

Tendo em vista todos os conhecimentos apresentados durante este trabalho, pode-se inferir as seguintes conclusões:

A principal diferença entre os discos de freios ventilados e sólidos em relação a temperatura, é que as aletas proporcionam ao disco ventilado uma maior taxa de resfriamento (em outras palavras, um resfriamento mais acelerado), em razão da maior área de contato com a fluido convectivo – o ar, deste modo, permitindo ao mesmo que trabalhe em uma temperatura mais baixa, possibilitando uma eficiência maior (referindo-se à possibilidade do disco trabalhar mais longe possível da sua temperatura máxima, onde podem ocorrer falhas) nas situações que o mesmo é mais exigido.

A diferença das temperaturas mensuradas nas superfícies dos discos aumenta ao passo que a velocidade também aumenta, já que a energia cinética envolvida e conseqüentemente a potência térmica, sofrem um acréscimo. Por conseguinte, o resultado do experimento de frenagem a 40 km/h teve uma redução de 15,9% na temperatura máxima obtida, assim como a frenagem de 80 km/h teve uma redução de 38% na temperatura máxima obtida.

É importante também, ressaltar a indispensável necessidade atual da utilização de ferramentas digitais para o ensaio/simulação de projetos de engenharia pois, pode-se observar experimentalmente o estudo térmico condizendo com o ensaio tradicional, podendo-se entender que esta etapa de projeto é totalmente válida, pois como mostram os resultados das simulações, as margens de erro entre a realidade e o ensaio virtual foram muito reduzidas, da ordem de menos de 3%.

Ao final deste estudo, depois de muitas horas dedicadas, trabalho duro, afincos e persistência, também foi possível inferir que o processo de experimentação e simulação é indispensável ao aprendizado, principalmente quando se trata da formação acadêmica do discente, com atenção especial ao discente de engenharia mecânica.

REFERÊNCIAS

- ABEID, L. TORT, A.C. **As forças de atrito e os freios ABS**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 36, n. 2, 2306. 2014.
- BORNHOLD, Adelson M. **Dimensionamento de um sistema de freio para veículo offroad de pequeno porte**. 2012. Monografia. Fator Faculdade Horizontina. Horizontina. 2012.
- CASTELAN, Jovani; MILANEZ, Alexandre; FRITZEN, Daniel. **Aprendizagem em engenharia utilizando métodos analíticos e numéricos**. Revista de Ensino de Engenharia, v. 35, n. 2, p. 37-43. 2016.
- CHIARONI, Alexandre B. **Análise térmica de um freio a tambor para rodas traseiras de veículos de passeio**. São Paulo. Trabalho de Conclusão de Curso. 2014.
- CHWIF, Leonard; MEDINA, Afonso C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: Teoria & Aplicações**. 3ª ed. Edição do Autor. 2010.
- CUIDADOS com discos e Pastilhas. **Revista O Mecânico**. São Paulo. Ano XXIX. nº 243. Julho. 2014.
- DENNY. M. **European Journal of Physics**. 26, 1007 2005.
- FREIOS – Substituição dos materiais de atrito no Novo Logan. **Revista O Mecânico**. São Paulo, Ano XXXI. nº 258. Outubro. 2015.
- GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Society of Automotive Engineers, Inc. 1992.
- GRADELA, Fabíola B. **Identificação das falhas utilizando FMEA no sistema de freios de carros de competição on-road – Fórmula@-SAE**. Trabalho de conclusão de curso. São Carlos. 2013.
- INCROPERA, Frank P. [et al.]. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. Tradução e revisão técnica Eduardo Mach Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. 6ª ed. Rio de Janeiro. Editora LTC. 2008.
- INFANTINI, Maurício B. **Variáveis de desempenho dos sistemas de freio**. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre. 2008.
- INSTITUTE OF TRANSPORTATION ENGINEERS. **Traffic Engineering Handbook**. 6th Edition. Washington DC. 2009.
- KAWAGUCHI, Hiroaki. **Comparação da análise de conforto de frenagem Subjetiva x Objetiva de um veículo de Passeio**. Dissertação de Mestrado Profissional. São Paulo. 2005.

KERN, Donald Q. **Processos de Transmissão de Calor**. Editora Guanabara. Rio de Janeiro. 1980.

LIMPERT, Rudolf. **Brake Design and Safety**. Segunda Edição. SAE. EUA. 1999.

MANUTENÇÃO nos freios do Aircross. **Revista O mecânico**. São Paulo, Ano XXXI, nº 266. Junho. 2016.

MATOZO, Luciano L. **Análise de Materiais de fundo de alto amortecimento e de seus efeitos em pastilhas de freio**. Dissertação de Mestrado. UFRS. Porto Alegre. 2006.

MIYASATO, Hugo H. **Simulação do fenômeno de gear rattle em modelos de trem de potência automotivos**. Dissertação de Mestrado. Campinas. 2011.

NETTO et al. **Realidade Virtual e suas aplicações na área de manufatura, treinamento, simulação e desenvolvimento de produto**. Gestão & Produção. v.5, n.2, p. 104-116, ago. 1998.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. [Tradução: Konstantinos Dimitriou Stavropoulos ... et al.]. 4. ed. Porto Alegre. Bookman. 2013.

SCHMIDT, Frank W. HENDERSON, Robert E. WOLGEMUTH, Carl H. **Introdução às Ciências Térmicas**. Editora Edgard Blucher Ltda.

SOUSA, Luiz A. P. **Taxas de desaceleração e tempos de percepção e reação dos motoristas em interseções semaforizadas**. Dissertação de Mestrado. UFRJ. Rio de Janeiro. 2011.

THOMAS, Lindon C. **Fundamentos da Transferência de Calor**. Rio de Janeiro. Prentice-Hall do Brasil. 1985.

YOSHIDA, Lucas Silva. **Projeto adaptativo de um sistema de freios para utilização em carro de competição classe Fórmula SAE**. Trabalho de Conclusão de Curso. São Carlos. 2013.

Catálogo de produtos Hiper Freios. 2013. Disponível em:
<<http://www.hipperfreios.com.br/catalogo/catalogo-hipper-freios.pdf>> Acesso em: 17/02/17

COBREQ. Discos de Freio para Freios de Veículos de Passeio – Informações técnicas. Manual do fabricante. 2015. Disponível em:
<http://www.cobreq.com.br/site/arquivos/informacoes_tecnicas/COBREQ-DISCOS-DE-FREIO.pdf>. Acesso em: 17/09/16

Discos de freio incandescentes. Disponível em:
<<https://rizzofisico.wordpress.com/2012/07/04/discos-de-freio-incandescentes/>>. Acesso em: 15/11/2016

Funcionamento e Detalhes do Sistema de Freio a Disco. Disponível em: <<http://www.carrosinfoco.com.br/carros/2016/03/funcionamento-e-detalhes-do-sistema-de-freio-a-disco/>>. Acesso em: 01/06/16.

Fundamentos de freios e seus componentes. Disponível em: <[http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM053/Bibliografia/freios/%5BBR%5D%20-%20Fundamentos%20de%20freios%20e%20seus%20componentes%20\(2\).pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM053/Bibliografia/freios/%5BBR%5D%20-%20Fundamentos%20de%20freios%20e%20seus%20componentes%20(2).pdf)>. Acesso em: 16/09/16.

Freio, conhecendo o produto. TRW. 2009. Disponível em: <http://www.manualdoautomovel.com.br/areatecnica/manuais_de_treinamento/freio_trw/trw/index.html> Acesso em: 02/03/17.

Mecanismos de Desgaste. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfWUJAH/mecanismos-desgaste-erosao-abrasao-corrosao>>. Acesso em: 17/09/16.

NAKATA. Manual NAKATA para sistemas de freios. Manual do fabricante. 2016. Disponível em: <<http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM053/Aulas/extras/Manual%20sistema%20de%20freios%20-%20Nakata.pdf>>. Acesso em: 17/09/16.

NASCIMENTO, Ivaldo A. BAPTISTA, André L. B. DESGASTE. Divisão Metalurgia / Processos. Spectru Instrumental Científico Ltda. Disponível em: <<http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/desgaste.pdf>> Acesso em: 17/09/16.

Pastilhas, lonas e embreagens. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfXnIAF/pastilhas-lonas-embreagens>> Acesso em: 17/04/17.

TAKAHASHI, Tiago A. Construção de uma bancada de testes para o estudo do problema de squeal noise em sistemas de freio a disco automotivo. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2006/Artigos/Art_TCC_061_2006.pdf>. Acesso em: 09/04/17.

TAVARES, Romero S. Notas de Aula de Física. 2002.