

Aplicação de Técnicas de Planejamento de Experimentos para Otimização do Comportamento Tribológico e Térmico de Materiais de Atrito Durante o Processo de Frenagem

Application of Experimental Planning Techniques for Optimization of the Tribological and Thermal Behavior of Friction Materials During the Braking Process

Rafael Lucas Machado Pinto¹, Juan Carlos Horta Gutiérrez²,
Rodrigo Cardoso de Menezes², Juan Carlos Campos Rubio²,
Paulo Eustáquio de Faria²

¹Universidade Federal de Ouro Preto – Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas - Rua 36, Número 115 - Bairro Loanda, João Monlevade, CEP: 35931-00. e-mail: rafaelucas@gmail.com

²Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos, 6.627, CEP 31270-901 Belo Horizonte – MG. e-mail: horta@demec.ufmg.br, menezes.eng@bol.com.br, juan@demec.ufmg.br, paulofaria@eng-mec.dout.ufmg.br

RESUMO

Sistemas de freio têm a finalidade de reduzir ou manter a velocidade de um veículo, levá-lo à imobilidade ou mantê-lo imóvel. O princípio básico dos sistemas de freios por atrito é a conversão da energia cinética do veículo em energia térmica. Neste estudo, buscou-se analisar os parâmetros de operação de um sistema de freio a disco para motocicletas utilizando-se um banco de ensaios baseado no procedimento Krauss, descrita pela norma ABNT NBR 6143/1995. Optou-se por conduzir um Experimento fatorial completo 2^3 , em que os três fatores de controle considerados (tipo de disco de freio, tipo de pastilha e o valor da pressão de acionamento da manete de freio) foram alterados deliberadamente em dois níveis cada. Analisou-se as propriedades dos materiais envolvidos novos e após um determinado tempo de uso, denominado materiais assentados. Para avaliar o desempenho do sistema de freio durante o processo de frenagem, analisaram-se duas variáveis de resposta simultaneamente: coeficiente de atrito e temperatura final. A partir dos experimentos, o desempenho tribológico mais satisfatório ocorreu para os materiais constituintes do par de atrito, disco e pastilhas, assentados, e um menor valor de pressão de acionamento da manete de freio. Já para a temperatura, o melhor resultado ocorreu para os materiais do par de atrito novo e um menor valor de pressão. Com o intuito de encontrar a melhor combinação dos níveis de cada fator que otimize o desempenho global destas duas variáveis resposta, foi proposta uma técnica de otimização de múltiplas respostas. Como resultado, obteve-se os níveis assentados do par de atrito e o menor valor de pressão como os capazes de otimizar as duas variáveis resposta simultaneamente. Por fim, o banco de ensaios foi adaptado com um motor de maior potência, o que possibilitou evidenciar e esclarecer mais sobre o efeito *brake fade*.

Palavras-chave: Material de atrito, Frenagem, Sistemas de Freio, efeito *fade*

ABSTRACT

Brake systems are employed to reduce or maintain the speed of a vehicle, take it to stillness or keep it motionless. The basic principle of friction brake systems is the conversion of the kinetic energy of the vehicle into thermal energy. This study aimed to analyze the operating parameters of a disc brake system for motorcycles using a test bench based on the Krauss procedure described by ABNT NBR 6143/1995. It was decided to conduct a complete 2^3 factorial experiment, in which the three control factors considered (type of brake disc, type of pad and the value of brake lever drive pressure) were deliberately altered in two levels each. The properties of the new materials were analyzed and after a certain time of use, called seated materials. To evaluate the performance of the brake system during the braking process, two response variables were analyzed simultaneously: friction coefficient and final temperature. From the experiments, the

most satisfactory tribological performance occurred for the constituent materials of the friction pair, disc and pads, set, and a lower value of brake lever drive pressure. As for the temperature, the best result occurred for the materials of the new friction pair and a lower pressure value. In order to find the best combination of levels of each factor that optimizes the overall performance of these two response variables, a multiple response optimization technique was proposed. As a result, the settling levels of the friction pair and the lowest pressure value were obtained as the ones able to optimize the two response variables simultaneously.

Finally, the test bench was adapted with a higher power engine, which made it possible to highlight and clarify more about brake fade or brake reduction effect.

Keywords: Friction material, braking, brake systems, fade effect.

1. INTRODUÇÃO

Segundo TALATI e JALALIFAR (2009) [20] freios são, essencialmente, mecanismos que convertem o tipo de energia. Para NARAYANA *et al* (2014) [12] a frenagem é um processo que converte energia cinética de um veículo em energia mecânica, que deve ser dissipada na forma de calor. De acordo com MAKRAHY *et al* (2013) [11], sistemas de freio tem a finalidade de reduzir ou manter a velocidade de um veículo, levá-lo à imobilidade ou mantê-lo imóvel. Já LIMPET (2011) [10], menciona que um veículo mantém-se conectado à estrada devido às forças de aderência produzidas pelos pneus. A operação segura de um veículo motorizado requer contínuo ajuste de sua velocidade às mudanças das condições de tráfego.

Segundo LIMPET (2011) [10], os freios de atrito veiculares podem ser agrupados em duas classes: Freios a tambor e Freios a disco. O mesmo autor destaca que a principal vantagem do freio a disco é a sua capacidade de operar com pequeno efeito fade a altas temperaturas, da ordem de 800 a 900°C. Já Freios a tambor têm sua eficiência prejudicada ao exceder 400 a 427°C. Para REHKOPF e HALDERMAN (2006) [17], o ruído é um grande problema dos freios a disco. Além disso, o custo de um sistema de freio a disco é maior que o freio a tambor. Entretanto, o peso de um sistema de freio a disco é menor e a manutenção é mais simples devido à menor quantidade de componentes, quando comparado ao sistema de freio a tambor.

NEIS (2012) [13] menciona que as variáveis que influenciam no desempenho (desgaste e atrito) dos materiais de fricção utilizados para frenagem são composição química e microestrutura tanto do disco quanto da pastilha, velocidade de deslizamento entre o par de atrito, pressão de contato, filme de fricção, histórico térmico e de carga do material, temperatura e rugosidade do disco, além das condições ambientais de realização dos testes. De acordo com XIAO *et al* (2016) [22] o comportamento do atrito e do desgaste dos materiais de atrito são principalmente afetados por: características materiais, condições de frenagem, condições de contorno, condições superficiais do par tribológico e parâmetros estruturais. Para XIAO *et al* (2016) [22], a análise da temperatura, pressão de frenagem e velocidade inicial de frenagem são os fatores mais estudados e conhecidos, já os outros fatores mencionados não são facilmente ou claramente estudados e detectados devido à limitação de teorias e tecnologias.

O desenvolvimento da composição ideal para materiais de fricção é uma das atividades mais complexas para fabricantes deste setor. OSTERMEYER (2001) [15] ressalta que pastilhas de freio geralmente são constituídas por mais de 20 ingredientes. Segundo OSTERMEYER e MULLER (2008) [16], pastilhas e lonas de freios devem apresentar baixo desgaste do material de atrito, manter o atrito estável à medida que há variação de temperatura, liberação mínima de resíduos e minimização da geração de ruído e vibrações. Além disso, BLAU (2001) [2] salienta que os materiais de fricção devem ser resistentes à corrosão e LEE e KANG (2007) [9] ressaltam sobre a importância de componentes veiculares recentemente desenvolvidos buscarem minimização do peso. De acordo com Eriksson e Jacobsom (2000), os materiais de fricção para utilização em freios normalmente são classificados em duas classes, semi-metálicos ou orgânicos. Já para os discos de freio, as características desejáveis são resistências térmica, mecânica, à corrosão e ao desgaste, e usinabilidade. Devido à grande competitividade entre as empresas no panorama econômico atual, os fatores tempo de desenvolvimento e de fabricação e custo passaram a ser diferenciais competitivos, aliados à garantia de que o produto atenda todas as especificações técnicas do cliente. De acordo com INFANTINI (2008) [8], materiais de fricção requerem elevados tempo de desenvolvimento e custo, pois o material precisa passar por uma série de testes em máquinas de ensaio e em veículos para obterem certificação.

Ensaio em laboratório são frequentemente empregados para caracterizar o desempenho de materiais de fricção. Segundo SANDERS *et al.* (2001) [19], máquinas de ensaios de frenagem possibilitam que as propriedades dos materiais de fricção sejam medidas com maior precisão, minimizam o custo de máquina e permitem que o material de fricção seja ensaiado antes que o sistema de freio seja projetado. TIMTE (2000)

[21] aponta a facilidade de instrumentação e controle mais preciso das variáveis envolvidas como vantagens ao utilizar a metodologia de avaliação de frenagens através de bancadas em laboratório.

NEIS *et al.* (2015) [14], realizaram um estudo baseado na análise comparativa do desempenho de pastilhas freio aplicadas a um modelo de veículo, sendo uma original e 3 pastilhas de reposição adquiridas no mercado brasileiro. A performance das pastilhas foi avaliada em função do coeficiente de atrito, do desgaste e das características acústicas. Os ensaios de frenagem foram realizados utilizando um tribômetro de escala. Cinco parâmetros foram utilizados para caracterizar as pastilhas de freio: o coeficiente de atrito médio, a variação do coeficiente de atrito, a taxa percentual de fade, a taxa de desgaste específica, e a média geral de vibração. Para relacionar todos os parâmetros, os autores criaram um índice Q. A análise dos resultados mostrou que as pastilhas de freio originais apresentaram o maior valor e a menor variação do coeficiente de atrito, bem como a melhor resistência ao “*brake fade*” ou redução de potência de frenagem.

O presente trabalho aplicou a metodologia de planejamento de experimentos fatoriais completo 2³ em um banco de ensaios através do procedimento Krauss, descrito pela norma ABNT NBR 6143/1995 [1]. Três variáveis de controle, tipo de disco, pastilha e pressão de acionamento da manete de freio, sofreram alterações intencionais para avaliar o desempenho do sistema de freio a disco quanto a duas variáveis de resposta, a saber: coeficiente de atrito e temperatura final. A bancada foi equipada com um sistema de freio para motocicletas, que aproxima-se mais das características do equipamento disponível, principalmente com relação ao torque e potência fornecido ao disco de freio.

Este estudo justifica-se pelo fato de que, conhecendo-se o comportamento das principais variáveis durante a frenagem para cada um dos materiais de fricção ensaiados, torna-se possível avaliar e comparar o desempenho de cada material através da medição dos parâmetros correspondentes, tornando-se possível tomar decisões quanto ao critério de escolha dos materiais de fricção. Além disso, contribui também para otimizar processos de melhorias neste fundamental dispositivo de segurança veicular. Segundo DUKKIPATI *et al.* (2008, p. 415) [5] a expectativa direta do uso de sistemas de frenagem é unicamente evitar acidentes de trânsito. Desta forma, sistemas de freio dimensionados sob criteriosas avaliações quanto aos principais parâmetros que influenciam a frenagem podem contribuir para que um sistema de freio não falhe quando submetido a condições extremas de aplicações, como em uma frenagem de emergência.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Descrição do banco de ensaios

Na montagem da bancada de ensaios buscou-se alcançar os mesmos efeitos produzidos em uma motocicleta comercial de baixa cilindrada, que está entre as motocicletas mais utilizadas no mercado nacional. O sistema de freio utilizado corresponde ao de uma motocicleta com as seguintes características: motor de 4 tempos, refrigerado a ar, 125 cc de cilindradas, potência de 11,8 cv a 6800 rpm, torque de 0,816 Kgf.m a 6000 rpm. A Figura 1 ilustra a bancada de ensaios elaborados para este experimento. Optou-se por conduzir um estudo relacionado ao setor de motocicletas pela disponibilidade da máquina de ensaios de frenagem disponível ser compatível com veículos de menor potência, pela representatividade do setor e pelos prováveis ganhos em termos de segurança e conforto que aperfeiçoamentos no sistema de frenagem podem proporcionar aos condutores e passageiros de motocicletas. O banco de ensaios foi equipado com um motor de 3 cv de potência.

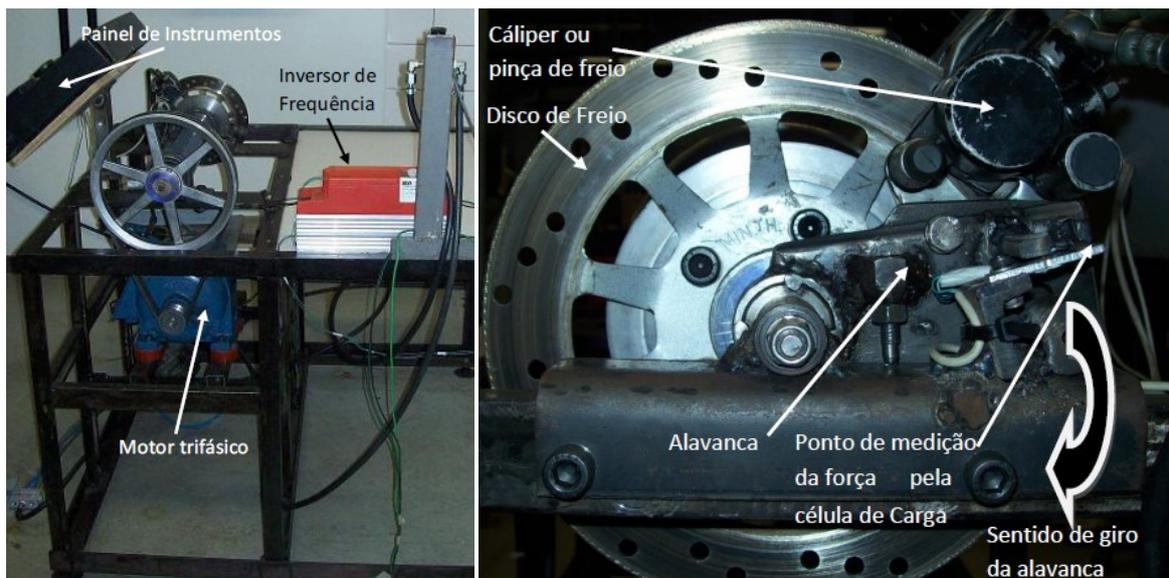


Figura 1: Perspectiva da bancada de ensaios

Figura 2: dispositivo para tomada da força tangencial.

Para ensaios de freios de motocicletas não foi encontrada uma norma específica para condução da metodologia de realização do ensaio. Desta forma, optou-se por conduzir os ensaios utilizando-se a norma existente para automóveis (ABNT NBR 6143/1995) [1] para o caso de motocicletas, tendo em vista que o princípio básico de funcionamento para os dois sistemas de freios a disco serem similares, mudando a robustez para cada caso. Para garantir uma rotação no eixo que contém o disco de 660rpm +/- 10rpm, requisito da norma, foi utilizado um sistema de transmissão de torque e potência por correias e polias. A obtenção do momento da força de frenagem foi obtida por meio de um dinamômetro projetado especificamente para os experimentos, baseado no princípio de funcionamento de uma alavanca. O caliper, ou pinça de freio, foi montado junto a esta alavanca. Ao acionar o freio, a força de atrito atua em sentido contrário ao movimento de rotação do disco de freio. Essa força de atrito é tangencial em relação à força normal de contato da pastilha de freio com o disco e tende a promover o giro da alavanca. Para medição da força produzida pela alavanca utilizou-se uma célula de carga *Electronic Scale*, com resolução de 2,5g, com capacidade de até 40kgf. A Figura 2 representa a montagem do dispositivo para obtenção do momento da força tangencial.

Para monitorar a velocidade de rotação do disco, foi utilizado um tacogerador eletrônico da marca *Cycle Computer*, apresenta baixo custo e é capaz de medir rotação de até 999 rpm, o que atende bem ao experimento. A temperatura do disco foi obtida por meio de um pirômetro digital com sistema infravermelho de captura da marca *Infrared Thermometer*. As medições foram feitas na região do disco de freio imediatamente após a área de contato da pastilha, conforme Figura 3. A temperatura registrada será aquela de maior valor encontrado, sendo realizada medição continuamente durante a frenagem. Para facilitar a coleta de dados e observação das variáveis medidas durante o ensaio, os instrumentos foram dispostos em um painel, conforme pode ser observado na Figura 4.

Segundo HOFFMANN *et al.* (2006) [6], a força na manete de freio é um parâmetro relevante durante o estudo de frenagem, pois freios que exigem menor força das mãos ao acionar a manete de freio, e que garantam a desaceleração desejada da motocicleta, aumentam o conforto proporcionado deste veículo ao condutor. O controle da força de atuação foi realizado através do controle da pressão da linha pneumática, uma vez que a manete de freio é acionada por um cilindro pneumático modelo DGS-25-80, marca *Festo Pneumatic*. O acionamento do cilindro é realizado através de uma válvula solenoide 5x2 vias, marca *Bel Air*. Para realizar a medição desta pressão pneumática, utilizou-se um manômetro com purgador da marca *Werk Schott*. A Figura 5 ilustra o diagrama esquemático do banco de ensaios montado neste trabalho.

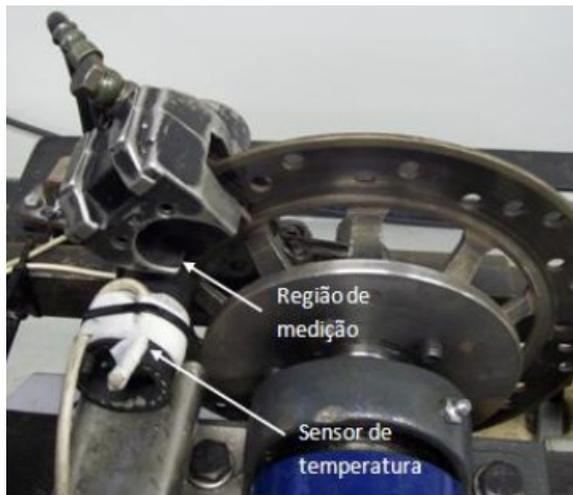


Figura 3: Região de medição da temperatura.



Figura 4: Painel de instrumentos

2.2 Procedimento de Ensaio

Segundo a norma adotada, deve ser utilizado um disco de freio conforme a norma de produção para cada qualidade de pastilha. A rugosidade da flange do disco, que entra em contato com as pastilhas no momento da frenagem, deve ser de, no máximo, 15 μm . Logo, é necessário medir a rugosidade do disco utilizado, que é da marca *MIN TH*. Foi utilizado um rugosímetro marca *Taylor Hobson Precision*, modelo *Surtronic 25*, para realizar a inspeção da rugosidade do disco.

Ainda de acordo com a norma utilizada, o procedimento de ensaio de frenagem deve ser realizado da seguinte forma:

- Cada frenagem deve ter duração de 5 segundos;
- O intervalo de tempo entre frenagens, ou seja, com o freio desaplicado, dever ser de 10 segundos;
- Um ciclo de frenagem é constituído por 10 frenagens. O ensaio é composto por 10 ciclos, totalizando 100 frenagens.

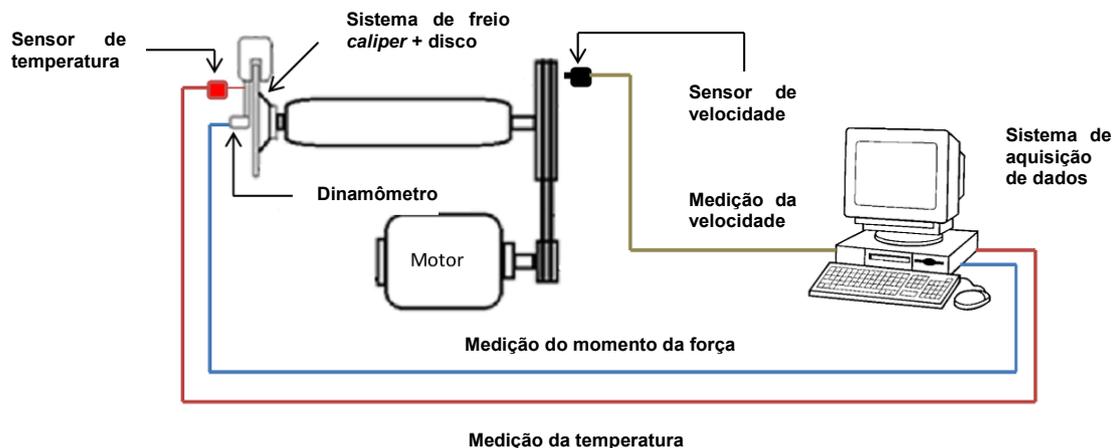


Figura 5: Representação esquemática da bancada de ensaios.

Após ter colocado o par de pastilhas em seu alojamento na pinça de freio, inicia-se o ensaio com a chamada fase de assentamento das pastilhas. Segundo Zaingiacomi (2002), a fase de assentamento das pastilhas serve para confirmar o correto posicionamento das pastilhas e o funcionamento das mesmas. Inicia-se o ensaio com o disco à temperatura ambiente ou à existente no mesmo, desde que inferior a 50°C, conduzindo-se o ensaio do primeiro até o terceiro ciclo com o ventilador ligado e, entre os ciclos individuais, o disco deve ser resfriado em giro livre para temperaturas abaixo de 100°C. Deve-se manter condições para que a temperatura do disco não ultrapasse 345°C. Os três primeiros ciclos são conduzidos para garantir assentamento das superfícies de trabalho. Os ciclos 4 a 10 somente podem ser executados caso haja um

mínimo de 80% de assentamento entre o par de atrito. Estes foram os sete ciclos escolhidos para se empregar e técnica DOE (*Design of Experiments*) – Planejamento de Experimentos.

2.3 Variáveis de Entrada e de Saída Analisadas

Os ensaios foram realizados utilizando-se 2 tipos diferentes de pastilhas – um par de pastilhas “assentado”, que foi utilizado em uma moto similar, e um par de pastilhas “novo”. Foram utilizados dois tipos de discos de freio – um disco classificado como “novo” e o mesmo disco com redução de 10% da espessura, dito disco “assentado”. O disco foi usinado por torneamento para alcançar tal nível de assentamento. Utilizou-se também duas pressões pneumáticas diferentes para acionamento da manete de freio: 0,10 MPa e 1,15 MPa, que geram pressões hidráulicas médias de acionamento do êmbolo do cilindro de freio de 0,24 MPa e 0,47 MPa, respectivamente. A Tabela 1 apresenta a descrição de cada fator de controle manipulado em dois níveis no experimento. Para cada combinação entre os níveis dos três fatores (tratamento), foram consideradas sete réplicas, equivalentes aos ciclos de frenagem 4 a 10, conforme descrito no tópico 2.2.

Tabela 1: Níveis dos fatores Controláveis.

| Fatores Controláveis | Nível -1 | Nível +1 |
|----------------------|-----------|----------|
| X1: Tipo de Disco | Assentado | Novo |
| X2: Tipo de Pastilha | Assentada | Nova |
| X3: Valor da Pressão | 0,10 MPa | 0,15 MPa |

Foram analisadas 2 variáveis de resposta: coeficiente de atrito e temperatura final em cada frenagem. Para o coeficiente de atrito, quanto maiores forem os seus valores melhor, uma vez que proporcionam maior efetividade durante a frenagem. Já para a temperatura final, quanto menor o seu valor melhor, uma vez que o sistema de freio fica menos sujeito a perdas de eficiência devido a efeitos térmicos, como, por exemplo, o *brake fade*.

Utilizou-se a metodologia estatística planejamento fatorial completo 2^3 do *software Minitab 16* para gerar o experimento e analisar os dados coletados. Foi proposta uma metodologia de otimização global, utilizando a ferramenta otimização de múltiplas respostas do *software Minitab 17*, para encontrar a melhor combinação dos níveis de cada fator que resulte em uma otimização global das duas variáveis simultaneamente. Por fim, utilizou-se estes níveis dos fatores otimizadores para conduzir um ensaio em que o banco de ensaios foi adaptado com um motor de maior potência (10 cv), com o intuito de estudar efeitos provocados no desempenho da frenagem quando o mesmo fica submetido a temperaturas mais elevadas.

3. RESULTADOS

3.1 Inspeção da Rugosidade do Disco de Freio

Foi realizada a avaliação do disco quanto à sua rugosidade em quatro ângulos espaçados em 90° . A Tabela 2-A apresenta os valores encontrados antes de iniciar o ensaio com o disco “assentado”, enquanto a Tabela 2-B mostra os valores encontrados antes de iniciar o ensaio com o disco “novo”. Conforme observado nestas Tabelas, a rugosidade da flange dos dois tipos de disco estão dentro da tolerância permitida para a condução dos ensaios (rugosidade máxima de $15 \mu\text{m}$).

Tabela 2: Resultado da inspeção da rugosidade: A- disco de freio “assentado”; B- disco de freio “novo”.

| A | Parâmetro | Ângulo | | | |
|---|----------------------|-----------|------------|-------------|-------------|
| | | 0° | 90° | 180° | 270° |
| | Ra (μm) | 0,62 | 0,58 | 0,7 | 0,66 |
| | Rz (μm) | 4,8 | 5,1 | 6,2 | 3,8 |
| | Rt (μm) | 7,7 | 7,5 | 8,6 | 5,7 |

| B | Parâmetro | Ângulo | | | |
|---|----------------------|-----------|------------|-------------|-------------|
| | | 0° | 90° | 180° | 270° |
| | Ra (μm) | 1,12 | 0,77 | 0,89 | 1,08 |
| | Rz (μm) | 5,6 | 7,3 | 8,1 | 6,3 |
| | Rt (μm) | 11,2 | 10,5 | 11,4 | 9,3 |

3.2 Análise estatística do experimento

3.2.1 Pressupostos do Modelo

A Figura 6 ilustra os gráficos residuais para a variável resposta Coeficiente de atrito. Os gráficos demonstram que as pressuposições do modelo não são violadas. O gráfico de probabilidade normal mostra que os resíduos ajustam-se bem a uma reta, indicando que os mesmos seguem uma distribuição normal. Observa-se tal comportamento também analisando-se o histograma dos resíduos. O gráfico dos resíduos versus valores ajustados evidencia dispersão aleatória dos dados, o que indica uma variância constante dos resíduos, atendendo ao pressuposto de homocedasticidade. O gráfico também indica ausência de outliers. Já o gráfico dos resíduos versus ordem mostra que os resíduos parecem estar aleatoriamente distribuídos em torno de zero, o que indica independência dos dados com o tempo. O mesmo procedimento foi conduzido para analisar a variável resposta Temperatura, onde todos os pressupostos do modelo também foram atendidos.

3.2.2 Análise do Coeficiente de atrito e da Temperatura

A Figura 7 ilustra o gráfico de cubo, que representa o experimento fatorial 2^3 , para a variável resposta coeficiente de atrito, onde cada vértice refere-se ao valores médios desta variável para as combinações dos tratamentos dos três fatores, cada um em dois níveis. Quanto maior for o coeficiente de atrito durante uma frenagem melhor é, pois alcança-se uma maior efetividade durante a frenagem. Desta forma, o maior valor observado foi no vértice do cubo que representa os três fatores em seus níveis mais baixos (disco e pastilhas assentadas e pressão de acionamento 0,10 MPa), cujo valor foi 0,37694. Entretanto, considerando os tratamentos com disco gasto e pastilha assentados (ou seja, os níveis mais baixos de A e B), o fator pressão de acionamento (C) não apresenta muita influência no coeficiente de atrito, sendo que em seu nível alto (0,15 MPa) o valor da variável resposta coeficiente de atrito é 0,36456. A Figura 8 (A) representa o gráfico de superfície que ilustra o comportamento dos fatores disco e pastilha fixando-se a pressão de acionamento em 0,10 MPa. Os mesmos resultados quando aos níveis dos fatores que maximizam o coeficiente de atrito são observados neste gráfico.

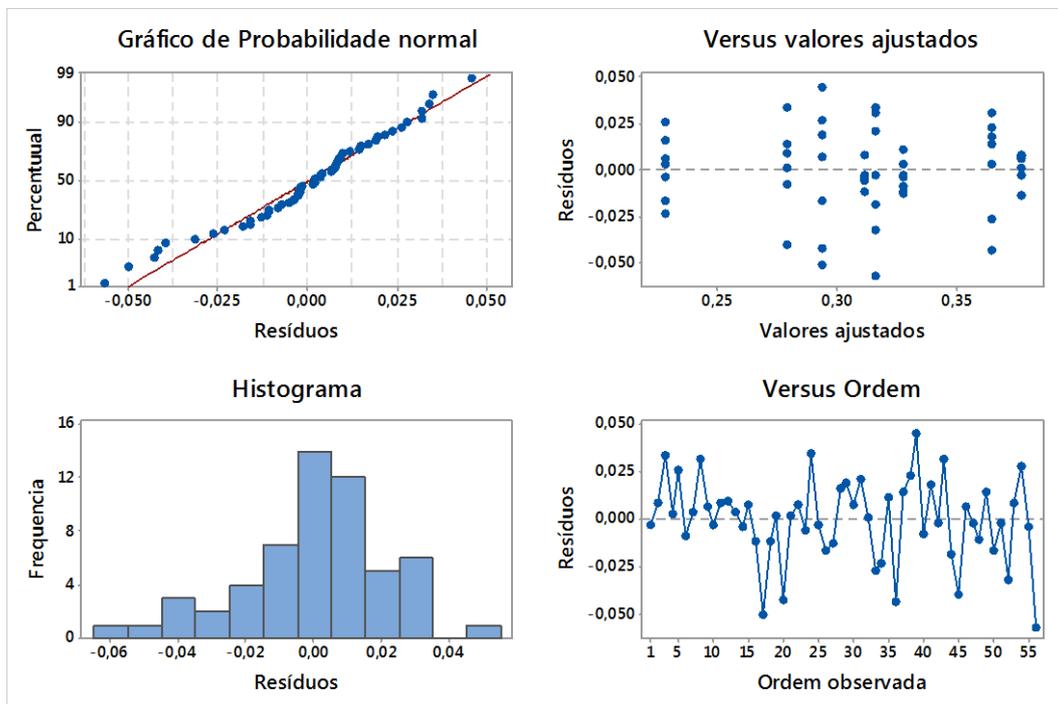


Figura 6: Gráficos de Resíduos para a variável resposta coeficiente de atrito.

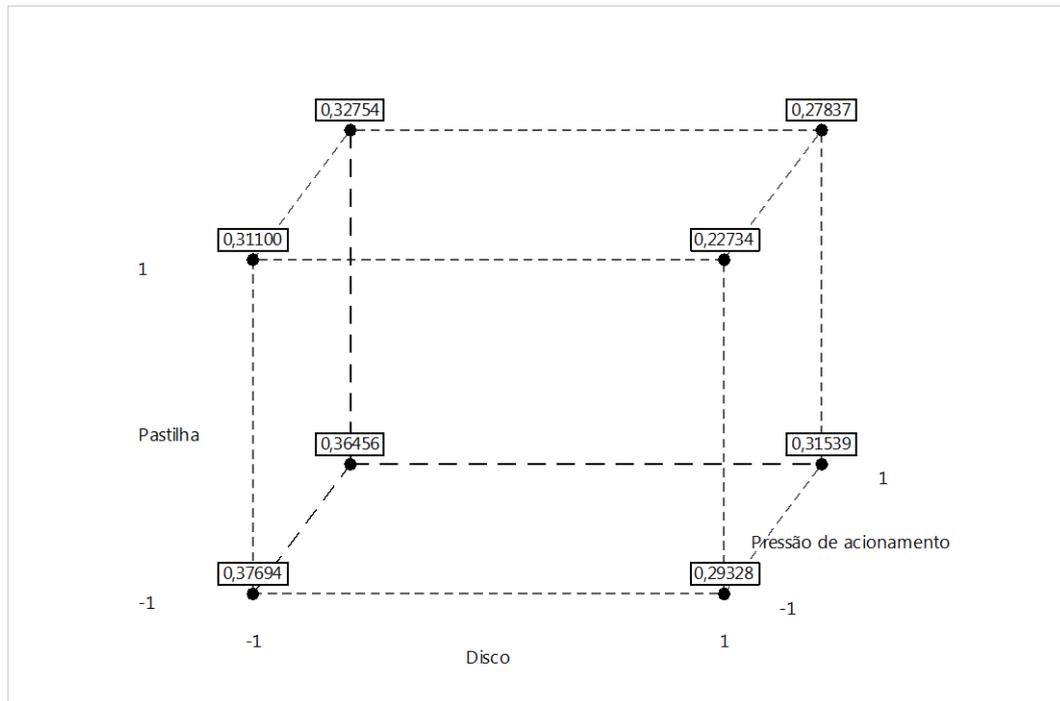


Figura 7: Gráfico de Cubo para a variável resposta coeficiente de atrito.

A Figura 9 representa o gráfico de cubo para a variável resposta Temperatura. Os valores em cada vértice referem-se ao valor da variável resposta temperatura para as combinações dos tratamentos dos três fatores, cada um em dois níveis.

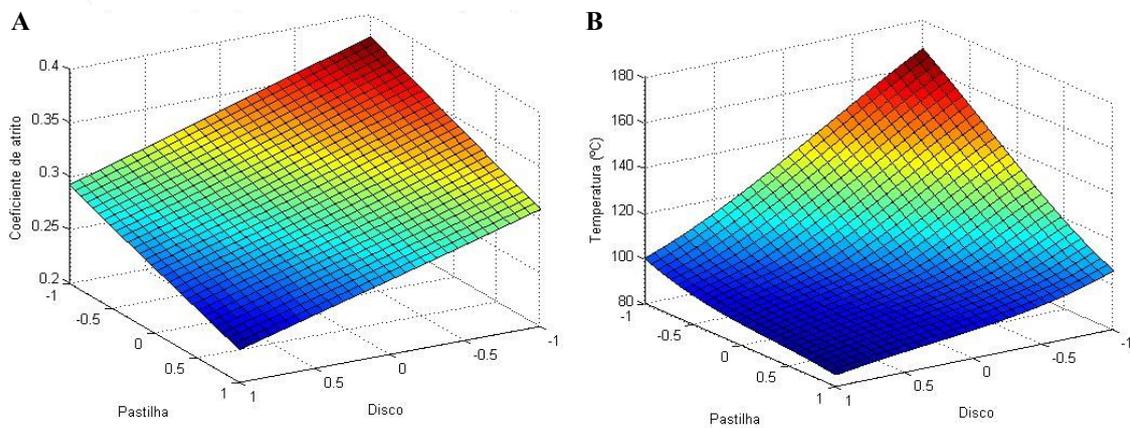


Figura 8: Gráficos de Superfície de Resposta para o Coeficiente de atrito (A) e Temperatura (B).

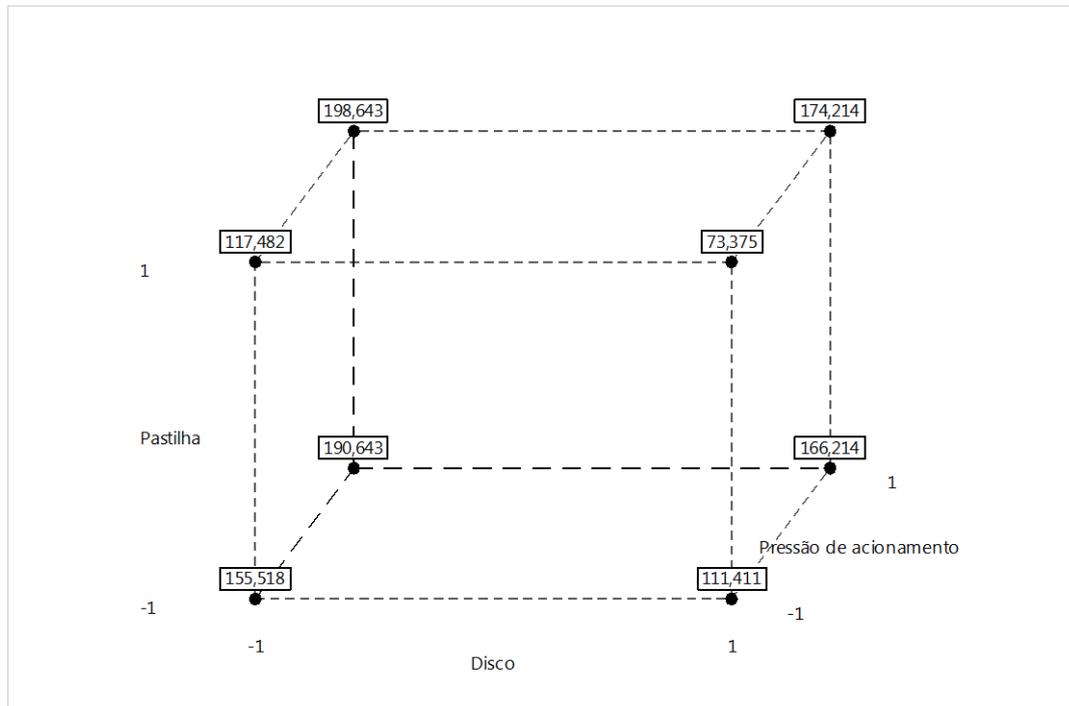


Figura 9: Gráfico de Cubo para a variável resposta temperatura.

Quanto menor o valor da temperatura experimentado por um sistema de freio durante uma frenagem melhor é, pois desta forma o sistema fica menos sujeito a efeitos térmicos, como decaimento do coeficiente de atrito, comportamento não constante entre frenagens seguintes e trincas, como consequência da excessiva têmpera da martensita, devido às altas temperaturas das condições de trabalho (BONIARDI et al, 2005) [4]. Desta forma, o menor valor observado foi no vértice do cubo que representa o tratamento com disco de freio novo, pastilhas novas e pressão de contato de 0,10 MPa, cujo valor foi de 73,375°C. A Figura 8 (B) representa o gráfico de superfície que ilustra o comportamento dos fatores disco e pastilha fixando-se a pressão de acionamento em 0,10 MPa. Os mesmos resultados quanto aos níveis dos fatores que minimizam a temperatura também foram observados neste gráfico. A explicação para o comportamento do coeficiente de atrito e da temperatura em relação aos tipos de pastilha e disco pode feita através do entendimento da área de contato real do par de atrito. Pastilhas e discos assentados apresentam uma maior área de contato real, o que causa aumento no coeficiente de atrito. Consequentemente, a temperatura também aumenta nesta situação. Além disso, segundo Segundo HORTA GUTIÉRREZ *et al.* (2013) [7], pastilhas que apresentam elementos abrasivos mais desgastados estão sujeitas a uma ação predominante do atrito entre os elementos e não a de cisalhamento por parte dos grãos abrasivos sobre o material do disco. Consequentemente, pastilhas assentadas aquecem mais e apresentam maiores valores de coeficiente de atrito.

3.2.3 Otimização de Múltiplas respostas

A Tabela 3 representa os resultados ótimos dos níveis dos fatores para cada uma das duas variáveis resposta separadamente.

Tabela 3: Resultados ótimos para cada variável resposta separada

| Variável Resposta | Níveis ótimos dos fatores controláveis | | |
|-----------------------|--|-----------|------------------------|
| | Disco | Pastilha | Pressão de acionamento |
| Coeficiente de atrito | Assentado | Assentado | 0,10 MPa |
| Temperatura | Novo | Novo | 0,10 MPa |

Através da Tabela 3, é possível perceber que nem sempre os níveis dos fatores capazes de otimizar o comportamento de uma variável resposta promovem também a otimização das demais. Isto acontece devido

às diferenças na funções objetivo de cada variável resposta. Apenas o fator Pressão de acionamento apresentou o mesmo nível (0,10 MPa) capaz de otimizar o coeficiente de atrito e a temperatura simultaneamente.

Com o intuito de encontrar os níveis dos fatores que otimizam simultaneamente estas duas respostas, foi utilizada a ferramenta otimização de múltiplas respostas, atrelada à análise fatorial, do software Minitab 17. Tal ferramenta baseia-se na definição das funções objetivo individual (para cada resposta separadamente) e composta (as duas simultaneamente). Diferentes configurações dos níveis dos fatores produzem um valor desta função entre 0 e 1. As configurações ótimas dos fatores são as que maximizam a função objetivo.

A aplicação desta ferramenta de otimização requer a definição do intervalo de especificação para cada variável resposta e o nível de importância relativa das mesmas. Para o coeficiente de atrito, foi definido o intervalo de 0,30 a 0,45, com alvo 0,40, utilizando-se como referência as pesquisas de NEIS (2012) [13] e BODE & OSTEMEYER (2009) [3]. Já Para a temperatura, foi definido o intervalo de 50 a 220°C, com alvo de 100°C, baseado nos estudo de LIMPET (2011) [10], e RHEE & SCHWARTZ (1979) [18]. As duas variáveis resposta foram definidas como tendo o mesmo nível de importância relativa. Como resultado da otimização das múltiplas respostas, obteve-se que os níveis dos fatores disco e pastilha assentados e pressão de acionamento de 0,10 MPa representam os níveis otimizadores.

3.3 Ensaios com potência de 10cv

Os ensaios conduzidos utilizando-se um motor de 3 cv não evidenciaram o efeito *Brake Fade*, que é a redução considerável do coeficiente de atrito devido à elevação da temperatura. A Figura 10 exemplifica um ensaio de frenagem do décimo ciclo de frenagem e utilizando-se os níveis dos fatores disco e pastilha assentados, com pressão de 0,15 MPa, onde espera-se alcançar os maiores valores de temperatura para o ensaio. Observa-se, por meio da Figura 10, que o coeficiente de atrito manteve-se razoavelmente constante ao longo deste ciclo de frenagem

A Figura 11 ilustra um ensaio utilizando-se a mesma configuração anterior, décimo ciclo de frenagem, disco e pastilhas assentadas, pressão de acionamento de 0,15 MPa. Para esta situação, nota-se que o coeficiente de atrito vai crescendo no início deste ciclo de frenagem, atinge um valor máximo entre a quarta e quinta frenagem (para um valor de temperatura na casa de 400°C) e, a partir deste ponto, o valor do coeficiente de atrito cai consideravelmente. Isto evidencia o efeito *fade* neste processo. Observa-se, também, que as temperaturas alcançadas durante o ciclo este ciclo de frenagem foram muito mais elevadas do que as obtidas no gráfico lustrado pela Figura 10. Desta forma, o sistema de frenagem ficou muito mais sujeito a efeitos térmicos quando o ensaio foi conduzido com potência de 10cv.

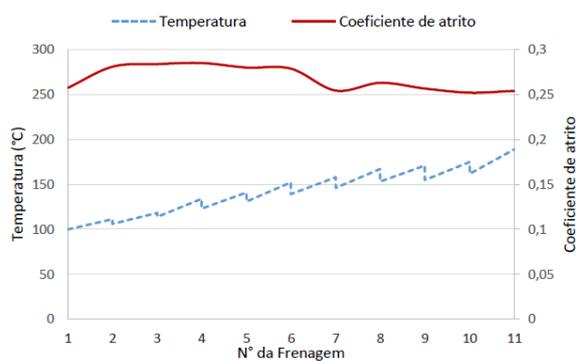


Figura 10: Coeficiente de atrito – pastilha nova, disco novo, P=3cv

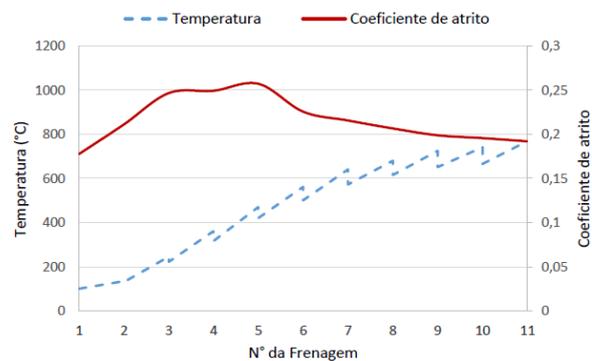


Figura 11: Coeficiente de atrito – pastilha nova, disco novo, P=10cv.

5. CONCLUSÕES

As ferramentas estatísticas *Design of Experiments* (DOE) permitem planejar, conduzir e analisar os resultados de um experimento envolvendo múltiplas variáveis resposta e os fatores de interesse. Por se tratar de um experimento com três fatores relacionados à operação de um sistema de frenagem de uma motocicleta de baixa cilindrada, que são os tipos de disco e pastilhas, além da pressão de acionamento da manete de freio cada um dois níveis, o experimento foi conduzido através de um Planejamento Fatorial 2³. Foram analisados os pressupostos do modelo através da análise dos resíduos e de gráficos fatoriais, como o gráfico de cubo e de superfície para as duas variáveis respostas, a partir de dados coletados de um banco de ensaios

dimensionado para esta finalidade. A partir desta análise, tornou-se possível analisar os melhores níveis de cada fator de operação para as duas variáveis resposta analisadas, o coeficiente de atrito e a temperatura.

Foram obtidos os níveis dos fatores capazes de otimizar cada uma das variáveis respostas separadamente. Entretanto, em termos práticos, é mais interessante analisar o comportamento global das múltiplas variáveis resposta atuando simultaneamente. Para tanto, uma técnica de otimização de múltiplas respostas foi empregada, utilizando-se uma ferramenta do *software* Minitab 17. Como resultado da otimização das múltiplas respostas, obteve-se que os níveis dos fatores disco e pastilha assentados e pressão de acionamento de 0,10 MPa representam os níveis otimizadores. Ou seja, estes níveis dos fatores conduzem a uma melhor performance da frenagem no sistema analisado.

Por fim, o banco de ensaios foi equipado com uma potência motora mais elevada (10 cv), com o intuito de investigar efeitos térmicos não identificados nos ensaios conduzidos com potência de 3cv. Por meio desta nova configuração experimental, pode-se identificar o efeito *fade* através da redução considerável do coeficiente de atrito em função do aumento da temperatura. Esta redução do coeficiente de atrito pode causar perdas no desempenho da frenagem, o que pode resultar em acidentes de trânsito.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro NBR 6143:1995 – Pastilha do Freio a disco – Determinação do atrito e desgaste através da bancada de ensaio Krauss.
- [2] BLAU, P.J., Compositions, Functions and Testing of Friction Brake Materials and their Additives, Technical report, ORBL/TM-2001/64, Oak Ridge National Laboratory, 2001
- [3] BODE, K. H., OSTEMEYER, G. P. “Simulations and Tests of Innovative Friction Laws in Brake Systems”, Technische Universitat Braunschweig, *Institute of Dynamics and Vibrations*, v. 9, 1 ed., pp. 63-66, 2009.
- [4] BONIARDI, M., D’ERRICO, F., TAGLIABUE, C., *et al.*, “Failure analysis of a motorcycle brake disc”, *Science Direct – Engineering Failure Analysis*, v.13, pp. 933-945., 2005.
- [5] Dukkupati, R.V. *et al.*, Road Vehicle Dynamics, SAE, 2008.
- [6] HOFFMAN, O., ECKERT, A., WOYWOD, J. “The Motorcycle Integral Brakesystem MIB: an advanced brake solution for high performance motorcycles”, *Internationale Motorradkonferenz*, v.6, n. 10, pp. 9 -10, 2006.
- [7] HORTA GUTIÉRREZ, J.C., ABREU, R.M, VASCONCELOS, I.R., *et al.*, “Estudo Experimental do Desempenho de Sistema de Freio Automotivo”, *CIBIM, La Plata*, 2013.
- [8] INFANTINI, M. B. “Variáveis de Desempenho dos Sistemas de Freio”, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2008.
- [9] LEE, K. H., KANG, D. H., “Structural optimization of an automotive door using the kriging interpolation method”, *Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Eng*, v. 221, n.12, pp. 1525–1534, 2007.
- [10] LIMPET, R., Brake Design and Safety, 3rd ed., SAE, 2011.
- [11] MAKRAHY, M. M., GHAZALY, N. M., ABD EL-GWWAD, K.A., “Optimization of Operation Parameters on a Novel Wedge Disc Brake by Taguchi Method”, *American Journal of Vehicle Design*, v. 1, n. 2, pp. 30-35, 2013.
- [12] NARAYANA, K.S., RAO, G. U., SIMHACHALAM, D., *et al.*, “Finite Element Analysis of Solid and Ventilated Disc Brake”, *International Journal of Science and Research (IJSR)*, v.3, n. 9, 2014.
- [13] NEIS, P.D. Projeto e Construção de um Tribômetro com Controle Independente da Temperatura do Disco. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2012.
- [14] NEIS, P. D., FERREIRA, N. F., POLETTO, J. C. “A comparative analysis of original and aftermarket brake pads sold in the Brazilian market”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 1, p. 1-11, 2015.
- [15] OSTERMEYER, G.P., “Friction and Wear of Brake Systems”, *Forschung im Ingenieurwesen*, v. 66, pp. 267– 272, 2001.
- [16] OSTERMEYER, G.P., MULLER, M. “New Insights into the Tribology of Brake Systems”, *Journal of Automotive Engineering – Special Issue on Automotive Braking*, v. 222, 7ed., pp.1167-1200, 2008.

- [17] REHKOPF, J., HALDERMAN, J.D., *Automotive Brake Systems*, Prentice Hall, 4th edition, 2006.
- [18] RHEE, S.K. SCHWARTZ, H.W. “Test Methods for Automotive and Truck Friction Materials, American Society for Testing and Materials”, *American Society for Testing and Materials*, pp. 39-49, Philadelphia, 1979.
- [19] SANDERS, P.G., DALKA, T.M., BASH, R.H., “A Reduced-Scale Brake Dynamometer for Friction Characterization”, *Tribology International*, v. 34, pp. 609-615, 2001.
- [20] TALATI F., JALALIFAR S. “Analysis of heat conduction in a disk brake system”, *Heat Mass Transfer*, v. 45, n. 8, pp. 1047-1059.
- [21] TIMTE, M.A. “Compasion of Lining Output Generated Using AK-Master and FMVSS 105 Simulation Dynamometer Procedures”, *Society of Automotive Engineers*, 2000.
- [22] XIAO, X., YIN, Y., BAO, J., *et al.*, “Review on the friction and wear of brake materials”, *Advances in Mechanical Engeneering*, v. 8, n.5, pp. 1-10, 2016.