

Proposta de Planejamento Experimental e de Sistemas de Medição para Análise de Variáveis que Influenciam o Desempenho da Frenagem veicular

Rafael Lucas Machado Pinto (UFMG) rafaelucas@gmail.com
Juan Carlos Horta Gutiérrez (UFMG) horta@demec.ufmg.br
Juan Carlos Campos Rubio (UFMG) juan@demec.ufmg.br
Paulo Eustáquio de Faria (UFMG) paulofaria@eng-mec.dout.ufmg.br

Resumo:

Neste projeto, foi proposto um planejamento experimental para o estudo a ser realizado e a análise dos sistemas de medições envolvidos, de forma especial para a obtenção das variáveis resposta temperatura, coeficiente de atrito e desgaste em um sistema de frenagem veicular. Os ensaios serão conduzidos em uma bancada de ensaios de frenagem pertencente ao Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG. Como resultados a serem alcançados, esta proposta de projeto busca a otimização dos parâmetros de fabricação e operação de sistemas de freio a disco, a modelagem matemática do comportamento térmico e do desgaste de materiais e a predição do comportamento do par de atrito, o que daria subsídios para substituições de materiais de atrito antes que haja perdas da efetividade da frenagem. Desta forma, este estudo, que está relacionado com as áreas de Engenharia de Qualidade e Projeto do Produto na Engenharia de Produção, contribui para o aprimoramento dos processos de desenvolvimento, manufatura e de operação de um dos sistemas veiculares mais importantes.

Palavras chave: Engenharia da Qualidade, Planejamento de Experimentos, Sistema de Freios.

Proposal of Experimental Planning and Measurement Systems for Analysis of Variables that Influence Vehicular Braking Performance

Abstract

In this project, it will be proposed an experimental design for the study to be performed and the analysis of the measurement systems involved, specially to obtain the variables temperature response and friction coefficient in a vehicle braking system. The tests will be conducted on a bench of brake tests belonging to the Machining Laboratory of the Department of Mechanical Engineering of UFMG. As results to be achieved, this project proposal seeks to optimize the parameters of fabrication and operation of disc brake systems, the mathematical modeling of thermal behavior and material wear and the prediction of the behavior of the friction torque, which would give allowances for substitutions of friction materials before loss of braking effectiveness. In this way, this study, which is related to the areas of Quality Engineering and Product Design in Production Engineering, contributes to the improvement of the development, manufacturing and operation processes of one of the most important automotive systems.

Key-words: Quality Engineering, Experiment Planning, Brake System.

1. Introdução

Segundo Talati e Jalalifar (2009) freios são, essencialmente, mecanismos que convertem um tipo de energia em outro. Para Narayana *et al.* (2014) 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), sistemas de freio tem a finalidade de reduzir ou manter a velocidade de um veículo, levá-lo à imobilidade ou mantê-lo imóvel. Aleksendric´ e Barton (2009) mencionam que o desempenho de um freio automotivo é resultado de complexos fenômenos interrelacionados que ocorrem na interface pastilha-disco, que são muito afetados pelas propriedades termoquímicas dos ingredientes dos materiais de atrito, propriedades dos discos e dos regimes de operação do sistema de freio. A condição de contato é ainda mais complexa pelo fato dos materiais de atrito serem compósitos poliméricos que podem conter mais de 20 ingredientes diferentes, podendo ser significativamente afetada pela grande diversidade das propriedades mecânicas dos ingredientes das pastilhas.

De acordo com XIAO *et al.* (2016) 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), 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.

Segundo Albertazzi (2008), a medição é uma operação antiquíssima e de fundamental importância para diversas atividades do ser humano. Transações comerciais, manufatura de bens e a intercambialidade somente tornaram-se possíveis em função da utilização de processos de medição. Medir é o procedimento experimental pelo qual o valor momentâneo de uma grandeza física (mensurando) é determinado (comparado) como um múltiplo e/ou uma fração de uma unidade, estabelecida por um padrão, e reconhecida internacionalmente. A operação de medição é realizada por um instrumento de medição ou, de uma forma mais genérica, por um sistema de medição (SM).

O resultado de uma medição deve ser capaz de exprimir o grau de confiança a que é depositado pelo experimentador. Sendo impossível obter uma Indicação exata, o erro provável envolvido deve sempre ser informado através de um parâmetro denominado incerteza.

A ferramenta DOE (*Design of Experiments*), segundo Montgomery (2012), é uma técnica estatística para planejar, conduzir e analisar os resultados de um experimento, a fim de validar uma determinada proposição para a solução de um problema. Neste estudo, será proposto um Planejamento de Experimentos Fatorial Fracionado para analisar o comportamento das variáveis resposta temperatura na interface do par de atrito pastilha-disco, coeficiente de atrito entre estes materiais e o desgaste sofrido pelas pastilhas de freio. Cinco variáveis de entrada serão manipuladas para compreender os seus respectivos impactos nas variáveis respostas. Desta forma, este estudo ressaltará a importância em se realizar um bom planejamento antes de se conduzir os experimentos, através da seleção das melhores técnicas de acordo com as variáveis envolvidas no estudo. Por conseguinte, este trabalho contribui com uma aplicação de ferramentas da Engenharia da Qualidade e do Desenvolvimento de Produtos voltados para a otimização dos parâmetros de operação e de manufatura de um produto, que são uma das áreas de atuação profissional do engenheiro de produção.

2.Revisão Bibliográfica

2.1. Sistema de frenagem

Segundo Limpert (2011), a operação segura de um veículo motorizado requer contínuo ajuste de sua velocidade às mudanças das condições de tráfego. Os freios, pneus e o sistema de direção são os mais importantes componentes de segurança de um veículo motor. Eles podem garantir segurança sob uma variedade de condições de operação, incluindo condições escorregadias, estradas molhadas ou secas, quando um veículo está levemente ou totalmente carregado, quando a frenagem ocorre em linha reta ou em curva, com lonas e pastilhas de freio novas ou usadas, com freios úmidos ou secos, quando aplicado por condutor novo ou experiente, durante a frenagem em estradas lisas ou ásperas, ou quando o veículo estiver puxando um reboque.

O uso geral dos freios pode ser formulado em termos de três funções básicas que um sistema de frenagem deve fornecer: desacelerar um veículo, manter a velocidade de um veículo durante uma operação de descida e Manter o veículo parado.

2.2. Freios a Disco

Utilizam pastilhas de freio que são pressionadas axialmente contra o rotor, que no caso é um disco de freio. Renkopf & Halderman (2006) afirmam que freios a disco são geralmente utilizados nas rodas dianteiras por promoverem maior eficiência de frenagem. Entretanto, em alguns casos, podem ser utilizados em todas as rodas de um veículo. A Figura 1 ilustra os principais componentes de um sistema de freio a disco.

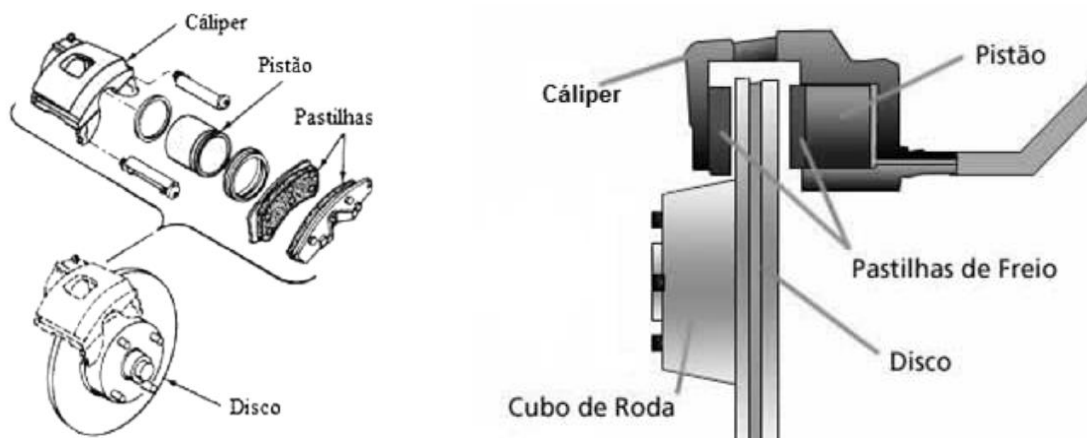


Figura 1 – Componentes de um Freio a Disco (Kruze 2009).
Fonte: adaptado de Kruze (2009)

De acordo com Kruze (2009) pastilhas de freio são fabricadas de material de fricção e devem ser capazes de suportar e realizar a transformação da energia cinética em calor. Para Renkopf & Halderman (2006) pastilhas de freio devem manter suas propriedades mecânicas em altas temperaturas, uma vez que sistemas de freio aquecem quando acionados. Pastilhas de freio são produzidas utilizando-se materiais compósitos.

Cáliper é um mecanismo que contém as pastilhas e o pistão. De acordo com Limpert (2011), o cáliper precisa ser capaz de resistir às elevadas pressões nos sistemas hidráulicos e às forças

axiais e tangenciais produzidas na frenagem.

Pistão de freio é o elemento responsável por transmitir força para a pastilha. De acordo com Halderman (1996), é acionado por pressão hidráulica nos sistemas hidráulicos e por um sistema mecânico de alavanca nos sistemas mecânicos.

O disco é o rotor ou elemento rotativo de um sistema de freio a disco. São produzidos utilizando-se ferro fundido cinzento ou aço. Segundo Halderman (1996) a superfície do disco, além de suportar a fricção da pastilha para reduzir a rotação do disco, acaba absorvendo grande parte do calor gerado durante a frenagem. Por apresentarem uma estrutura aberta, o fluxo de ar facilita o seu resfriamento.

Freios a disco são amplamente usados para reduzir velocidade devido às suas características de estabilidade durante a frenagem, confiabilidade e a capacidade de promover uma ampla faixa de torque ao freio.

2.1. Variáveis que afetam o atrito e o desgaste

Os parâmetros de desempenho, considerados na avaliação dos materiais de fricção para aplicação automotiva, são o coeficiente de atrito e o desgaste, pois esses parâmetros são utilizados para correlacionar os resultados de dinamômetros em escala reduzida e em escala real (SANDERS *et al.*, 2001).

Segundo SANDERS *et al.* (2001), o coeficiente de atrito depende da velocidade de escorregamento, da pressão de contato e da temperatura na interface do par tribológico. RHEE e SCHWARTZ (1979) mencionam que a taxa de desgaste dos materiais de fricção está relacionada às mesmas variáveis mencionadas para o atrito com a adição da variável tempo de ensaio. Como a velocidade de escorregamento e a pressão de contato são parâmetros de operação do sistema, elas podem ser diretamente controladas nas máquinas de ensaio. No entanto, a temperatura é uma variável dependente desses parâmetros e das características mecânicas e térmicas do sistema. LIMPET (2011) menciona também os efeitos da umidade relativa do ar sobre o desempenho do sistema.

2.8. Planejamento de Experimentos Fatorial Fracionado

Segundo Montgomery (2013), experimento são parte natural do processo de tomada de decisões em engenharia e ciências. Técnicas de planejamento de experimentos, com base estatística, são particularmente úteis no mundo da engenharia, a fim de resolver muitos problemas importantes, como a descoberta de novos fenômenos básicos que podem levar a novos produtos e a comercialização de nova tecnologia, incluindo o desenvolvimento de novos produtos, novos processos e a melhoria de produtos e processos existentes. A maioria dos processos pode ser descrita em termos de muitas variáveis controláveis, tais como temperatura, pressão e taxa de alimentação. Usando experimentos planejados, engenheiros podem determinar qual subconjunto das variáveis de processos tem a maior influência no desempenho do processo. Os resultados de tal experimento podem conduzir a:

- Melhor rendimento do processo
- Redução na variabilidade do processo e uma melhor obediência aos requerimentos nominais ou alvos
- Redução nos tempos de projeto e de desenvolvimento

- Redução nos custos de operação

Experimentos planejados são geralmente empregados sequencialmente. Isto é, o primeiro experimento com um sistema complexo (talvez um processo de fabricação), que tenha muitas variáveis controláveis, é frequentemente um experimento exploratório projetado para determinar que variáveis são mais importantes. Experimentos subsequentes são usados para refinar essa informação e determinar quais ajustes são requeridos nessas variáveis críticas, de modo a melhorar o processo. Finalmente, o objetivo do experimentalista é a otimização, ou seja, determinar quais os níveis resultantes das variáveis críticas no melhor desempenho do processo.

Segundo Montgomery (2013), Planejamentos fatoriais são usados nos experimentos envolvendo vários fatores em que é necessário estudar o efeito conjunto dos fatores sobre uma resposta. Entretanto, vários casos especiais do planejamento fatorial em geral são importantes pelo fato de eles serem largamente empregados em trabalhos de pesquisa e devido ao fato de eles formarem a base de outros planejamentos de considerável valor prático. O mais importante desses casos especiais é aquele de K fatores, cada um com somente 2 níveis. Uma réplica completa de tal planejamento requer $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^K$ observações, sendo chamada de um planejamento fatorial 2^K .

À medida que o número de fatores em um planejamento fatorial 2^K aumenta, o número requerido de corridas aumenta rapidamente. Por exemplo, um planejamento fatorial 2^5 requer 32 corridas. Nesse planejamento, somente 5 graus de liberdade correspondem aos efeitos principais e 10 graus de liberdade correspondem às interações de segunda ordem. Dezesesseis dos 31 graus de liberdade são usados para estimar interações de ordens mais altas – ou seja, interações de terceira ordem e superiores. Frequentemente, há pouco interesse nessas interações de ordens altas, particularmente quando inicia-se o estudo de um processo ou um sistema. Se é possível considerar que certas interações de ordens altas são desprezíveis, então um planejamento fatorial fracionário, envolvendo menos corridas que um conjunto completo de 2^K corridas, poderá ser usado para obter informações sobre os efeitos principais e interações de ordens baixas.

De acordo com Montgomery (2013), Os fatoriais fracionários têm um uso importante nos experimentos exploratórios. Esses são experimentos em que muitos fatores são considerados, com a finalidade de identificar aqueles fatores (se algum) que têm efeitos grandes. Experimentos exploratórios são geralmente feitos nos estágios iniciais de um projeto, quando é provável que muitos dos fatores inicialmente considerados tenham pouco ou nenhum efeito na resposta. Os fatores que forem identificados como importantes serão então investigados mais profundamente em experimentos subsequentes.

3.Procedimentos Metodológicos

3.1. Classificação metodológica da pesquisa

Segundo Medeiros (2006) a pesquisa científica tem como objetivo contribuir para a evolução do conhecimento humano em todos os setores, da ciência pura, ou aplicada; da matemática ou da agricultura, da tecnologia ou da literatura. A Figura 2 ilustra alguns critérios de classificação da pesquisa científica em engenharia de produção, como proposto por Turrioni e Mello (2011).

Do ponto de vista da natureza da pesquisa, trata-se de uma pesquisa aplicada, pelo seu

interesse prático, no qual o conhecimento teórico adquirido durante a revisão bibliográfica é utilizado na realidade da empresa para solucionar os problemas encontrados.

Quanto aos objetivos, caracteriza-se como exploratória, pois, conforme Medeiros (2006), esse modelo visa proporcionar maior familiaridade com um problema a fim de torná-lo mais explícito ou construir hipóteses, e tem como objetivo o aprimoramento de ideias. Pode-se utilizar levantamento bibliográfico, documental e observação direta intensiva.

A pesquisa tem uma abordagem quantitativa, pois, de acordo com Turrioni e Mello (2011), a interpretação dos fenômenos e requer o uso de recursos de coleta de dados e de técnicas estatísticas, de forma a quantificar o estudo para classificação e análise. Relativo ao método, a pesquisa pode ser classificada como um experimento, pois o deseja-se analisar a influência de um determinado conjunto de variáveis no objeto de estudo, bem como formas de controle e observação dos efeitos que estas variáveis produzem no objeto de estudo.

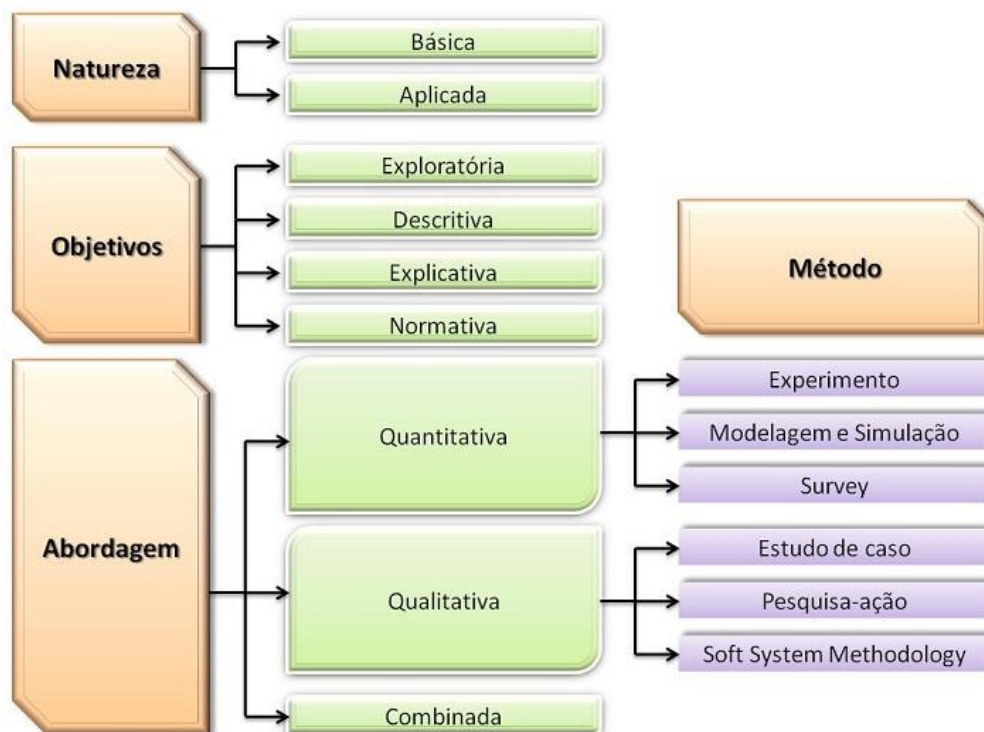


Figura 2- Classificação da pesquisa científica em Engenharia de Produção.

Fonte: Adaptado de Turrioni e Mello (2011).

3.2. Descrição do banco de ensaios

Optou-se por equipar a bancada de ensaios com um sistema de freio de motocicleta, pois os parâmetros produzidos por esta máquina para simular a frenagem, como torque e potência no eixo que contém o disco de freio, serem mais compatíveis com um veículo de menor porte. A bancada de ensaios foi modificada para atender aos requisitos da norma ABNT NBR 6143/1995. 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. Para a obtenção do momento da força de frenagem, foi fabricado um dinamômetro, baseado no princípio de funcionamento de uma alavanca. O caliper, ou pinça de freio, foi montado junto a esta alavanca, que possui uma célula de carga. 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 a obtenção da pressão hidráulica, foi construído um medidor de força hidráulica, representado pela Figura 2, utilizando-se um pequeno cilindro, um pistão e um retentor de vedação. Ao acionar o freio, a pressão na linha hidráulica atua promovendo o deslocamento do pistão. Através de uma célula de carga adaptada na extremidade livre do pistão, foi possível obter a força F_h , em [N], que o fluido pressurizado exerce na área do pistão, A_p em $[m^2]$.

Para monitorar a velocidade de rotação do disco, foi utilizado um tacogerador eletrônico da marca *Cycle Computer*. 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.

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 3 ilustra o diagrama esquemático do banco de ensaios montado neste trabalho.

A Figura 3 ilustra o diagrama esquemático do banco de ensaios montado neste trabalho.

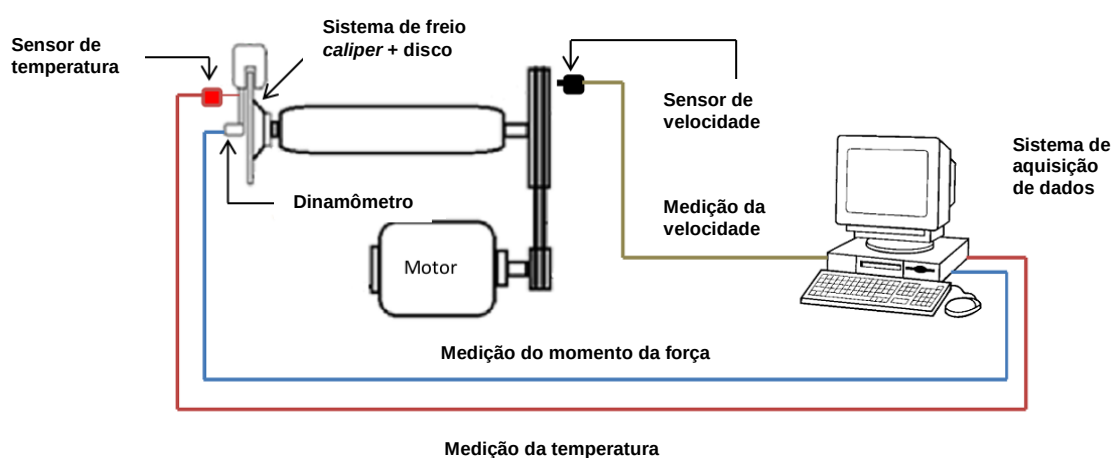


Figura 3: Representação esquemática do banco de ensaios.

3.3. Procedimento de Ensaio

Os ensaios serão conduzidos segundo a norma ABNT NBR-6143/1995 – Pastilhas de Freio a Disco – Determinação do Atrito e Desgaste Através da Bancada de Ensaio Krauss. Segundo a norma adotada, deve ser utilizado um disco de freio conforme a norma de produção para cada qualidade de pastilha. 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.

Ainda de acordo com a ABNT NBR-6143/1995, 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. 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

4. Resultados

Para a realização do experimento, será utilizada a técnica de Planejamento de Experimentos Fatorial Fracionado. Serão analisados 5 fatores, cada um sendo manipulado em 2 níveis, configurando um experimento fatorial 2^5 . Especificamente, pretende-se utilizar um experimento de $\frac{1}{2}$ fração, que neste caso configura-se um experimento 2^{5-1} . Esta notação indica que o experimento pode acomodar 5 fatores, cada um de 2 níveis, mas que apenas $2^{5-1} = 2^4 = 16$ ensaios serão usados. Como pretende-se replicar o experimento, serão executados 32 ensaios. Por replicação, entende-se a repetição de um experimento básico. Permite ao pesquisador obter uma estimativa do erro experimental. Essa estimativa de erro se torna uma unidade básica de medida para determinar se as diferenças observadas nos dados são realmente estatisticamente diferentes. Tabela 1 representa os fatores a serem estudado e os seus respectivos níveis.

O sistema de freio testado é aplicado em um veículo de uso urbano onde as velocidades típicas variam de 50 km/h a 100 km/h. Portanto, foram escolhidas as velocidades de 60 km/h (500 rpm para a máquina de ensaio, equivalente a uma velocidade de escorregamento de 5m/s) e 95 km/h (800 rpm, equivalente a uma velocidade de escorregamento de 8m/s).

Fator	Experimento Fatorial	
	Nível baixo (-1)	Nível alto (+1)
Disco	Superfície com furos	Sólido
Pastilha	Paralela	Original
Pressão de Contato	668 Kpa	2672 Kpa
Velocidade de Escorregamento	5m/s	8m/s
Potência Motora	3cv	10cv

Tabela 1: Variáveis de entrada a serem analisadas

Já a Tabela 2 representa as variáveis resposta que serão analisadas neste estudo. 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 fade. Para o coeficiente de atrito, quanto maiores forem os seus valores melhor, uma vez que proporcionam maior efetividade durante a frenagem. Já o desgaste das pastilhas também possui função objetivo minimizadora, pois quanto menor for o desgaste sofrido pelo material

de atrito com o passar do tempo melhor, em função de maior durabilidade e redução de custos com substituições.

Variável Resposta	Função Objetivo
Temperatura	Minimização
Coeficiente de atrito	Maximização
Desgaste das pastilhas	Minimização

Tabela 2: Variáveis de saída a serem analisadas

A escolha pela técnica de experimento fatorial fracionado ocorre em decorrência de que, à medida que o número de fatores em um experimento fatorial 2^k aumenta, o número de ensaios necessários para se efetuar uma réplica completa aumenta exponencialmente. Em muitos casos, o experimento fatorial completo torna-se muito caro ou difícil de ser executado. Assim, com a necessidade de se restringir o número de ensaios, a solução seria então os experimentos fatoriais fracionados. Os experimentos fatoriais fracionados utilizam um subconjunto (ou fração) de um experimento fatorial completo para obter informações sobre os efeitos principais e as interações de menor ordem. A Tabela 3 ilustra o Experimento Fatorial Fracionado 2^{5-1} gerado, por meio do software Minitab 17, para a execução dos experimentos.

Por meio da Tabela 3, nota-se que o software utilizado para gerar o experimento, Minitab 17, armazena automaticamente o experimento na Worksheet. É constituído dos seguintes elementos:

StdOrder - A coluna de ordem padrão mostra a ordem definida pelo algoritmo de Yates.

RunOrder - Na ordem de execução dos ensaios, O Minitab atribui uma ordem aleatória para os ensaios experimentais para facilitar a aleatorização quando o experimento for executado. Por aleatorização, entende-se que tanto a alocação do material do experimento, quanto a ordem na qual os ensaios individuais do experimento são realizados são aleatoriamente determinados. A aleatorização do experimento propicia a redução dos efeitos de fatores que não estão sendo considerados. Esta é a ordem preferencial na qual deve-se conduzir os ensaios experimentais.

CenterPT - Esta coluna indica o tipo do ponto experimental. Pontos centrais são codificados como 0; pontos de canto são codificados como 1. Neste experimento, todos os pontos são pontos de canto.

Blocks - O bloco indica se aquela combinação em particular será efetuado no primeiro ou no segundo lote de solução de limpeza. Cada bloco é aleatorizado independentemente. Neste estudo, não serão utilizados blocos distintos.

As colunas referentes aos cinco fatores mostram a combinação dos níveis dos fatores a serem executados na ordem aleatória. Após executar cada experimento, deve-se preencher as últimas três colunas com os valores obtidos para as três variáveis resposta, a fim de realizar a análise experimentos por meio de técnicas estatísticas como ANOVA, Análise de Regressão e Gráficos Fatoriais (cubo, efeitos principais, e de interação). A partir dos resultados obtidos, análises serão realizadas para verificar o nível de significância de cada uma destes fatores em relação ao comportamento de cada uma das variáveis resposta e em relação ao comportamento simultâneo de todas elas, por meio de técnicas de otimização de múltiplas

respostas. Desta forma, estas técnicas contribuirão para uma melhor compreensão deste sistema e para a tomada de decisões a respeito dos processos de manufatura e operação dos mesmos.

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Disco	Pastilha	Pressão de Contato (KPa)	Vel. de Esc. (m/s)	Potência Motora (cv)	Temp. (°C)	Coef. de atrito	Desgaste (mm)
28	1	1	1	Sólido	Original	668	8	3			
4	2	1	1	Sólido	Original	668	5	10			
17	3	1	1	Sup. com furos	Paralela	668	5	10			
16	4	1	1	Sólido	Original	2672	8	10			
2	5	1	1	Sólido	Paralela	668	5	3			
27	6	1	1	Sup. com furos	Original	668	8	10			
13	7	1	1	Sup. com furos	Paralela	2672	8	10			
11	8	1	1	Sup. com furos	Original	668	8	10			
31	9	1	1	Sup. com furos	Original	2672	8	3			
23	10	1	1	Sup. com furos	Original	2672	5	10			
1	11	1	1	Sup. com furos	Paralela	668	5	10			
7	12	1	1	Sup. com furos	Original	2672	5	10			
9	13	1	1	Sup. com furos	Paralela	668	8	3			
26	14	1	1	Sólido	Paralela	668	8	10			
21	15	1	1	Sup. com furos	Paralela	2672	5	3			
3	16	1	1	Sup. com furos	Original	668	5	3			
25	17	1	1	Sup. com furos	Paralela	668	8	3			
29	18	1	1	Sup. com furos	Paralela	2672	8	10			
24	19	1	1	Sólido	Original	2672	5	3			
20	20	1	1	Sólido	Original	668	5	10			
22	21	1	1	Sólido	Paralela	2672	5	10			
10	22	1	1	Sólido	Paralela	668	8	10			
19	23	1	1	Sup. com furos	Original	668	5	3			
30	24	1	1	Sólido	Paralela	2672	8	3			
12	25	1	1	Sólido	Original	668	8	3			
15	26	1	1	Sup. com furos	Original	2672	8	3			
32	27	1	1	Sólido	Original	2672	8	10			
6	28	1	1	Sólido	Paralela	2672	5	10			
18	29	1	1	Sólido	Paralela	668	5	3			
14	30	1	1	Sólido	Paralela	2672	8	3			
8	31	1	1	Sólido	Original	2672	5	3			
5	32	1	1	Sup. com furos	Paralela	2672	5	3			

Tabela 3: Planejamento Experimental Fatorial Fracionado 2^{5-1} para o estudo

Primeiramente, cada variável resposta será analisada separadamente utilizando-se as técnicas estatísticas supracitadas. Entretanto, muitas vezes, tem-se o interesse em analisar o efeito simultâneo de múltiplas variáveis resposta. Para tanto, será proposto a aplicação de uma técnica de otimização global de múltiplas respostas. Para realizar a otimização global deste sistema, será utilizada a ferramenta *Response Optimizer* referente ao planejamento de

experimentos fatoriais do software Minitab 17. Os critérios para encontrar as melhores configurações globais dos fatores são baseados na função desirability individuais (di) e composta (Di). Este procedimento é equivalente à definição das funções objetivo em otimização. 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.

3.9. Estimativa de Custos Envolvidos

Com parte importante de um planejamento, a Tabela 4 apresenta uma estimativa de custos relacionados ao desenvolvimento deste estudo. Desta forma, tornou-se possível saber o investimento a ser feito com aquisição dos materiais para a condução dos ensaios a serem realizados.

Material	Quantidade gasta	Preço Unitário	Preço Total
Disco de freio sólido	16	R\$ 70,00	R\$ 1.120,00
Disco de freio com furos	16	R\$ 80,00	R\$ 1280,00
Pastilha Original	16	R\$ 35,00	R\$ 560,00
Pastilha Paralela	16	R\$ 15,00	R\$ 240,00
Total:			R\$ 3.200,00

Tabela 4: Estimativa de custos para execução dos ensaios.

4. Conclusões

Neste estudo, foi realizado um planejamento de experimentos para analisar o desempenho de operação de um sistema de freio a disco. A abordagem principal foi focada em técnicas para melhor conduzir os ensaios de forma a otimizar a utilização dos recursos disponíveis.

Na revisão bibliográfica, buscou-se apresentar conceitos relacionados à frenagem e aos sistemas de freios a disco, materiais utilizados para fabricação de materiais de atrito, variáveis que influenciam o desempenho de sistemas de freios e técnicas de planejamento de experimentos a serem utilizadas para criação e análise dos experimentos.

Já no capítulo sobre materiais e métodos, foi realizada uma classificação metodológica da pesquisa, bem como a descrição do banco de ensaios a ser utilizado, instrumentos utilizados para monitoramento da variáveis de entrada e de saída e o procedimento de ensaio para condução dos experimentos.

No capítulo de resultados, foi criado um Experimento Fatorial Fracionado 2^{5-1} com as variáveis de entrada envolvidas utilizando-se o software Minitab 17. A ordem aleatória proposta para a execução dos ensaios define qual a combinação entre os níveis dos fatores será executado a cada rodada de testes. Optou-se pela ordem aleatória como forma de garantir independência entre os ensaios a serem executados. Foi proposto, também, uma planilha relacionada aos gastos com materiais de atrito para a execução dos ensaios.

Por fim, ressalta-se que esta pesquisa buscou empregar técnicas relativas às áreas da Engenharia de Produção - Engenharia da Qualidade e de Engenharia do Produto - para obter ganhos em termos de redução de tempo e recursos em desenvolvimento e análise de um projeto, otimização de parâmetros de operação e de fabricação de um sistema de segurança essencial aos veículos.

Referências

- ALBERTAZZI, G. Jr., A.; De Souza, A. R.** *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*. Editora Manole. São Paulo, SP, 2008.
- ALEKSENDRIĆ, D., BARTON, D. C.** *Neural network prediction of disc brake performance*. Tribology International, Vol. 47, Issue 7, 1074-1080, 2009.
- 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.
- HALDERMAN, J.D.,** *Automotive Brake Systems*, Prentice Hall, 1996.
- KRUZE, G. A. S.,** *Avaliação do Coeficiente de Atrito em um Dinamômetro em Escala Reduzida*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil, 2009
- LIMPERT, R.,** *Brake Design and Safety*, 3rd ed., SAE, 2011.
- MAKRAHY, M. M., GHAZALY, N. M., ABD EL-GWWAD, MAHMOUD, K. R., ABD-EL-TAWWAB, A. M.,** *Optimization of Operation Parameters on a Novel Wedge Disc Brake by Taguchi Method*. American Journal of Vehicle Design, 2013, Vol. 1, No 2, p. 30-35, 2013
- MEDEIROS, J. B.** *Redação Científica: a prática de fichamentos, resumos, resenhas*. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2006.
- MONTGOMERY, D.C.** *Design and Analysis of Experiments*. 8th Edição. John Wiley & Sons, NY, 2013.
- NARAYANA, K.S., Rao, G. U., Simhachalam, D., Nagaraju, B.** *Finite Element Analysis of Solid and Ventilated Disc Brake*. International Journal of Science and Research (IJSR). Volume 3 Issue 9, September, 2014.
- REHKOPF, J., HALDERMAN, J.D.,** *Automotive Brake Systems*, Prentice Hall, 4th edition, 2006
- SANDERS, P.G., DALKA, T.M., Bash, R.H.** *A Reduced-Scale Brake Dynamometer for Friction Characterization*, Tribology International, vol. 34, pp. 609-615, 2001
- TALATI F., JALALIFAR S.** *Analysis of heat conduction in a disk brake system*, Heat Mass Transfer, Vol. 45, No 8, 1047-1059, 2009
- TURRIONI, J. B., MELLO, C. H. P.** *Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção*. Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – Curso de Especialização em Qualidade e Produtividade, 2017
- XIAO, X., YIN, Y., BAO, J., FENG, X.** *Review on the friction and wear of brake materials*. Advances in Mechanical Engineering 2016, Vol. 8 (5) 1-10, Sage, 2016.