



# ConBRepro

XII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



**ESG nas Engenharias**

**30 a 02**  
**de dezembro 2022**

## **Aplicação de Técnicas Estatísticas para Análise de Efeitos Térmicos e do Desgaste em Materiais de freio Veicular empregando-se a norma SAE J661**

**Rafael Lucas Machado Pinto**

Departamento de Engenharia de Produção – UFOP/ICEA

**Pedro Francisco do Amaral Lage**

Departamento de Engenharia de Produção – UFOP/ICEA

**Thainara Fernanda da Silva**

Departamento de Engenharia de Produção – UFOP/ICEA

**Juliana Alves da Silva**

Departamento de Engenharia de Produção – UFOP/ICEA

**Resumo:** O presente trabalho visa realizar uma análise dos efeitos térmicos e tribológicos sofridos por materiais de atrito empregando-se o procedimento normativo SAE J661, que trata de ensaios de frenagem em tambores e lonas de freio empregando-se a máquina de teste do tipo Chase. Esta máquina é equipada com meios adequados para monitoramento dos ensaios, tais como: medição da temperatura do tambor, controle da taxa de aquecimento, resfriamento pelo sistema de freio traseiro, medição da força de atrito e medição da velocidade de rotação. No ensaio são analisadas as respectivas variáveis resposta: coeficiente de atrito, temperatura final e inicial, e o desgaste do material, objetivando avaliar o desempenho do sistema de freio no decurso do processo de frenagem. Foram analisados, também, as razões fade e recuperação para caracterização dos materiais estudados. Dois materiais de fornecedores diferentes foram testados, com três réplicas, e os resultados foram analisados por meio de técnicas de estatística descritiva e por meio do teste t de hipóteses. Focou-se na análise de desempenho das variáveis respostas como critério comparativo entre os dois materiais, definindo-se estratégias para tomar decisões sobre a escolha dos melhores materiais para serem utilizados nos veículos. Por fim, a metodologia empregada pode ser considerada satisfatória para analisar os resultados alcançados e definir critérios para tomadas de decisões.

**Palavras-chave:** Sistema de Frenagem, Efeito fade, Desgaste, Atrito.

# Application of Statistical Techniques for the Analysis of Thermal and Wear Effects in Vehicle Brake Materials using SAE J661

**Abstract:** The present work aims at performing an analysis of the thermal and tribological effects suffered by friction materials using the SAE J661 standard procedure, which deals with brake tests on brake drums and linings using the Chase-type testing machine. This machine is equipped with suitable means for monitoring the tests, such as: temperature measurement of the drum, heating rate control, cooling by the rear brake system, friction force measurement and rotation speed measurement. The test analyzes the respective response variables; coefficient of friction, final and initial temperature, and material wear, in order to evaluate the performance of the brake system during the braking process. The fade and recovery ratios were also analyzed to characterize the materials studied. Two materials from different suppliers were tested, with three replicates, and the results were analyzed using descriptive statistical techniques and the hypothesis t-test. The focus was on the performance analysis of the response variables as a comparative criterion between the two materials, defining strategies to make decisions about the choice of the best materials to be used in the vehicles. Finally, the methodology employed can be considered satisfactory for analyzing the results achieved and defining criteria for decision-making.

**Keywords:** Braking System, Fade Effect, Wear, Friction.

## 1. Introdução

O setor automotivo busca constantemente se tornar cada vez mais moderno. Essa busca exige um alto investimento em pesquisas e desenvolvimento, a fim de obter alto desempenho aliado à redução de custos e segurança máxima (NEIS, 2008).

Para Limpert (1999), o sistema de freio tem uma importância muito significativa na construção e elaboração de um projeto veicular. Ele é tratado como um item crítico de segurança. As principais funções de um sistema de freio são: reduzir a velocidade ou manter uma velocidade constante controlando o movimento, ou ainda manter o veículo parado quando solicitado (LIMPERT, 1999).

O sistema de frenagem pode ser classificado de acordo com o tipo de acionamento podendo ser, sistema hidráulico, pneumático ou mecânico. De acordo com Canali (2002), o processo de frenagem ocorre através do contato sob pressão entre o par tribológico, lona e tambor ou disco e pastilhas de freio. Quando o veículo está em movimento e o freio é solicitado, ocorre a transformação da energia cinética em energia térmica dissipando calor. Também é possível que outras formas de energia sejam dissipadas em forma de ruído ou vibração (CANALI, 2002).

É preciso garantir que o sistema de freios seja eficiente, confiável e que esteja dentro dos parâmetros e objetivos estabelecidos pelas normas, ressalta Guimarães (2016). No Brasil quem estabelece essas normas é o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) e o Instituto Nacional de Meteorologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), juntamente com um conjunto de normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que tem como base, em parte, a regulamentação europeia ECE-13/05, (INMETRO, 2013). Para assegurar que o sistema de freios, bem como todos seus componentes funcionam corretamente e estão de acordo com todas as normas estabelecidas pelos órgãos reguladores, é necessário a realização de diversos ensaios (GUIMARÃES, 2016). O banco de dados obtido através dos ensaios é analisado utilizando técnicas estatísticas adequadas para cada caso, possibilitando uma interpretação e avaliação que se mostre relevante para o objetivo desejado e assim, uma tomada de decisão (RUSNAK. et al 1970). Os testes laboratoriais são de extrema importância pois são utilizados com diversas finalidades, como: controle de qualidade, realização de pesquisas e

desenvolvimento, aprovação ou com o intuito de obter certificação de um sistema (RUSNAK. et al 1970).

Existem diversos tipos de máquinas e normas de teste para os materiais de fricção, dentre eles podemos citar a máquina Chase e a norma SAE J661, que serão utilizados nesse estudo. A máquina Chase foi usada para realizar o teste SAE J661, o qual possui como resultados o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste de uma amostra de material de atrito. O teste SAE J661 vem sendo muito utilizado como ensaio para controle de qualidade dos produtos na indústria, pela fácil obtenção da taxa de desgaste e nível de atrito característico de cada material (MENETRIER,2014).

Através da combinação de técnicas estatísticas e do planejamento de experimentos, é possível realizar uma tomada de decisão mais confiável. O planejamento de experimentos é uma técnica utilizada com o intuito de determinar quais variáveis exercem maior influência no desempenho de um determinado processo (CALADO e MONTGOMERY, 2003). Além disso, Button (2005) descreve como objetivos do planejamento de experimentos:

- a) atribuir valores às variáveis influentes do processo de modo que a variabilidade da resposta de interesse seja mínima ou que o valor (parâmetro de qualidade) seja próximo do valor nominal;
- b) atribuir valores às variáveis influentes do processo de modo que o efeito das variáveis não controláveis seja minimizado.

A utilização de planejamentos de experimentos baseados em princípios estatísticos é, em geral, a maneira mais eficiente para estimar os efeitos de várias variáveis simultaneamente (SCARMINO, 2001). Com esta ferramenta, os pesquisadores podem extrair do sistema em estudo, o máximo de informações úteis com um número mínimo de ensaios (MENETRIER, 2014).

Nesse estudo, serão analisados o comportamento térmico e tribológico de dois materiais de atrito utilizados para fabricação de lonas de freio empregadas em veículos automotores. Os ensaios experimentais foram conduzidos seguindo as regulamentações da norma SAE J661, que estabelece os procedimentos para o controle de qualidade dos materiais de fricção utilizados em sistemas de freios automotivos. Com os resultados alcançados, espera-se contribuir na tomada de decisões sobre a seleção dos melhores parâmetros de operação desses sistemas de freio e na escolha dos materiais adequados com base nas variáveis analisadas, tornando-se possível avaliar e comparar o desempenho de cada material através da medição dos parâmetros correspondentes. Espera-se, também, contribuir para o aumento da segurança e para otimizar processos de melhorias nesse fundamental sistema veicular.

## **2. Materiais e métodos**

### **2.1 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 1 ilustra alguns critérios de classificação da pesquisa científica em engenharia de produção, como proposto por Turrioni e Mello (2017).

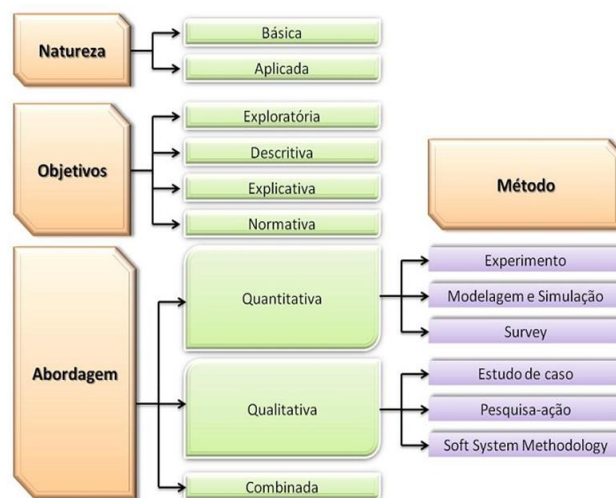
Do ponto de vista da natureza da pesquisa, trata-se de uma pesquisa aplicada, pelo seu interesse prático, no qual o conhecimento teórico adquirido durante a revisão bibliográfica é utilizado na realidade da empresa para solucionar os problemas encontrados.

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

m Turrioni e Mello (2017), 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, 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 1- Classificação da pesquisa científica em Engenharia de Produção**



**Fonte: Adaptado de Turrioni e Mello (2017)**

## 2.2 Descrição do banco de ensaios

A operação do processo de frenagem ocorre utilizando-se uma amostra de material de atrito (lona de freio) com área de uma polegada quadrada, que é mecanicamente forçado contra o interior ou um tambor de freio. Durante o ensaio é necessário controlar a carga normal e a força de atrito, enquanto são monitorados os parâmetros térmicos, de velocidade e carga. A partir da medição destes fatores, a avaliação das propriedades de atrito do material pode ser feita.

A velocidade de fricção é controlada por uma válvula de acionamento de velocidade, a carga é controlada por um sistema de circuito fechado e a temperatura do tambor de teste é controlada por aquecedores de resistência e um sistema de refrigeração de ar.

Um computador operando o ProLink™, que é um software capaz de executar todo o controle e funções de sequenciamento para capturar, exibir e relatar dados de teste e manter um banco de dados de seqüências de operações e seus respectivos resultados). Os controles são ferramentas cruciais, que permitem o gerenciamento manual ou totalmente automatizado de todas as funções, ao longo dos de testes executados (LINKENG, 2022).

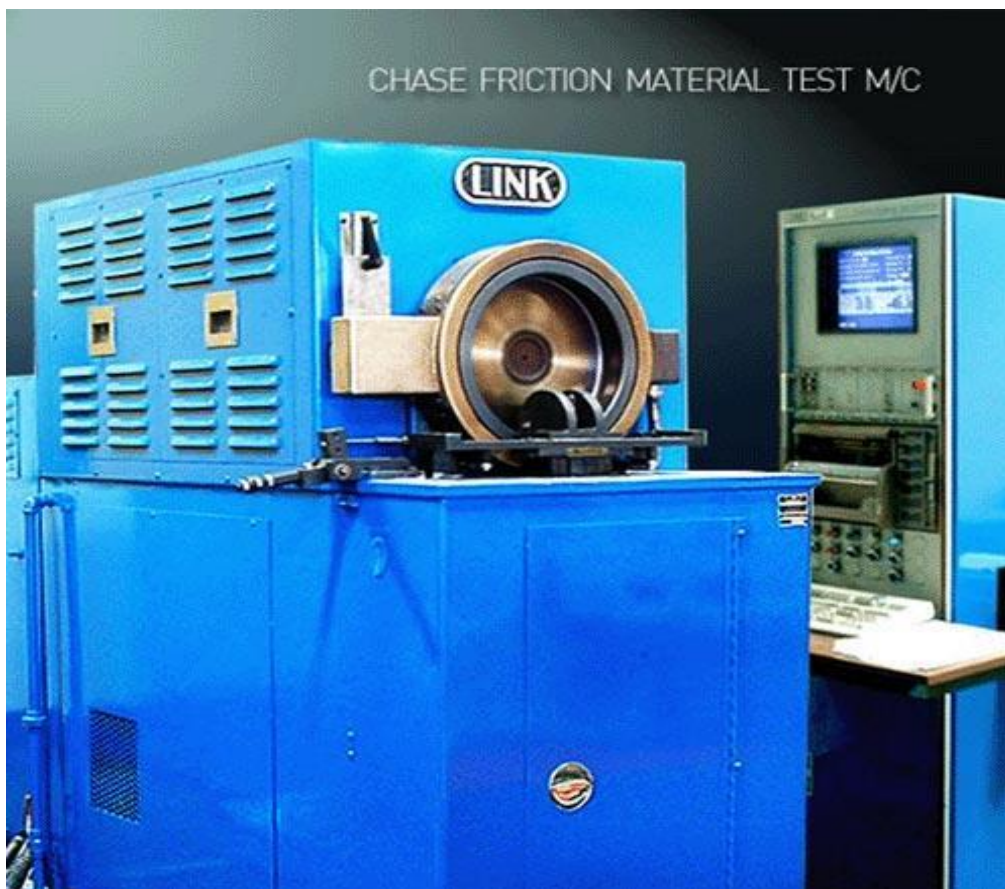
As seqüências de teste de frenagem conduzidas na máquina Chase objetivam recriar a operação real durante o processo de frenagem, simulando condições pré-selecionadas de

cargas, forças, temperaturas, velocidades e tempos de aplicação de frenagem. Vale ressaltar que o procedimento de frenagem, utilizando-se a norma SAE J661, é um padrão reconhecido em todo o mundo, e fornece dados precisos sobre o desempenho e características do desgaste do material de fricção.

A grande vantagem da máquina Chase é o seu potencial de gerar dados de especificações de teste rapidamente, devido à sua projeção voltada ao fácil carregamento de amostras e aos convenientes controles orientados ao operador; fazendo com que a posição da amostra de teste seja mantida, independentemente de variações sofridas pela força de atrito. Durante os testes utilizando a Máquina Chase, ocorre uma indicação contínua de temperatura, pois a temperatura do tambor é mantida.

A Figura 2 esboça a Máquina Chase, que utilizam corpos de prova de 25,4mm<sup>2</sup> de área pressionados contra um tambor, cujo raio de escorregamento é de 279 mm. A partir desses parâmetros, o coeficiente de atrito dos materiais é medido. Este corpo de prova é uma amostra retirada de material de desgaste utilizado na lonas de freio que equipam veículo automotores. O tambor de freio rotativo é feito de ferro fundido cinzento perlítico, cujo sistema de acionamento é ligado a um motor de velocidade variável, cuja função é controlar a velocidade de rotação do tambor. A aplicação/liberação de carga é obtida por um sistema de circuito fechado, sendo que o soprador e o aquecedor são responsáveis por controlar a temperatura do tambor. A medição da temperatura do sistema ocorre empregando-se termopares localizados na parte traseira do tambor.

**Figura 2 - Máquina Chase**



Fonte: Linkeng (2022)

## 2.5 Variáveis Analisadas

Com relação às variáveis de entrada analisadas nesta pesquisa, foram selecionados dois diferentes materiais de atrito fornecidos por dois distintos fabricantes. Em função de sigilo estratégico e mercadológico serão chamados de material A e material B, respectivamente. Esses materiais são conhecidos no mercado como lonas de freio e ambas são fabricadas com materiais classificados como orgânicos sem amianto, também chamadas de NAO (Non-Asbestos Organic). Essa classe de materiais possui tal denominação devido à proibição do uso de amianto em pastilhas e lonas de freio por ser uma substância cancerígena. Para cada material, foram realizadas três réplicas experimentais.

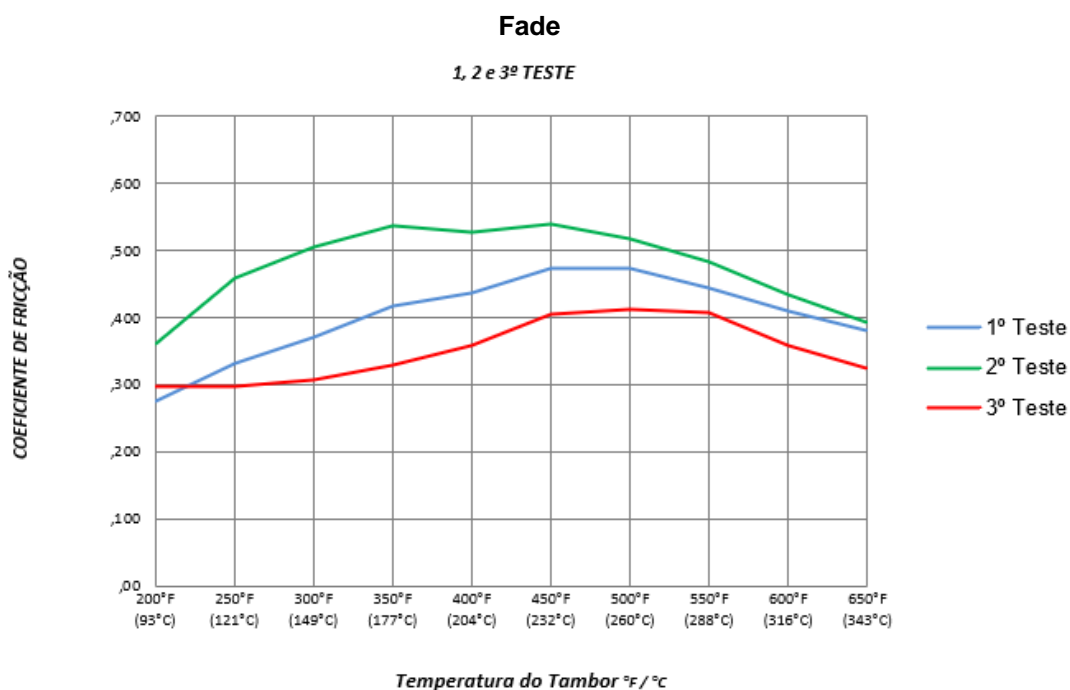
Já em relação as variáveis resposta, foram consideradas um conjunto de medidas de desempenho térmicas e tribológicas: coeficiente de atrito, temperatura e desgaste. Estas variáveis são responsáveis por analisar o desempenho do sistema de freio por meio da medição do coeficiente de atrito em diferentes condições de operação, do desgaste sofrido e pela a capacidade do sistema de freio em manter a efetividade da frenagem em função da elevação da temperatura do sistema de freio quando submetido a vários ciclos de frenagem.

## 3. Apresentação dos Resultados

### 3.1. Análise da relação coeficiente de atrito x temperatura

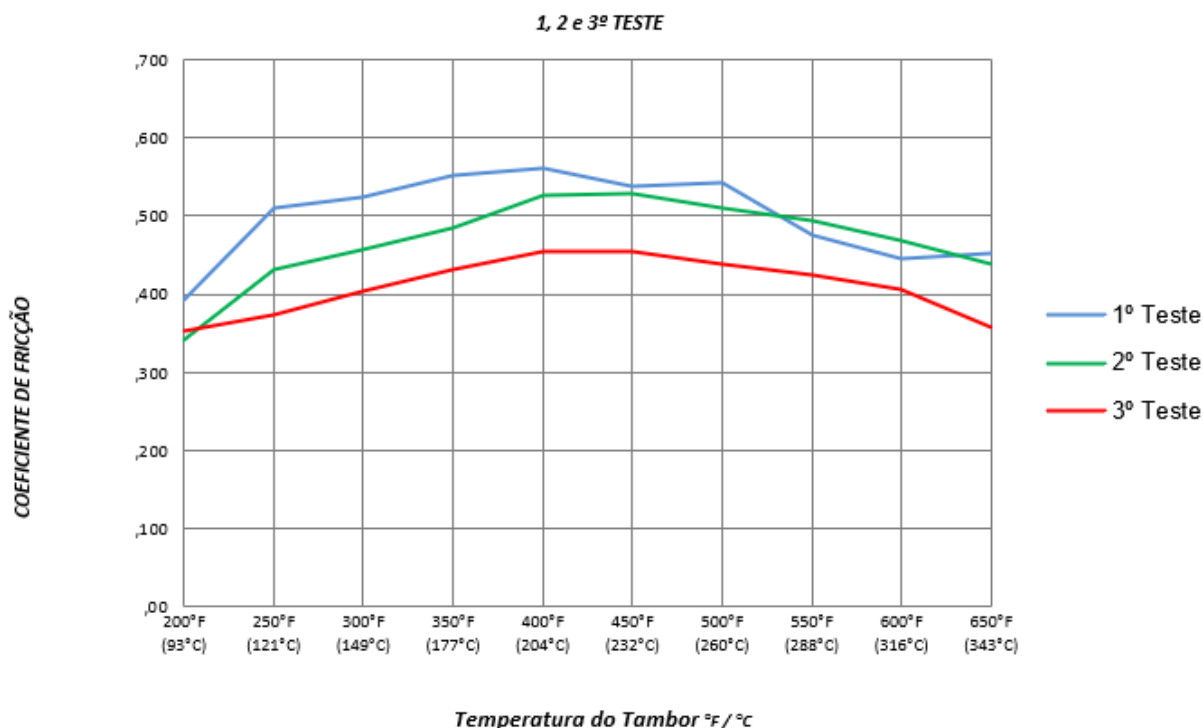
A Figura 3 ilustra os ensaios da segunda fase Fade para o material A. Já a Figura 4 representa os mesmos ensaios para o Material B. Em todos esses gráficos é possível observar um comportamento semelhante na relação entre a temperatura e o coeficiente de atrito: inicialmente ocorre um aumento do valor do coeficiente de atrito à medida que o sistema de freio aquece em função do contato tribológico durante a frenagem, alcança-se um valor de máximo de máximo coeficiente de atrito e, em seguida, observa-se redução no coeficiente de atrito à medida que a temperatura continua aumentando. Esse fenômeno é conhecido como Fade.

Figura 3 - Gráfico do coeficiente de atrito x temperatura para as três amostras do material A na etapa



Fonte: Elaborado pelos Autores (2022)

**Figura 4 - Gráfico do coeficiente de atrito X temperatura para as três amostras do material B na etapa fade**



**Fonte: Elaborado pelos Autores (2022)**

Média de máximo coeficiente de atrito para o material A: 0,466;

Valor da temperatura que se observou redução no coeficiente de atrito - material A: entre 232°C e 260°C (média = 250 °C);

Média de máximo coeficiente de atrito para o material B: 0,514.

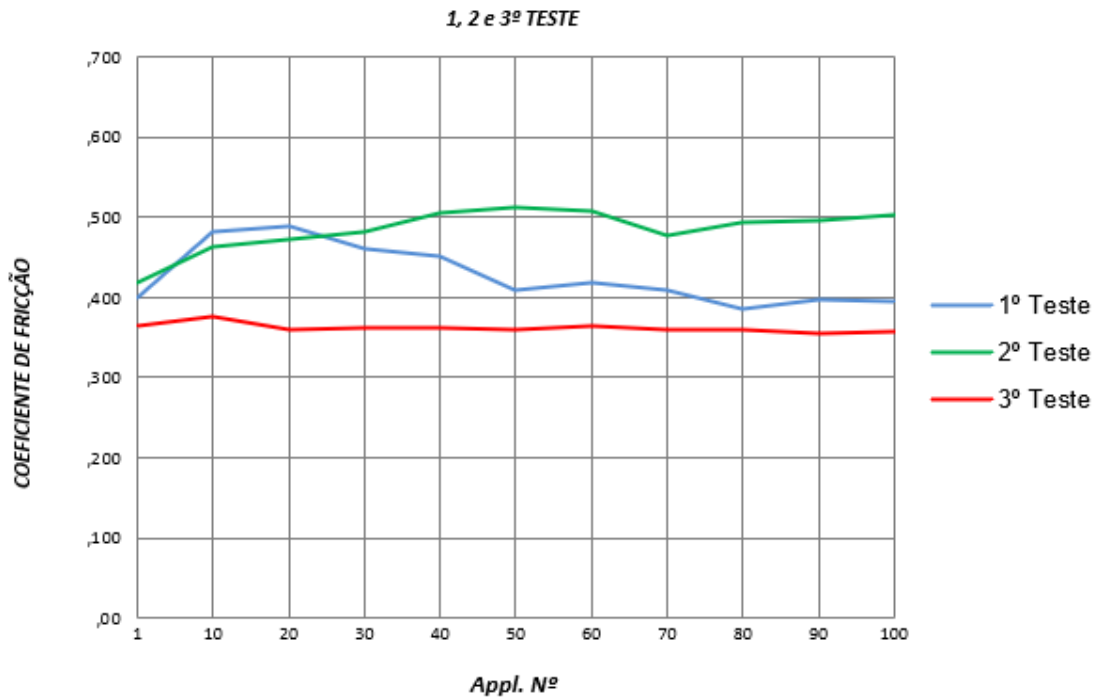
Valor da temperatura que se observou redução no coeficiente de atrito -material B: entre 204°C e 232°C (média = 222 °C).

Nota-se que o material A possui valor médio inferior para o máximo valor de coeficiente de atrito se comparado ao material B; entretanto, o material A apresenta maior valor médio de temperatura a partir do qual a redução do coeficiente de atrito se inicia.

### **3.2 Análise do Desgaste sofrido pelas amostras de lonas de freio durante os ensaios**

A Figura 5 ilustra os ensaios da fase desgaste para o material A. Já a Figura 6 representa os mesmos ensaios para o Material B. Para o material B, o coeficiente de atrito manteve-se em valores estáveis (entre 0.4 e 0.53) à medida que as aplicações de frenagem ocorriam e, conseqüentemente, o material de atrito B se desgastava. Já para o material A o comportamento foi semelhante, mas os valores foram ligeiramente inferiores e a amplitude de valores foi um pouco maior (entre 0.36 e 0.5).

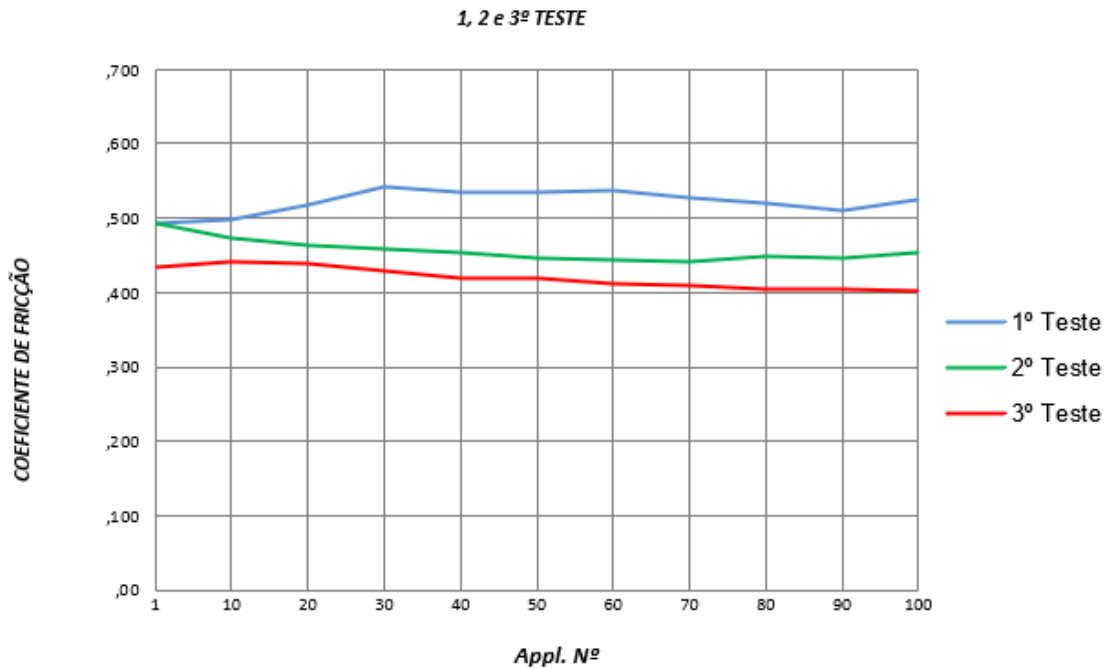
**Figura 5 - Gráfico do coeficiente de fricção X número de aplicações para as três amostras do material A na fase**



**Wear**

**Fonte: Elaborado pelos Autores (2022)**

**Figura 6 - Gráfico do coeficiente de fricção X número de aplicações para as três amostras do material B na fase Wear**



**Fonte: Elaborado pelos Autores (2022)**



## 4. Conclusões

Nesse estudo, foram analisados o comportamento térmico e tribológico de dois materiais de atrito utilizados para fabricação de lonas de freio empregadas em veículos automotores. Os ensaios experimentais foram conduzidos seguindo as regulamentações da norma SAE J661, que estabelece os procedimentos para o controle de qualidade dos materiais de fricção utilizados em sistemas de freios automotivos. Foram aplicadas técnicas de análise gráfica e estatística descritiva para obtenção dos resultados.

Para a relação entre o coeficiente de atrito e temperatura, é possível observar um comportamento semelhante entre os dois materiais analisados: inicialmente ocorre um aumento do valor do coeficiente de atrito à medida que o sistema de freio aquece em função do contato tribológico durante a frenagem, alcança-se um valor de máximo coeficiente de atrito e, em seguida, observa-se redução no coeficiente de atrito à medida que a temperatura continua aumentando. Este fenômeno é conhecido como fade, também chamado de fadiga térmica. Esse achado é de extrema importância nos parâmetros de qualidade, ensaios e desenvolvimento de materiais de atrito veiculares, tendo em vista que está diretamente relacionado com a efetividade da frenagem do veículo e, conseqüentemente, com a segurança dos passageiros. Pelos resultados obtidos, observou-se que o material A apresentou valor médio inferior para o máximo coeficiente de atrito se comparado ao material B; entretanto, o material A apresentou maior valor médio de temperatura a partir do qual a redução do coeficiente de atrito se inicia. Desta forma, o material A apresentou melhor desempenho na relação atrito x coeficiente de atrito.

O desgaste das lonas de freio se configura como um importante indicador relativo à manutenção da efetividade da frenagem, medida por meio do coeficiente de atrito, à medida que o veículo experimenta sucessivos acionamentos do sistema de freio. Observou-se que para o material B, o coeficiente de atrito manteve-se em valores estáveis (entre 0.4 e 0.53) à medida que as aplicações de frenagem ocorriam e, conseqüentemente, o material de atrito B se desgastava. Além disso, apresentou valor médio superior para o coeficiente de atrito em relação ao material A (0,47 para o material B e 0,42 para o material A). Já para o material A o comportamento foi semelhante, mas os valores foram ligeiramente inferiores e a amplitude de valores foi um pouco mais elevada (entre 0.36 e 0.5). Desta forma, o material B apresentou melhor desempenho na desgaste x coeficiente de atrito.

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, análise de otimização de parâmetros de operação e de seleção de um sistema de segurança essencial aos veículos.

## Referências

CALADO, Verônica; MONTGOMERY, Douglas. **Planejamento de Experimentos usando o Statistica**. Editora E-papers, 2003.

CANALI, R. J. **Determinação das propriedades físicas de diferentes materiais para discos e pastilhas de freio e relação destas propriedades com ruído**. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre: 2002.

Guimarães, J. V. A. **Automação de uma Bancada para Ensaio e Testes De Frenagem/ João Victor Avancini Guimarães**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB Faculdade UnB Gama - FGA , Brasília, DF, 2016.

INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para Materiais de Atrito Destinados ao Uso em Freios de Veículos Roviários Automotores**. Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

LIMPERT, R. **Brake Design and Safety**. 2. ed. SAE International, Warrendale, 1999.

LINKENG, 2022. Disponível em: <http://WWW.LINKENG.COM> Acesso em: 9 de Mai. 2022.

MEDEIROS, J. B. **Redação Científica: a prática de fichamentos, resumos, resenhas**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2006.

MENETRIER, Ademir Reus. **Estudo de variáveis de composição e processo para controle da compressibilidade**. 2014. Tese de Doutorado.

RUSNAK, R. M.; SPURGEON, W. M.; ALDRICH, F. W. **Friction material testing**. SAE Transactions, p. 1944-1952, 1970.

SCARMINO I.S., NETO B.B., BRUNS R.E., **Como fazer experimentos – pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**, Editora da Unicamp, Campinas, 2001.

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.