

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DE DESEMPENHO ENTRE PASTILHAS DE FREIO DO
MERCADO DE REPOSIÇÃO E ORIGINAL

por

Daniel Carmo Krummel

Monografia apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica
da Escola de Engenharia da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como
parte dos requisitos para obtenção do
diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2014.

ANÁLISE DE DESEMPENHO ENTRE PASTILHAS DE FREIO DO
MERCADO DE REPOSIÇÃO E ORIGINAL

por

Daniel Carmo Krummel

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof.^a Dr.^a Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Darci Campani

Prof. Dr. Fabiano Disconzi Wildner

Prof. Dr. Tiago Becker

Porto Alegre, 14 de novembro de 2014.

Krummel, D. C. **Análise de Desempenho entre Pastilhas de Freio do Mercado de Reposição e Original**. 2014. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade analisar o desempenho de materiais de fricção, aplicados a um sistema de freio a disco, comparando produtos do mercado de reposição e concessionária (original). Entende-se por desempenho desses materiais: a estabilidade do coeficiente de atrito bem como a resistência ao desgaste. Através da metodologia de ensaio empregada no tribômetro do LATRIB – UFRGS, que reproduz as condições reais de frenagens, foi possível mensurar as variáveis (atrito e desgaste). Essas variáveis foram pós-processadas em *software Excel*, e os resultados mostraram que o material original apresenta melhor desempenho em atrito comparado aos produtos do mercado de reposição. Por outro lado, desempenho oposto foi verificado com relação ao desgaste.

PALAVRAS-CHAVE: Coeficiente de atrito, frenagens, mercado de reposição.

Krummel, D. C. **Performance Analysis of the Brake Pads Replacement and Original Market.** 2014. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ABSTRACT

This paper aims to analyze the performance of friction materials, applied a brake disc system, comparing products from the aftermarket front the original sample. It is understood by performance of these materials, the stability of coefficient of friction and wear resistance. Through the methodology used in testing the tribometer LATRIB - UFRGS, which reproduces the actual braking conditions, it was possible to measure the variables (friction and wear). These variables were post-processed in Excel software, and the results showed that the original material shows better performance compared to friction products aftermarket. The opposite was observed in performance for wear.

KEYWORDS: Coefficient of friction, braking, aftermarket.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3.1 Sistema de freios.....	1
3.2 Material de fricção.....	2
3.3 Desempenho dos materiais de fricção.....	2
3.4 Mecanismos de desgaste.....	3
4. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS	3
4.1 Tribômetro.....	3
4.2 Balança eletrônica de precisão.....	4
4.3 Materiais ensaiados.....	5
5. METODOLOGIA DE ENSAIOS.....	5
5.1 Determinação do atrito.....	6
5.2 Determinação do desgaste.....	6
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	6
6.1 Etapa de assentamento.....	6
6.2 Etapa <i>fade</i> (100/200/300 e 350°C).....	7
6.3 Etapa de caracterização.....	12
6.4 Desgaste dos materiais.....	12
6.5 Indicador (Kr).....	13
7. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria automotiva busca novas soluções para tratar dos componentes que equipam veículos em situações de frenagens. Hoje, a tecnologia se volta para a pesquisa do comportamento destes materiais quando solicitados na prática. Para isso, pesquisadores do ramo procuram caracterizar o comportamento dos materiais de fricção (pastilhas e lonas de freio) através de ensaios realizados em equipamentos de testes, monitorando o atrito através de metodologias de ensaios. Com isso, o que se busca é promover o melhoramento do produto de fricção para o ponto ótimo, ou seja, que este material quando atritado sobre o disco de freio, promova paradas mais eficientes e com o menor desgaste possível.

Através dos estudos de Velde, at. al., (1997), muitos parâmetros podem influenciar o comportamento do atrito: pressão de contato, aceleração, desaceleração, condições ambientais, sistemas mecânicos, dentre outros. No entanto, outros estudiosos no assunto, relacionam três principais agentes modificadores do atrito: pressão de contato, velocidade de deslizamento entre corpos e temperatura, [Neuman at. al., 1983].

Verificou-se, que para materiais de fricção comercializados no Brasil, não se aplica às exigências por normas ante aos órgãos vigentes. Com isso, não impede-se que materiais de fricção de baixa qualidade equipem veículos no pós-venda. Dito isso, houve a preocupação em verificar a qualidade destes produtos frente a um “original”, que por normas é atendido, como por exemplo a norma: FMVSS n° 135.

Este trabalho insere-se na linha de pesquisa do Laboratório de Tribologia – LATRIB-UFRGS, que vem realizando pesquisas referentes aos fenômenos tribológicos, bem como desenvolvendo metodologias de ensaio de frenagens no tribômetro.

2. OBJETIVOS

Objetivo geral:

O trabalho visa caracterizar e comparar, de forma experimental, o atrito e o desgaste de cinco amostras de materiais de fricção empregadas em pastilhas de freio a disco, providas do mercado de reposição e de concessionária (original).

Objetivos Específicos:

- Avaliar os resultados de atrito do tribômetro, comparando os materiais do mercado de reposição frente ao original
- Apresentar o material com melhor resultado em desempenho frenante
- Relacionar o custo e o desgaste dos materiais ensaiados com os resultados obtidos no tribômetro através de um indicador

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sistema de freios

É um conjunto de componentes projetado essencialmente para dissipar a energia cinética do veículo, transformando-a em calor. Os principais requisitos de projeto envolvem segurança, durabilidade, eficiência, entre outros, [Ruzzi, 2004; Brezolin, 2007]. Estes sistemas utilizam

pastilhas pressionadas axialmente contra o disco ou rotor de freio, proporcionando menor distância de parada, menor sensibilidade da eficiência em relação ao aquecimento (*fade*) e frenagens mais seguras. A figura 3.1 abaixo mostra um esquema de freio a disco comercial, com os principais componentes do sistema.

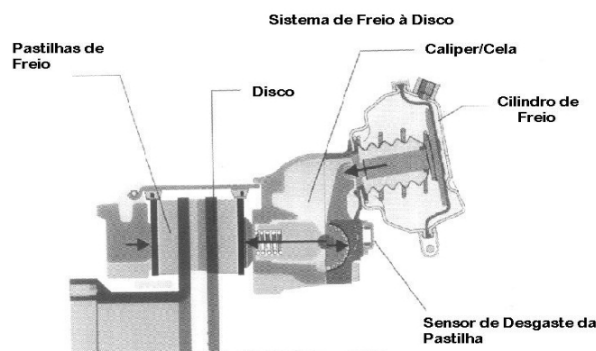


Figura 3.1 - Sistema de freio veicular (Brezolin, 2007)

3.2 Material de fricção

A pastilha de freio é composta essencialmente por duas partes: (i) plaqueta e (ii) material de atrito, este último determinante no desempenho de frenagens. A plaqueta tem como função básica distribuir uniformemente a força proveniente do pistão sobre a superfície do material de atrito contra o rotor. Os componentes básicos dos materiais de fricção são:

- Aglomerantes ou ligantes: responsáveis pela aglomeração dos demais materiais de atrito, formam uma matriz estável térmica e mecanicamente, buscando manter a integridade estrutural do composto, [Stapathy, 2004; Menetrier, 2006]
- Materiais Estruturais: estes materiais promovem a resistência mecânica do aglomerado. Usualmente uma combinação de mais de um tipo de fibra é utilizada para se obter propriedades complementares para a matriz, como por exemplo: fibra de vidro, fibra de carbono, fibras metálicas, dentre outras, [Nicholson, 1995; Blau, 2005].
- Modificadores de atrito: são os materiais responsáveis pela estabilidade do atrito e pela estabilidade das taxas de desgaste nas diferentes faixas de aplicação. Podem ser divididos em duas categorias principais: lubrificantes e abrasivos, [Menetrier, 2006; Satapathy, 2004].
- Carga: melhora a resistência e a dissipação térmica. Portanto, aumenta a vida útil do material de fricção, preenchendo os espaços e minimizando o custo, [Neis, 2008].

Quanto à classificação, sugerida por Nicholson apud Serbino, (2005), os materiais utilizados em pastilhas de disco podem ser:

- Não metálico: menos de 10% de metal (em peso)
- Intermediário: com 10% a 40% de metal (em peso)
- Semi-metálico: 40% ou mais de metal (em peso).

3.3 Desempenho dos materiais de fricção

Para caracterizar o material de fricção, é necessário avaliar seu desempenho frente a diferentes condições de frenagens. Estas condições normalmente são realizadas em equipamentos utilizando metodologias de ensaios para se poder caracterizá-los. Dentre estes equipamentos, pode-se citar os tipo FAST, que realizam testes em corpos de prova, seguindo

normalmente normas internacionais, por exemplo a norma: SAE J661. Outros tipos utilizam discos de inércia simulando a energia cinética de veículos, estes normalmente utilizam normais próprias (montadora). Em seguida, o tribômetro, que além de tudo, é uma ferramenta para tratar da compreensão do comportamento do coeficiente de atrito, simulada pelas diferentes condições de operação: velocidade de escorregamento, pressão de contato e temperatura, [Neis, 2008]. Este último, foi o equipamento utilizado para a realização do estudo.

3.4 Mecanismos de desgaste

Diferentes mecanismos de desgaste podem estar presentes no contato entre duas superfícies. Estes fenômenos tribológicos podem estar presentes individualmente ou combinados. Abaixo, é apresentado os principais mecanismos de desgaste de forma resumida:

- Desgaste adesivo: ocorre quando dois corpos planos escorregam um contra o outro, e as partículas da interface que formam os contatos são divididos por cisalhamento, resultando em um desprendimento de fragmentos de uma superfície, aderindo na oposta, [Hutchings, 1992; Stachowiak, 2001].
- Desgaste abrasivo: ocorre quando asperezas de uma superfície dura e rugosa, danificam a outra através de uma deformação plástica ou fratura, na superfície, [Hutchings, 1992].
- Desgaste por fadiga: é observado quando o material é exposto a esforços repetitivos durante o escorregamento ou rolagem entre superfícies provocando a formação de trincas nela ou logo abaixo da mesma, [Hutchings 1992; Bhusman, 2002].
- Desgaste químico: desgaste químico ou corrosivo ocorre quando o escorregamento de duas superfícies estão expostas a um ambiente corrosivo, geralmente com alta umidade e altas temperaturas, [Bhusman, 2002].

4. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS

4.1 Tribômetro

Neste trabalho se utilizou o tribômetro do LATRIB-UFRGS, cujo desenvolvimento é apresentado por Neis, (2008). Este equipamento visa simular condições reais de frenagens e avaliar a resposta em desempenho de materiais de fricção mediante parâmetros pré estabelecidos para teste. Um esquema do aparato utilizado para ensaios é mostrado na Figura 4.1 abaixo, onde: (a), é o equipamento real e (b), é o esquema simplificado do equipamento.

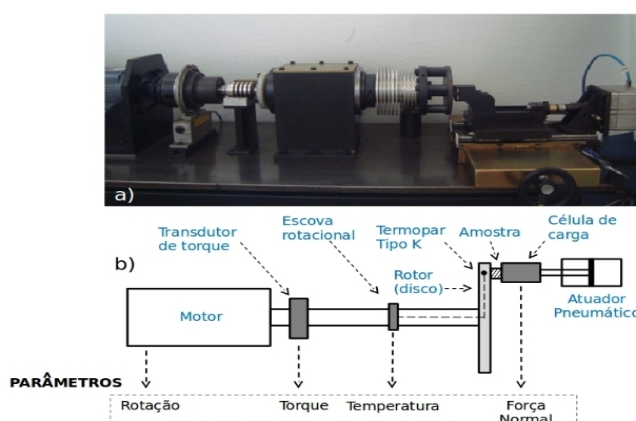


Figura 4.1 – Tribômetro real em (a) e esquema do tribômetro em (b)

A máquina pode ser dividida em 3 partes principais, segundo Neis, (2008), e são apresentadas em resumo na sequência:

- Sistema de atuação: composto pelo pistão pneumático, suporte do corpo de prova, molas de retorno, luvas e acessórios de fixação.
- Sistema de rotação: é composto pelos elementos girantes do sistema: mancais, eixo, motor, acoplamento, suporte dos condicionadores de termopar e disco.
- Estrutura de sustentação: composto pela base ou estrutura sobre a qual os equipamentos e sistemas de rotação e de atuação são montados.

Do sistema de aquisição e controle, segundo Neis, (2008), tem-se:

- Sistema de aquisição e controle de dados: sistema de aquisição de dados e controle em tempo real da *Dspace (Hardware)* que gerencia todos os processos que são realizados pela máquina. Utiliza *software Control Desktop*, com possibilidade de exportação dos dados adquiridos pelo *Hardware* para planilhas do *Excel*.
- Programa computacional de controle: A lógica de controle da máquina é gerenciada pelo *hardware* como ferramenta para modelagem e simulação.
- Sistema de controle do atuador: a pressão do pistão pneumático é controlada por uma válvula proporcional de pressão, comandada capaz de modular a pressão na faixa de 0 a 6 Bar. A força normal que é aplicada é medida através de um transdutor de força ligado a um condicionador de sinais específico para este instrumento.
- Sistema de controle da velocidade: o eixo rotativo da máquina está conectado a um servomotor, o qual possui um controle da rotação em malha fechada, realizado por um conversor de frequência que acompanha o servomotor.
- Sistema de medição do torque: o torque aplicado durante as frenagens ensaiadas no tribômetro é medido através de um sistema composto por um transdutor de torque mais um condicionador de sinais.
- Sistema de controle da temperatura do disco: o sistema para medição e controle da temperatura do disco é composto por: um termopar tipo K, instalado no meio da espessura do disco (3 mm da superfície) num raio de 40mm, um aquecedor por indução eletromagnética que promove o aquecimento do disco para as escalas de temperatura de ensaios.

Os resultados adquiridos pelo sistema de aquisição e controle, são calculados pela Equação 4.1 abaixo, para determinação do coeficiente de atrito dos materiais ensaiados.

$$\mu = \frac{T}{FR} \quad (4.1)$$

Onde: T = Torque no eixo (Nm); F = Força axial (N); R = Raio de deslizamento (m)

O raio de deslizamento é definido pela distância entre centros (corpo de prova e disco de atrito) mantido constante igual a 40 mm.

4.2 Balança eletrônica de precisão

Uma balança eletrônica de precisão do LATRIB-UFRGS foi utilizada para registrar as pesagens dos corpos de prova. Este equipamento possui legibilidade de 0,1 mg, suficiente para atribuir valor em desgaste nos testes realizados. Lee, et. al., 2007, previne o uso de ambiente condicionado para tais medições, visto que o material de atrito possui propriedades

higroscópicas, com variações das medições na pesagem devido a este efeito, podem produzir incerteza de mesma ordem de grandeza. Para este estudo, se utilizou ambiente com temperatura de 25°C e baixa umidade relativa do ar (UR ~ 15%).

4.3 Materiais ensaiados

Foram ensaiados cinco materiais, sendo o primeiro “original”, e os demais providos do mercado de reposição, estes últimos enumerados respectivamente (2, 3, 4, 5). O material original foi adquirido na concessionária e as demais pastilhas em lojas do varejo na cidade de Porto Alegre. Todos estes produtos servem para equipar um veículo em específico, assim torna justo a realização dos testes no tribômetro para a análise de desempenho entre estes produtos. É válido salientar, que nada foi encontrado nas embalagens com informações sobre a composição química destes produtos.

Para análise dos resultados através da metodologia usada no tribômetro, as pastilhas foram usinadas em escala de corpos de prova, com geometria definida, podendo ser visualizada na Figura 4.2 abaixo, sendo essa, a imagem do corpo de prova original.

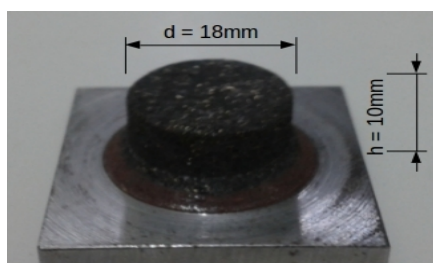


Figura 4.2 – Corpo de prova com área de 254,46 mm²

A usinagem do material de atrito é feita até a base da plaqueta. Esta última, também usinada, confere base retangular para posicionamento no suporte do tribômetro com fixação por meio de parafuso.

5. METODOLOGIA DE ENSAIOS

Os ensaios do tribômetro foram realizados conforme condições de temperatura de gatilho em: 100/200/300 e 350°C. O equipamento é programado com rampa de desaceleração de 7,8m/s a zero em 10 segundos e pressão de contato constante da ordem de 4,7 Bar, para uma força de atuação de 1200N. Estas simulações de frenagens, equivalem a desaceleração de 80Km/h a zero para um veículo leve, equipado com sistema de freio hidráulico. A Tabela 5.1 abaixo, facilita o entendimento da metodologia de ensaio utilizada neste estudo.

Tabela 5.1 – Sequência do ensaio empregada nos testes do tribômetro do LATRIB-UFRGS.

Etapa	Força Normal [N]	Nº ciclos	Nº de frenagens	Vel. inicial - final [m/s]	Temperatura inicial [°C]
1º Assentamento	1200 [± 2]	1	30	7,8 – 0	100 [±7]
2º Alta Temperatura (<i>fade</i>)		4	10 (7 + 3) a 100°C 3 a 200/300/350°C		100/200/300/350 [±7]
3º Caracterização		1	30		100 [± 7]

5.1 Determinação do atrito

A sequência apresentada anteriormente pela Tabela 5.1, está dividida em três etapas que são descritas abaixo, em ordem de ensaio respectivamente:

- *Assentamento*: a primeira fase de testes, tem por objetivo promover o aumento de área de contato do par tribológico. Para esta etapa, foram simuladas 30 frenagens com temperatura de gatilho de 100°C, e os demais parâmetros constantes (desaceleração e força de atuação).
- *Fade (alta temperatura)*: simula condições de frenagens em altas temperaturas. Essa etapa conta com 4 ciclos, para cada patamar de temperatura, totalizando 40 frenagens a 100°C, e 12 frenagens a 200/300 e 350°C. As 7 primeiras frenagens de cada ciclo a 100°C são desconsideradas, pois há preocupação em retirar o filme de óxido remanescente no rotor de atrito. Os demais parâmetros de mantém, idem aos da etapa anterior.
- *Caracterização*: tem por objetivo avaliar o atrito em condições usuais de frenagens. Para esta etapa, foram simuladas 30 frenagens com temperatura de gatilho de 100°C.

5.2 Determinação do desgaste

O desgaste é medido através da mudança de massa do corpo de prova, feito através de balança eletrônica de precisão, com média de 3 pesagens ao início do ensaio e média de 3 outras pesagens ao fim do procedimento de testes. Sendo que a diferença das médias confere o desgaste do CP medido em gramas. Segundo Lee et al. (2007), as variações das medições na pesagem devido ao efeito higroscópico do material de atrito, chegam a ser da mesma ordem de grandeza das alterações produzidas pelo desgaste. Por isso, um ambiente condicionado foi usado para registrar as medições em massa dos corpos de prova utilizados neste estudo, com $T = 25^{\circ}\text{C}$ e $UR \sim 15\%$.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Etapa de assentamento

Foi observado nessa etapa, que o atrito é mais disperso entre os diferentes materiais. Isso se deve a estabilização da área de contato dos corpos de prova. Também se verifica um atrito final mais elevado para o material original, na casa de 0,43 contra 0,36 da média dos outros materiais, uma diferença de 16,3%. A Figura 6.1 abaixo, apresenta as curvas de atrito levantadas no tribômetro para esta etapa.

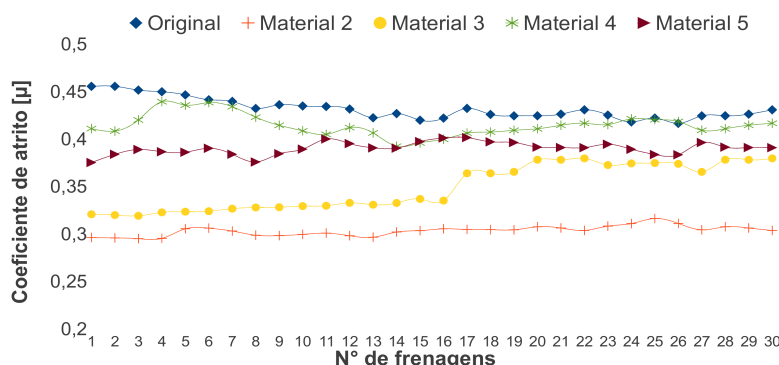


Figura 6.1 – Resultados de atrito dos materiais ensaiados (etapa de assentamento)

Para facilitar a compreensão dos gráficos subsequentes, como por exemplo o da Figura 6.2 a seguir, os resultados dos materiais são separados por colunas, identificadas conforme legenda em anexo.

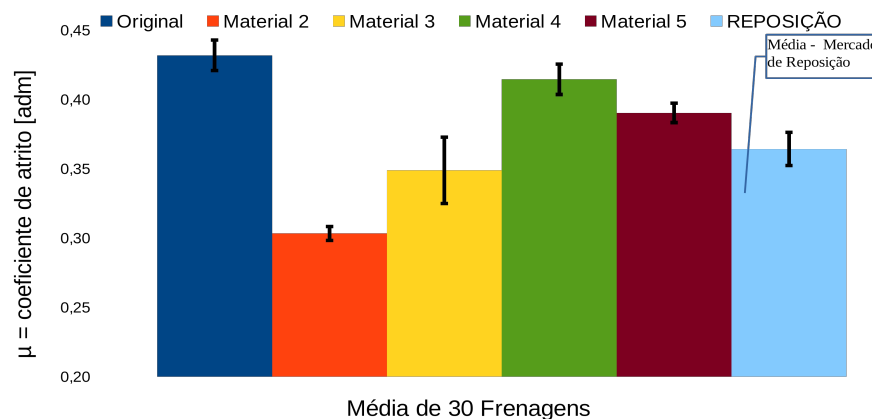


Figura 6.2 – Atrito final médio com temperatura de 100°C (etapa de assentamento)

É possível verificar pelo gráfico da Figura 6.2, que o “material 2” apresenta o desempenho mais insatisfatório para o nível de atrito, com $\mu = 0,30$, frente a $\mu = 0,43$ do original, medidos. No entanto é o mais estável, como pode ser observado pelas barras de desvio, com $\sigma = \pm 0,5\%$ calculado, frente a $\sigma = \pm 1,1\%$ do original.

Também se verifica que o “original” produz o maior torque frenante no decorrer das 30 frenagens desta etapa, totalizando 16,3%, a mais que a média de “reposição” em atrito.

Nesta etapa, é possível observar que o “material 4”, é o que melhor acompanha os resultados do original, com $\mu = 0,41$, medido e $\sigma = \pm 1,1\%$, calculado. Totalizando uma diferença entre os mesmos de apenas 4,6% em atrito, calculado.

Calcula-se que, para os ensaios com a temperatura de gatilho de 100°C, a variabilidade dos resultados obtida no gráfico em relação à média foi de, no máximo, $\pm 3,1\%$, sendo menor que a incerteza de medição dos equipamentos, que foi de $\pm 3,6\%$. A Tabela 6.1 a seguir apresenta os resultados de “ μ ” e “ σ ”, desta etapa obtidos no tribômetro. Onde: σ = incerteza de medição para o atrito (adm).

Tabela 6.1 – Valores de μ e σ , (assentamento a 100°C, índice a)

	Original	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5	Média Merc. Rep.
μ_a [adm]	0,43	0,30	0,35	0,41	0,39	0,36
σ_a [% adm]	1,1	0,5	2,4	1,1	1,7	1,4

6.2 Etapa fade (100/200/300 e 350°C)

Esta etapa conta com quatro diferentes temperaturas de gatilho: 100/200/300 e 350°C. O escalonamento da temperatura para fins de resultados é de se verificar o comportamento do atrito com o aumento da mesma.

Nesta etapa, os gráficos de resultados são similares ao da Figura 6.2, permitindo ao leitor acompanhar a evolução do comportamento desta variável para os materiais ensaiados, com a possibilidade de cruzamento de dados para melhor caracterização do atrito.

- *Etapa fade a 100°C*: Este é o primeiro patamar dos ensaios para avaliação do atrito em altas temperaturas. Esta etapa totaliza 12 frenagens válidas para cada amostra. A Figura 6.3 abaixo apresenta os resultados dos testes realizados para esta etapa.

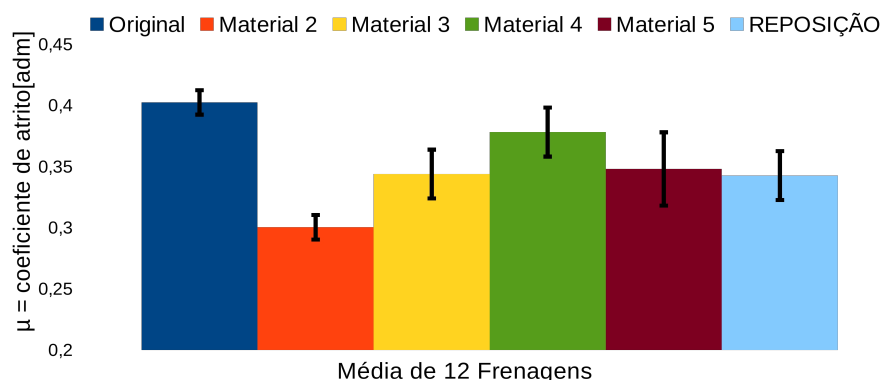


Figura 6.3 – Atrito final médio adquirido pelo sistema de controle (etapa *fade* a 100°C)

Nesta etapa, pode-se observar que o material original apresenta melhor desempenho frente a média dos demais. Verifica-se que o “original” tem $\mu = 0,40$, medido e $\sigma = \pm 1,1\%$, calculado. Sendo estes os melhores resultados conferidos nesta etapa.

Nota-se que o “material 4”, novamente é o que melhor acompanha aos resultados de atrito frente o “original”, com $\mu = 0,38$, medido.

Também se faz menção ao “material 2”, que continua apresentando o mais baixo nível de atrito em relação aos demais materiais, com $\mu = 0,3$, medido.

Calcula-se que, para os ensaios com a temperatura de gatilho de 100°C, a variabilidade dos resultados obtida no gráfico em relação à média foi de, no máximo, $\pm 5,6\%$, sendo menor que a incerteza de medição dos equipamentos, que foi de $\pm 7,5\%$. A Tabela 6.2 a seguir apresenta os resultados adquiridos no tribômetro nesta etapa. Onde: Dif = diferença percentual dos resultados de atrito entre os produtos do mercado de reposição e o “original”.

Tabela 6.2 – Valores de μ , Dif e σ , (etapa *fade* a 100°C, índice 100)

	Original	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5	Média Merc. Rep
μ_{100} [adm]	0,40	0,30	0,34	0,38	0,35	0,34
Dif ₁₀₀ [%]	-	-25,3	-15	-6	-13,5	-15
σ_{100} [% adm]	1,1	1,3	2,3	2,5	2,8	2,2

• *Etapa fade a 200°C*: Nesta etapa, nota-se que o efeito da temperatura começa a provocar alterações no comportamento do atrito. A Figura 6.4 na sequência apresenta os resultados que mostram este efeito provocado pelo aquecimento do disco.

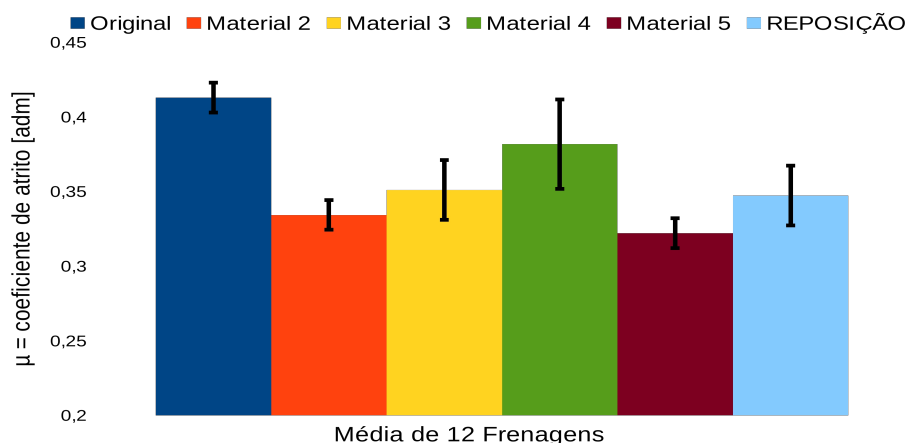


Figura 6.4 – Atrito final médio adquirido pelo sistema de controle (etapa *fade* a 200°C)

Nota-se que os materiais de fricção tendem a aumentar o nível de atrito. “Isso se deve às modificações do compósito atritante, por motivos químico-físicos do material, devido ao aquecimento”.

Nesta fase, percebe-se que os materiais não seguem um padrão, isso é notado pelo comportamento do “material 5”, com queda de “ μ ” em relação a etapa anterior (*fade* a 100°C), enquanto o “original”, por exemplo, apresenta ganho no atrito em 2,5%, calculado.

Outra observação é feita para o “material 2”, que em relação à etapa anterior (*fade* a 100°C), obtém o melhor rendimento dentre os ensaiados, com ganho de 10% em “ μ ”.

Apresentado como o material de melhor qualidade, nesta etapa é visto como o “original” se mantém superior aos concorrentes, tanto em nível de atrito, como maior estabilidade.

Calcula-se que, para os ensaios com a temperatura de gatilho de 200°C, a variabilidade dos resultados obtida no gráfico em relação à média foi de, no máximo, $\pm 5,1\%$, sendo menor que a incerteza de medição dos equipamentos, que foi de $\pm 6,4\%$. A tabela 6.3 abaixo apresenta os resultados adquiridos nos ensaios do tribômetro para esta etapa.

Tabela 6.3 – Valores de μ , Dif e σ , (etapa *fade* a 200°C, índice 200)

	Original	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5	Média Merc. Rep
μ_{200} [adm]	0,41	0,33	0,35	0,38	0,32	0,35
Dif ₂₀₀ [%]	-	-19	-14,9	-7,5	-30	-15,9
σ_{200} [% adm]	0,9	1,5	2,1	3,4	1,3	2,0

• *Etapa fade 300°C*: Com acréscimo de 100°C no rotor em relação a etapa anterior, nota-se como a influência da temperatura promove efeito de instabilidade para o “original” e para o “material 2”. No entanto, o nível de atrito permanece superior para o “original”, com $\mu = 0,41$, contra $\mu = 0,30$, média dos de “reposição”, sendo estes valores medidos. Isso contabiliza 26,8% a mais em “ μ ” em relação a mesma média (“reposição”).

Agora com efeito oposto, os materiais “4” e “5”, apresentam ganho no quesito estabilidade, com resultados menos dispersos, porém ao custo de queda do “ μ ” em relação a etapa anterior (*fade* a 200°C). A Figura 6.5 abaixo apresenta os resultados do tribômetro desta etapa.

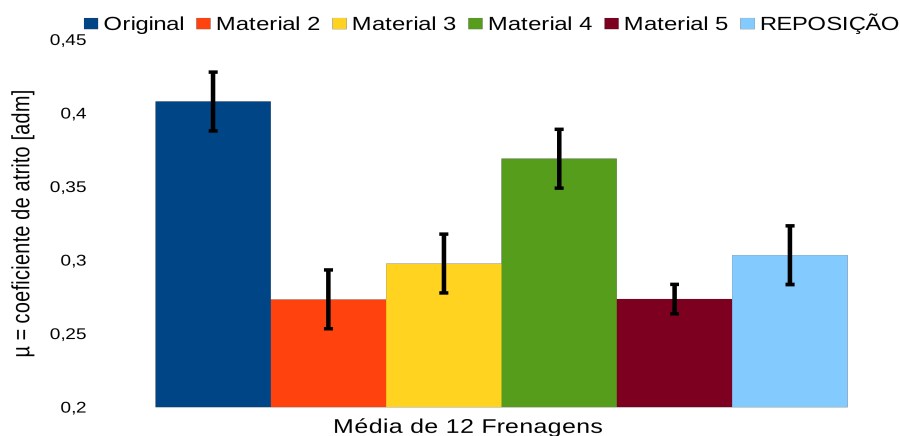


Figura 6.5 – Atrito final médio adquirido pelo sistema de controle (etapa *fade* a 300°C)

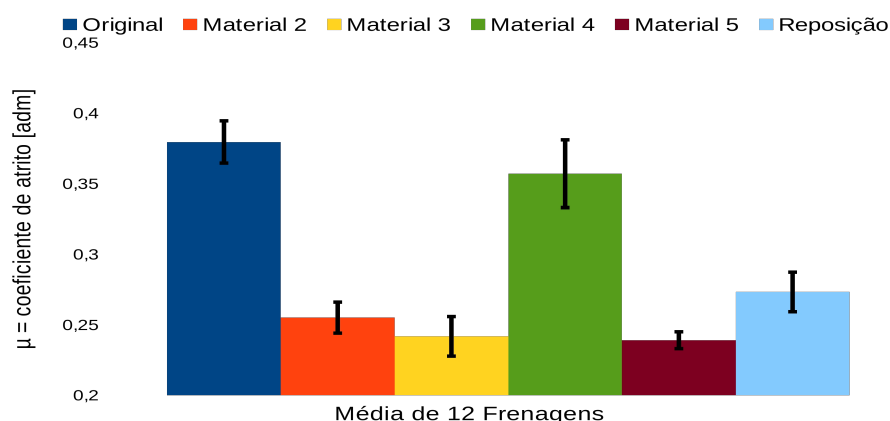
Nota-se que os materiais do mercado de reposição, que na etapa *fade* a 200°C obtiveram a média de $\mu = 0,35$, agora recuam para o patamar de $\mu = 0,30$, com queda de 14,3% em desempenho no torque frenante. A Tabela 6.4 a seguir mostra os resultados adquiridos nos ensaios do tribômetro.

Tabela 6.4 – Valores de μ , Dif e σ , (etapa *fade* a 300°C, índice 300)

	Original	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5	Média Merc. Rep
μ_{300} [adm]	0,41	0,27	0,30	0,37	0,27	0,30
Dif300 [%]	-	-34,1	-26,8	-9,7	-34,1	-26,8
σ_{300} [% adm]	1,5	2,3	2,0	2,2	0,8	1,8

Calcula-se que, para os ensaios com a temperatura de gatilho de 300°C, a variabilidade dos resultados obtida no gráfico em relação à média foi de, no máximo, $\pm 5,4\%$, sendo menor que a incerteza de medição dos equipamentos, que foi de $\pm 7,3\%$.

• *Etapa fade a 350°C*: Na última etapa de análise em altas temperaturas (*fade* a 350°C), se faz valer a influência das mesmas sobre o desempenho frenante dos materiais ensaiados. Sem exceção, todos os materiais apresentam redução de “ μ ”, porém o “material 4” foi o menos afetado em relação a etapa anterior (*fade* a 300°C), com perda em performance de apenas 2,7%, contra 7,3% do original. Seguindo o mesmo raciocínio, nota-se que o “material 3”, por exemplo, apresenta queda de 20%, este com a maior perda de rendimento calculada. A Figura 6.6 a seguir apresenta o gráfico de resultados em atrito dos materiais ensaiados no tribômetro.

Figura 6.6 – Atrito final médio adquirido pelo sistema de controle (etapa *fade* a 350°C)

É visto, que o quesito estabilidade foi melhor atendido pelo “material 5”, atribuído à menor dispersão de resultados, com $\sigma = \pm 0,6\%$, calculado, contra $\pm 1,5\%$ do “original”. No entanto, este mesmo material, apresenta o menor nível de atrito, com $\mu = 0,24$, empatado ao “material 3”.

Apesar do “original” apresentar perda em desempenho frenante com o aumento da temperatura no disco, ainda assim se mantém na liderança sobre os demais materiais. Com $\mu = 0,38$, medido, é seguido pelo “material 4” com $\mu = 0,36$.

Com relação a média dos de “reposição”, o “original” conta com 28,9% a mais sobre o atrito produzido no disco. Com $\mu = 0,38$, calculado, contra $\mu = 0,27$, da média de “reposição”.

Continuando com a análise, esta etapa parece mostrar que a temperatura tem forte influência sobre o atrito nos materiais de fricção, como mostram os estudos de Neuman at. al., (1983). Onde, com relação a 1ª etapa (*fade* a 100°C), a perda em atrito do “original” é de 5%, enquanto a média dos de “reposição” recua em 20,6%, calculada. Esse grau de concordância dos resultados em atrito do “original” até então, pode ser considerada devido o aspecto construtivo do produto, com base na composição química do mesmo, [Coyle et. al., 1983]. A Tabela 6.5 abaixo, apresenta os resultados desta etapa para os materiais ensaiados.

Tabela 6.5 – Valores de μ , Dif e σ , (etapa *fade* a 350°C, índice 350)

	Original	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5	Média Merc. Rep
μ_{350} [adm]	0,38	0,25	0,24	0,36	0,24	0,27
Dif ₃₅₀ [%]	-	-34,2	-36,8	-5,3	-36,8	-28,9
σ_{350} [% adm]	1,5	1,1	1,4	2,4	0,6	1,4

Calcula-se que, para os ensaios com a temperatura de gatilho de 350°C, a variabilidade dos resultados obtida no gráfico em relação à média foi de, no máximo, $\pm 4,7\%$, sendo menor que a incerteza de medição dos equipamentos, que foi de $\pm 5,9\%$.

• *Fade geral*: Para análise das etapas *fade* (todas as temperaturas de gatilho), são apresentados os resultados referentes às mesmas, com os valores de atrito e de variabilidade dispostos em linha, conforme Tabela 6.6 a seguir. O resultado mais satisfatório tanto para o “ μ ”, quanto para o “ σ ”, são destacados pela cor verde, enquanto os resultados de reflexo oposto, em amarelo. Assim é traçado um perfil para os materiais ensaiados em cada condição de temperatura, que possibilita identificá-los positivamente ou negativamente. Para cada sinal verde, o material destacado leva 1 ponto, caso destacado em amarelo se subtrai 1 ponto, podendo apresentar valor negativo. A ideia é uma tentativa de qualificá-los pela maior pontuação, ou desqualificá-los pela pior. A Tabela 6.6 abaixo apresenta os valores referidos anteriormente, e ao final da mesma são mostradas as devidas pontuações.

Tabela 6.6 – Valores de μ_i e σ_i , (todas etapas *fade*, índice conforme temperatura de gatilho)

Fade		Original	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5
100°C	μ_{100} [adm]	0,40	0,30	0,34	0,38	0,35
	σ_{100} [% adm]	1,1	1,3	2,3	2,5	2,8
200°C	μ_{200} [adm]	0,41	0,33	0,35	0,38	0,32
	σ_{200} [% adm]	0,9	1,5	2,1	3,4	1,3
300°C	μ_{300} [adm]	0,41	0,27	0,30	0,37	0,27
	σ_{300} [% adm]	1,5	2,3	2,0	2,2	0,8
350°C	μ_{350} [adm]	0,38	0,25	0,24	0,36	0,24
	σ_{350} [% adm]	1,5	1,1	1,4	2,4	0,6
Total de pontos		6	-3	0	-2	-2

Através da Tabela 6.6 anterior, nota-se que o material com maior pontuação é o “original”, totalizando 6 pontos, enquanto o de resultado oposto, é o “material 2”, com -3 pontos. Contudo, a tabela pode proporcionar maiores informações através do cruzamento de dados, no entanto a proposta deste estudo é uma tentativa de apresentar, dentre os materiais ensaiados no tribômetro, o produto de fricção que condiz com os melhores resultados de desempenho. Assim a pontuação determinada anteriormente, é uma forma de indicar o material evitando que mais cálculos sejam realizados.

Para finalizar a análise das etapas *fade*, são apresentados os valores percentuais calculados, da diferença entre o atrito do “original” e da média dos de “reposição”, para cada temperatura de gatilho. Para cada condição de temperatura o material original supera em 15% (*fade* a 100°C), 14,6% (*fade* a 200°C), 26,8% (*fade* a 300°C) e 28,9% (*fade* a 350°C), sobre a média dos demais materiais.

6.3 Etapa de caracterização

Uma análise qualitativa do gráfico é suficiente para mostrar que o material original apresenta superioridade em desempenho, não só no quesito estabilidade, mas como também para o maior nível de atrito.

Nesta etapa, todos os materiais do mercado de reposição, iniciam os ensaios, com resultados de atrito abaixo da própria média, como por exemplo o “material 5”, com atrito inicial de 0,23 e atrito médio de 0,33. Pelo gráfico é possível verificar que após a 15ª frenagem principalmente, todos os materiais convergem para resultados de melhor estabilidade e com nível de atrito mais bem definido, exceto o original, que apresenta excelente grau concordância com os resultados das etapas realizadas anteriormente. Também é possível perceber, que ao contrário dos demais, este último (“original”) já parte com atrito praticamente predefinido.

Evitando-se usar a mesma lógica de cálculos tomados para a análise entre os materiais, nesta última etapa de ensaios será aplicado o mesmo raciocínio como anteriormente na Tabela 6.6, ou seja, a escolha se valerá pela pontuação. Antes de se apresentar a Tabela 6.7 com as devidas pontuações, a Figura 6.7 a seguir, apresenta os resultados dos ensaios destes materiais realizados no equipamento, com temperatura de gatilho de 100°C.

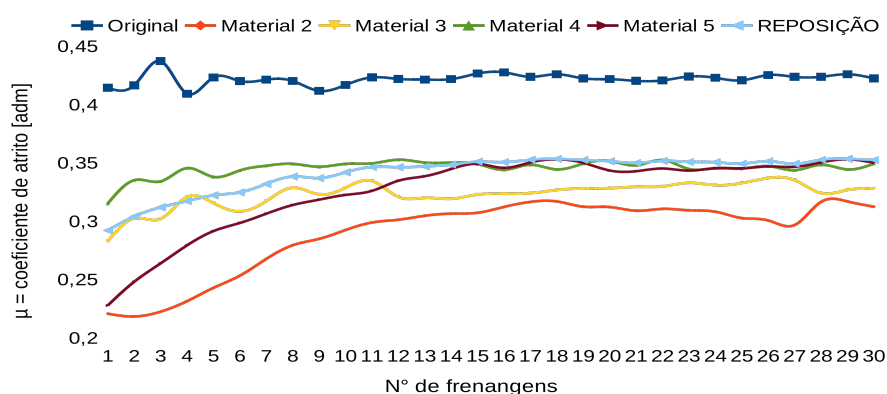


Figura 6.7 – Curvas de atrito dos materiais ensaiados (etapa de assentamento)

Tabela 6.7 – Valores de μ , Dif e σ , (caracterização índice c)

	Original	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5
μ_c [adm]	0,42	0,29	0,32	0,34	0,33
Difc [%]	-	-31,4	-23,5	-18,1	-22,8
σ_c [% adm]	0,5	3,2	1,1	0,7	3,3
Total de pontos	2	-1	0	0	-1

Calcula-se nesta etapa, que do material original supera em 23,8% a média dos demais materiais. Com a maior diferença medida entre o produto original, com $\mu = 0,42$, contra $\mu = 0,29$ do “material 2”.

Calcula-se que, para os ensaios com a temperatura de gatilho de 100°C, a variabilidade dos resultados obtida no gráfico em relação à média foi de, no máximo, $\pm 5,2\%$, sendo menor que a incerteza de medição dos equipamentos, que foi de $\pm 6,6\%$.

6.4 Desgaste dos materiais

A Tabela 6.8 a seguir mostra os valores de desgaste, variável relacionada a custos por manutenção, mensurados pela Δm do corpo de prova.

Tabela 6.8 – Valores de desgaste (Δm)

	Original	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5
Δm [g]	0,37	0,16	0,19	0,29	0,36

O resultado de desgaste não foi satisfatório para a amostra original em relação aos outros materiais. Este último, acusou desgaste de 32,4%, calculado, a mais que a média dos materiais concorrentes.

Para o “material 2”, que vem apresentando baixo desempenho em atrito, agora se mostra mais econômico que os demais, sobre tudo ao original, sendo este 56,7% mais durável em relação ao outro.

Neste quesito, também se verifica que o “material 5” acompanha o original, com resultados praticamente empatados, com $\Delta m = 0,37g$ para o original e $\Delta m = 0,36g$ do outro.

6.5 Indicador (Kr)

A proposta do indicador “Kr”, é contribuir para a escolha de um material com resultados voltados à segurança. Portanto, se dá preferência para os materiais com melhor desempenho frenante (maior “ μ ”), seguido da melhor estabilidade (menor “ σ ”). Este indicador também relaciona todas as outras variáveis deste estudo (“ Δm ” e custo).

Sendo assim, o indicador é tanto melhor quanto: maior for “ μ ”, menor for “ σ ”, menor for “ Δm ” e menor o custo. Por não ter sido encontrado na literatura um padrão neste aspecto, se tomou um, como sendo a média dos resultados de todos os produtos ensaiados.

Para conseguir correlacionar as variáveis, estas são dimensionadas em relação ao padrão utilizado, dividindo-se o valor da variável do material (média de todas as etapas), pela respectiva padrão. Os valores do objeto padrão são: $\mu = 0,34$, $\sigma = 1,6$, $\Delta m = 0,27$ e custo de R\$ 124,40. O indicador proposto tem a seguinte Equação 6.1 mostrada a seguir.

$$Kr = \left[\frac{(K_1 \mu)}{(K_2 \sigma + k_3 \Delta m + k_4 C)} \right] [adm] \quad (6.1)$$

Onde:

Kr = indicador (adm)

ki (i = 1, 2, 3, 4) = pesos das variáveis em ordem respectivamente (0,5; 0,4; 0,05 e 0,05) (adm)

C = custo de aquisição (adm)

Arriscando considerar pesos às variáveis para o cálculo do indicador, lembrando que a propensão da escolha é voltada para a segurança humana, a Tabela 6.9 abaixo apresenta os valores encontrados para os materiais ensaiados no tribômetro.

Tabela 6.9 – Valores de μ , σ , Δm e C Kr

	Original	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5
Kr	1,29	0,82	0,9	1,02	0,99

Logo, indicador apontou preferencialmente para a escolha do material original, com Kr = 1,29, o maior valor calculado. Nota-se que o indicador consegue trabalhar as variáveis, ajustando o resultado para a uma preferência conforme valor peso estipulado. O indicador também mostra que, mesmo um material apresentando alto “ μ ”, não necessariamente será o

apontado, pois o custo de aquisição e o desgaste, também ponderam sobre a escolha.

7. CONCLUSÕES

Considerando os objetivos deste trabalho sobre o desempenho do material original frente aos materiais do mercado de reposição, conclui-se que:

- Com base nos valores obtidos no tribômetro, o “original” apresentou os melhores resultados de desempenho. Se posiciona à frente dos concorrentes com maior “ μ ” e maior estabilidade. Para este material (original), os resultados superam em: 21,9%, calculado, a mais que a média dos de “reposição” em nível de atrito, e 39%, calculado, a mais que a média dos de “reposição” em estabilidade (“ σ ”). Estes resultados possivelmente são atribuídos ao controle da qualidade empregado no processo de fabricação.
- Com relação a custos por manutenção, o “original” se apresenta como o mais custoso. Com 32,4%, a mais que a média de “reposição” em desgaste (custos por manutenção), e 55,6%, a mais que a média sobre o custo de aquisição.
- Com o indicador criado, foi possível apontar para o material mais satisfatório, no caso deste estudo se tratou do produto original, que como visto anteriormente, é o material que apresenta as melhores características em desempenho frenante. Com os valores do indicador para o original em $K_r = 1,29$, contra a média de “reposição” com $K_r = 0,97$.
- Sobre o atrito medido, calculou-se que os ensaios, em todas as temperaturas de gatilho, foi de, no máximo $\pm 5,6\%$, sendo menor que a incerteza de medição dos equipamentos, que foi de $\pm 7,5\%$, isso mostra que para o número de frenagens produzidas no tribômetro é suficiente para avaliar as características dos materiais ensaiados .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bhusman, B.; **"Introduction to Tribology"**, Editora John Wiley & Sons, New York, 2002.
- Blau, P. J.; Brian, C. J.; **"Wear of Truck Brake Lining Using Three Different Test Methods"**, Wear 259, pp 1022-1030, 2005.
- Brezolin, A.; **"Estudo de Geração de Trincas Térmicas em Discos de Freios de Veículos Comerciais"**, Dissertação de Mestrado, 2007.
- Coyle, J. P., Tsang; P. H. S.; **"Microestrutural Changes of Cast Iron Rotor Surfaces and Their Effects on Brake Performance and Wear Resistance"**, Society of Automotive Engineers, paper 830534, 1983.
- Federal Motor Vehicle Safety Standards and Regulations (FMVSS); **"Passenger Car Brake Systems"**, N° 135, 2004.
- Hutchings I.M.; **"Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials"**, Great Britain, 1992.
- Lee K., Blau P.J.; Truhan Jr. J.J.; **"Effects of Moisture Adsorption on Laboratory Wear Measurements of Brake Friction Materials"**, wear 262, pp 925-930, 2007.
- Menetrier, A.R.; **"Estudo de Variáveis de Composição e Processo para Controle da Compressibilidade"**, Dissertação de Mestrado, 2006.
- Neis, P. D.; **"Projeto e Construção de um Tribômetro para Estudos Relacionados a Materiais de Fricção Veiculares"**, Dissertação de Mestrado, 2008.
- Neuman, R. F.; McNinch, J. H.; **"Performance Characterization of Dry Friction Materials"**, IMech E, pp 233-238, 1983.
- Nicholson G.; **"Facts about Friction; P&W Price Enterprise"**, Croydon, 1995.
- Ruzzi, M.; **"Medições de Propriedades Dinâmicas de Materiais de Pastilhas de Freios Automotivos"**, Dissertação de Mestrado, pp 121, 2004.
- Satapathy B. K.; Bijwe J.; **"Wear Data Analysis of Friction Materials to Investigate the Simultaneous Influence of Operating Parameters and Compositions"**, Wear 256, pp 797-804, 2004.
- Serbino, E.M.; **"Um Estudo dos Mecanismos de Desgaste em Disco de Freio Automotivo Ventilado de Ferro Fundido Cinzento Perlítico com Grafita Lamelar"**, Dissertação de mestrado, 2005.
- Society of Automotive Engineers; **"Surface Vehicle Recommended Practice – SAE J661"**, Estados Unidos da América, 8 p., 1997.
- Stachowiak, G.W.; Batchelor, A.W.; **"Engineering Tribology"**, 2ª edição, 2001.
- Velde, F. Van.; Baets P.; **"Comparison of Two Stick-Slip Tester and Recommendations for Repeatable and Significant Stick-Slip Testing"**, Tribotest Journal pp 3-4, 1997.