

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

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES PISTAS DE ATRITO EM DISCOS DE  
FREIO UTILIZADOS EM UM TRIBÔMETRO**

por

Jonas Fantin Giacomelli

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, Junho de 2012.

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES PISTAS DE ATRITO EM DISCOS DE  
FREIO UTILIZADOS EM UM TRIBÔMETRO**

por

Jonas Fantin Giacomelli

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. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Ney Francisco Ferreira

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Cíntia Petry Mazzafero

Prof. Dr. Flávio José Lorini

Prof. Dr. José Antônio Esmério Mazzafero

Porto Alegre, 29 de Junho de 2012.

GIACOMELLI, J.F.; **Estudo sobre a utilização de diferentes pistas de atrito em discos de freio utilizados em um tribômetro**. 2012. 19 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## RESUMO

Este trabalho avalia, a partir de testes experimentais realizados em um tribômetro, a possibilidade de utilizar duas pistas de atrito sobre cada face do disco de freio bem como a reutilização da mesma pista de atrito diversas vezes, visando a economia de discos e consequente redução de custo dos ensaios. O ensaio consistia em realizar o processo de fricção sobre duas pistas de atrito, localizadas em raios de 33 mm e 51 mm. Foram ensaiados 8 corpos de prova do mesmo material de fricção e cada ensaio foi composto por 76 frenagens, realizados em diferentes patamares de temperatura. A significância da repetição de ensaios na mesma pista e da utilização de duas pistas de escorregamento foi feita utilizando-se a ferramenta estatística ANOVA e o cálculo da variabilidade dos resultados de atrito. Concluiu-se que o estado da pista teve pouca influência sobre a variabilidade dos resultados e a prática de utilização de uma mesma pista para vários ensaios pode ser utilizada, desde que seja aceita uma variabilidade média máxima de 2,5%. Para o caso de alteração do raio, esta variabilidade máxima foi maior, 6,7%.

PALAVRAS-CHAVE: *tribologia, materiais de fricção, tribômetro.*

GIACOMELLI, J.F.; **Study about the use of different friction tracks in brake discs by means of a tribometer.** 2012. 19 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

#### ABSTRACT

This paper evaluates, through experimental tests performed on a tribometer, the possibility of using two friction tracks on each side of a brake disc and also reuse the same friction track several times. This is done aiming the economy of the discs and the consequent cost reduction in the tests. The experiments were carry out on a friction track located on a smaller radius of the disc and also on a larger radius, 33 mm and 51 mm, respectively. Eight samples from the same friction material were tested, where each test consists of 76 stop braking, carried out under different levels of temperature. Significance of the tests on the same friction track and also on the use of two different friction tracks were evaluated by means of Analysis of Variance (ANOVA) and through the variability of the friction results. It was possible to conclude that the condition of the friction track caused a small influence on the variability of the results and the same friction track can be used more than once, since 2,5 % of variability is accepted. In the case of different radius, the maximum variability was larger, 6,7%.

KEYWORDS: *tribology, friction materials, tribometer.*

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	1
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
	3.1 Sistemas de Freio	1
	3.2 Atrito	2
	3.3 Materiais de Fricção	2
	3.4 Discos de Freio	2
	3.5 Influência da Temperatura no Atrito	3
	3.6 Equipamentos para Caracterização dos Materiais de Fricção	3
	3.6.1 Tribômetro	4
	3.7 Etapas de Ensaio	4
4	METODOLOGIA	5
	4.1 Corpos de Prova	5
	4.2 Disco	6
	4.3 Assentamento das Amostras	6
	4.4 Procedimento de Ensaio	7
	4.5 Ensaios Realizados	8
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	9
	5.1 Análise das Frenagens	9
	5.1.1 Análise ANOVA	11
	5.1.2 Cálculo da Variabilidade dos Resultados	12
	5.1.3 Fatores associados às diferenças na mudança de raio	13
6	CONCLUSÕES	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
	APÊNDICE I - Gráficos comportamento do atrito médio das frenagens	16

## 1 INTRODUÇÃO

Até meados da década de 50, os sistemas de freio eram testados exclusivamente em veículos, através de ensaios em campo. Porém, esse tipo de teste apresenta algumas dificuldades devido a variações nos resultados ocasionadas por fatores humanos, ambientais e externos [Tsang et. al., 1985. Rhee e Schawartz, 1979]. Atualmente, os ensaios em materiais de fricção são realizados previamente em laboratório com equipamentos que possibilitam maior controle sobre os parâmetros dos ensaios, o que reduz custos e tempo no desenvolvimento de produtos de fricção (pastilhas e lonas de freio).

Para realização desses ensaios laboratoriais, são desenvolvidos diversos tipos de máquinas, entre elas o dinamômetro inercial, sendo o equipamento que apresenta as melhores correlações em termos de curvas de atrito e taxa de desgaste com as encontradas nos sistemas mecânicos dos veículos. Máquinas em escala reduzida são usadas também para avaliar as propriedades de atrito e são mais aplicadas à pesquisa. Dentro deste contexto, foi desenvolvido no Laboratório de Tribologia da UFRGS um tribômetro capaz de medir atrito em materiais de fricção em condições similares às encontradas em veículos (pressão de contato, velocidades de escorregamento, energia dissipada por área e temperatura de disco). Este equipamento vem sendo utilizado para estudar diferentes aspectos relacionados a ensaios de materiais de fricção.

Nas máquinas de ensaio, o procedimento normalmente adotado é utilizar discos novos a cada novo ensaio, o que aumenta os custos dos mesmos. Isso dificulta a realização de estudos mais aprofundados, onde o número de amostras deve ser grande para haver melhor representação estatística dos resultados.

A possibilidade de estender a vida útil dos discos passa pela repetição de ensaios em uma mesma pista e utilização de mais de uma pista de escorregamento por lado do disco. A viabilidade dessas soluções depende de como isso afeta a variabilidade do atrito medido no tribômetro.

## 2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da condição da pista de escorregamento (nova ou usada) do disco sobre a variabilidade do atrito medido no tribômetro para um material de fricção. Além disso, avaliar a possibilidade de utilização de mais de uma pista de escorregamento por lado do disco, utilizando para tal, diferentes raios de deslizamento.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Sistemas de Freio

Um sistema de freio pode ser definido como um dispositivo que transforma energia cinética de uma massa em movimento rotacional ou translacional em calor. Trata-se, portanto, de um dissipador de calor cuja finalidade é reduzir a velocidade ou parar um corpo em movimento [Neis, 2008].

Os principais componentes de um sistema de freio automotivo destacados por [Eriksson, 2000] são:

- **Rotor** – como o próprio nome indica é o componente que gira fixado à roda. É o componente do par de fricção que recebe a maior parte da energia térmica do processo de frenagem e, por isso, precisa ser projetado para dissipá-la.
- **Material de fricção** – é o componente estacionário do par de fricção que é pressionado contra o rotor durante o processo de frenagem. As forças de atrito entre o material de fricção e o rotor transformam a energia cinética em calor.
- **Sistema hidráulico ou pneumático** – transmite e amplifica a força aplicada no pedal do freio para o sistema de atuação que pressiona o material de fricção contra o rotor.

Os freios automotivos podem ser classificados quanto à geometria do rotor em freios a tambor e a disco.

### 3.2 Atrito

O atrito é definido como uma força natural que atua apenas quando dois corpos estão em contato e sofrem a ação de outra força que tende a colocá-los em movimento. A força de atrito está dividida em força de atrito estática e dinâmica, sendo que a primeira ocorre sem que haja movimento relativo enquanto que a última atua durante o deslizamento relativo entre as superfícies [Blau e McLaughlin, 2003].

### 3.3 Materiais de fricção

Materiais de fricção são materiais compósitos geralmente fabricados por processo de compactação e que, para uso em sistemas de freio, devem ser projetados de forma a se manterem estáveis e confiáveis para uma grande variação de pressão de frenagem, velocidade, temperatura, umidade, etc. Como não há um material apenas que consiga atender a todas essas necessidades, os materiais de atrito são produzidos com mais de um componente. As quantidades e os tipos de cada componente utilizados em materiais de atrito têm sido determinados, basicamente, por métodos empíricos [Kim e Jang, 2000].

O material de fricção é o elemento mais importante no desempenho do sistema de freio. Portanto, avaliar as suas características de desempenho é fundamental [Neuman et. al, 1983].

Para que sejam aplicados de maneira segura e eficaz em sistemas de freios automotivos, os materiais de fricção devem possuir certos requisitos de desempenho, ruído e durabilidade, afirmam Tsang et. al., 1985. Rhee e Schawartz, 1979, salientam que os materiais de fricção sob diversas condições de operação devem apresentar as seguintes características:

- atrito elevado e constante;
- baixo desgaste;
- baixo ruído;
- baixa sensibilidade à água;
- baixo desgaste do rotor.

Segundo Birch, 1999, os materiais de fricção dividem-se basicamente em dois grupos, dependendo do percentual de fibras metálicas ferrosas presentes na composição. Assim tem-se os materiais chamados de **Non-Asbestos Organic (NAO)** que apresentam pouca fibra ferrosa e os **semi-metálicos (SM)** com quantidade considerável dessa fibra. Esta distinção na composição acarreta significativa diferença no desempenho desses dois grupos de materiais.

### 3.4 Discos de Freio

As duas principais funções de um disco de freio são: reduzir o movimento giratório da roda devido ao torque frenante produzido pelo atrito das pastilhas e dissipação do calor produzido durante a frenagem. A temperatura que o disco alcança depende da severidade e do número de frenagens e pode oscilar desde a temperatura ambiente até 700°C. Esta grande faixa acaba por gerar altos gradientes de temperatura no disco, ocasionando problemas de fadiga térmica. No entanto, o componente também está sujeito à ação de uma carga mecânica cíclica aplicada pela pastilha durante a frenagem, levando ao desgaste do mesmo. Estes fatores contribuem significativamente na análise de resultados de atrito dos materiais de fricção [Mackin, 2002].

Os discos de freio são feitos geralmente de ferro fundido cinzento, pois apresentam boa condutividade térmica, boa resistência à corrosão, baixo ruído, baixo peso, longa durabilidade, atrito estável, baixa taxa de desgaste e boa relação custo/benefício [Brembo, 1995].

Segundo Mackin, 2002, outro tipo de ferro fundido que vem encontrando utilização crescente em aplicações onde condições de resistência mecânica, fadiga térmica e altas temperaturas estão presentes é o ferro fundido com grafita vermicular. Este material apresenta

a grafita em forma de vermes (morfologia intermediária entre lamelar e nodular) que confere propriedades mecânicas e térmicas intermediárias entre o ferro fundido cinzento e o nodular.

Além dos ferros fundidos, materiais compósitos com matriz de carbono são empregados na produção de discos de freio para carros de competição e aeronaves. Apresentam excelente desempenho a quente, mas o custo de fabricação e a forma de utilização os inviabiliza para o uso em veículos de passeio comuns. Outro exemplo são os discos de freio de ferro fundido cinzento com adição de titânio, elemento que aumenta a resistência do componente, mas diminui o coeficiente de atrito, o que pode ser um grande problema quando se trabalha com curta distância de frenagem [Brembo, 1995].

Portanto, os ferros fundidos cinzentos são os materiais preferidos na confecção de componentes dos sistemas de frenagem, pois apresentam a melhor relação custo/benefício e possuem excelente condutividade térmica, o que facilita a dissipação do calor gerado pela fricção da pastilha de freio contra o disco durante a frenagem [Mackin, 2002].

### 3.5 Influência da Temperatura no Atrito

Segundo Preston e Forthofer, 1971, um dos fatores que mais influenciam o desempenho dos materiais de atrito é a temperatura. Para poder comparar os resultados obtidos em ensaio de laboratório com os realizados em veículos é necessário que se reproduza as mesmas condições de temperatura, uma vez que o coeficiente de atrito do material é principalmente dependente da temperatura instantânea de operação.

Blau e McLaughlin, 2003, mencionam que em altas temperaturas, a taxa de formação de óxidos metálicos é maior nas pastilhas. Certos óxidos metálicos têm características lubrificantes e podem contribuir para a redução do coeficiente de atrito entre a pastilha e o disco.

Segundo Limpert, 1999, um problema comum que ocorre com os sistemas de freio quando atingem temperaturas elevadas (acima de 300°C) é o *fade*, termo utilizado para indicar a redução do coeficiente de atrito com o aumento da temperatura durante frenagens.

Neuman et. al., 1983, destacam ainda que o histórico das temperaturas influencia no comportamento do atrito de materiais de fricção, ou seja, as propriedades tribológicas são alteradas em função de condições de operação anteriores. O melhor exemplo disso é a recuperação do atrito que ocorre após etapas em que as temperaturas de operação são mais severas. O autor também menciona que as razões para essas mudanças são diversas e incluem a cura adicional do material, alterações químicas (reversíveis e irreversíveis) e vaporização de componentes voláteis.

Conforme Bulthé et al., 2008, a partir dos 300°C, ocorrem transformações químicas importantes, como a degradação da resina fenólica do material compósito. É observada perda significativa de atrito nesta situação, efeito que tende a ser reduzido ou até desaparecer após submeter o material de fricção a repetidos ciclos térmicos de temperatura elevada.

São inúmeros os problemas causados pelo excesso de temperatura no par de atrito. Assim, há um compromisso dos fabricantes no desenvolvimento de materiais resistentes a altas temperaturas bem como de sistemas de freio eficientes do ponto de vista da dissipação do calor [Neis, 2008].

### 3.6 Equipamentos para Caracterização de Materiais de Fricção

Em virtude de razões financeiras e disponibilidade de tempo, somente os melhores materiais são testados em veículos. Testes em veículos são requeridos para certificação, porém, antes dessa etapa, os materiais de fricção passam por uma série de testes em máquinas para a sua caracterização, salientam Rhee e Schawartz, 1979. Existem diversos tipos de máquinas e normas de teste, porém, conseguir correlacionar os resultados dessas máquinas com os resultados obtidos em testes realizados em veículos é uma tarefa bastante árdua.

Os principais equipamentos para testes envolvendo materiais de fricção para uso em freios são: a FAST, a Chase, o Dinamômetro Inercial e a Krauss. Existe ainda o tribômetro, equipamento utilizado neste trabalho, e que será brevemente discutido no item 3.6.1.

### 3.6.1 Tribômetro

O tribômetro é um equipamento concebido para medir atrito e desgaste de materiais. O tipo mais comum de tribômetro é o pino-disco. Seu princípio de funcionamento é bastante simples e consiste em aplicar uma carga no pino de forma a comprimi-lo contra um disco. Geralmente o pino é fixo enquanto o disco gira. Esse tipo de tribômetro é usualmente empregado para testes em pequena escala e cargas reduzidas.

O tribômetro utilizado para pesquisa em materiais de atrito, ou tribômetro de frenagem, apresenta o mesmo princípio de funcionamento que o tipo pino-disco, porém, é projetado de forma a atingir as condições reais de frenagem. Dessa forma, este equipamento opera com pressões de contato, velocidades de escorregamento, temperaturas de disco (rotor) e energia dissipada por área de pastilha semelhantes aos encontrados nos sistemas de frenagem de veículos [Neis, 2008]. A escala deste equipamento é reduzido com relação aos sistemas de frenagem, o que implica em um tamanho reduzido de corpo de prova (pastilha), o que reduz o consumo de energia e a duração dos ensaios.

Na figura 3.1 é apresentado o tribômetro projetado pela Equipe do Laboratório de Tribologia da UFRGS e que é utilizado nos ensaios deste trabalho.

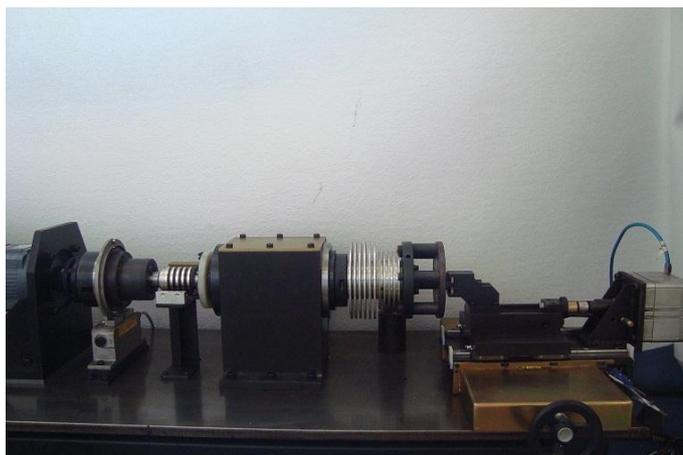
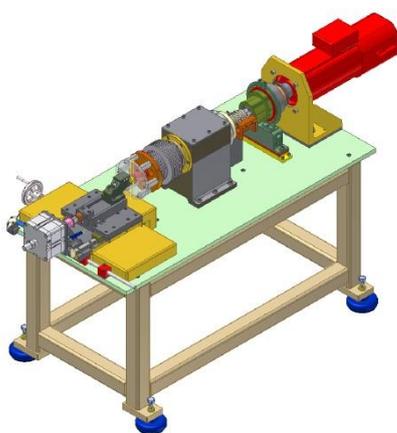


Figura 3.1 – Tribômetro utilizado nos ensaios [Neis, 2008].

### 3.7 Etapas de Ensaio

A certificação dos materiais de fricção é definida por normas nacionais e internacionais que exigem que uma série de testes seja realizada em máquinas de ensaio e em veículo. Normas corporativas também são utilizadas pelos fabricantes dos materiais de fricção em aplicações específicas dentro da empresa, a norma padrão utilizada em dinamômetros inerciais é a norma AK-Master 01 Stand 12/98.

Cada equipamento de ensaio possui pelo menos uma norma padrão que define os parâmetros de operação do ensaio. No caso dos ensaios realizados no tribômetro, o procedimento que é empregado baseia-se em normas utilizadas em dinamômetros inerciais. Estas apresentam diferentes etapas onde frenagens são realizadas em condições distintas de pressão de contato (indicadas por pressão de acionamento do sistema mecânico), velocidades de escorregamento (indicadas pela velocidade inicial e final do veículo), tempo de frenagem

(quando a etapa for condicionada a desaceleração constante) e temperatura do rotor (disco ou tambor de freio).

A seguir são apresentadas as definições de algumas das etapas avaliadas no presente trabalho:

- **Assentamento** – o objetivo desta etapa inicial dos procedimentos de ensaio é aumentar, por desgaste, a área de contato do par de fricção. Nesta etapa ocorre a estabilização do coeficiente de atrito do material medido pelo equipamento devido à uniformização do contato entre a pastilha e o disco de freio. O assentamento pode ser feito por arraste ou por frenagens consecutivas.
- **Fade** – é a etapa realizada para avaliar o efeito do aumento da temperatura sobre o desempenho do material de fricção. São realizadas frenagens repetidas em um curto intervalo de tempo a fim de elevar a temperatura. Materiais de fricção convencionais geralmente têm uma piora do seu desempenho com o aumento da temperatura.
- **Recuperação** – são frenagens que seguem etapas onde as temperaturas são elevadas (*fade*). O filme tribológico altera-se com o aumento da temperatura e esta alteração passa por um transiente, cujos gradientes de atrito são maiores na transição de temperaturas elevadas (acima de 300°C) para menores (geralmente 100°C). Por isso, após etapas de *fade*, faz-se necessário passar por uma etapa de recuperação a fim de estabilizar novamente o filme tribológico e, conseqüentemente, o coeficiente de atrito medido.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Corpos de Prova

O material de fricção utilizado neste trabalho apresenta uma formulação semi-metálica e as amostras foram retiradas de pastilhas de freio comerciais. A figura 4.1 mostra dois corpos de prova retirados de uma pastilha comercial através de etapas de usinagem da plaqueta e do material de fricção. Os corpos de prova foram usinados com diâmetro de 18 mm.

Todos os ensaios deste trabalho foram realizados com corpos de prova virgem. Objetiva-se, portanto, avaliar o desempenho do material (quantificado aqui como atrito) sem a influência do histórico tribológico do material.

No total, foram utilizados neste trabalho 4 pastilhas comerciais, que resultaram 8 corpos de prova. A numeração destes segue a nomenclatura dos ensaios que será mostrado a seguir (Tabela 4.2).



Figura 4.1 – Pastilha de freio comercial e os corpos de prova.

## 4.2 Disco

O procedimento de ensaio utilizado neste trabalho consiste em aplicar frenagens sobre quatro pistas do disco, sendo duas em cada face.

Foram utilizados dois raios de frenagem, 33 mm e 51 mm, cada um gerando uma respectiva pista de atrito.

Considerando estas condições de operação, 2 faces e 2 diferentes raios, é usada a nomenclatura (lado A e lado B) para cada respectiva face do disco, usando os índices 33 e 51 para identificar os raios ensaiados, o sub-índice (1) define condição de pista nova e os sub-índices (2 e 3) condição de pista usada. Como exemplo, segue a nomenclatura de um determinado ensaio, A33-(1), ensaio sobre a face A do disco, no raio de 33 mm, sobre pista de atrito nova.

O disco empregado neste experimento é feito de ferro fundido cinzento, sem uso (disco novo) e a medição da temperatura do disco é realizada utilizando quatro termopares tipo K instalados na seção interna do disco. A localização dos termopares coincide com o centro de cada pista de atrito, a uma distância de 3 mm da superfície. O sinal elétrico dos termopares é retirado do eixo da máquina através de escovas e, após condicionado, é enviado ao sistema supervisor e de controle do tribômetro, onde é salvo com os demais sinais medidos durante o experimento.

A figura 4.2 ilustra a disposição dos corpos de prova sobre as pistas de escorregamento no disco, bem como a posição dos termopares sobre os raios de deslizamento.

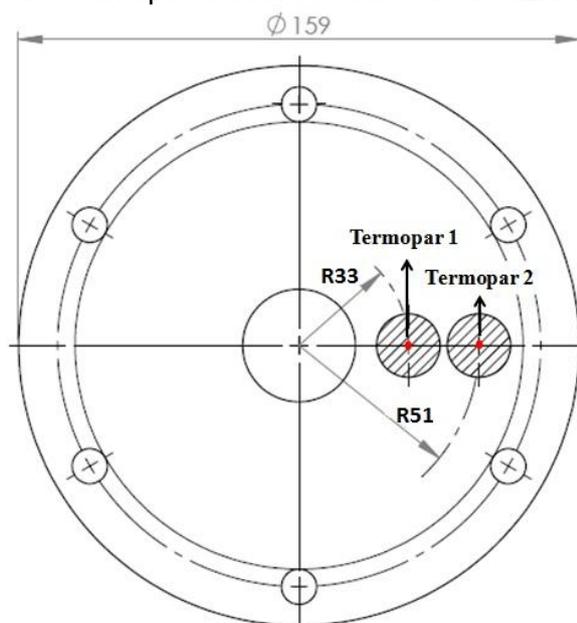


Figura 4.2 – Técnica de utilização de duas pistas de atrito sobre cada face do disco (configuração de raios e termopares).

## 4.3 Assentamento das Amostras

A fim de uniformizar a área de contato e evitar consequentes efeitos transientes do atrito, um ensaio de assentamento foi executado sobre cada corpo de prova imediatamente antes da realização dos experimentos. A etapa de assentamento é realizada sob condição de arraste constante e a condição considerada é que o material percorra a distância de 500 metros em ambas as pistas de escorregamento.

A rotação do disco foi de 188 rpm para o raio de 33 mm e de 314 rpm para os ensaios realizados na pista de raio 51 mm, resultando tempos de assentamento de 476 s e 300 s,

respectivamente. Esta diferença nas rotações foi escolhida visando manter próximo o acréscimo de temperatura ao longo do assentamento.

A força normal aplicada em ambos os raios foi de 1200 N, acarretando igual pressão de contato de 4,7 MPa.

#### 4.4 Procedimento de Ensaio

Para que o procedimento de ensaio seja avaliado com segurança e confiabilidade, deve-se garantir que as amostras sejam ensaiadas sobre iguais condições de frenagem.

Para isso é necessário adequar os parâmetros de ensaio conforme a teoria de escalas proposta por Wilson, 1968. De acordo com a teoria, é importante garantir que a energia dissipada na frenagem por unidade de área da pastilha de freio, ou simplesmente densidade de energia, seja mantida a mesma. Alguns parâmetros como velocidade de escorregamento [m/s], desaceleração [m/s<sup>2</sup>], tempo de frenagem [s] e densidade de energia [J/m<sup>2</sup>] devem ser mantidos constantes durante as frenagens.

Estes parâmetros são mantidos constantes segundo a lógica de controle em malha fechada implementada no tribômetro por Neis, 2008. O controle do tribômetro é feito via *Simulink*, ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Sua interface primária é uma ferramenta de diagramação gráfica por blocos e bibliotecas customizáveis de blocos. O software oferece integração com o resto do ambiente MATLAB, integrando todas as variáveis necessárias para o controle do tribômetro.

O procedimento de ensaio utilizado compreende frenagens com desaceleração e força normal constante.

A rampa de velocidade de escorregamento durante as frenagens variou de 7,7 m/s a zero em um tempo de 10 segundos (desaceleração de 0,77 m/s<sup>2</sup>). Correlacionando com a prática em veículos leves, esta condição representa uma desaceleração de 80 Km/h a zero no mesmo tempo. Para obter esta condição em ambos os raios, foram utilizadas rotações iniciais distintas do disco, sendo de 2222 rpm para o raio de 33 mm e de 1440 rpm para o raio de 51 mm.

A força utilizada para pressionar o corpo de prova contra o disco foi de 1200 N em ambos os raios, mesma força utilizada no assentamento. Esta força é exercida por um atuador pneumático controlado pelo sistema de supervisão e controle do tribômetro. A medição da força é feita através de uma célula de carga alinhada entre o atuador e o corpo de prova.

A taxa de aquisição dos sinais durante as frenagens é de 10 Hz e o início da aquisição (gatilho) se dá quando a força de acionamento alcança 90% da força pré-estabelecida (1200 N), ou seja, 1080 N.

As frenagens iniciam quando a temperatura do disco, medida pelo termopar a 3 mm da face de contato, atinge um valor pré-determinado, parâmetro este chamado de gatilho. Em algumas situações a temperatura fornecida pela frenagem anterior não consegue atingir o gatilho da próxima frenagem, o que exige uma fonte externa de calor através de uma unidade de aquecimento por indução.

O procedimento adotado foi constituído de 4 ciclos iguais com 19 frenagens, totalizando 76 frenagens. A Tabela 4.1 mostra as frenagens de cada ciclo onde são utilizados 4 gatilhos ou patamares de temperatura. Inicialmente são realizadas 10 frenagens com gatilho de 100°C, sendo que as 7 primeiras são consideradas como recuperação do atrito e as três últimas na média do atrito nesta temperatura. Após são realizadas mais 3 frenagens em cada temperatura: 200, 300 e 350°C. Portanto, dentro de cada ciclo tem-se um atrito médio por temperatura baseado em três medidas. Na passagem dos patamares de 100 para 200°C, 200 para 300°C e de 300 para 350°C foi utilizado o aquecimento indutivo.

Tabela 4.1 – Ciclo do procedimento de ensaio.

FRENAGEM	TEMPERATURA	FUNÇÃO
1	100 °C	recuperação do atrito
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11	200 °C	média do atrito em 200°C
12		
13		
14	300 °C	média do atrito em 300°C
15		
16		
17	350 °C	média do atrito em 350°C
18		
19		

#### 4.5 Ensaios Realizados

Para as análises de variabilidade do coeficiente de atrito foram ensaiados 8 corpos de prova, avaliando as frenagens sobre pista nova e usada nos raios de 33 mm e 51 mm. A sequência dos ensaios é apresentada na tabela 4.2. Tem-se portanto, 2 procedimentos de ensaio para pista nova e 2 procedimentos para pista usada em cada raio, utilizando as faces A e B do disco de freio.

Tabela 4.2 – Ensaios realizados.

	Nome do Ensaio	Raio [mm]	Pista	
			Nova	Usada
1	<b>A51-(1)</b>	51	X	
2	<b>B51-(1)</b>		X	
3	<b>B51-(2)</b>			X
4	<b>B51-(3)</b>			X
5	<b>A33-(1)</b>	33	X	
6	<b>A33-(2)</b>			X
7	<b>A33-(3)</b>			X
8	<b>B33-(1)</b>		X	

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são analisados os resultados de atrito medidos nos ensaios realizados buscando identificar diferenças na utilização de pistas novas e usadas, bem como a influência do raio. Isso é feito segundo duas abordagens: a primeira através da análise da variância (ANOVA) dos atritos médios e posteriormente através da análise da variabilidade do atrito.

A seguir são apresentados os resultados do atrito médio medido durante os diferentes ensaios.

### 5.1 Análise das Frenagens

Os ensaios executados são analisados nos gráficos de atrito de cada ensaio onde é avaliado o comportamento do coeficiente de atrito do material.

A figura 5.1 apresenta, exemplificando o comportamento médio encontrado nos ensaios, o resultado em termos de atrito medido durante o ensaio B33-(1). Nota-se claramente o efeito de *recuperação* do coeficiente de atrito nas primeiras 7 frenagens em 100°C. O atrito aumenta convergindo para o valor médio apresentado a seguir, no patamar de 100°C. Este é um comportamento esperado para o atrito nesta etapa.

Percebe-se, também, a variação do atrito médio nos 2 primeiros ciclos de frenagem e isso se deve a existência de efeitos transientes (cura do material e transformações químicas) que geralmente ocorrem nessas condições. Já nos ciclos 3 e 4 existe uma aproximação maior dos valores, indicando que a partir do terceiro ciclo atinge-se a estabilização do atrito do material e os atritos médios podem ser utilizados na análise objeto deste trabalho. Este comportamento também já é conhecido e era esperado.

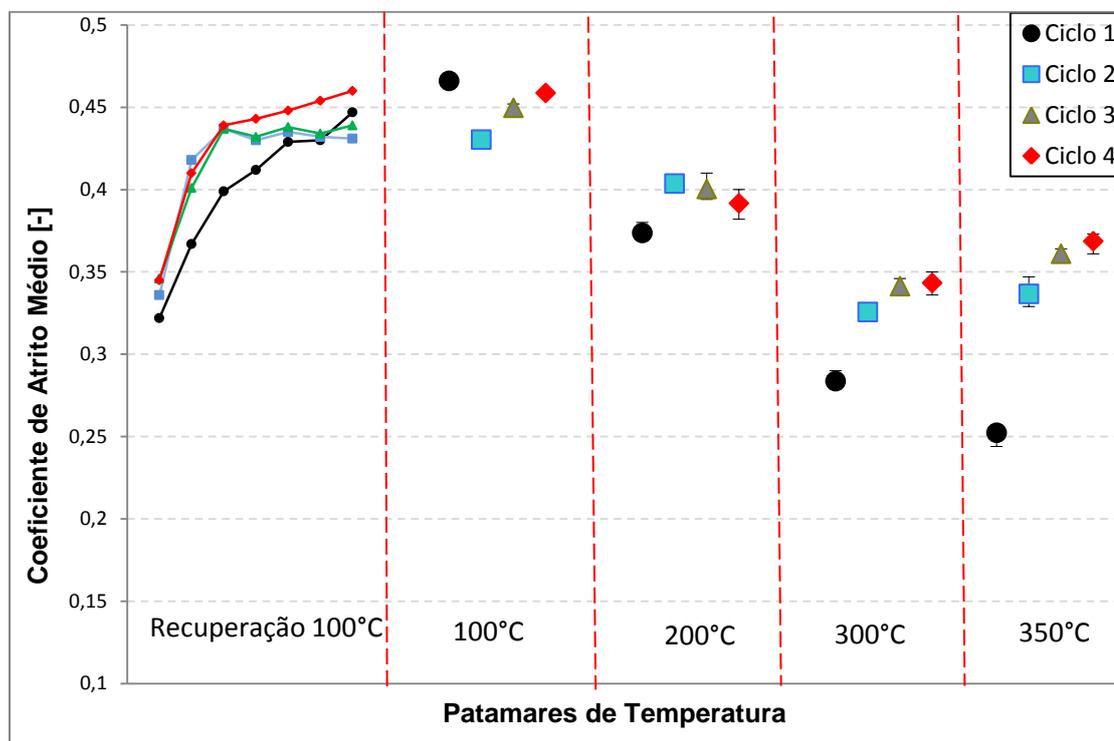


Figura 5.1 – Comportamento do atrito durante o procedimento de ensaio B33-(1).

Os gráficos dos demais ensaios executados são ilustrados no APÊNDICE I e mantêm o mesmo padrão de comportamento.

Outra forma de visualizar o resultado é através do atrito médio por patamar de temperatura. Para exemplificar de onde são retirados os valores graficados, a Figura 5.2 mostra os valores de atrito do ensaio B33-(1). Para cada ensaio avalia-se os 6 valores de

coeficiente de atrito médio nos ciclos 3 e 4 em cada patamar de temperatura (100, 200, 300 e 350°C). A barra de erro da figura 5.2 indica o maior e o menor valor encontrado no conjunto de seis valores de atrito.

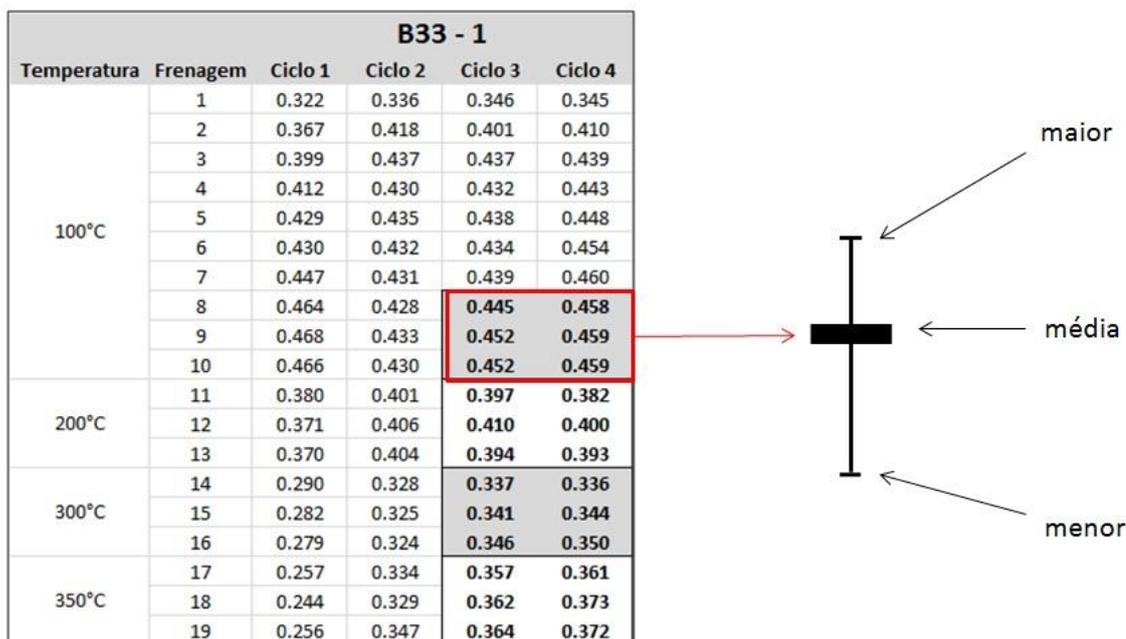


Figura 5.2 – Representação dos valores de atritos médios empregados nas análises.

Na figura 5.3 são apresentados os atritos médios em cada temperatura. Esclarecendo a simbologia: os marcadores em “preto” correspondem a ensaios executados sobre a face A do disco e em “vermelho” sobre a face B. Ensaios executados sobre pista nova correspondem aos marcadores sem preenchimento e marcadores preenchidos definem condição de pista usada.

A análise deste gráfico demonstra haver uma pequena distinção nos valores de atrito medidos nos dois raios, com exceção para o caso da temperatura de 300°C. Nos patamares de 100 e 350 °C, os atritos medidos no raio 33 são levemente superiores aos medidos no raio 51. Já no patamar de 200 °C, efeito contrário aparece. Dentro de cada raio, os atritos ficam mais próximos, não indicando diferenças com relação ao estado da pista (nova/usada).

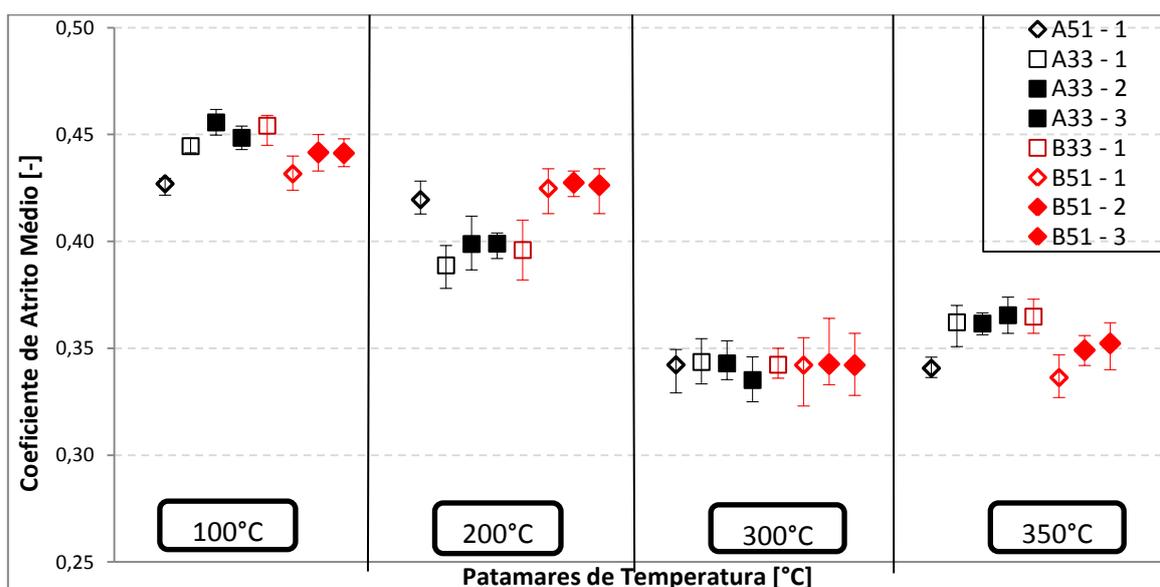


Figura 5.3 – Análise dos resultados de atrito médio em diferentes raios ensaiados e entre pista nova e usada, médias dos ciclos 3 e 4.

Analisando os dados da figura 5.3, por meio da análise de variância ANOVA e utilizando um nível de significância de 5%, foi avaliada a influência entre os raios e pistas novas e usadas nos diferentes níveis de temperatura ensaiados.

A seguir são utilizados métodos estatísticos pra verificar a tendência observada na Figura 5.3.

### 5.1.1 Análise ANOVA

A análise de variância ANOVA visa fundamentalmente verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. Por ANOVA, utilizando F a 5% (onde F representa o fator de variância do Teste-F), tem-se que se  $F_{\text{calc}} > F_{\text{tab}}$  rejeita-se a hipótese, isto é, existem diferenças estatisticamente significativas entre as médias. Por outro lado, se  $F_{\text{calc}} < F_{\text{tab}}$  não se rejeita a hipótese, indicando que não existem evidências estatísticas de que as médias sejam diferentes [Montgomery e Runger, 2009].

Os valores considerados de um ensaio na análise ANOVA, para uma dada temperatura, são os 6 valores medidos nos ciclos 3 e 4 (mesmo grupo de valores exemplificado na Figura 5.2). A Figura 5.4 mostra os ensaios considerados na análise de pista nova/usada para o raio 51 mm. Para o raio 33 mm, a mesma lógica foi seguida.

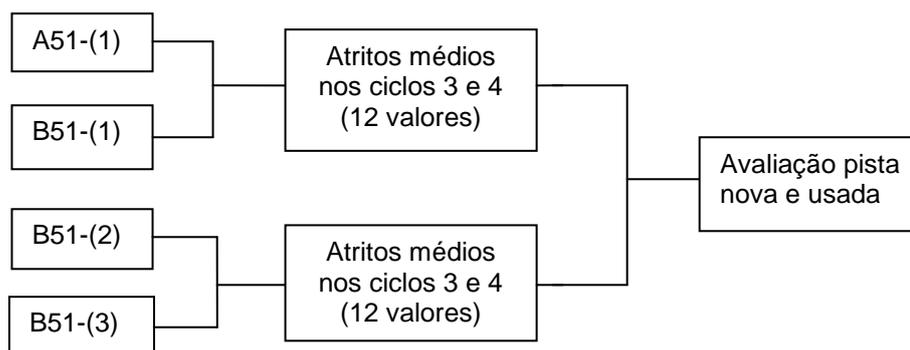


Figura 5.4 – Representação esquemática das avaliações entre pista nova e usada.

Na tabela 5.1 é apresentado o resultado da análise ANOVA considerando a variável “estado da pista” para os dois raios. Para facilitar a compreensão dos resultados, utiliza-se a simbologia S para efeitos significativos e NS para não significativos bem como os valores de  $F_{\text{calc}}$  e  $F_{\text{tab}}$  nas referidas condições. Percebe-se que o estado da pista somente é significativo para os ensaios realizados no raio 51 mm e temperaturas de 100 e 350°C.

Tabela 5.1 – Influência entre pistas de atrito nova e usada comparados entre as médias por ANOVA, nível de significância de 5%,  $F_{\text{tab}} = 4,304$ .

Temperatura [°C]	Raio 51 mm		Raio 33 mm	
	$F_{\text{calc}}$	Influência pista nova/usada	$F_{\text{calc}}$	Influência pista nova/usada
100	32,38	S	1,065	NS
200	3,459	NS	4,003	NS
300	0,002	NS	1,604	NS
350	16,14	S	0,0023	NS

Na tabela 5.2 é apresentado o resultado da análise ANOVA considerando a variável raio. Neste caso, esta variável é significativa para todos os patamares de temperatura, com exceção da temperatura de 300 °C, confirmando o que é percebido graficamente na Figura 5.3.

Tabela 5.2 – Influência entre raios diferentes comparados entre as médias por ANOVA, nível de significância de 5%,  $F_{tab}=2,249$ .

Temperatura [°C]	Entre os raios de 51 mm e 33 mm	
	$F_{calc}$	Influência entre raios
100	23,81	S
200	30,4	S
300	0,519	NS
350	15,41	S

A seguir foi feita outra análise do atrito, considerando as mesmas condições de estado da pista e raio, visando avaliar como a significância das médias calculada pelo método ANOVA afeta a variabilidade dos resultados medidos no tribômetro.

#### 5.1.2 Cálculo da Variabilidade dos Resultados

Para cada ensaio, foi calculada a variabilidade do atrito nos diferentes patamares de temperatura, considerando as 6 frenagens dos ciclos 3 e 4. Dentro de cada patamar, o cálculo é feito segundo a equação 5.1:

$$R = \frac{\text{máximo dos atritos} - \text{mínimo dos atritos}}{\text{média dos atritos}} \quad (5.1)$$

Na tabela 5.3 são apresentados os valores de variabilidade calculados para os dois raios e levando em conta a condição da pista (N=nova e U=usada). As células destacadas na cor amarela correspondem aos casos em que, pela análise ANOVA, o fator “estado da pista” é significativo. As células marcadas com verde, por sua vez, indicam as situações onde a variável raio é significativa. Percebe-se novamente nestes casos que os percentuais de variabilidade são mais elevados.

Tabela 5.3 – Variabilidade do atrito.

Temperatura	RAIOS 33 e 51	RAIO 33			RAIO 51		
	N + U	N	U	N + U	N	U	N + U
100°C	6,5%	2,1%	1,6%	2,5%	1,1%	0,1%	3,4%
200°C	9,4%	1,8%	0,0%	2,6%	1,2%	0,3%	1,9%
300°C	2,5%	0,4%	0,0%	2,5%	0,0%	0,1%	0,1%
350°C	8,2%	0,7%	1,1%	1,1%	1,3%	0,9%	4,6%
<b>MÉDIA</b>	<b>6,7%</b>	1,3%	0,7%	<b>2,1%</b>	0,9%	0,3%	<b>2,5%</b>
QTD ENSAIOS	8	2	2	4	2	2	4

Percebe-se portanto que a variabilidade de ensaios realizados num mesmo raio, mesmo que repetindo os ensaios na mesma pista, resultaram numa variabilidade máxima de 4,6% no pior caso (raio 51 mm, 350 °C) e, na média, uma variabilidade de 2,5%. Para o raio 33 mm, as

variabilidades são menores. Esta é uma situação em que somente duas pistas de frenagem são utilizadas no disco.

Por outro lado, se forem utilizados os dois raios de frenagem, sem preocupação com o estado da pista, a variabilidade aumenta para 9,4%, no pior caso (200°C). Na média, para o procedimento adotado, a variabilidade fica em 6,7%.

### 5.1.3 Fatores associados às diferenças na mudança de raio

Diante disso, foram avaliados os possíveis fatores que influenciam na diferença dos atritos quando se modifica o raio. Entre eles destacam-se o ganho de temperatura a cada frenagem. Na tabela 5.4 as variações de temperatura do disco (valores médios e desvio padrão) são mostrados para os diferentes patamares de temperatura ensaiados.

Tabela 5.4 – Ganho de temperatura do disco durante o processo de frenagem nos raios de 33 mm e 51 mm.

Temperatura inicial [°C]	<i>R=33 mm</i>	<i>R=51 mm</i>
	Variação de temperatura // desvio padrão [°C]	Variação de temperatura // desvio padrão [°C]
100	78.5 // 2.9	50.8 // 2.7
200	59.5 // 1.5	42.2 // 4.5
300	36.2 // 3.5	16.4 // 1.8
350	41.5 // 2.6	17.1 // 2.4

Apesar de a velocidade linear e a temperatura inicial terem sido mantidas iguais durante os ensaios sobre os raios de 33 mm e 51 mm, o ganho de temperatura durante as frenagens variou em ambos os casos. Esse efeito acontece em função da diferença de geometria das pistas de atrito interna e externa, cujas áreas valem aproximadamente 0,00373 m<sup>2</sup> e 0,00576 m<sup>2</sup>, respectivamente. Conforme apresentado na tabela 5.5, apesar da potência dissipada média calculada nos ensaios ser muito próxima para os dois raios, a potência por área varrida e, conseqüentemente, volume varrido, é menor. Dessa forma, no raio externo (51 mm), a mesma quantidade de energia é dissipada num volume maior de material do disco, fazendo que as temperaturas ao longo das frenagens sejam menores. Como a temperatura afeta as propriedades tribológicas do material de fricção, esta diferença na temperatura é a causa mais provável da diferença na variabilidade dos resultados para os diferentes raios de frenagem.

Tabela 5.5 – Potências dissipadas nos ensaios.

Raio [mm]	Área Varrida [m <sup>2</sup> ]	Potência Média [W]	Potência por área varrida [kW/m <sup>2</sup> ]	Potência por volume varrido [kW/m <sup>3</sup> ]
33	0,00373	2073	556	46
51	0,00576	1970	342	28

## 6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados da análise ANOVA, corroborado também pela análise da variabilidade do atrito, conclui-se que o raio de escorregamento do corpo de prova sobre o disco afeta o atrito medido durante as frenagens nas temperaturas de 100, 200 e 350°C. De uma forma geral, se considerada a variabilidade média para as quatro faixas de temperatura, ao se utilizar somente pistas de mesmo raio, mesmo que desconsiderando o estado da pista, a variabilidade fica em 2,5%. Por outro lado, utilizando-se as duas pistas, a incerteza média dos ensaios aumenta para 6,7%.

Quanto ao fator que relaciona o estado da pista (nova ou usada), os resultados da análise ANOVA demonstram que este fator não é significativo para os ensaios realizados no raio de 33 mm. Já para o raio de 51 mm, passa a ser significativo para as temperaturas de 100 e 350°C. No pior desses casos (350 °C), a variabilidade aumenta 4,6% ao desconsiderarmos o estado da pista.

O levantamento realizado neste trabalho torna-se útil para a tomada de decisão sobre a quantidade de pistas a serem atritadas em discos nos ensaios realizados no tribômetro. Assim, os ganhos no custo e tempo de preparação dos ensaios com a reutilização das pistas do disco compensam o aumento na variabilidade dos resultados de atrito para a maioria das necessidades de ensaio no tribômetro.

Por outro lado, a utilização de raios distintos exige um aprofundamento no estudo, principalmente na questão relacionada ao aumento da temperatura do disco durante as frenagens. Porém, esta técnica pode ser utilizada se for aceitável uma variabilidade de até 6,7% nos resultados de atrito.

Sugere-se finalmente para trabalho futuro, a repetição desta metodologia para outros materiais, visando identificar a influência também do material ensaiado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Birch, T.W.; **“Automotive Braking Systems”**, Third Edition, Delmar, 1999.
- Blau, P.J.; McLaughlin, J.C.; **“Effects of water films and sliding speed on the frictional behavior of truck disc brake materials”**, Tribology International 36, pp. 709-715, 2003.
- Brembo.; II, **“Manual del Disco Freno”**, capítulo 2, 1995.
- Bulthé, A-L. C.; Desplanques, Y.; Degallaix, G.; Berthier, Y. **“Mechanical and Chemical Investigation of the Temperature Influence on the Tribological Mechanisms Occurring in OMC/Cast Iron Friction Contact”**, Wear 264, pp. 815-825, 2008.
- Eriksson, M.; Bergman, F.; Jacobson, S.; **“On the nature of tribological contact in automotive brakes”**, Wear 252, pp. 26-36, 2000.
- Kim, S.J.; Jang, H.; **“Friction and Wear of Friction Materials Countaining Two Different Phenolic Resins Reinforced with Aramid Pulp”**, Tribology International 33, pp. 477-484, 2000.
- Limpert, R.; **“Brake Design and Safety”**, Second Edition, SAE, 1999.
- Mackin, T.J.; **“Thermal cracking in disc brakes”**, Engineering Failure Analysis, vol. 9, no. 1, pp. 63-76, February 2002.
- Montgomery, D.C.; Runger, G.C.; **“Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros”**, Quarta Edição, LTC, 2009.
- Neis, P.D.; **“Projeto e Construção de um Tribômetro para Estudos Relacionados a Materiais de Fricção Veiculares”**, Dissertação de Mestrado, 84 folhas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil, 2008.
- Neumam, R.F.; Urban, J.A.; McNinch, J.H.; **“Performance Characterization of Dry Friction Materials”**. In: Braking of Road Vehicles. London: Mechanical Engineering Publications Ltd, pp. 233-238, 1983.
- Norma AK-Master. Alemanha. **“Ak-Master Stand”**. Ak-Master de dezembro de 1998. In Break German Procedures.
- Preston, J.D.; Forthofer, R.J.; **“Correlation of Vehicle, Dynamometer and Other Laboratory Tests for Brake Friction Materials”**. Society of Automotive Engineers, paper 710250, 1971.
- Rhee, S.K.; Schwartz, H.W.; **“Test Methods for Automotive and Truck friction Materials”**, American Society for Testing and Materials, pp. 39-49, 1979.
- Tsang, P.H.S, Jacko, M.G., Rhee, S.K.; **“Comparison of Chase and Inertial Brake Dynamometer Testing of Automotive Friction Materials”**, Wear of Material: International Conference on Wear of Materials, pp. 129-137, 1985.
- Wilson, A.J.; Belford, W.G.; Bowsher, G.T.; **“Testing Machines for Scale Vehicle Brake Installations”**, The Engineer, pp. 317-323, 1968.

APÊNDICE I – Gráficos comportamento do atrito médio das frenagens

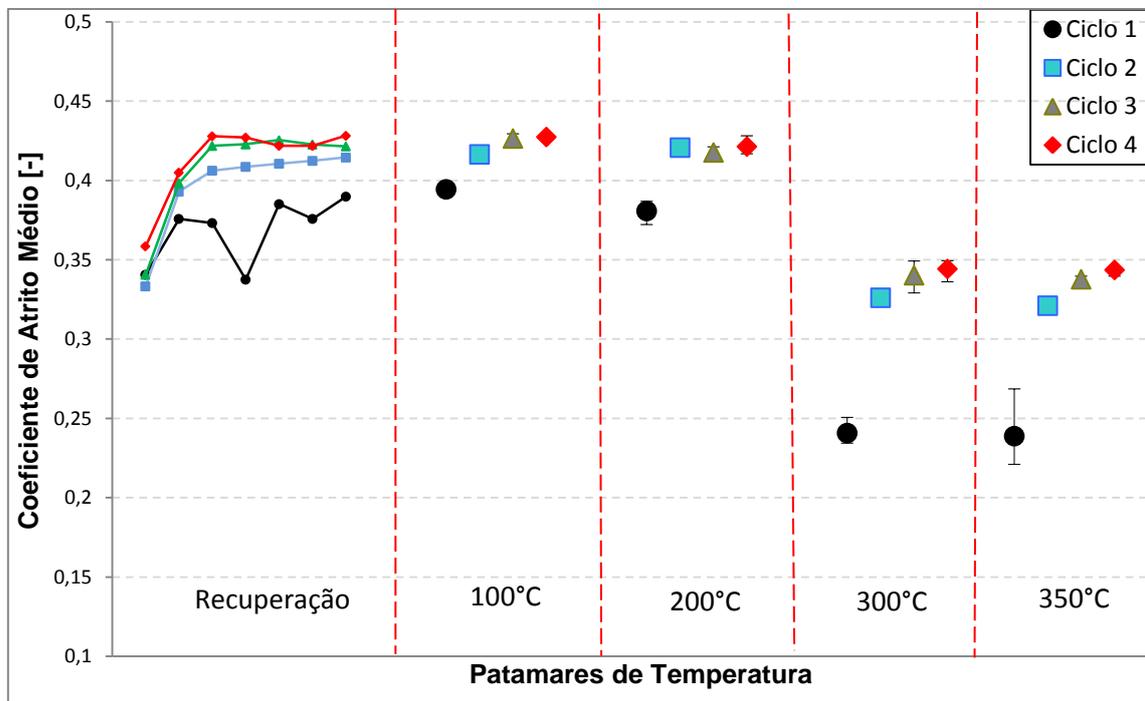


Figura 1 – Evolução atrito médio das frenagens ensaio A51-(1).

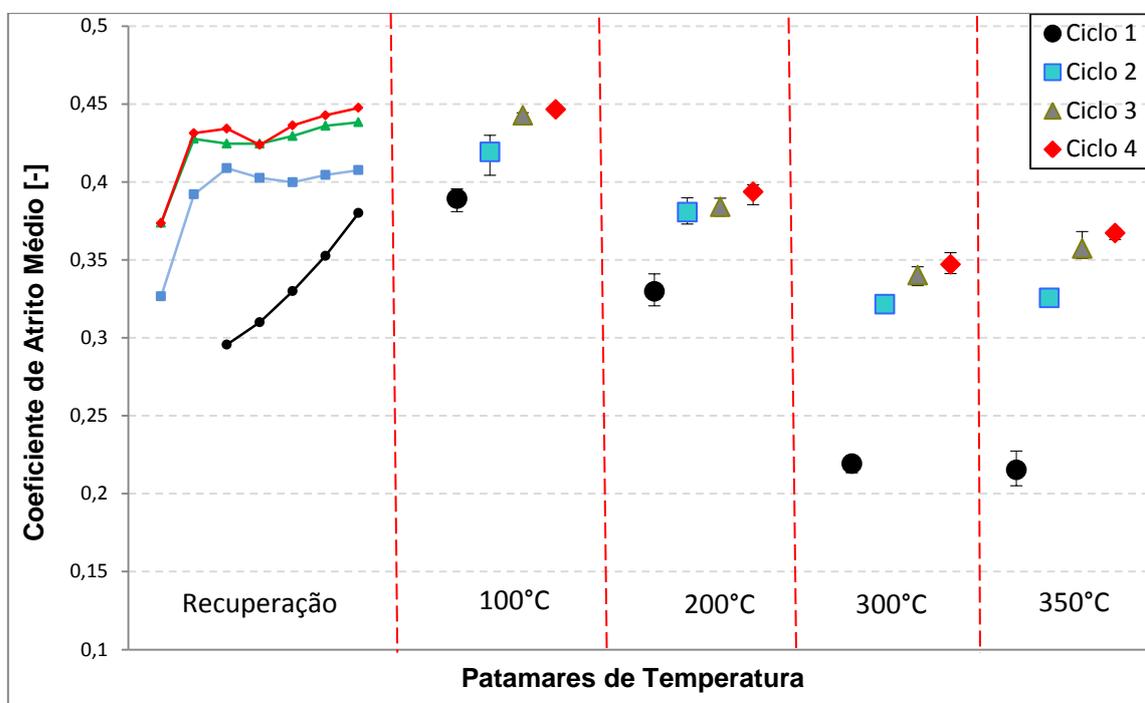


Figura 2 – Evolução atrito médio das frenagens ensaio A33-(1).

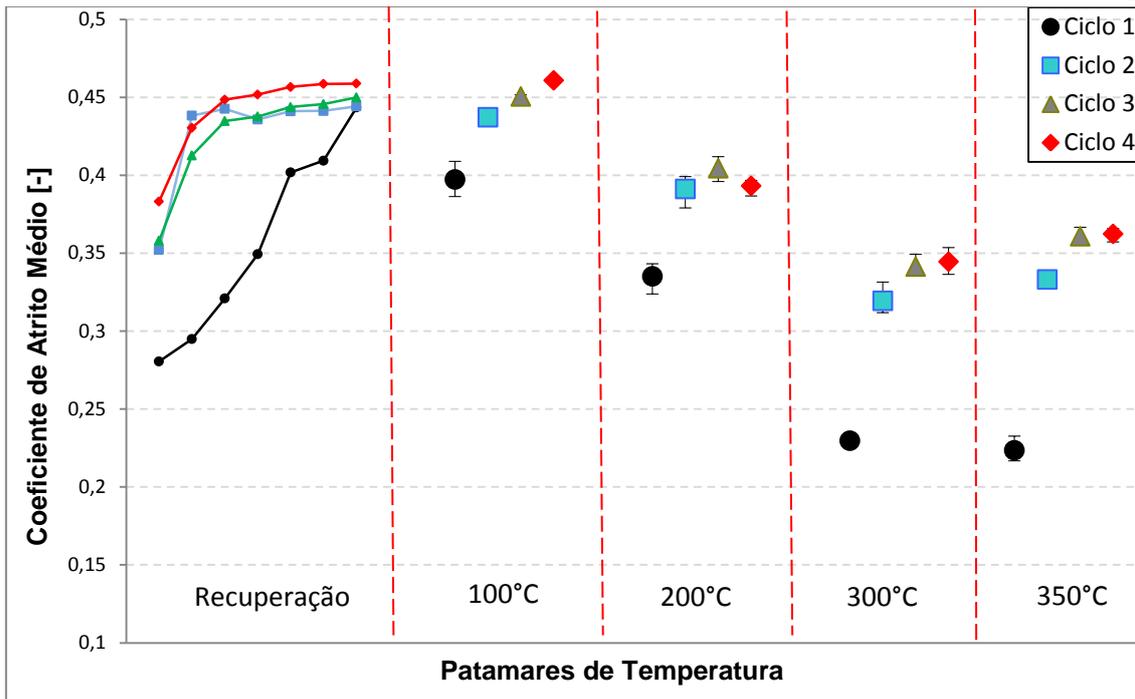


Figura 3 – Evolução atrito médio das frenagens ensaio A33-(2).

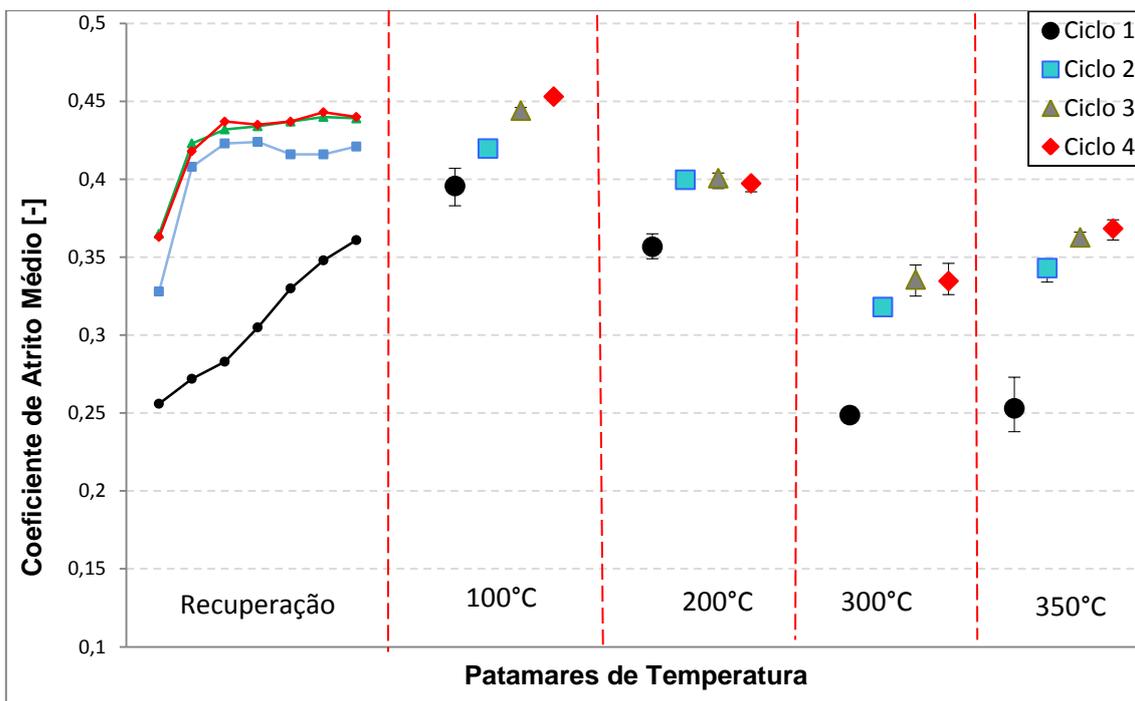


Figura 4 – Evolução atrito médio das frenagens ensaio A33-(3).

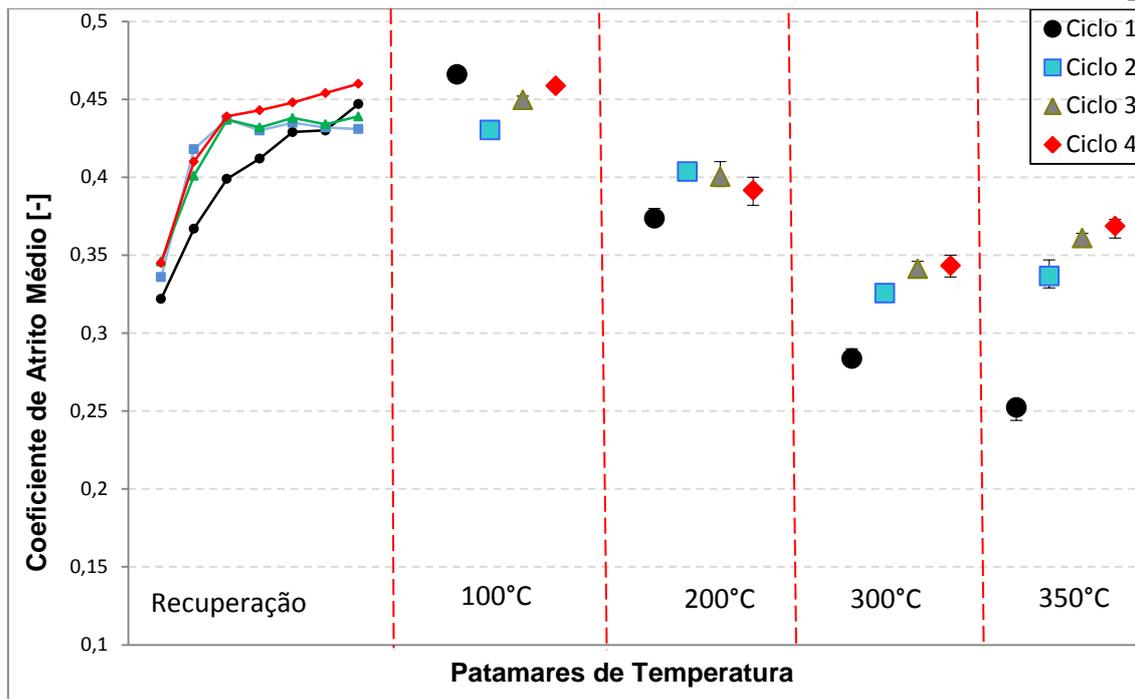


Figura 5 – Evolução atrito médio das frenagens ensaio B33-(1).

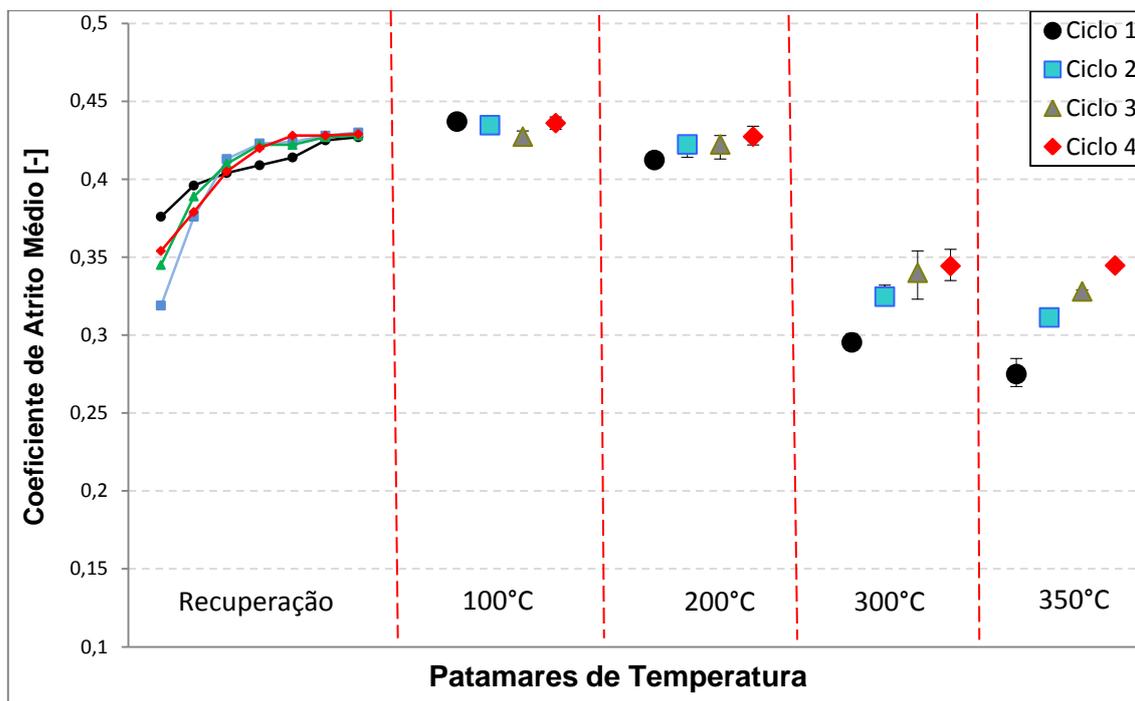


Figura 6 – Evolução atrito médio das frenagens ensaio B51-(1).

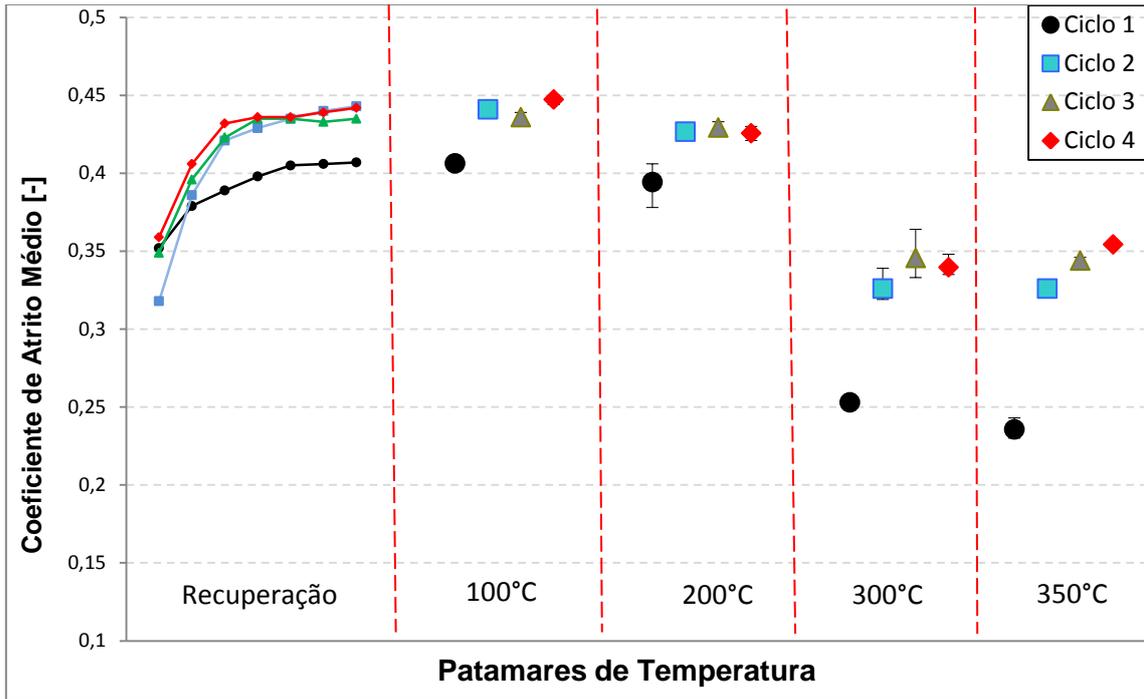


Figura 7 – Evolução atrito médio das frenagens ensaio B51-(2).

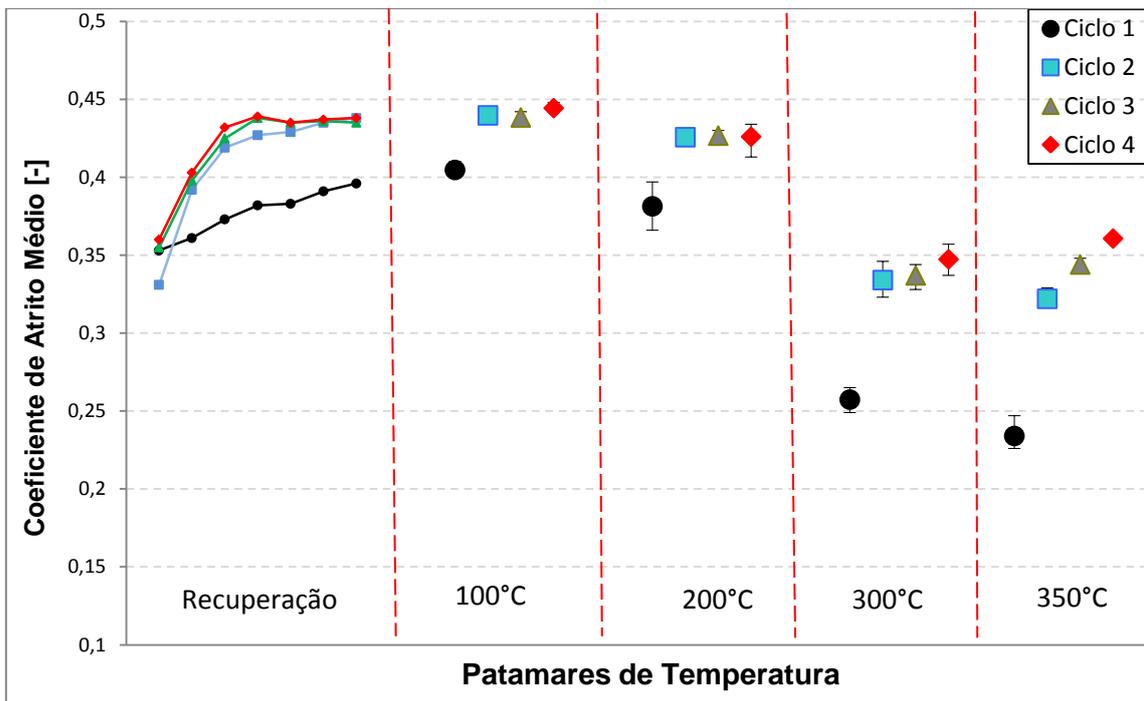


Figura 8 – Evolução atrito médio das frenagens ensaio B51-(3).