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

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE PIRÔMETRO INFRAVERMELHO NA MEDIDA DE TEMPERATURA NO DISCO DE FREIO DURANTE TESTES DE FRENAGENS

por

Leonardo Valero Pereira

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, dezembro de 2010.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE PIRÔMETRO INFRAVERMELHO NA MEDIDA DE TEMPERATURA NO DISCO DE FREIO DURANTE TESTES DE FRENAGENS

por

Leonardo Valero Pereira

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. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira.

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Flávio José Lorini

Profª. Drª. Cintia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Darci Campani

Porto Alegre, novembro, 2010.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aqui a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para o bom andamento deste trabalho.

À minha família pelo apoio ao longo do curso de graduação.

Ao Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira que me orientou no decorrer do trabalho, e ao Patric Daniel Neis, que esteve sempre disposto a esclarecer meus questionamentos.

À empresa FRAS-LE, onde foram realizados os testes deste estudo.

Aos colegas de graduação Vinícius Ribeiro da Silva e Venâncio Lazaro Batalhone Neto pela ajuda nos momentos finais do trabalho.

PEREIRA, L.V. **Análise da utilização de pirômetro infravermelho na medida de temperatura no disco de freio durante testes de frenagens**. 2010. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RESUMO

Durante ensaios de materiais de fricção para uso em sistemas de freio automotivo, a temperatura do disco de freio é monitorada por meio de termopares acoplados lateralmente ao disco e logo abaixo da superfície de contato. Na atual pesquisa, realizou-se uma comparação entre a temperatura do disco medido por termopares e sensores infravermelhos durante testes de frenagem. O aparato experimental para ensaiar os materiais de fricção consiste em um dinamômetro inercial, sendo que o teste foi baseado em um procedimento padrão de ensaio de materiais de fricção e divido em três etapas: assentamento, caracterização e fade. As curvas de emissividade para as medições de temperatura foram avaliadas com diferentes materiais e seus valores médios foram propostos como correção da temperatura medida pelo pirômetro infravermelho. O método proposto de correção da emissividade do pirômetro infravermelho mostrou-se eficaz para duas etapas do procedimento, assentamento e caracterização. O erro elevado apresentado durante a etapa fade deve-se possívelmente ao surgimento de bandas quentes e formação de óxido na superfície do disco de freio.

PALAVRAS-CHAVE: disco de freio, pirômetro, fade.

PEREIRA,L.V. **Analysis of the use of pyrometer to measure disc temperature during braking tests**. 2010. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ABSTRACT

During testing of friction materials for use in automotive brake systems, the temperature of the brake disk is monitored by thermocouples placed laterally to the disc and just below the surface. In the current research, a comparison between the disk temperature measured by thermocouples and infrared sensors during brake test was done. The experimental apparatus for testing friction material consists of an inertial dynamometer, and the test procedure was based on a standard test of friction materials and divided into three stages: a settlement, characterization and fade. Emissivity curves for temperature measurements were evaluated with different materials and their mean values were proposed as a correction of the temperature measured by infrared pyrometer. The proposed method of emissivity correction for the infrared pyrometer was effective for two stages of the procedure, setting and characterization. The elevated error presented during fade is possibly due to the appearance of hot bands and oxide formation in the brake disc surface.

KEYWORDS: **brake-disc, pyrometer, fade.**

ÍNDICE

Pág.

1. INTRODUÇÃO.....1
2. OBJETIVOS 1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 2
3.1. Equipamento Para Ensaio.....2
3.2. Forma de medição da temperatura de discos.....2
3.3. Irradiação Térmica.....3
3.4. Características dos materiais de fricção.....4
3.5. Alterações na superfície de atrito.....5
3.6. Características do procedimento.....6
3.7. Estudos realizados.....7
4. METODOLOGIA 9
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....12
5.1. Erros e incertezas.....19
6. CONCLUSÕES 24
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....26

1. INTRODUÇÃO

O freio a disco surgiu aproximadamente junto com os veículos a roda motorizados, sua vantagem em relação ao freio a tambor se dá pelo fato do freio a disco ser mais facilmente resfriado, garantindo que o sistema de frenagem funcione em situações mais adversas de temperatura. Obviamente outras características devem ser levadas em consideração no momento do projeto, como custo, disponibilidade do material, dimensões, entre outros. Atualmente, carros populares utilizam sistema de freio a disco nas rodas dianteiras. Nesse sistema um disco fixo à roda do veículo é freado quando as pastilhas são acionadas provocando atrito nos dois lados do disco.

Um ou mais mecanismos, pneumáticos ou hidráulicos, são responsáveis por esse acionamento; o primeiro é mais usado em veículos de grande porte e o outro, em veículos de passeio. O esforço assim gerado provoca o atrito entre a pastilha e o disco e a força de atrito entre ambos cria o torque de frenagem.

Durante a etapa de desenvolvimento de novas pastilhas e lonas de freio para uso em sistemas automotivos, são realizados ensaios com o intuito de avaliar e selecionar os materiais, bem como qualificá-los para que possam atingir todos os parâmetros necessários e finalmente, serem seguramente comercializados. O principal parâmetro de uma pastilha de freio é o coeficiente de atrito, o desempenho de uma pastilha de freio está diretamente ligado a esse coeficiente, que varia de acordo com o tipo de compósito utilizado. Os compósitos frequentemente utilizados para a formação do material de fricção contêm fibras metálicas, material de enchimento e aditivos para fricção, os quais são agregados por aglutinantes (resinas).

A temperatura gerada no momento da frenagem pode alterar de maneira significativa o desempenho do material de fricção, tendo em vista que em altas temperaturas pode ocorrer a queima do material orgânico existente na pastilha (resina fenólica). O desempenho da pastilha sob altas temperaturas é avaliado na etapa de ensaio conhecida como fade [Kasem et al., 2010]. Dessa forma, o monitoramento da temperatura do disco se torna interessante, pois possibilita correlacionar os valores de coeficiente de atrito alcançados nos testes de interação pastilha/disco de freio, com as faixas de temperatura do disco no momento do teste [Bulthé et al., 2007a e 2007b;Limpert, 1999].

Atualmente, fabricantes utilizam uma técnica consolidada para o monitoramento da temperatura, que consiste na utilização de termopares ligados aos discos para mensurar a temperatura, os termopares são acoplados lateralmente ao disco de freio e também logo abaixo da superfície de contato. Porém essa tarefa requer tempo de preparação, além de conhecimento técnico para a realização da mesma.

Esse trabalho propõe uma alteração no processo empregado para analisar a temperatura durante os testes de frenagem, utilizando um sensor infravermelho para que a medida da temperatura seja obtida através de uma instrumentação mais simples e rápida, eliminando o tempo gasto com o procedimento de preparação do disco e possibilitando a medição da temperatura realmente na superfície do disco de freio. Além disso, quando se tratam de discos delgados (4 a 6 mm), a instalação de termopares, aos moldes hoje consolidados, pode por em risco a integridade dos discos devido a possível ocorrência de fraturas e trincas.

2. OBJETIVOS

O trabalho consiste em propor e analisar a viabilidade técnica de substituir o usual método de medida de temperatura de disco nos ensaios de frenagem – termopar inserido no disco – pela utilização de um pirômetro infravermelho com área de leitura posicionado sobre a pista de atrito na superfície do disco. A análise foca o levantamento das curvas de emissividade de início das frenagens e o comportamento das temperaturas nas diferentes etapas do ensaio.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Equipamento Para Ensaio

O equipamento utilizado para testar os materiais de fricção foi um dinamômetro inercial, atualmente o equipamento mais utilizado para avaliar materiais de atrito [Zimmer e Teves, 1982], que consiste em grandes discos de inércia acoplados a um eixo centralizado ao disco de frenagem de um lado e a um motor elétrico por outro. Para um teste de dinamômetro inercial o torque ou a desaceleração substituem a distância de parada, e a pressão substitui a força do pedal [Agudelo e Ferro, 2005]. Os discos inerciais podem ser configurados para que apresentem a mesma inércia de um veículo específico, além de reproduzir o sistema de freios do veículo em questão, o que o caracteriza como sendo o equipamento que simula bem as condições reais de frenagem [Preston et al., 1970]. Segue na Figura 3.1 um desenho esquemático de um dinamômetro inercial.

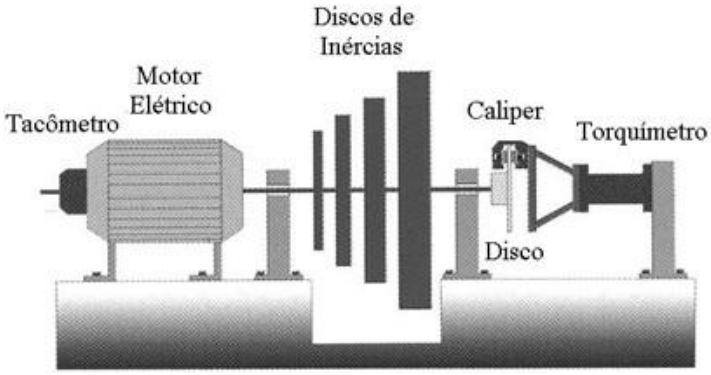

Figura 3.1 – Ilustração de um dinamômetro inercial [Haynes Publishing, 1999]

3.2. Forma de medição da temperatura de discos

Os instrumentos empregados na mensuração da temperatura são um termopar e um pirômetro infravermelho, os quais possuem as seguintes características fundamentais:

- **Termopar**: instrumento de mensuração da temperatura através de uma diferença de tensão gerada, nos extremos de um par de fios com características especiais, através da diferença de temperatura entre suas extremidades (juntas). Como este instrumento não depende somente da temperatura a ser medida, se faz necessário conhecer a temperatura de uma das juntas, denominada junta fria. Este instrumento é capaz de medir uma ampla faixa de temperatura e ainda possui custo relativamente baixo. [Ismail, 1986]
- **Pirômetro**: são sensores de temperatura, que não necessitam de contato físico, diferente do sensor apresentado anteriormente, e que utilizam como informação a radiação eletromagnética emitida pelo corpo a medir e de propriedades de sua superfície (emissividade, definida na seção 3.3) [Rocha, 1998].
- **Pirômetro infravermelho**: instrumento que mede a taxa de emissão de energia radiante por unidade de área numa faixa mais ampla de comprimento de onda, utilizando um sistema que retém a energia no espectro visível e infravermelho do alvo e

a focaliza em um elemento sensível, e como podemos observar na Figura 3.3, a energia radiante é mais intensa entre os comprimentos de onda de 0,3 a 20µm. A Figura 3.2 mostra um desenho esquemático de um pirômetro infravermelho. Uma lente capta a radiação infravermelha emitida pela superfície em sua área de foco, que depois é refletida e focada no sensor [Rocha, 1998].

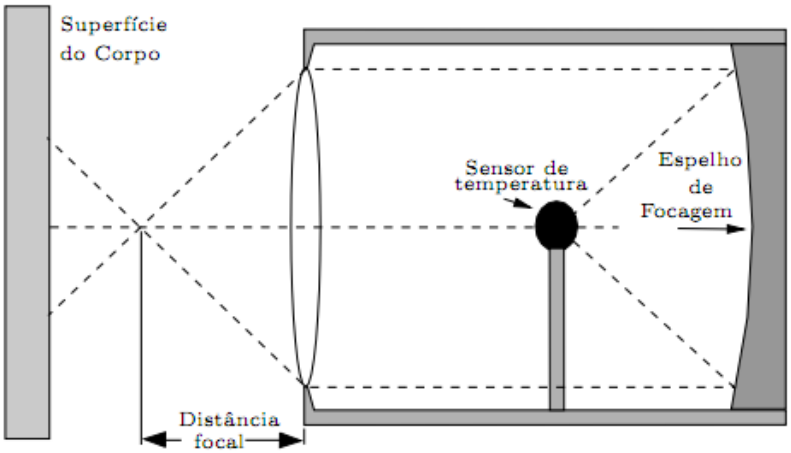

Figura 3.2 – Ilustração esquemática de um pirômetro infravermelho [Rocha, 1998].

Recentemente surgiram pirômetros de dupla onda, que, segundo fabricantes, asseguram uma medida independente da emissividade do objeto. No entanto, estudos mostram que o acréscimo de ondas não se traduz necessariamente em leituras mais confiáveis de temperatura [Hladik, 1990], e que ainda incorrem em erros, por menores que sejam [Kasem et al., 2010]. Para tal instrumento, considera-se que a emissividade do corpo deve ser independente do comprimento de onda ou ao menos igual para os dois comprimentos de onda, ou seja, que se comporte como um corpo cinza [Godoy e Lockwood, 1997].

A mensuração da temperatura de superfície em disco de freios é especialmente complexa devido à reduzida área de leitura do pirômetro e às rápidas rotações em que o disco é submetido [Thevenet et al., 2009]. Outro aspecto importante relativo à técnica de medição por infravermelho, diz respeito ao fato de que a superfície dos objetos mensurados não se comporta como corpo negro, ou seja, a emissividade de um corpo depende da natureza do material, podendo ainda variar com a temperatura e o comprimento de onda [Kasem et al., 2010 ; Madura et al., 2007].

Outros fatores importantes a serem mencionados são a formação de carepa devido à oxidação do metal na pista de atrito do disco com a alta temperatura e o surgimento de debris, material proveniente da pastilha de freio que após desgaste se deposita sobre a superfície do disco. Tais fenômenos acabam por alterar a emissividade do disco de freio e, por conseguinte distorcer a leitura da temperatura [Kasem et al., 2010].

3.3. Irradiação Térmica

A radiação térmica se propaga através de ondas eletromagnéticas, e tem sua intensidade dependente da temperatura e do comprimento de onda, como se pode ver na Figura 3.3, sendo relevante observar que para qualquer comprimento de onda a magnitude da radiação emitida aumenta com o aumento da temperatura.

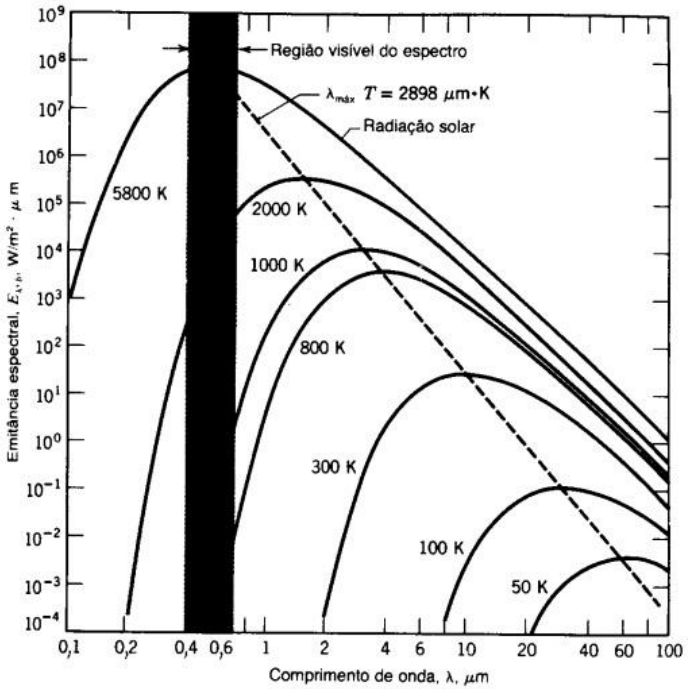

Figura 3.3 – Comportamento da intensidade de radiação [Incropera, 2008].

Segundo Incropera, 2008, um corpo negro ideal absorve toda a radiação, independente de seu comprimento de onda e de sua direção. Para uma dada temperatura e comprimento de onda, uma superfície qualquer não pode emitir ou absorver mais energia do que o corpo negro. Assim sendo, este último serve como parâmetro ideal com o qual as características de radiação de outros corpos são comparadas. A partir dessa constatação, defini-se a emissividade de um corpo como sendo a razão entre a radiação emitida pela sua superfície e a radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura.

Conforme Incropera, 2008, determina-se como sendo um corpo cinzento aquele cuja energia emitida ou absorvida é independente do comprimento de onda nas regiões de irradiação e emissão superficial onde as propriedades espectrais, absortividade e emissividade, são aproximadamente constantes.

3.4. Características dos materiais de fricção

Segundo Bulthé et al., 2007, materiais de atrito para freios automotivos são formados de materiais compósitos e geralmente fabricados por compactação a quente. Esses materiais devem possuir características de resistência, estabilidade do coeficiente de atrito para condições adversas de temperatura, pressão, umidade, etc. No intuito de se obter tais especificações, os materiais de fricção são compostos por vários ingredientes. De acordo com Eriksson et al., 2002, materiais de fricção são formados por:

- **Fibra Metálica**: fornece propriedades mecânicas e condutividade térmica, além de estabilizar o coeficiente de atrito durante as frenagens. Os componentes responsáveis por esta estabilização são as partículas abrasivas minerais, partículas metálicas (bronze, cobre, estanho, e outros) e lubrificantes sólidos, como o grafite.
- **Material de enchimento**: elemento utilizado com propósito de reduzir custos e favorecer a produção em série dos materiais de fricção. Exemplo: mica, sulfato de bário, etc.

- **Aditivos para fricção**: adicionados para garantir propriedades de fricção estáveis ao longo das frenagens, bem como controlar a taxa de desgaste da pastilha e disco de freio (lubrificantes de grafite e sulfureto metálico).
- **Aglutinantes**: elemento que une os materiais da pastilha e forma um componente termicamente estável, sendo geralmente utilizada a resina fenólica.

3.5. Alterações na superfície de atrito

A área de contato real entre a pastilha e o disco de freio não é constante ao longo do procedimento de frenagem. Apenas uma fração da área da pastilha estará em contato real com o disco de freio, já que a mesma está correlacionada com a pressão de contato, temperatura (que varia ao longo do processo), deformações, desgaste e a própria natureza da superfície de contato. Assim, essa área real de contato está limitada a platôs que se sobressaem da superfície da pastilha, como mostra Figura 3.4. [Eriksson et al., 2002].

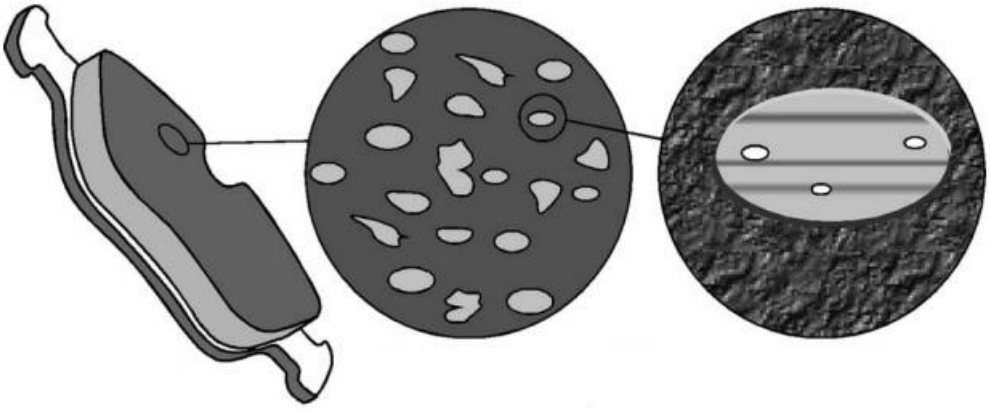

Figura 3.4 – Visão geral da superfície da pastilha com detalhe para os platôs [Eriksson et al., 2002].

Tais platôs são essencialmente formados por fibras metálicas imersas em componentes mais dúcteis e contemplam cerca de 15 a 20% da área de contato. Eles são responsáveis por absorver grande parte das pressões e esforços (em torno de 5 vezes mais em relação a outras regiões da pastilha) o que permite supor que tais superfícies terão maior influência no coeficiente de atrito em comparação à área total da pastilha [Eriksson et al., 2002].

Pesquisas anteriores, utilizando termógrafos, já mostraram que o tamanho e a localização do raio de contato real variam constantemente [Kasem et al., 2010; Neis et al.,2009]. Esse efeito é atribuído à formação de banda e/ou pontos quentes sobre a superfície de atrito do disco, que é resultado dos seguintes fatores:

- Má distribuição de pressão de contato [Bulthé et al., 2007];
- Vibrações locais, deformações e desgastes [Panier et al., 2003];
- Formação de óxidos e debris (material depositado na superfície do disco) [Bulthé et al., 2007];
- Alterações na estrutura dos materiais do disco e da pastilha de freio [Panier et al., 2003];
- A própria natureza heterogênea dos materiais de fricção [Desplanques et al., 2006].

Tal heterogeneidade na superfície da pista de atrito devido ao surgimento de bandas quentes, que dificulta a determinação da emissividade, é mostrada na Figura 3.5 [Kasem et al., 2010].

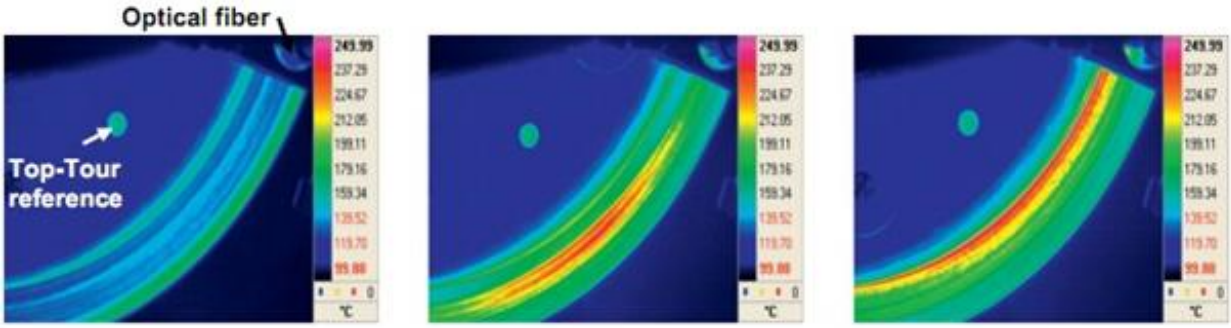

Figura 3.5 - Surgimento de bandas quentes ao longo das frenagens [Kasem et al., 2010].

3.6. Características do procedimento

As normas de certificação para ensaios de pastilhas de freio possuem, em sua maioria, características de ensaio semelhantes. A certificação dos materiais de fricção exige uma sequência de testes, que é distinta para cada equipamento utilizado (dinamômetro inercial, chase, fast e krauss). Além disso, os procedimentos sofrem atualizações constantes no dia-a-dia da indústria automotiva devido à complexidade envolvida no processo [Agudelo e Ferro, 2005].

Os ensaios rodados em dinamômetro – equipamento utilizado nos testes desse trabalho – basicamente possuem as seguintes características [Infantini, 2008]:

- **Caracterização Green**: é a primeira etapa a ser realizada em grande parte dos procedimentos de ensaio, e tem como objetivo verificar o desempenho do sistema de freio com o material de fricção verde (novo). Responsável por simular o desempenho do sistema de freio quando o veículo recém saiu de fábrica.
- **Assentamento**: etapa realizada após a caracterização Green e consiste em uma sequência de frenagens para que o material de fricção se acomode melhor ao rotor, aumentando a área de contato do par de fricção.
- **Fade**: etapa realizada com intuito de avaliar o impacto do aumento da temperatura sobre o desempenho das frenagens. São realizadas diversas frenagens em curto intervalo de tempo a fim de elevar a temperatura. Os materiais de fricção geralmente apresentam queda em seu desempenho com o aumento da temperatura. Esse fenômeno ocorre devido à degradação da resina fenólica, matriz orgânica de compósitos, e aumento de desgaste do material, ao passo que a temperatura aumenta [Bulthé et al., 2007].
- **Recuperação**: tem como objetivo avaliar o desempenho do material de fricção logo após uma etapa com elevadas temperaturas, como o fade. Uma sequência de frenagens é empregada com o propósito de verificar a recuperação do desempenho do material de fricção em questão, sendo considerados como bons materiais aqueles capazes de apresentar recuperação adequada de suas características de desempenho rapidamente.
- **Caracterização**: essa etapa tem como objetivo caracterizar a interação entre o material avaliado e o sistema de freio, sendo efetuada logo após cada uma das etapas descritas anteriormente. Pode ainda ser utilizada para analisar a recuperação do desempenho após a etapa fade.

3.7. Estudos realizados

Alguns autores analisaram a variação da emissividade e temperatura ao longo de frenagens, porém através de metodologias distintas. Em um trabalho realizado por Thevenet et al., 2009, mostrou-se o desenvolvimento de um pirômetro de dupla onda, que permite aquisição de temperatura na faixa de 200°C a 800 °C, com diâmetro de leitura de 2,4 mm. A calibração do pirômetro foi efetuada utilizando a temperatura conhecida de um corpo negro, e também comparou-se os resultados obtidos com um pirômetro comercial de dupla onda.

Foram realizadas duas sequências distintas de frenagens, uma de desaceleração e outra em velocidade angular constante, denominado ensaio de arrasto. As Figuras 3.6 e 3.7 mostram o comportamento da temperatura e emissividade, sendo que $T_{\lambda 1/\lambda 2}$ é a temperatura medida pelo pirômetro de dupla onda; $T_{\lambda 1}$ e $T_{\lambda 2}$ temperatura medida em uma superfície em que se assume comportamento de corpo negro; T_{pyro} temperatura do pirômetro de única onda, onde se assume comportamento de corpo negro à superfície; T_{Disc} temperatura medida por termopar inserido 6 mm abaixo da superfície de fricção; ε emissividade da superfície medida a partir do pirômetro de dupla onda.

Os referidos procedimentos têm as seguintes características:

- **Arrasto**: rotação de 1000 rpm, torque de 50 Nm e pressão de contato de 1,05 bar. Utilizando rotação de 1500 rpm e inércia de 8 kg.m² .
- **Desaceleração**: a velocidade angular sofre decréscimo de 1292 a 373 rpm, com pressão de contato de 24,6 bar.

Nota-se nas Figuras 3.6 e 3.7 que em ambos os procedimentos realizados, o aumento da temperatura, medidas pelo pirômetro de dupla onda, acarreta em uma queda da emissividade quase que em igual proporção.

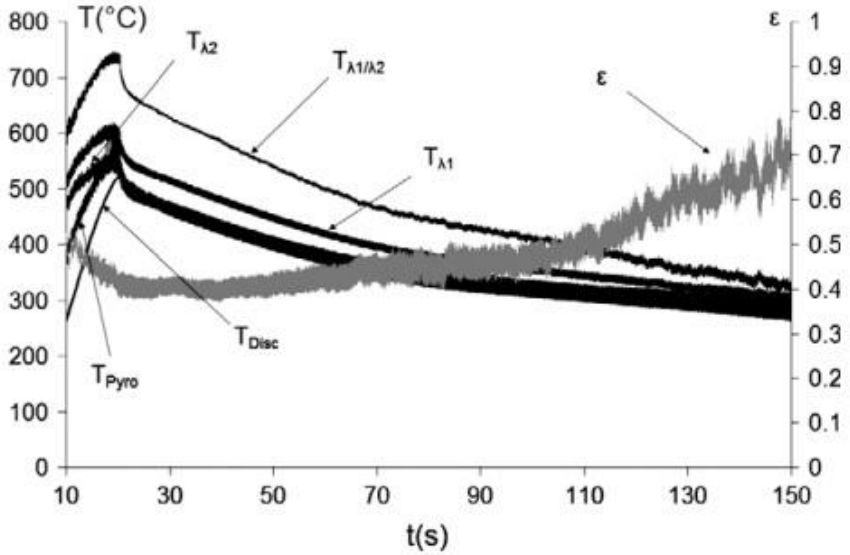

Figura 3.6 – Variação das temperaturas e emissividade durante as frenagens de desaceleração [Thevenet et al., 2009].

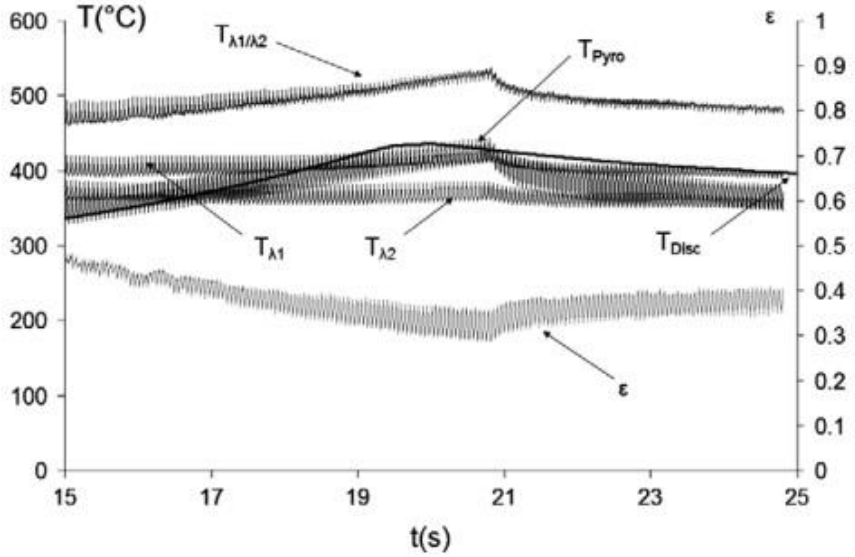

Figura 3.7 – Variação das temperaturas e emissividade durante os ensaios de arrasto [Thevenet et al., 2009].

No experimento de Kasem et al., 2010, foi observada a variação da temperatura com ensaios efetuados em um tribômetro em escala reduzida, por meio de um pirômetro de dupla onda. Além disso, utilizou-se uma câmera termográfica, na qual foram reintroduzidos os valores de emissividade obtidos com o pirômetro, já que a medição termográfica exige o conhecimento prévio da emissividade.

O disco e a pastilha de freio, utilizados nos estudos acima mencionados, são materiais comerciais. O diâmetro da região de leitura do pirômetro foi de 2,4 mm, localizado num raio médio de fricção.

Foram realizadas frenagens sucessivas para aquecimento do disco utilizando rotação de 1500 rpm e inércia de 8 kg.m². Ao atingir temperatura de 220°C, aplicou-se a pressão de 0,6 MPa no disco (parâmetros utilizados para simular uma frenagem total de um carro em velocidade inicial de aproximadamente 80 km/h).

Os comportamentos da temperatura e da emissividade observados no referido teste são mostrados na Figura 3.8.

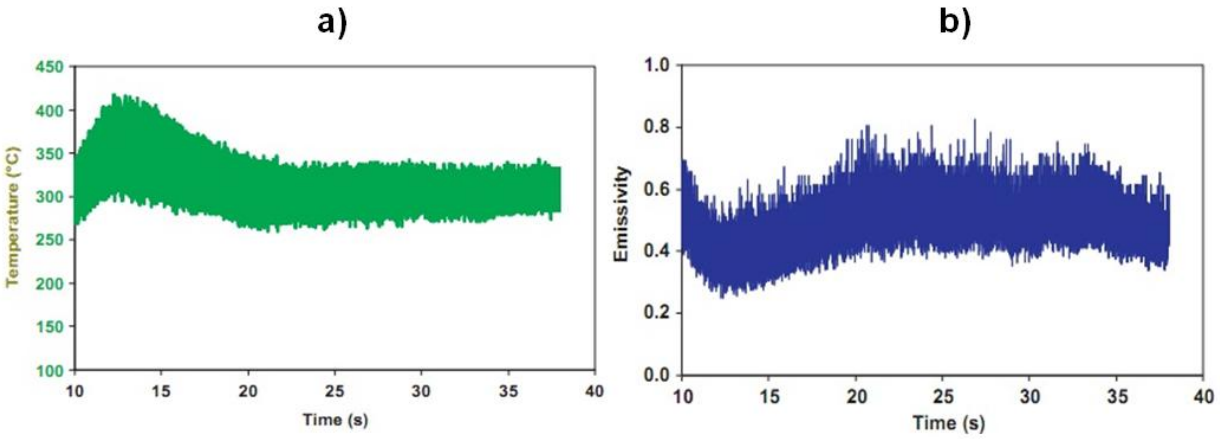

Figura 3.8. – Evolução da a) temperatura e b) emissividade do disco ao longo do ensaio [Kasem et al., 2010].

A metodologia apresentada no presente trabalho utiliza equipamentos de baixo custo e que viabilizam mensurar a temperatura desde 0°C, o que nos possibilita melhor acompanhamento da evolução da temperatura nos testes de frenagem, já que alguns fenômenos são perceptíveis a temperaturas abaixo de 200°C.

4. METODOLOGIA

Os experimentos de frenagem foram realizados no laboratório de teste da empresa FRAS-LE, Caxias do Sul/RS. A Figura 4.1 mostra a bancada experimental, um dinamômetro inercial, utilizado durante os ensaios do presente trabalho.

Figura 4.1 – Dinamômetro inercial empregado nos testes.

As medições de temperatura no disco de freio foram realizadas através de um sensor infravermelho. O campo de visão do sensor infravermelho foi direcionado sobre a pista de atrito (região de contato entre a pastilha e o disco de freio). Ao mesmo tempo, termopares foram instalados em ambos os lados do disco, a 1mm da superfície. As Figuras 4.2 e 4.3 mostram o esquema representativo dos termopares e do pirômetro, respectivamente.

O pirômetro utilizado possui um único comprimento de onda, o que implica em algumas restrições à utilização tão somente do pirômetro para medição, já que a emissividade do objeto varia conforme a temperatura. Assim, utilizou-se a medida do termopar como referência para a determinação das curvas de emissividade nas diversas etapas de frenagem.

O modelo de pirômetro comercial utilizado possui as seguintes características: emissividade ajustável de 0 (zero) à 1 (um); leitura realizada em apenas um comprimento de onda; resolução ótica (relação entre distância do sensor ao objeto e o diâmetro da área de leitura) de 20:1. No ensaio a distância entre o cabeçote do pirômetro e disco de freio é de 60 mm, ou seja, o diâmetro da área de leitura é de 3 mm.

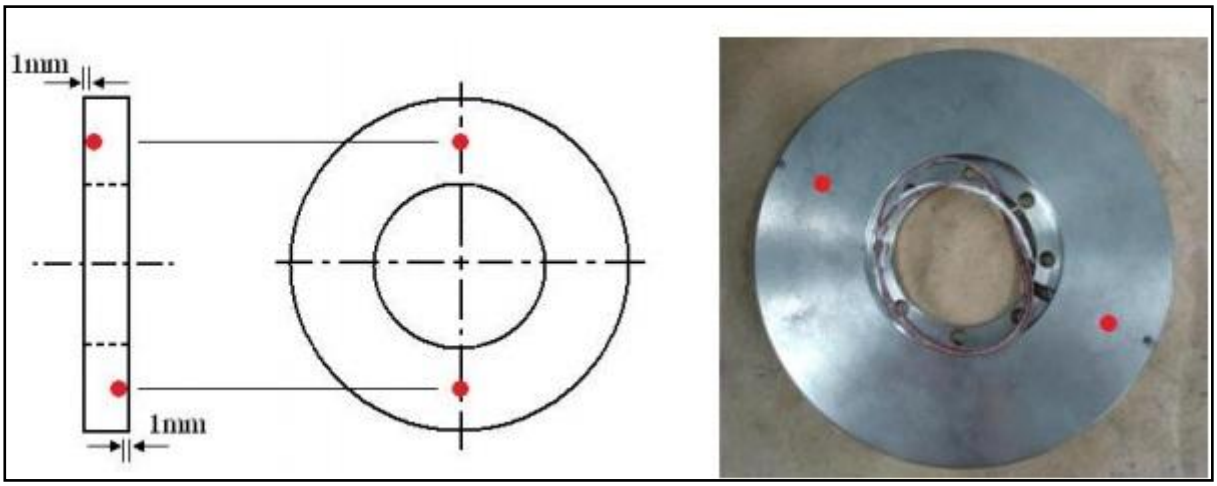

Figura 4.2 - Instrumentação com termopares no disco de freio

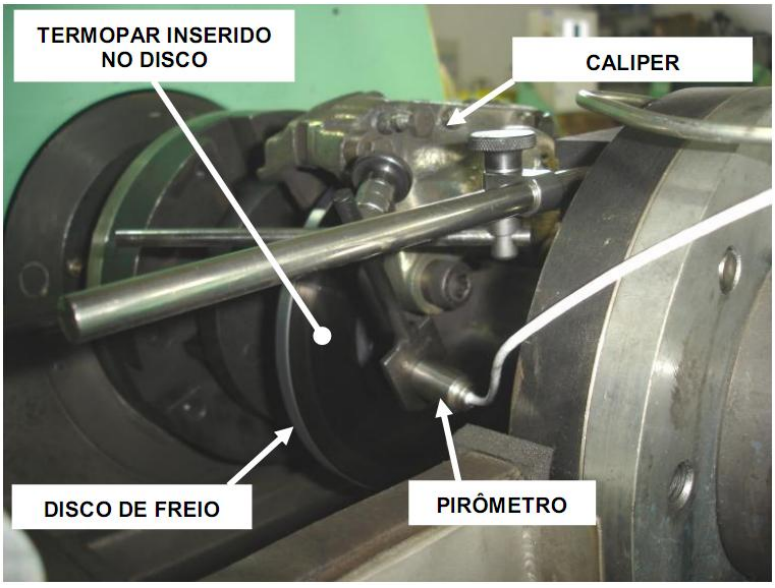

Figura 4.3 – Pirômetro posicionado frente à pista de atrito [Dillenburg, 2007].

As etapas de avaliação empregadas foram realizadas na seguinte sequência: assentamento, caracterização e fade. Foram realizados dois testes, alterando entre eles o número frenagens em cada etapa. Primeiramente o disco é aquecido com frenagem; para o inicio da etapa de assentamento, é deixado para resfriamento até a temperatura gatilho (temperatura de início da etapa) de 100°C. Aciona-se novamente as pastilhas e, para o assentamento, o disco sofre uma redução de velocidade de 80km/h para 30km/h. Posteriormente à etapa de assentamento, o disco é deixado resfriar até a temperatura de 100°C, condição necessária para início da etapa fade.

Na etapa fade o disco é freado e resfriado diversas vezes, sendo que a cada frenagem a temperatura gatilho é maior que a no passo anterior. É importante ressaltar que existe um período entre cada frenagem que depende do tempo de resfriamento do disco até a temperatura para próxima frenagem (gatilho).

A terceira etapa, caracterização, é feita com parâmetros de temperatura de gatilho e redução de velocidade análogos aos da etapa de assentamento. Ao final da caracterização ocorrem mais duas sequências fade-caracterização.

As frenagens de assentamento e caracterização foram realizadas com uma pressão de contato entre 30 bar e 32 bar, e temperatura de gatilho das frenagens de 100°C.

Tabela 4.1 - Número de frenagens em ambos os testes.

Etapas	Número de Frenagens	
	Teste 1	Teste 2
Assentamento	29	17
1° Fade	15	15
1° caracterização	18	6
2° Fade	15	15
2° Caracterização	18	18
3° Fade	15	15
3° Caracterização	18	6

As frenagens da etapa de fade foram realizadas com redução de velocidade de 100km/h a 0km/h, com uma sequência de temperaturas de gatilho aproximadas de: 100, 210, 276, 321, 356, 387, 411, 432, 452, 473, 484, 501, 510, 524, 534°C. Deve-se lembrar que ao final de cada frenagem o disco deve ser capaz de se resfriar até atingir a temperatura de gatilho para a próxima frenagem.

Foram utilizados materiais distintos para as pastilhas de freio nos testes realizados, para o Teste 1 material A e para o Teste 2 material B.

Importante salientar que os valores de temperatura e emissividade são medidos e determinados somente para o início das etapas de frenagem. Encontram-se abaixo as equações utilizadas neste trabalho e logo após o procedimento de cálculo.

Conforme Incropera,2008, a intensidade de radiação e a emissividade são definidas como:

$$I = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \tag{4.1}$$

onde *I* é intensidade de radiação: Wm^{-2}; ε é emissividade; $\sigma = 5{,}67 * 10^{-8}$ é constante de constante de Stefan-Boltzmann: $Wm^{-2}K^{-4}$; *T* é temperatura:K. A emissividade é definida pela equação 4.2:

$$\varepsilon = \frac{I}{I'} \tag{4.2}$$

sendo I a intensidade de irradiação calculada para a temperatura medida pelo pirômetro e I' a intensidade de radiação calculada para a temperatura medida pelo termopar.

O procedimento de cálculo da temperatura medida pelo pirômetro segue a seguinte metodologia:

1. Mede-se a temperatura através do pirômetro e do termopar aplicando-se um valor unitário de emissividade;
2. Calculam-se as intensidades de radiação para as temperaturas medidas por termopar e pirômetro por meio da equação 4.1;
3. Determina-se a emissividade do disco através da equação 4.2;
4. Calcula-se a emissividade média para todas as frenagens;
5. Calcula-se a emissividade média para as 3 etapas (assentamento, caracterização e fade);
6. Calcula-se a emissividade média para cada frenagem das etapas;

7. Calcula-se a temperatura corrigida do pirômetro reintroduzindo o valor médio de emissividade (para todas as frenagens) e de intensidade de radiação do pirômetro, através da equação 4.1.
8. Calcula-se a temperatura corrigida do pirômetro reintroduzindo o valor médio de emissividade (para cada etapa) e de intensidade de radiação do pirômetro, através da equação 4.1.
9. Calcula-se a temperatura corrigida do pirômetro reintroduzindo o valor médio de emissividade (de cada frenagem) e de intensidade de radiação do pirômetro, através da equação 4.1.

Segue abaixo as vantagens e desvantagens de utilização da metodologia apresentada.

- Vantagens
  - Mensuração da temperatura na superfície do disco;
  - Possibilita mensurar a temperatura em discos delgados;
  - Custo relativamente baixo;
  - Fácil instrumentação (não é necessário perfurar o disco).
- Desvantagens
  - Necessidade de se conhecer a emissividade do disco;
  - Emissividade não uniforme da superfície do disco;

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram que entre a última frenagem do assentamento e a primeira frenagem da etapa fade o tempo de resfriamento do disco para que chegue a temperatura de gatilho é maior do que o tempo de resfriamento do disco entre as frenagens durante a etapa fade. O mesmo fenômeno ocorre entre a última frenagem das etapas de caracterização e fade, e entre a última frenagem das etapas de fade e caracterização.

Tabela 5.1 – Tempo de início das frenagens no Teste 1.

	Tempo médio para início da 1° frenagem das etapas – Teste 1	Tempo médio de início das demais frenagens das etapas – Teste 1
Assentamento	00:00:29	00:01:55
Fade	00:02:15	00:00:36
Caracterização	00:06:52	00:02:09

Tabela 5.2 - Tempo de início das frenagens no Teste 2.

	Tempo médio para início da 1° frenagem das etapas - Teste 2	Tempo médio de início das demais etapas - Teste 2
Assentamento	00:01:50	00:05:26
Fade	00:06:01	00:00:46
Caracterização	00:26:38	00:06:21

Para início do procedimento esquenta-se o disco com frenagens e assim que se atinge a temperatura de 100°C faz-se a primeira frenagem de assentamento. Durante a etapa de assentamento o disco demora mais para resfriar à 100°C entre o fim de uma frenagem e o início de outra. A primeira frenagem da etapa fade é realizada com a mesma temperatura de gatilho da etapa de assentamento, por isso o tempo de início é similar. Já durante a etapa fade

a temperatura de gatilho aumenta de frenagem a frenagem, o que incorre na diminuição do tempo necessário de resfriamento do disco entre frenagens. A última frenagem da etapa fade inicia aproximadamente a 534°C, o que influencia diretamente o tempo de início da primeira frenagem da caracterização, pois o disco necessita atingir novamente 100°C.

Percebe-se então que o maior tempo para o gatilho das frenagens no início das etapas de fade e caracterização é devido ao maior tempo necessário para o resfriamento do disco entre um ciclo e outro de frenagens.

A Figura 5.1 apresenta os resultados de emissividade dos procedimentos experimentais realizados neste trabalho.

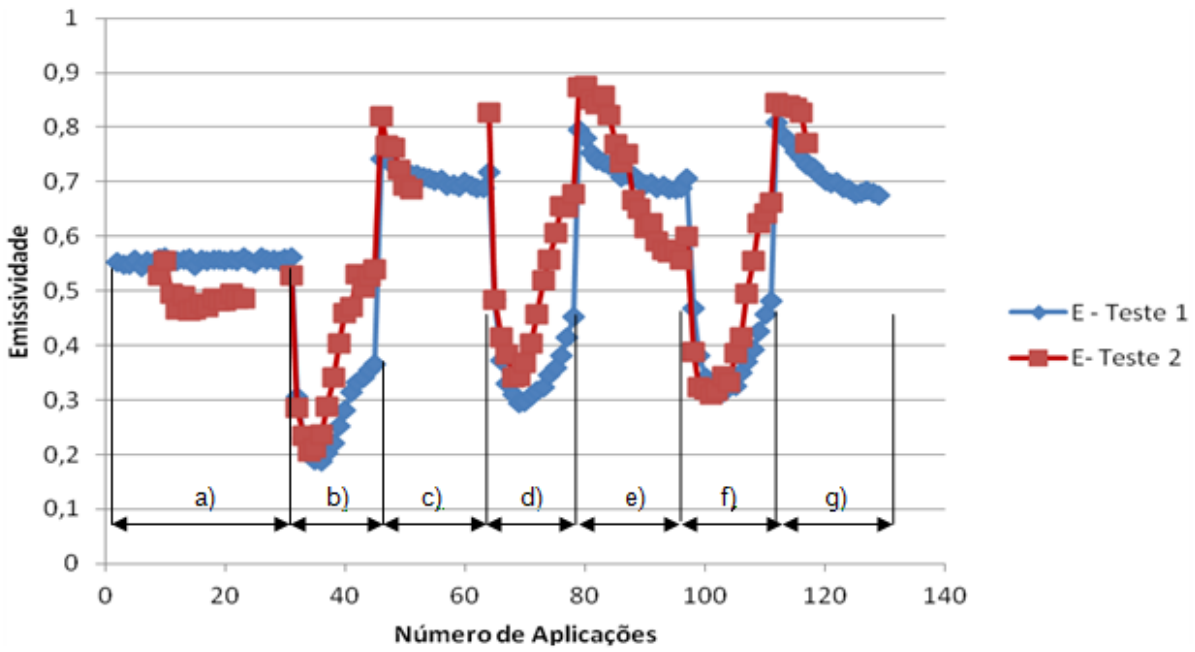

Figura 5.1 – Comportamento da emissividade no início das etapas. a) assentamento; b), d) e f) fade; c), e) e g) caracterização.

Nota-se que a emissividade em ambos os testes possui maior variação nas etapas de fade e caracterização, em comparação com a etapa de assentamento.

Outro ponto interessante é que se pode notar a queda da emissividade no início da etapa fade, devido ao aumento da temperatura e ao baixo tempo de exposição do aço ao ambiente (ainda não ocorre oxidação), já durante a etapa fade a temperatura atinge valores que favorecem a oxidação do disco, causando o aumento da emissividade [Dillenburg, 2007]. O aumento da emissividade no início das etapas de caracterização ocorre devido à queda da temperatura e ao aumento do tempo de exposição do aço quente ao ambiente, o que acaba novamente por ocasionar em oxidação da superfície do disco. O efeito oposto ocorre ao longo da caracterização, onde a queda da emissividade se dá devido à diminuição do tempo de exposição do aço ao ambiente.

A influência da oxidação no aumento da emissividade em discos de freio já foi observada em estudo experimental realizado por Dillenburg, 2007.

As duas primeiras formas de correção da emissividade do pirômetro infravermelho são apresentadas na Tabela 5.3, que seriam a emissividade média de todas as frenagens do procedimento experimental e a emissividade média em cada etapa (assentamento, caracterização e fade).

Tabela 5.3 - Emissividade média nos Testes 1 e 2.

Teste	1		2	
Etapas	Emissividade média total	Emissividade média por etapa	Emissividade média total	Emissividade média por etapa
Assentamento	0,55	0,56	0,55	0,49
Caracterização		0,71		0,74
Fade		0,36		0,45

Outra forma de se realizar a correção da emissividade para a medição da temperatura medida pelo pirômetro consiste em realizar a média da emissividade em cada frenagem das etapas, como mostra a Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Emissividade média em cada frenagem das etapas

Emissividade média em cada frenagem das etapas					
	Teste 1		Teste 2		
	Média das 3 repetições		Média das 3 repetições		
Frenagem	Caracterização	Fade	Assentamento	Caracterização	Fade
1	0,78	0,66	0,53	0,85	0,65
2	0,77	0,42	0,56	0,83	0,39
3	0,75	0,33	0,49	0,82	0,32
4	0,74	0,29	0,47	0,8	0,3
5	0,73	0,28	0,49	0,79	0,29
6	0,72	0,26	0,46	0,76	0,3
7	0,72	0,27	0,47		0,33
8	0,71	0,28	0,48		0,36
9	0,71	0,3	0,47		0,42
10	0,7	0,32	0,49		0,47
11	0,7	0,34	0,48		0,51
12	0,69	0,36	0,48		0,56
13	0,69	0,38	0,49		0,59
14	0,69	0,41	0,49		0,61
15	0,69	0,43	0,49		0,63
16	0,69		0,53		
17	0,68		0,48		
18	0,68				

Vemos na Tabela 5.4 que se realizou a média apenas até a 6° frenagem do Teste 2 na etapa de caracterização devido a natureza do procedimento seguido, que aplica seis frenagens na primeira e terceira caracterização e dezoito na segunda (conforme Tabela 4.1). Portanto, entre as frenagens sete e oito utilizaram-se os valores de emissividade da segunda caracterização para o cálculo posterior da temperatura corrigida do pirômetro (Figuras 5.3 e

5.6). Para a etapa de assentamento no Teste 1, o valor da emissividade apresentou-se praticamente constante em 0,56 para as 29 frenagens.

Ainda pode-se realizar a média das emissividades em cada frenagem das etapas entre os dois testes. O objetivo desse procedimento consiste em obter uma emissividade média envolvendo materiais distintos.

Tabela 5.5 – Emissividade média entre os dois testes em cada frenagem das etapas.

Emissividade média entre os dois testes para cada frenagem das etapas			
Frenagem	Assentamento	Caracterização	Fade
1	0,54	0,83	0,66
2	0,56	0,82	0,4
3	0,53	0,8	0,33
4	0,51	0,79	0,3
5	0,53	0,8	0,28
6	0,51	0,77	0,28
7	0,51	0,74	0,3
8	0,52	0,72	0,32
9	0,51	0,73	0,36
10	0,52	0,68	0,39
11	0,52	0,68	0,43
12	0,52	0,65	0,46
13	0,53	0,66	0,49
14	0,52	0,64	0,51
15	0,52	0,63	0,53
16	0,54	0,63	
17	0,52	0,63	
18		0,62	

Para a etapa de assentamento, foi considerada uma emissividade média de 0,56 para as frenagens de 18 a 29.

Estuda-se então o comportamento da temperatura para cada uma das correções de emissividade, acima propostas, para ambos os testes realizados.

O comportamento da temperatura (para a correção através da emissividade total e por etapa) no início de cada etapa de frenagem durante o Teste 1 é mostrado na Figura 5.2.

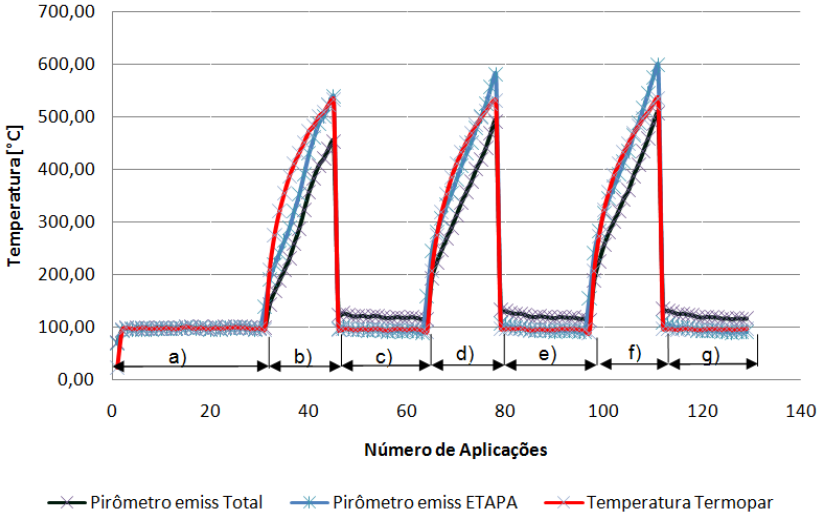

Figura 5.2 – Comportamento da temperatura no Teste 1. a) assentamento; b), d) e f) fade; c), e) e g) caracterização.

O primeiro teste realizado mostrou semelhança entre a temperatura medida pelo termopar e a temperatura medida pelo pirômetro, já corrigida através da reintrodução da emissividade (valores apresentados na Tabela 5.3). Tpir emiss total é a corrigida através da emissividade média durante todo o procedimento experimental; Tpir emiss etapa é corrigida através da emissividade média de cada etapa.

Encontrou-se melhor aproximação térmica do pirômetro com os resultados de termopar quando a correção da temperatura foi determinada pela média da emissividade de cada etapa. Isto se deve ao fato de que a emissividade média por etapa abrange melhor as variações dos dados em comparação com a emissividade média de todo o teste.

O comportamento da temperatura no início de cada etapa de frenagem durante o Teste 1 (para a correção através da emissividade média em cada frenagem das etapas) é mostrado na Figura 5.3.

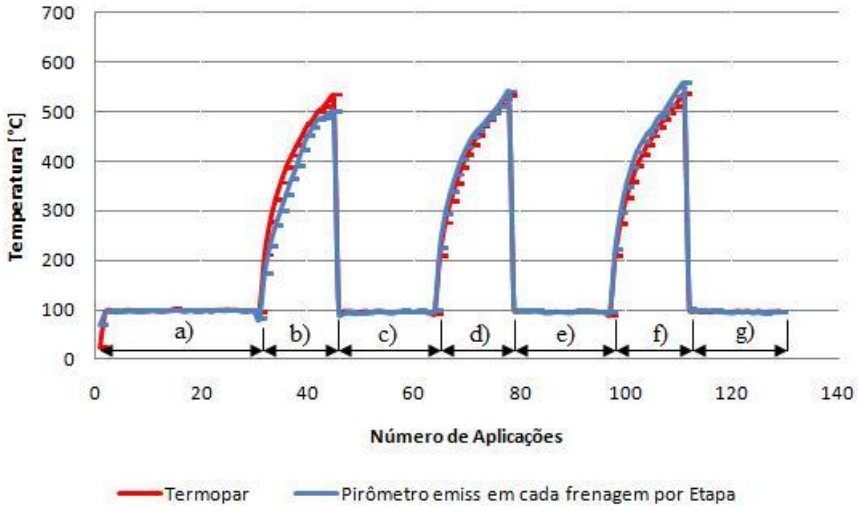

Figura 5.3 – Comportamento da temperatura no Teste 1. a) assentamento; b), d) e f) fade; c), e) e g) caracterização.

A Figura 5.3 apresenta o comparativo das temperaturas de termopar e pirômetro, onde para o pirômetro foram utilizados os valores de emissividade da Tabela 5.4.

Ao utilizar a emissividade média em cada frenagem das etapas como correção, apesar de ser um procedimento mais trabalhoso ao usuário, permite evidente semelhança entre as temperaturas medidas com os dois instrumentos.

O comportamento da temperatura no início de cada etapa de frenagem durante o Teste 1 (para a correção através da emissividade média entre os dois testes em cada frenagem das etapas) é mostrado na Figura 5.4.

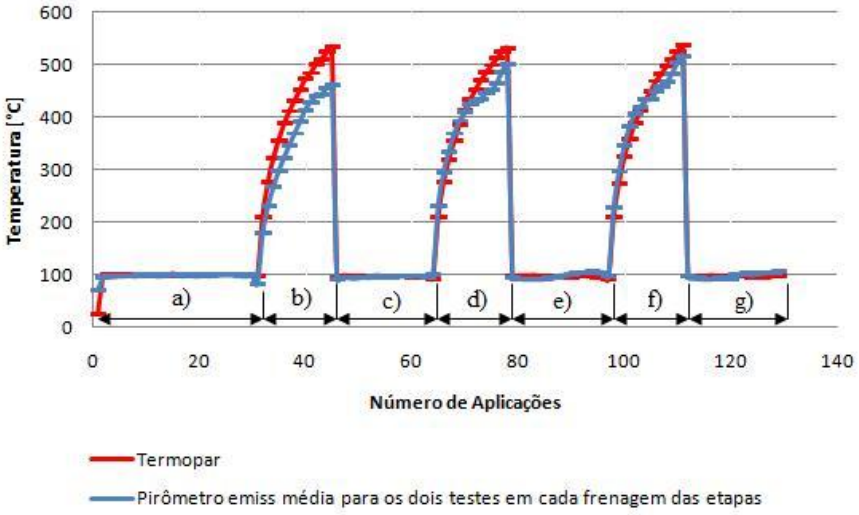

Figura 5.4 – Comportamento da temperatura no Teste 1. a) assentamento; b), d) e f) fade; c), e) e g) caracterização.

A Figura 5.4 apresenta o comparativo das temperaturas de termopar e pirômetro, onde para o pirômetro foram utilizados os valores de emissividade da Tabela 5.5.

Ao contrário do comportamento da temperatura corrigida na Figura 5.3, as temperaturas durante as etapas de fade para essa forma de correção continuam apresentando notável diferença entre os instrumentos utilizados.

A Figura 5.5 apresenta o comportamento da temperatura no início das etapas de frenagem durante o Teste 2 (para a correção através da emissividade total e por etapa).

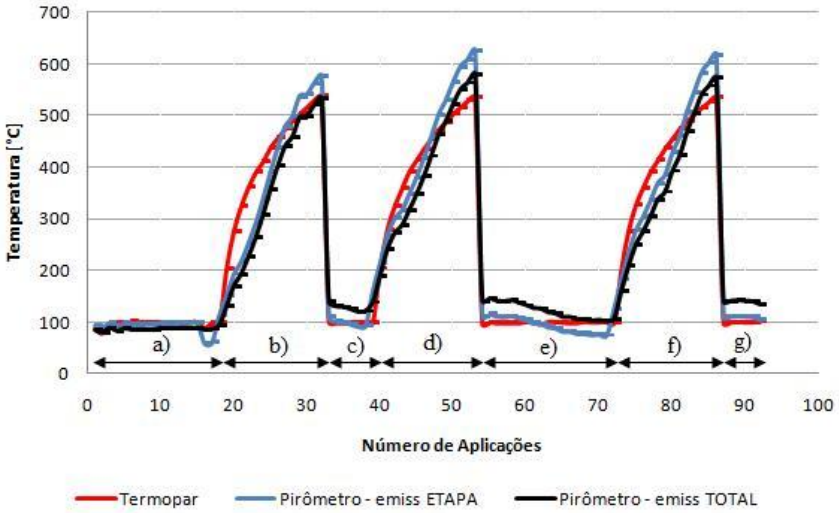

Figura 5.5 – Comportamento da temperatura no Teste 2. a) assentamento; b), d) e f) fade; c), e) e g) caracterização.

A Figura 5.5 faz um comparativo entre a temperatura de termopar e a do pirômetro, para o qual foram utilizados os valores de emissividades da Tabela 5.3. Tpir emiss total é a temperatura medida pelo pirômetro e corrigida através da emissividade média durante todo o procedimento experimenta; Tpir emiss etapa é a temperatura medida pelo pirômetro e corrigida através da emissividade média de cada etapa (Assentamento, Caracterização e Fade).

O comportamento da temperatura do pirômetro mostrou-se similar a temperatura do termopar, contudo com notórias diferenças quantitativas, principalmente durante a etapa fade.

O comportamento da temperatura no início de cada etapa de frenagem durante o Teste 2 (para a correção através da emissividade média em cada frenagem das etapas) é mostrado na Figura 5.6.

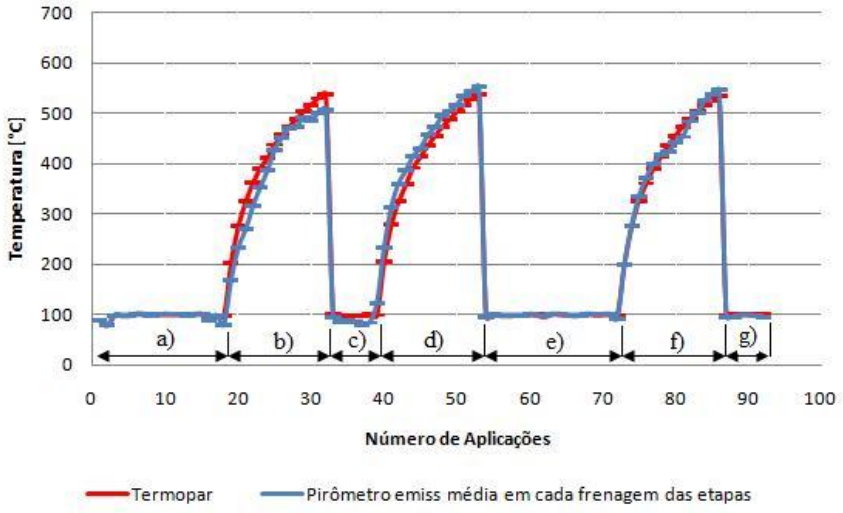

Figura 5.6 - Comportamento da temperatura no Teste 2. a) assentamento; b), d) e f) fade; c), e) e g) caracterização.

A Figura 5.6 correlaciona as temperaturas de termopar e de pirômetro, para o qual foram reintroduzidos valores de emissividade conforme Tabela 5.4. Assim como no Teste 1 essa forma de correção da emissividade do pirômetro possibilitou um comportamento muito parecido ao longo de todo o procedimento, variações mais acintosas nas últimas frenagens do primeiro fade.

O comportamento da temperatura no início de cada etapa de frenagem durante o Teste 2 (para a correção através da emissividade média entre os dois testes em cada frenagem das etapas) é mostrado na Figura 5.7.

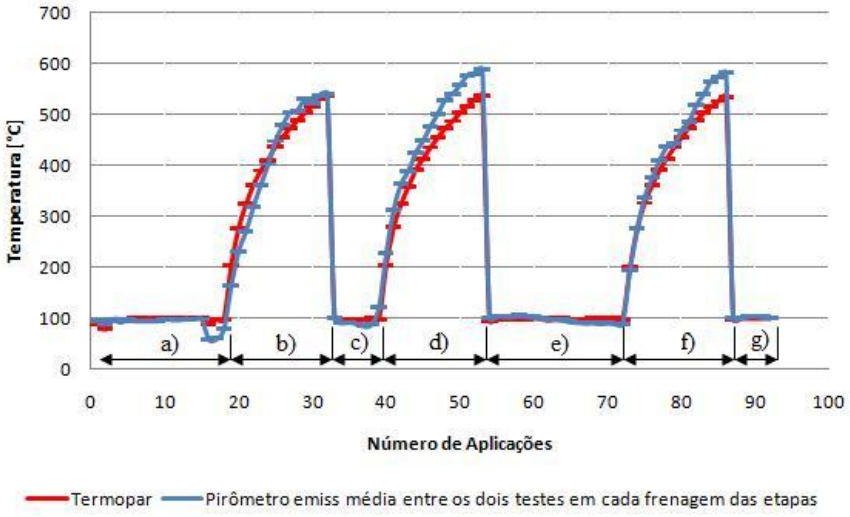

Figura 5.7 – Comportamento da temperatura Teste2. a) assentamento; b), d) e f) fade; c), e) e g) caracterização.

A Figura 5.7 apresenta o comparativo das temperaturas de termopar e pirômetro, onde foram utilizados os valores de emissividade da Tabela 5.5.

A curva da temperatura de pirômetro corrigida apresenta comportamento similar à temperatura de termopar, com exceção das últimas frenagens do segundo e terceiro fade.

5.1. Erros e Incertezas

Para o estudo da incerteza de medição da temperatura através do pirômetro, fez-se a análise nas etapas de assentamento e caracterização para as distintas formas de correção da emissividade.

As Tabelas 5.6 e 5.7 não apresentam a média e incerteza para a etapa fade, pois a temperatura de cada frenagem aumenta ao longo da etapa.

Tabela 5.6 – Incerteza de medição para o Teste 1.

		Ttermopar [°C]	Tpir - emiss total [°C]	Tpir - emiss etapa [°C]
Assentamento	Média	95,50	97,38	96,92
	Desvio [95%]	26,95	10,33	10,31
Caracterização	Média	96,06	120,36	95,85
	Desvio [95%]	2,10	9,33	8,75

Tabela 5.7 - Incerteza de medição para o Teste 2.

		Ttermopar [°C]	Tpir - emiss total [°C]	Tpir - emiss etapa [°C]
Assentamento	Média	97,82	86,46	97,52
	Desvio [95%]	11,88	5,29	5,45
Caracterização	Média	99,25	124,5	98,18
	Desvio [95%]	4,39	33,82	31,58

Nas Tabelas 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11 não foram calculadas as médias e desvios para a etapa de assentamento, pois em ambos os testes foram realizas apenas uma repetição, o que implicaria em desvio padrão zero.

As incertezas na etapa de caracterização para o Teste 1 mostraram-se baixas se comparadas com as apresentadas no Teste 2 para a mesma etapa.

As variações da incerteza de medição para essa etapa, comparando-se os testes, sugerem que a incerteza da metodologia proposta depende do procedimento experimental e do material utilizado, apesar de verifica-se que as incertezas para etapa fade foram significativas em ambos os testes.

Durante a primeira etapa fade os valores de emissividade são significativamente menores do que os encontrados durante a segunda e terceira etapa (Figura 5.1), e quando o valor médio da emissividade (Tabela 5.4 e 5.5) for introduzido na equação 4.1 para correção da temperatura de início de cada frenagem das três etapas, o resultado será o aumento do desvio padrão para as temperaturas médias de cada frenagem das etapas.

Tabela 5.8 - Incerteza de medição para emissividade média em cada frenagem das etapas.

	Caracterização - Teste 1		Fade - Teste 1	
Frenagem	Média [°C]	Desvio 95%[°C]	Média [°C]	Desvio95%[°C]
1	96,82	11,41	91,37	17,74
2	96,83	4,79	206,63	56,90
3	96,49	4,53	272,21	73,42
4	95,50	5,19	318,23	84,60
5	96,51	5,75	352,63	90,11
6	96,51	2,27	384,16	90,02
7	94,85	2,96	409,28	78,97
8	95,52	2,00	430,74	71,65
9	95,85	2,90	450,31	47,99
10	95,51	1,39	469,93	35,67
11	94,85	1,28	483,53	29,43
12	95,85	1,28	498,82	28,89
13	96,18	3,68	509,92	42,46
14	96,51	1,38	523,73	50,49
15	95,18	3,20	532,86	57,16
16	96,52	2,13		
17	95,52	1,52		
18	95,18	1,18		

Tabela 5.9 - Incerteza de medição para emissividade média em cada frenagem das etapas.

	Caracterização - Teste 2		Fade - Teste 2	
Frenagem	Média [°C]	Desvio95%[°C]	Média [°C]	Desvio95%[°C]
1	95,46	1,17	97,48	42,97
2	94,29	13,49	200,72	63,44
3	95,33	12,41	274,50	79,29
4	94,18	15,97	321,50	92,73
5	91,67	21,27	357,86	73,81
6	92,70	15,17	389,38	63,66
7			412,17	45,45
8			436,13	35,45
9			455,19	31,16
10			473,15	40,44
11			488,00	30,93
12			503,10	25,42
13			515,28	51,88
14			527,82	44,58
15			535,83	47,53

Tabela 5.10 - Incerteza de medição para emissividade média entre os dois testes em cada frenagem das etapas.

	Caracterização - Teste 1		Fade - Teste 1	
Frenagem	Média [°C]	Desvio95%[°C]	Média [°C]	Desvio95%[°C]
1	93,30	5,55	92,08	17,78
2	92,82	2,20	211,56	57,49
3	92,51	2,82	273,03	73,53
4	91,29	2,00	315,38	84,20
5	91,56	2,66	349,28	89,63
6	92,51	4,87	373,96	88,62
7	92,87	2,73	391,26	76,88
8	94,49	3,74	409,23	69,46
9	93,97	5,30	418,33	45,87
10	97,21	4,26	432,23	33,86
11	97,10	5,01	443,98	27,89
12	99,37	6,02	452,64	27,16
13	99,38	5,02	463,52	39,94
14	101,02	7,78	481,60	47,82
15	100,66	8,24	493,13	54,34
16	102,10	7,92		
17	100,70	7,28		
18	101,16	11,35		

Tabela 5.11 - Incerteza de medição para emissividade média entre os dois testes em cada frenagem das etapas.

	Caracterização - Teste 2		Fade - Teste 2	
Frenagem	Média [°C]	Desvio[°C]	Média[°C]	Desvio[°C]
1	100,46	1,19	96,76	42,89
2	99,97	13,70	195,69	62,77
3	100,99	12,60	273,67	79,17
4	100,14	16,23	324,33	93,17
5	98,56	21,67	361,19	74,20
6	98,35	15,41	399,21	64,60
7			428,94	46,56
8			455,98	36,44
9			483,60	32,37
10			505,99	42,22
11			522,37	32,33
12			542,44	26,71
13			554,91	54,49
14			564,35	46,61
15			570,55	49,57

As tabelas a seguir mostram os erros obtidos durante as etapas, onde se faz a diferença entre a temperatura de termopar e a temperatura do pirômetro, para as diferentes formas de correção da emissividade propostas no presente trabalho.

As Tabelas 5.12 e 5.13 mostram que somente os valores apresentados nas etapas de assentamento são compatíveis aos apresentados por Kasem et al., 2010, e Thevenet et al.,2009 (8 e 14°C respectivamente). Os valores de assentamento e caracterização são substancialmente menores do que os obtidos durante a etapa fade, pois durante a etapa fade a emissividade varia mais ao longo das frenagens, o que não possibilita que a média realizada ao longo de todo o procedimento ou ao longo das três etapas de fade lhe forneça um comportamento próximo ao apresentado na Figura 5.1.

Tabela 5.12 – Diferença entre Ttermopar e Tpir corrigida Teste 1.

	Tpir emissividade total	Tpir emissividade etapa
Máximo ΔT [°C] Assentamento	1,70	2,16
Máximo ΔT[°C] Caracterização	36,86	11,44
Máximo ΔT[°C] Fade	156,74	98,34

Tabela 5.13 - Diferença entre Ttermopar e Tpir corrigida Teste 2.

	Tpir emissividade total	Tpir emissividade etapa
Máximo ΔT[°C] Assentamento	16,04	11,41
Máximo ΔT[°C] Caracterização	45,51	35,77
Máximo ΔT[°C] Fade	134,55	108,01

As Tabelas 5.14 e 5.15 mostram que os valores de temperaturas obtidas por pirômetro (Figuras 5.3, 5.4, 5.6 e 5.7) para as etapas de assentamento e caracterização apresentam erro baixo se comparado ao apresentado nos trabalhos de Kasem et al., 2010, e Thevenet et al.,2009 (8 e 14°C respectivamente). Contudo os valores obtidos para a etapa Fade apresentam valores elevados se comparado aos trabalhos referidos.

Tabela 5.14 - Máximo ΔT[°C] na medição do Teste 1.

	Pirômetro emissividade média em cada frenagem das etapas			Pirômetro emissividade média entre os dois testes para cada frenagem das etapas		
Frenagem	Assentamento	Caracterização	Fade	Assentamento	Caracterização	Fade
1	1,14	4,84	14,89	1,13	4,84	14,19
2	1,33	2,96	36,83	3,63	5,16	32,24
3	0,12	3,04	47,02	6,07	5,92	46,27
4	2,16	2,55	52,23	5,26	6,14	54,85
5	0,04	1,87	55,88	5,44	7,22	58,96
6	0,56	1,68	55,26	7,31	5,41	64,64
7	0,56	1,25	47,89	5,79	2,74	64,7
8	0,82	0,32	43,21	7,65	1,76	63,44
9	0,29	0,86	29,87	6,40	3,67	60,59
10	0,02	0,96	22,54	5,68	3,35	59,26
11	0,08	0,53	16,58	6,01	3,29	55,29
12	0,53	0,53	16,22	4,90	5,44	61,56
13	1,58	0,98	22,38	6,16	5,19	67,45
14	0,20	1,19	27,94	4,02	6,99	68,61
15	0,13	1,7	33,41	1,99	8,39	71,54
16	0,10	0,65		5,53	8,09	
17	0,29	0,87		0,72	7,77	
18	0,20	1,44		0,15	9,47	

A variação máxima obtida no assentamento, no que diz respeito à Tabela 5.14, nas frenagens de 19 a 29 possui comportamento similar ao apresentado pelas frenagens de 1 a 18.

Tabela 5.15 - Máximo ΔT[°C] na medição do Teste 2.

	Pirômetro emiss média em cada frenagem das etapas			Pirômetro emiss média entre os dois testes para cada frenagem das etapas		
Frenagem	Assentamento	Caracterização	Fade	Assentamento	Caracterização	Fade
1	0,15	3,03	22,7	2,83	4,86	21,9
2	0,15	7,00	34,9	0,49	6,53	39,63
3	0,15	6,69	43,3	6,03	5,56	44,08
4	0,15	9,64	55,4	9,04	8,5	52,81
5	0,15	12,42	46,5	6,44	12,75	43,4
6	0,15	9,65	37,6	9,31	11,24	33,68
7	0,15	0,15	24,8	8,98	2,79	34,37
8	0,15	0,15	21	7,82	1,4	41,43
9	0,15	0,15	17,4	8,64	2,61	46,51
10	0,15	0,15	21	6,95	2,79	54,83
11	0,15	0,15	18	7,37	3,68	53,13
12	0,15	0,15	13,7	7,48	5,72	53,8
13	0,15	0,15	31,5	6,09	5,17	59,54
14	0,15	0,15	28,4	7,01	7,35	51,84
15	0,15	0,15	29,8	6,95	9,13	51,62
16	0,15	0,15		2,75	9,23	
17	0,15	0,15		7,02	8,56	
18		0,15			9,97	

Observa-se que os erros máximos nas etapas de assentamento e caracterização, mostram-se aceitáveis se comparados ao apresentado nos trabalhos de Kasem et al., 2010, e Thevenet et al.,2009 (8 e 14°C respectivamente), somente quando corrigidos pelas emissividades médias das Tabelas 5.5 e 5.4.

Como se esperava o menor erro máximo se deu para as temperaturas corrigidas pela emissividade média por frenagem das etapas, já que abordam melhor o comportamento nas etapas de frenagem, em comparação às outras propostas de correção da emissividade. Outro ponto a se ressaltar é o elevado erro máximo apresentado para a etapa fade, uma justificativa plausível seria a formação de óxido, e principalmente o surgimento de bandas e/ou pontos quentes na superfície de atrito.

6. CONCLUSÃO

O método do presente trabalho mostrou-se eficaz utilizando-se a correção proposta na Tabela 5.4 para as etapas de assentamento e caracterização, já os resultados obtidos para a etapa fade não se mostraram satisfatórios.

O grau de incerteza da metodologia proposta depende do procedimento experimental utilizado, já que se observam variações significativas entres os testes e as correções propostas (como mostrado nas Tabelas 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11).

Como já analisado, a etapa fade foi a que mostrou os resultados menos coerentes, assim, propõe-se que em trabalhos futuros essa etapa seja estuda de maneira mais detalhada, com maior número de testes (maior número de amostras), estudando-se o efeito de banda na

etapa para um ou mais materiais, e verificando-se a possibilidade de uso dessa metodologia não só para as etapas de assentamento e caracterização, mas também para a etapa fade.

Ainda pose ser estudado a viabilidade do uso de um procedimento padrão exclusivo (número de frenagens) durante os testes, ou seja, modificar o procedimento experimental utilizado no presente trabalho, para que um pirômetro infravermelho de onda simples consiga atingir bons níveis de erro e incerteza em todas as etapas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agudelo, C. E., Ferro, E.; "**Technical Overview of Brake Performance Testing for Original Equipment and Aftermarket in the US and European Markets**", Link Technical Report FEV205-01, 2005.

Bulthé, A. L. C., Desplanques, Y., Degallaix, G., Berthier, Y.; "**Mechanical and chemical investigation of temperature influence on the tribological mechanisms occurring in OMC/cast iron friction contact**", Elsevier: 2007.

Bulthé, A. L. C., Desplanques, Y., Degallaix, G.; "**Coupling between friction physical mechanisms and transient thermal phenomena involved in pad-disc contact during railway braking**", Elsevier: 2007.

Desplanques, Y., Roussette, O., Degallaix, G., Copin, R., Berthier, Y.; "**Analysis of tribological behavior of pad-disc contact in railway braking. Part 1. Laboratory test development, compromises between actual and simulated tribological triplets**", Elsevier: 2006.

Dillenburg, F.R; "**Avaliação do Contato Entre Material de Fricção e Disco de Freio com o Uso de Termografia**" , Monografia, DEMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul: 2007.

Eriksson, M., Bergman, F., Jacobson, S.; "**On the nature of tribological contact in automotive brakes**", Elsevier: 2002.

Haynes Publishing; "**Automotive Disc Brake Manual**", Techbook Series: 1999.

Hladik, J.; "**Métrologie des proprieties thermophysiques des matériaux**", Masson: 1990.

Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T.L., Lavine, A.S.; "**Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**", LTC, 6° edição, 2008.

Infantini, M. B.; "**Variáveis de Desempenho dos Sistemas de Freio**", Dissertação, PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul: 2008.

Ismail, K. A.; "**Técnicas de Medidas e Instrumentação em Engenharia Mecânica**", UNICAMP, 1986.

Limpert, R.; "**Brake Desing and Safety**", Second Edition, SAE, 1999.

Kasem, H., Thevenet, J., Boidin, X., Siroux, M., Dufrenoy, P., Desmet, B., Desplanques, Y.; "**An emissivity-corrected method for the accurate radiometric measurement of transient surface temperatures during braking**", Elsevier: 2010.

Madura, H., Kastek, M., Piatkowski, T.; "**Automatic compensation of emissivity in three-wavelength pyrometers**", Elsevier: 2007.

Neis, P. D., Kruze, G. A. S., Ferreira, N. F.; "**Relation Between the Temperature of the Disc Measured with Thermocouple and by Thermography Using a Reduced-Scale Dynamometer**", 20th International Congress of Mechanical Engineering: 2009.

Panier, S., Dufrénoy, P., Weichert, D.; "**An experimental investigation of hot spots in railway disc brakes**", Elsevier: 2003.

Preston, J.D.; Forthofer, R.J.; "**Correlation of Vehicle, Dynamometer and Other Laboratory Tests for Brake Drums**", Society of Automotive Engineers, paper 700138, 1970.

Rocha, J.G.V.; "**Protótipo de um Pirômetro Autocalibrado Independente da Emissividade**", Dissertação, Universidade de Minho: 1998.

Thevenet, J., Siroux, M., Desmet, B.; "**Mesurements of brake disc surface temperature and emissivity by two-color pyrometry**", Elsevier: 2009.