

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO EM UM DINAMÔMETRO EM ESCALA
REDUZIDA

por

Gabriel Aquino Schell Kruze

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, novembro de 2009.

AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO EM UM DINAMÔMETRO EM ESCALA
REDUZIDA

por

Gabriel Aquino Schell Kruze
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Eduardo André Perondi

PROMECC / UFRGS

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

PROMECC / UFRGS

Prof. Dr. Rafael Antônio Comparsi Laranja

DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Horácio A Vielmo

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 30 de novembro de 2009.

Dedico este trabalho primeiramente a minha namorada Tielli Magnus pelo apoio, sem o qual este trabalho não seria possível, e também a minha família pelo incentivo aos meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer:

- A minha namorada Tielli Magnus pela ajuda na correção da minha dissertação e pelo apoio nas horas de dificuldade;
- A toda a minha família por apoiar e incentivar os meus estudos;
- Ao MSc Eng. Luciano Tedesco Matozo pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho;
- À FINEP pelo apoio a pesquisa realizada;
- Ao colega MSc Eng. Patric Daniel pelo apoio nos momentos de dificuldade e pelo auxílio na interpretação dos resultados deste trabalho;
- Ao meu orientador Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira pelo auxílio na elaboração deste trabalho e pelas críticas, as quais tenho certeza que me farão um profissional melhor;
- À Fras-le por financiar e emprestar os seus equipamentos para a realização deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho foi realizada a seleção da espessura do disco a ser utilizada em um dinamômetro em escala reduzida, chamado Dinamômetro em Escala da Fras-le, a partir de quatro espessuras de disco ensaiadas conforme o procedimento de ensaio chamado de caracterização térmica. A seleção da espessura do disco foi realizada através da comparação dos resultados dos comportamentos térmicos dos discos de diferentes espessuras, ensaiados conforme o ensaio de caracterização térmica, com os resultados de quatro sistemas de freio, ensaiados em dinamômetros convencionais com o mesmo procedimento de ensaio. Os coeficientes de atrito médio por frenagem obtidos no ensaio de caracterização térmica do dinamômetro em escala reduzida e dos quatro sistemas de freio também foram comparados de modo a comprovar que a espessura de disco escolhida foi realmente adequada para este procedimento de ensaio. Esta comparação foi realizada através de três métodos: coeficiente de correlação de Pearson, comparação qualitativa e comparação quantitativa. Após a comparação foi comprovado que o Dinamômetro em Escala da Fras-le reproduz o comportamento do coeficiente de atrito médio por frenagem dos quatro sistemas com o ensaio de caracterização térmica para um material de fricção orgânico.

Palavras-chave: Dinamômetro em escala reduzida; sistemas de freio; material de fricção.

ABSTRACT

In this work, a disc thickness for a reduced-scale dynamometer called Fras-le Scale Dynamometer was selected by testing four disc thicknesses with the thermal characterization test procedure. The disc thickness selection was done by comparison of the different thick-disc thermal behavior tested with the thermal characterization procedure, with the results of four brake systems tested with the same procedure in full-scale dynamometers. The mean friction coefficients by braking obtained in the thermal characterization test of the reduced-scale dynamometer and of the four brake systems were also compared to prove that the selected disc-thick is adequate for this test procedure. This comparison was done by three methods: Pearson correlation coefficient, qualitative comparison and quantitative comparison. After this comparison it was verified that the Fras-le Scale Dynamometer can reproduce the behavior of the mean friction coefficient by braking of the four systems with the thermal characterization test for an organic friction material.

Keywords: Reduced-scale dynamometer; brake systems; friction material.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo geral	2
1.1.2	Objetivos específicos	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	Sistemas de Freio Automotivos.....	4
2.1.1	Freio a Disco.....	5
2.2	Materiais de Fricção Utilizados em Freios Veiculares.....	9
2.3	Normas de Ensaio dos Materiais de Fricção	10
2.4	Dinamômetro Inercial para Ensaio de Materiais de Fricção	12
2.5	Dinamômetros em Escala Reduzida para Ensaio de Materiais de Fricção.....	14
2.6	Dinamômetro em Escala da Fras-le (<i>Fras-le Scale Dynamometer - FSD</i>)	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1	Obtenção Experimental do Tempo de Resposta do Termopar Tipo K Utilizado nas Medições	31
3.2	Seleção da Espessura do Disco do Dinamômetro em Escala da Fras-le através do Comportamento Térmico Durante o Ensaio de Caracterização Térmica.....	31
3.3	Avaliação da Incerteza de Medição do Coeficiente de Atrito no Dinamômetro em Escala da Fras-le.....	33
3.4	Curva de Atrito Característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le para o Ensaio de Caracterização Térmica.....	35
3.5	Avaliação da Correlação do Coeficiente de Atrito Médio por Frenagem dos Ensaios de Caracterização Térmica.....	36
3.5.1	Avaliação do Coeficiente de Correlação de Pearson.....	36
3.5.2	Comparação Qualitativa	39
3.5.3	Comparação Quantitativa	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1	Seleção da Espessura do Disco do Dinamômetro em Escala da Fras-le através do Comportamento Térmico Durante o Ensaio de Caracterização Térmica.....	43

4.2	Avaliação da Incerteza de Medição do Coeficiente de Atrito no Dinamômetro em Escala da Fras-le.....	47
4.3	Curva de Atrito Característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le para o Ensaio de Caracterização Térmica.....	47
4.4	Avaliação da Correlação do Coeficiente de Atrito Médio por Frenagem dos Ensaios de Caracterização Térmica.....	49
4.4.1	Avaliação do Coeficiente de Correlação de Pearson.....	50
4.4.2	Comparação Qualitativa	53
4.4.3	Comparação Quantitativa	58
4.5	Variação do Coeficiente de Atrito Médio por Frenagem na Etapa de Fade do Ensaio de Caracterização Térmica.....	59
5	CONCLUSÕES	61
5.1	Propostas de Trabalhos Futuros.....	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Principais componentes do sistema de freio a disco [adaptada de Rehkopf e Halderman, 2006]	5
Figura 2.2 - Funcionamento do cáliper fixo [adaptada de Rehkopf e Halderman, 2006]	6
Figura 2.3 - Funcionamento do cáliper flutuante [adaptada de Rehkopf e Halderman, 2006] ..	7
Figura 2.4 - Distribuiao da pressão de contato entre o par de fricao com: (a) um pistão; (b) dois pistões [adaptada de Puhn, 1985]	8
Figura 2.5 - Ilustraao do disco ventilado mostrando as aletas e o fluxo de ar gerado pela força centrípeta [adaptada de Birch, 1999]	8
Figura 2.6 - Desenho esquemático de um dinamômetro inercial para ensaio de materiais de fricao [adaptada de Haynes Publishing, 1999]	13
Figura 2.7 - Desenho esquemático do Dinamômetro em Escala da Girling (<i>Girling Scale Dynamometer</i> - GSD) [adaptada de Wilson et al., 1968]	17
Figura 2.8 - Desenho esquemático do Dinamômetro em Escala da Lockheed (<i>Lockheed Scale Dynamometer</i> - LSD) [adaptada de Oldershaw et al., 1973]	19
Figura 2.9 - Dinamômetro em escala reduzida desenvolvido por Sanders e colaboradores [adaptada de Sanders et al., 2001]	20
Figura 2.10 - Desenho esquemático e foto da posiao do termopar no disco do sistema B (o ponto vermelho indica a posiao do termopar) [adaptada de Infantini, 2008]	24
Figura 2.11 - Desenho esquemático da posiao dos termopares nos sistemas com disco ventilado e foto do disco do sistema C (os pontos vermelhos informam as posioes dos termopares): (a) Face do lado do cubo; (b) Face do lado oposto ao cubo [adaptada de Infantini, 2008]	24
Figura 2.12 - Variaao da temperatura do disco durante uma frenagem	27
Figura 2.13 - Temperaturas finais médias de cada frenagem dos quatro sistemas ensaiados [adaptada de Infantini, 2008]	28
Figura 2.14 - Variaao do coeficiente de atrito ao longo de uma frenagem e coeficiente de atrito médio da frenagem	28
Figura 2.15 - Coeficientes de atrito médios de cada frenagem dos quatro sistemas ensaiados [adaptada de Infantini, 2008]	29
Figura 2.16 - Dinamômetro em Escala da Fras-le (<i>Fras-le Scale Dynamometer</i> - FSD)	30

Figura 3.1 - Desenho esquemático da instrumentação dos discos do Dinamômetro em Escala da Fras-le e foto do disco de 10 mm instrumentado com os dois termopares (os pontos vermelhos informam as posições dos termopares)	33
Figura 3.2 - Relação linear entre o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema B e do Dinamômetro em Escala da Fras-le (a linha vermelha representa a linha de tendência linear entre as variáveis)	37
Figura 3.3 - Relação linear entre o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema C versus o coeficiente de atrito médio por frenagem do Dinamômetro em Escala da Fras-le (a linha vermelha representa a linha de tendência linear entre as variáveis).....	37
Figura 3.4 - Relação linear entre o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema D e do Dinamômetro em Escala da Fras-le (a linha vermelha representa a linha de tendência linear entre as variáveis)	38
Figura 3.5 - Relação linear entre o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema E versus o coeficiente de atrito médio por frenagem do Dinamômetro em Escala da Fras-le (a linha vermelha representa a linha de tendência linear entre as variáveis).....	38
Figura 3.6 - Deslocamento da curva de atrito de característica do Dinamômetro em Escala Reduzida da Fras-le em relação ao sistema B	40
Figura 4.1 - Temperaturas finais de cada frenagem dos sistemas B,C D e E e das diferentes espessuras de disco ensaiadas no Dinamômetro em Escala da Fras-le para o ensaio de caracterização térmica	44
Figura 4.2 - Temperaturas finais dos sistemas B, C, D e E e das diferentes espessuras de disco do Dinamômetro em Escala da Fras-le nas últimas dez frenagens do assentamento e da caracterização	44
Figura 4.3 - Coeficiente de atrito médio para os dois ensaios realizados com o disco de 10 mm no Dinamômetro em Escala da Fras-le.....	48
Figura 4.4 - Coeficiente de atrito médio por frenagem para os dois ensaios realizados com o disco de 10 mm no Dinamômetro em Escala da Fras-le, média dessas duas curva (curva de atrito característica do FSD) e as incertezas de medição do coeficiente de atrito no FSD	48
Figura 4.5 - Coeficientes de atrito médio por frenagem dos sistemas B, C, D e E e curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le para o ensaio de caracterização térmica	49

Figura 4.6 - Relação linear entre o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema B e do Dinamômetro em Escala da Fras-le após a retirada dos pontos espúrios (a linha vermelha representa a linha de tendência linear entre as variáveis).....	50
Figura 4.7 - Relação linear entre o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema C versus o coeficiente de atrito médio por frenagem do Dinamômetro em Escala da Fras-le após o retirada dos pontos espúrios (a linha vermelha representa a linha de tendência linear entre as variáveis)	51
Figura 4.8 - Relação linear entre o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema B e do Dinamômetro em Escala da Fras-le após a retirada dos pontos espúrios (a linha vermelha representa a linha de tendência linear entre as variáveis).....	51
Figura 4.9 - Relação linear entre o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema E versus o coeficiente de atrito médio por frenagem do Dinamômetro em Escala da Fras-le após o retirada dos pontos espúrios (a linha vermelha representa a linha de tendência linear entre as variáveis)	52
Figura 4.10 - Curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le ajustada em relação ao sistema B, coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema B e incertezas de medição do coeficiente de atrito no FSD (representadas pelas barras)	54
Figura 4.11 - Curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le ajustada em relação ao sistema C, coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema C e incertezas de medição do coeficiente de atrito no FSD (representadas pelas barras)	55
Figura 4.12 - Curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le ajustada em relação ao sistema D, coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema D e incertezas de medição do coeficiente de atrito no FSD (representadas pelas barras)	56
Figura 4.13 - Curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le ajustada em relação ao sistema E, coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema E e incertezas de medição do coeficiente de atrito no FSD (representadas pelas barras)	57
Figura 4.14 - Coeficientes de atrito médio em cada frenagem da etapa de <i>fade</i> das pastilhas usadas e novas	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Temperaturas iniciais, ou de gatilho de cada frenagem da etapa de <i>fade</i> para os sistemas de freio a disco	12
Tabela 2.2 - Sistemas de freio a disco utilizados no levantamento das variáveis	22
Tabela 2.3 - Ensaio de caracterização térmica	25
Tabela 2.4 - Momentos de inércia de massa utilizados no ensaio de caracterização térmica ..	26
Tabela 4.1 - Médias e desvios padrão das temperaturas finais das dez últimas frenagens das etapas de assentamento e de caracterização dos sistemas B, C, D e E.....	45
Tabela 4.2 - Temperaturas médias e diferenças absolutas das últimas dez frenagens da etapa de assentamento e de caracterização dos sistemas B, C, D e E e das diferentes espessuras do Dinamômetro em Escala da Fras-le.....	45
Tabela 4.3 - Temperatura inicial necessária em cada frenagem da etapa de <i>fade</i> e temperatura final medida das cinco primeiras frenagens dessa etapa para cada espessura de disco do Dinamômetro em Escala da Fras-le.....	46
Tabela 4.4 - Valores do coeficiente de correlação de Pearson entre a curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le e o coeficiente de atrito médio por frenagem dos sistemas B, C, D e E no ensaio de caracterização térmica, após a retirada dos pontos espúrios	52
Tabela 4.5 - Constantes somadas a curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le para ajustá-la em relação a cada um dos quatro sistemas de freio.....	53
Tabela 4.6 - Resultados dos critérios quantitativos e diferenças relativas dadas em percentual dos valores dos sistemas B, C, D e E (valores em negrito)	58

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

FSD	Dinamômetro em Escala da Fras-le (<i>Fras-le Scale Dynamometer</i>)
SUV	Veículos utilitários esportivos (<i>Sport Utility Vehicles</i>)
NAO	Material de fricção orgânico (<i>Non asbesto organic</i>)
GSD	Dinamômetro em Escala da Girling (<i>Girling Scale Dynamometer</i>)
LSD	Dinamômetro em Escala da Lockheed (<i>Lockheed Scale Dynamometer</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

T_{AN}	Temperatura inicial da enésima frenagem do <i>fade</i>	[°C]
T_{A1}	Temperatura inicial da primeira frenagem do <i>fade</i>	[°C]
T_{A15}	Temperatura inicial da décima quinta frenagem do <i>fade</i>	[°C]
N	Número da frenagem do <i>fade</i>	
μ	Coefficiente de atrito	
T	Torque frenante	[Nm]
η	Eficiência mecânica do sistema de freio	
$P_{acion.}$	Pressão de acionamento	[Pa]
P_o	Pressão necessária para superar a força da mola de retorno e o atrito do pistão com o cáliper	[Pa]
$A_{pistão}$	Área do pistão	[m ²]
R_e	Raio efetivo do veículo	[m]
S	Fator de escala	
A	Área da pastilha do veículo	[m ²]
a	Área da pastilha em escala reduzida	[m ²]
D	Diâmetro do disco do veículo	[m ²]
d	Diâmetro do disco em escala reduzida	[m ²]
I	Momento de inércia de massa do veículo	[kgm ²]
M	Massa do veículo	[kg]
R_r	Raio de rolamento do veículo	[m]
E_a	Densidade de energia do veículo	[J/m ²]
V_e	Velocidade de escorregamento do veículo	[m/s]
i	Momento de inércia de massa em escala reduzida	[kgm ²]
r_r	Raio de rolamento em escala reduzida	[m]
v_e	Velocidade de escorregamento em escala reduzida	[m/s]
r_e	Raio efetivo em escala reduzida	[m]
h_{ep}	Altura da pastilha em escala reduzida	[m]
σ_μ	Incerteza de medição do coeficiente de atrito	
σ_T	Incerteza de medição do torque	[Nm]

σ_{η}	Incerteza de medição da eficiência mecânica do sistema de freio	
$\sigma_{Pacion.}$	Incerteza de medição da pressão de acionamento	[Pa]
σ_{P0}	Incerteza de medição da pressão necessária para superar a força da mola de retorno e o atrito do pistão com o calíper	[Pa]
$\sigma_{Apistão}$	Incerteza de medição da área do pistão	[m ²]
σ_{Re}	Incerteza de medição do raio efetivo	[m ²]
$d_{pistão}$	Diâmetro do pistão	[m]
$\sigma_{dpistão}$	Incerteza de medição do diâmetro do pistão	[m]
$\% \Delta \mu_{p1-p2}$	Sensibilidade do coeficiente de atrito médio por frenagem à pressão	
μ_{p1}	Coeficiente de atrito médio da frenagem à pressão de 3 MPa na etapa de velocidade 2	
μ_{p2}	Coeficiente de atrito médio da frenagem à pressão de 8 MPa na etapa de velocidade 2	
$\% \Delta \mu_v$	Sensibilidade do coeficiente de atrito médio por frenagem à velocidade	
$\bar{\mu}_{v1}$	Média dos coeficientes de atrito médios das frenagens às pressões de 3 a 8 MPa na etapa de velocidade 2	
$\bar{\mu}_{v2}$	Média dos coeficientes de atrito médios das frenagens às pressões de 3 a 8 MPa na etapa de velocidade 4	
$\%fade$	Sensibilidade do coeficiente de atrito médio por frenagem à temperatura	
$\mu_{assentamento}$	Coeficiente de atrito médio da última frenagem do assentamento	
μ_{fade}	Coeficiente de atrito médio mínimo no primeiro <i>fade</i>	
$\%caracterização$	Recuperação do coeficiente de atrito médio na última frenagem da etapa de caracterização após o <i>fade</i>	
$\mu_{caracterização}$	Coeficiente de atrito médio da última frenagem da etapa de caracterização após o <i>fade</i>	

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos materiais de fricção para utilização em freios automotivos é um constante desafio devido ao aumento da potência dos motores e, às cada vez maiores, exigências do mercado [Infantini, 2008]. O equipamento normalmente utilizado durante o desenvolvimento de pastilhas e lonas de freios é o dinamômetro inercial, pois ele utiliza o sistema de freio do próprio veículo do qual se quer testar o material de fricção, o que o torna uma máquina capaz de gerar resultados muito semelhantes aos dos veículos [Preston e Forthofer, 1971]. Porém, dinamômetros inerciais têm um resultado do coeficiente de atrito dependente do sistema de freio, assim a cada ensaio se obtém o desempenho do material de fricção apenas para o sistema de freio ensaiado e, caso seja necessário avaliar a utilização desse mesmo material em outro sistema de freio um novo ensaio deve ser realizado no dinamômetro com o respectivo sistema de freio [Infantini, 2008; Sanders et al., 2001]. Dessa forma é necessário que um mesmo material de fricção seja ensaiado diversas vezes em diferentes sistemas de freio sendo que os ensaios podem levar vários dias, além disso, essa abordagem encarece e dificulta o projeto de novos produtos de fricção [Sanders, et al., 2001].

Na busca por resultados do desempenho do material de fricção independente do sistema de freio, surgiram os dinamômetros em escala reduzida [Sanders et al., 2001]. Porém, a grande limitação desse tipo de equipamento é que assim como os dinamômetros convencionais, eles servem para ensaiar apenas um sistema de freio por vez, o qual é representado por um sistema de freio em escala reduzida correlacionado ao sistema em escala real pelo correspondente fator de escala. Dessa forma para cada sistema que se queira reproduzir o comportamento no dinamômetro em escala reduzida deve-se adotar um fator de escala conveniente (minimizando o custo) e com ele dimensionar um disco e uma pastilha em escala reduzida, os quais serão utilizados neste equipamento.

A fim de desenvolver um novo conceito de dinamômetro em escala reduzida, cujos resultados do ensaio de um único material pudessem ser extrapolados para diferentes sistemas de freio e no qual o desempenho dos materiais de fricção pudessem ser avaliados independentemente do sistema de freio, estabeleceu-se uma parceria entre a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a empresa Fras-le S/A de Caxias do Sul. Esse equipamento foi chamado de “Dinamômetro em Escala da Fras-le” (*Fras-le Scale Dynamometer - FSD*).

O projeto dessa máquina iniciou-se com o levantamento das variáveis que afetam o desempenho dos materiais de fricção: pressão de contato, velocidades de escorregamento e

temperatura do disco, para dezenove sistemas de freio representativos do mercado (sistemas de A a S), trabalho desenvolvido por Infantini, 2008. As pressões de contato e as velocidades de escorregamento foram calculadas pelo autor utilizando os dados geométricos desses sistemas/veículos. Porém, a temperatura do disco e o coeficiente de atrito foram obtidos experimentalmente para quatro sistemas de freio de veículos leves (sistemas B, C, D e E) dos dezenove utilizados no levantamento das variáveis. Com os resultados das pressões de contato e das velocidades de escorregamento dos dezenove sistemas iniciou-se o projeto do sistema de freio do Dinamômetro em Escala da Fras-le por Kruze, 2007, e as modificações de um dinamômetro inercial da LINK modelo 1500 existente na Fras-le S/A para funcionar como um dinamômetro em escala reduzida. As modificações realizadas neste equipamento incluíam o redimensionamento dos seus discos de inércia de modo que eles pudessem representar os momentos de inércia de massa em escala reduzida dos dezenove sistemas utilizados por Infantini, 2008, com isso, obtendo-se a mesma energia por unidade de área da pastilha tanto no FSD quanto em cada um dos dezenove sistemas de freio.

O presente trabalho é uma continuação dos trabalhos desenvolvidos por Kruze, 2007, e Infantini, 2008. Dessa forma, neste trabalho, foi selecionada uma espessura de disco do dinamômetro em escala reduzida que possua um comportamento térmico mais próximo dos resultados das temperaturas do disco dos sistemas B, C, D e E para o procedimento de ensaio chamado de caracterização térmica, o qual foi elaborado por Infantini, 2008. Além disso, os coeficientes de atrito dos ensaios desses mesmos quatro sistemas foram comparados com os resultados do FSD através do coeficiente de correlação de Pearson e de comparações qualitativas e quantitativas. Foi realizada também uma comparação do comportamento térmico do disco e do coeficiente de atrito médio do dinamômetro em escala reduzida com o sistema D, ambos ensaiados segundo a norma de ensaio *AK-Master*, 1998, de modo a avaliar a capacidade do FSD de reproduzir desempenho de um dinamômetro convencional em um ensaio mais complexo e próximo da realidade.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é a avaliação do coeficiente de atrito no Dinamômetro em Escala da Fras-le para o procedimento de ensaio chamado de ensaio de caracterização térmica.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Selecionar uma espessura de disco para o Dinamômetro em Escala da Fras-le de modo que o comportamento térmico do disco desse equipamento seja semelhante ao dos quatro sistemas de freio ensaiados por Infantini, 2008, no ensaio de caracterização térmica;

- Verificar a capacidade do Dinamômetro em Escala da Fras-le de reproduzir o comportamento do coeficiente de atrito de quatro sistemas de freio ensaiados por Infantini, 2008, para o ensaio de caracterização térmica através da correlação dos resultados do coeficiente de atrito desse equipamento com os dos quatro sistemas de freio, a fim de comprovar que a espessura de disco escolhida foi realmente adequada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir serão apresentados alguns assuntos necessários para o entendimento deste trabalho como:

- Informações gerais sobre os sistemas de freio, principalmente sobre os sistemas de freio a disco, os quais foram utilizados na elaboração deste trabalho;
- Composição e tipos de materiais de fricção;
- Procedimentos de ensaio utilizados para testar materiais de fricção, quais as suas etapas e como eles são utilizados para certificar e desenvolver materiais de fricção;
- Funcionamento dos Dinamômetros inerciais utilizados para testar materiais de fricção, máquinas a partir das quais surgiram os dinamômetros em escala reduzida;
- Funcionamento dos Dinamômetros em escala reduzida utilizados para testar materiais de fricção;
- Projeto e desenvolvimento do Dinamômetro em Escala da Fras-le, sendo um dos objetivos deste trabalho a continuação do desenvolvimento desse equipamento.

2.1 Sistemas de Freio Automotivos

Segundo Limpert, 1999, os sistemas de freio automotivos possuem basicamente três funções: desacelerar ou parar um veículo (o que envolve a transformação de energia cinética e potencial do veículo em energia térmica), manter a velocidade do veículo durante um declive (o que envolve a transformação indireta de energia potencial em energia térmica) e manter o veículo parado após sua frenagem completa. Segundo Eriksson, 2000, os sistemas de freio automotivos podem ser divididos em três partes principais:

- **Rotor:** é o elemento que gira fixo a roda, são normalmente fabricados de ferro fundido cinzento [Eriksson, 2000].

- **Material de fricção:** é a parte estacionária do par de fricção, afirma Eriksson, 2000. Segundo o mesmo autor, durante a frenagem, o material de fricção é pressionado contra o rotor e as forças de fricção entre eles transformam a energia cinética do veículo em energia térmica.

- **Sistema hidráulico ou pneumático:** transfere e amplifica a força aplicada no pedal para o sistema de atuação, o qual pressiona o material de fricção contra o rotor [Eriksson, 2000].

Quanto à geometria do rotor os freios automotivos podem ser classificados em freios a tambor e freios a disco.

2.1.1 Freio a Disco

Nos freios a disco, pastilhas são pressionadas axialmente por pistões contra um disco produzindo torque frenante. Os freios a disco são mais utilizados nas rodas dianteiras, ou em alguns casos, em todas as rodas, devido a sua maior eficiência de frenagem [Rehkopf e Halderman, 2006]. A Figura 2.1 mostra um sistema de freio a disco e seus principais componentes, os quais são:

- Pastilhas de freio;
- Cáliper ou pinça de freio;
- Pistões;
- Disco.

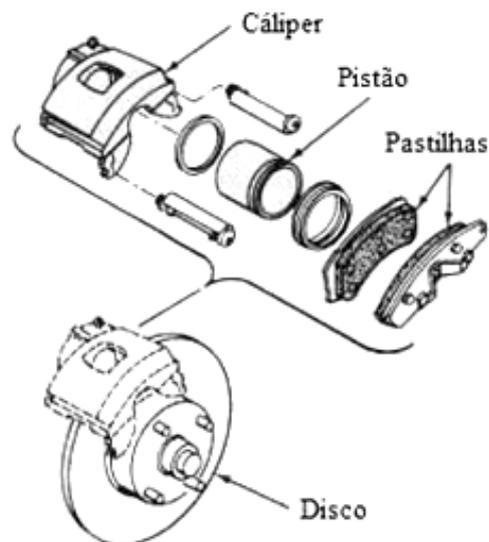


Figura 2.1 - Principais componentes do sistema de freio a disco [adaptada de Rehkopf e Halderman, 2006]

As pastilhas de freio são feitas de material de fricção conformado no formato de pastilha preso a uma placa de metal rígida (chamada de plaqueta), a qual garante que a força de atuação do pistão seja transmitida uniformemente para a pastilha. As pastilhas são fabricadas com materiais compósitos.

As pastilhas de cada lado do disco são fixas por um elemento metálico que as envolve, os quais são chamados de cáliper ou pinça de freio. Os cálipers convertem a pressão

hidráulica do cilindro em força mecânica quando o pedal de freio é pressionado pelo motorista. Isso ocorre devido à ação do fluido de freio sobre os pistões e desses contra as pastilhas, que se movem em direção ao disco. Quando esses dois últimos componentes entram em contato, ocorre a frenagem.

Os calipers estão sujeitos a esforços muito elevados e são feitos, em sua maioria, de ferro fundido nodular devido à sua ductilidade, resistência mecânica e baixo custo. Segundo Pompon, 1997, essas ligas são mais leves e também são melhores condutoras de calor. Vale lembrar que grande cuidado deve ser tomado para evitar o superaquecimento do fluido de freio que pode evaporar, já que gases na linha hidráulica diminuem a eficiência do acionamento do freio, daí a necessidade de dissipação do calor. A busca da conciliação entre desempenho, dimensões, conforto, peso e custo, levaram ao desenvolvimento de duas concepções principais de projeto de caliper: o fixo e o flutuante [Pompon, 1997].

O caliper fixo é rigidamente preso ao eixo e tem, pelo menos, dois pistões opostos que são ativados pelo mesmo circuito hidráulico (esse tipo é sempre hidráulico). A Figura 2.2 mostra como é o funcionamento do caliper fixo.

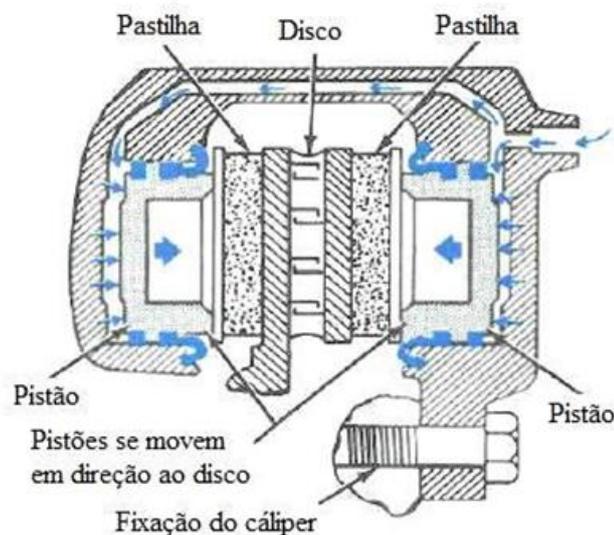


Figura 2.2 - Funcionamento do caliper fixo [adaptada de Rehkopf e Halderman, 2006]

No caliper flutuante, a pastilha acionada pelo cilindro primeiramente entra em contato com o disco e, por reação, ocorre o contato da outra pastilha. Com isso, pressupõe-se que o caliper pode mover-se em relação ao eixo do plano de simetria do disco. Mesmo que esse movimento seja pequeno, o caliper precisa ter um pouco de folga para que possa posicionar-se corretamente em relação ao disco, sem um esforço significativo contra o seu ponto de fixação.

Também é necessário que ele seja conectado ao eixo com rigidez adequada para evitar sua rotação junto com o disco.

Normalmente, o cáliper flutuante tem apenas um pistão e pode ter acionamento tanto hidráulico quanto pneumático (como no caso de veículos comerciais - caminhões e ônibus), mas ela também pode ter dois pistões, ambos no mesmo lado. Nos sistemas hidráulicos o pistão é pressionado diretamente contra a pastilha por um fluido hidráulico. Já, nos sistemas pneumáticos, a força é amplificada por um sistema de alavancas. A Figura 2.3 mostra como funciona o cáliper flutuante.

Comparado com o cáliper fixo, o pistão do cáliper flutuante tem o curso aproximadamente duas vezes maior. É geralmente mais ruidoso, pois é menos rígido (pois tem folga na fixação) e, portanto, tem mais facilidade de vibrar. Também é um pouco menos eficiente, pelo fato de que grande parte da força é absorvida pela deformação elástica do seu corpo, sendo essa diferença mais perceptível a elevadas pressões [Limpert, 1999].

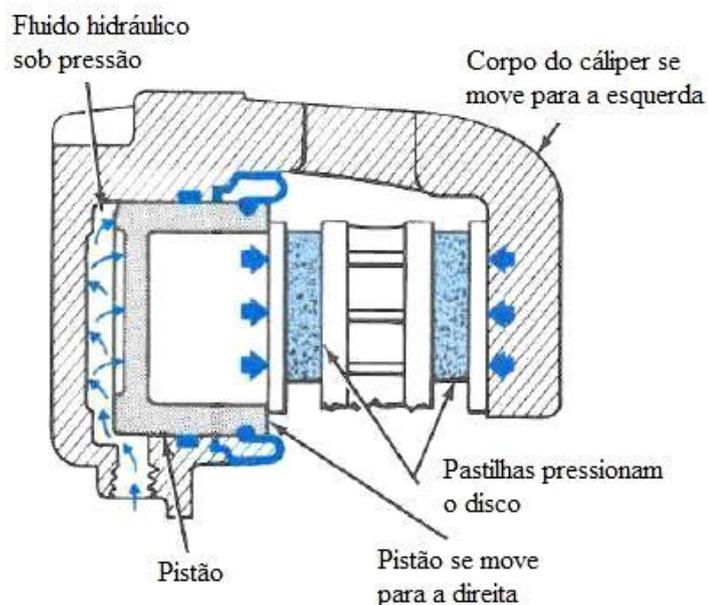


Figura 2.3 - Funcionamento do cáliper flutuante [adaptada de Rehkopf e Halderman, 2006]

Um sistema de freio pode ter de um a quatro pistões de cada lado do cáliper [Rehkopf, e Halderman, 2006]. Segundo Puhn, 1985, a pressão de contato normalmente não é uniforme com apenas um pistão de cada lado do cáliper, como mostra a Figura 2.4 (a). Dessa forma, seria necessário um maior número de pistões para se obter uma pressão de contato aproximadamente uniforme entre a pastilha e o disco (Figura 2.4 (b)). Porém, com mais de um pistão de cada lado, o acionamento dos pistões no mesmo lado se dá em tempos diferentes

na maioria das vezes, o que resulta em um desgaste em forma de cunha da pastilha [Puhn, 1985].

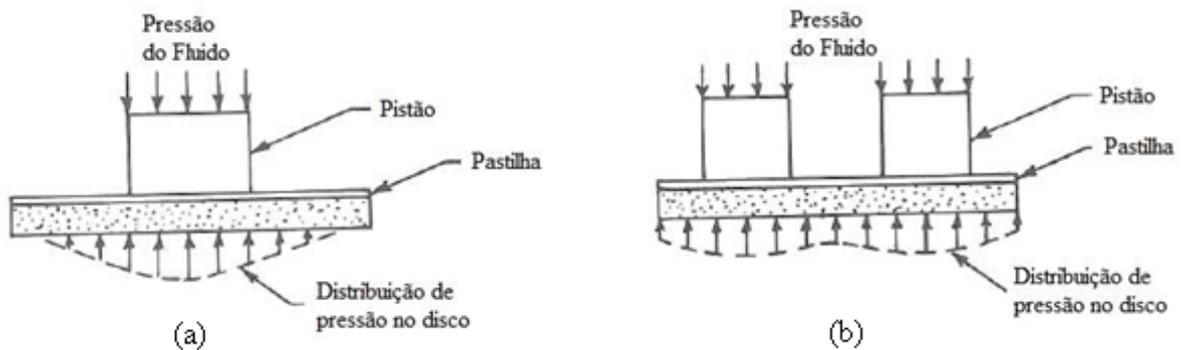


Figura 2.4 - Distribuição da pressão de contato entre o par de fricção com: (a) um pistão; (b) dois pistões [adaptada de Puhn, 1985]

O outro componente do par de fricção, além das pastilhas, é o disco. Os discos são a parte girante do par de fricção, e são fabricados de ferro fundido cinzento ou aço podendo ser sólidos ou ventilados [Rehkopf e Halderman, 2006]. O disco ventilado é vazado e possui aletas no seu interior, o que gera uma circulação de ar interna devido à força centrípeta quando ele está girando, aumentando assim a troca térmica por convecção do disco (Figura 2.5). Segundo Birch, 1999, a superfície de atrito do disco se mantém limpa devido à força centrípeta que arremessa as sujeiras e a água para fora do disco (Figura 2.5).

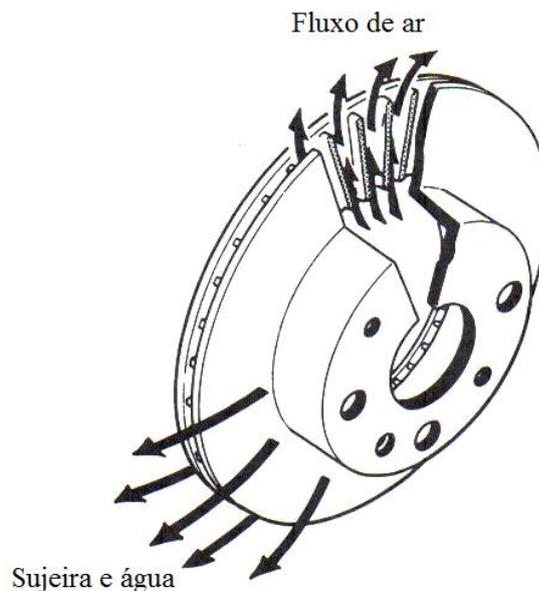


Figura 2.5 - Ilustração do disco ventilado mostrando as aletas e o fluxo de ar gerado pela força centrípeta [adaptada de Birch, 1999]

Segundo Rehkopf e Halderman, 2006, as principais desvantagens do sistema de freio a disco são: não possuir pastilha auto-energizante e o ruído. Os mesmos autores afirmam ainda que o ruído é o maior problema dos sistemas de freio a disco que pode ocorrer durante uma frenagem. Para reduzir esse problema, molas são colocadas no cáliper para manter as pastilhas no lugar, reduzindo a sua frequência natural, e placas amortecedoras são colocadas atrás das pastilhas, as quais reduzem as vibrações [Rehkopf e Halderman, 2006].

2.2 Materiais de Fricção Utilizados em Freios Veiculares

Segundo Eriksson et al., 2002; Eriksson e Jacobson, 2000; Bijwe et al., 2008, os materiais de fricção dos freios automotivos são compósitos formados pela compactação a quente de 10 a 20 diferentes materiais. Os principais componentes dos materiais de fricção segundo esses autores são:

- **Ligantes:** utilizados para unir os componentes formando uma matriz termicamente estável. Geralmente são usadas resinas fenólicas com a adição de borracha para melhorar as propriedades de amortecimento e diminuir o ruído.

- **Materiais estruturais:** conferem resistência mecânica, resistência ao desgaste e aumentam o coeficiente de atrito. Geralmente são utilizadas fibras metálicas, de carbono, de vidro, e/ou de kevlar e, mais raramente, são utilizadas fibras minerais e cerâmicas. Antes da sua proibição na década de 80, o amianto ou asbesto foi largamente utilizado como material estrutural.

- **Cargas:** são usadas principalmente para reduzir os custos, mas também para facilitar a fabricação e melhorar a resistência e a dissipação térmica. Elas são subdivididas em cargas funcionais e cargas inertes ou de preenchimento. As cargas funcionais servem para melhorar características específicas do material de fricção como resistência a elevadas temperaturas e condutividade térmica. Já, as cargas inertes (ou de preenchimento) servem principalmente para reduzir os custos, pois elas são apenas para preenchimento e não possuem influência no coeficiente de atrito do material de fricção. Então, as cargas aumentam a vida útil do material de fricção, preenchendo os espaços e minimizando o custo. Como exemplos de cargas têm-se o sulfeto de bário, carbonato de cálcio e sílica.

- **Modificadores de fricção:** utilizados para a estabilização do coeficiente de atrito e controle da taxa de desgaste da pastilha e do disco. Lubrificantes sólidos, tais como grafite ou sulfetos metálicos, são utilizados para promover a estabilidade do atrito, principalmente em elevadas temperaturas. Partículas abrasivas, tipicamente alumina ou mica, aumentam o coeficiente de atrito e ainda ajudam a remover camadas de óxidos de ferro das superfícies dos

discos. Alguns exemplos de modificadores de fricção são: latão, zinco, grafite, borracha de estireno butadieno, óxido de cobre e óxido de ferro.

- **Agentes de cura:** atuam nas reações químicas do ligante durante o processo de fabricação, realizando a cura do material.

Os materiais de fricção utilizados em freios veiculares são normalmente divididos pelos fabricantes em dois grupos principais [Birch, 1999]:

- **Orgânico (*Non-Asbestos Organic* - NAO):** os materiais orgânicos passaram a se chamar *non asbestos organic* (NAO) devido à redução do uso de asbestos pelo fato dele causar danos à saúde [Birch, 1999]. Segundo Birch, 1999, esses materiais são compostos por resinas, materiais orgânicos e inorgânicos, grafite, mica, fibras metálicas (em baixa porcentagem) e de aramida, a qual substitui em parte o amianto. O mesmo autor afirma ainda que pastilhas fabricadas com esse material são mais macias em relação as semi-metálicas, proporcionando um maior contato com o disco, diminuindo o coeficiente de atrito e aumentando a vida útil dos discos. São utilizados em mercados que priorizam o conforto da operação de frenagem, como por exemplo, o mercado americano.

- **Semi-metálico:** nesse material, é utilizada uma carga maior de compostos metálicos (fibras de aço) em sua formulação, que pode chegar a 50 %, daí o termo semi-metálico [Eriksson e Jacobson, 2000]. Segundo Birch, 1999, em relação aos materiais orgânicos, os materiais semi-metálicos são mais resistentes a elevadas temperaturas e ao desgaste. Esses materiais são mais utilizados em mercados que buscam desempenho, como o mercado europeu por exemplo.

Segundo Birch, 1999, os materiais orgânicos possuem custo inferior, menor abrasividade, bom atrito a frio, maior propensão a perda da capacidade frenante e produzem menos ruído em relação aos materiais semi-metálicos. Os materiais de fricção possuem uma composição semelhante tanto para os freios a tambor quanto para os freios a disco, porém, no caso dos freios a disco eles são projetados para operar a temperaturas mais elevadas, conforme menciona Puhn, 1985.

2.3 Normas de Ensaio dos Materiais de Fricção

A maioria das normas de certificação, nacionais ou internacionais, possui o mesmo conjunto de exigências para garantir uma frenagem segura. Mercados ou regiões específicas usam abordagens diferentes com diferentes conjuntos de protocolos de teste [Agudelo e Ferro, 2005]. Essas normas de certificação exigem uma série de testes em máquinas de ensaio e em veículos. Nestes ensaios o desempenho dos materiais de fricção é avaliado principalmente

pelo desgaste, coeficiente de atrito e ruído.

Cada máquina de ensaio (dinamômetro inercial, *chase*, *fast* e *krauss*, por exemplo) possui ao menos uma norma padrão que determina os seus parâmetros de operação durante o ensaio. Como os dinamômetros inerciais para ensaio de materiais de fricção são as máquinas de principal interesse neste trabalho, a seguir são apresentadas as etapas comumente encontradas nas principais normas desses equipamentos, conforme Infantini, 2008:

- **Caracterização a verde (*Green*):** é a primeira etapa dos ensaios e é realizada para avaliar o desempenho do material de fricção novo ou “verde”, daí o nome dessa etapa. Essa etapa avalia o desempenho do sistema de freio logo que o veículo saiu da fábrica.

- **Assentamento:** essa etapa é realizada após a caracterização à verde e consiste de repetidas frenagens realizadas sob as mesmas condições de operação (pressões de acionamento, velocidades do veículo e temperaturas iniciais ou de gatilho) para assentar o material de fricção ao rotor, ou seja, aumentar a área de contato entre o par de fricção.

- **Etapas de pressão:** são realizadas frenagens com diversas pressões de acionamento (em torno de oito pressões distintas) para avaliar o efeito da pressão sobre o desempenho do material de fricção.

- **Etapas de velocidade:** são realizadas frenagens com diferentes velocidades iniciais (de quatro a cinco velocidades diferentes) de modo a analisar o efeito dessa variável sobre o desempenho do material de fricção.

- **Fade:** são realizadas quinze frenagens com temperaturas iniciais crescentes, seguindo uma escala logarítmica conforme a Equação 1 (*AK-Master*, 1998), de modo a esquentar o rotor:

$$T_{AN} = \frac{(T_{A15} - T_{A1})}{\ln 15} \ln N + T_{A1} \quad (1)$$

onde T_{AN} é a temperatura inicial da n ésima frenagem do *fade* [°C], T_{A1} é temperatura inicial da primeira frenagem do *fade* [°C], T_{A15} é temperatura inicial da décima quinta frenagem do *fade* [°C] e N é o número da frenagem do *fade*.

Esta etapa é realizada para avaliar o efeito da temperatura do rotor sobre o desempenho do material de atrito. Sendo T_{A1} igual a 100°C e T_{A15} igual a 550°C, no caso dos freios a disco, as temperaturas iniciais, ou temperaturas de gatilho, de cada uma das quinze frenagens da etapa de *fade*, calculados pela Equação 1 conforme a norma de ensaio *AK-Master*, 1998, podem ser vistas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Temperaturas iniciais, ou de gatilho de cada frenagem da etapa de *fade* para os sistemas de freio a disco

	Disco [°C]
T_{A1}	100
T_{A2}	215
T_{A3}	283
T_{A4}	330
T_{A5}	367
T_{A6}	398
T_{A7}	423
T_{A8}	446
T_{A9}	465
T_{A10}	483
T_{A11}	498
T_{A12}	513
T_{A13}	526
T_{A14}	539
T_{A15}	550

Fonte: adaptada da norma *AK-Master*, 1998.

- **Caracterização:** é uma etapa com condições de ensaio (pressão de acionamento e velocidade) que variam conforme a norma, essa etapa é repetida durante o procedimento visando avaliar o desempenho dos materiais de fricção no decorrer do teste. A caracterização realizada após o *fade* também é chamada de recuperação e tem a finalidade de analisar o desempenho do material de fricção após a etapa de elevadas temperaturas ou *fade*. Nesta etapa os materiais de fricção tendem a recuperar (ou elevar) o seu coeficiente de atrito para um valor próximo ao que ele possuía antes do *fade*.

Segundo infantini, 2008, as normas de ensaio de dinamômetros normalmente possuem de 250 a 1500 frenagens em ensaios que duram de 12 a 72 horas, cujo principal objetivo é avaliar a influência da pressão, temperatura e velocidade no desempenho do material de fricção.

2.4 Dinamômetro Inercial para Ensaio de Materiais de Fricção

O dinamômetro inercial é um dos equipamentos mais utilizado para avaliar materiais de atrito, afirmam Zimmer e Teves, 1982; Agudelo e Ferro, 2005. Uma prática comum é a utilização desse equipamento para testar, desenvolver e certificar materiais de fricção [Agudelo e Ferro, 2005].

Os dinamômetros inerciais são empregados para ensaiar materiais de fricção, na forma de pastilhas ou lonas, diretamente aplicados no sistema de freio e também na avaliação do ruído de freio. Utilizam discos de inércia para simular a energia cinética de um veículo em movimento. O material de atrito apenas é testado no veículo após aprovado no ensaio em um dinamômetro inercial.

Os dinamômetros inerciais utilizados para ensaiar materiais de fricção consistem basicamente de um motor acoplado a um eixo onde são fixos discos de inércia e o sistema de freio do veículo (Figura 2.6). Um motor elétrico movimenta os discos de inércia e o rotor até a rotação desejada. Após, o sistema de freio é acionado, desacelerando o rotor e, conseqüentemente, os discos de inércia. Os principais parâmetros medidos durante as frenagens são: a pressão de acionamento, o torque frenante (normalmente medido por um torquímetro) e a rotação (medida por um tacômetro). Com o torque frenante e a pressão de acionamento é possível calcular o coeficiente de atrito pela Equação 2 [Dohle et al., 2007]:

$$\mu = \frac{T}{2\eta(P_{acion.} - P_0)A_{pistão}R_e} \quad (2)$$

onde μ é o coeficiente de atrito, T é o torque frenante [Nm], η é a eficiência mecânica do sistema de freio, $P_{acion.}$ é a pressão de acionamento [Pa], P_0 é a pressão necessária para superar a força da mola de retorno e o atrito do pistão com o calíper [Pa], $A_{pistão}$ é a área do pistão [m²] e R_e é o raio efetivo do veículo (distância do centro do disco ao centro da pastilha) [m].

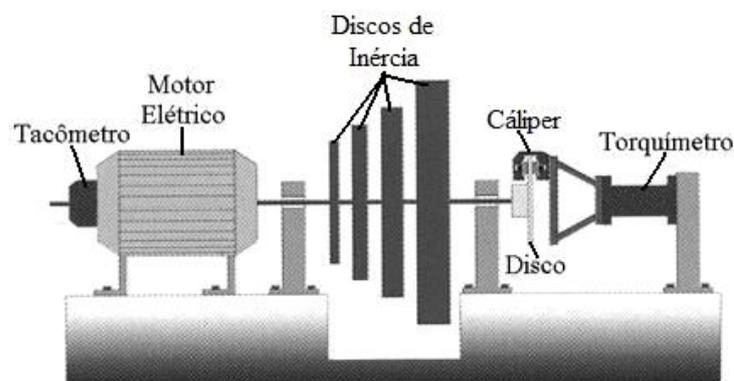


Figura 2.6 - Desenho esquemático de um dinamômetro inercial para ensaio de materiais de fricção [adaptada de Haynes Publishing, 1999]

A principal desvantagem dos dinamômetros inerciais para ensaio de materiais de fricção, segundo Sanders et al., 2001, é que eles geram um resultado do coeficiente de atrito dependente do sistema de freio, assim a cada ensaio se obtém o desempenho do material de fricção apenas para o sistema de freio ensaiado e, caso deseje-se avaliar a utilização desse mesmo material em outro sistema de freio um novo ensaio deve ser realizado no dinamômetro com o respectivo sistema de freio. Assim, o mesmo material de fricção deve ser ensaiado diversas vezes em diferentes sistemas de freio sendo que os ensaios podem levar um grande período. Essa abordagem encarece e dificulta o projeto de novos produtos de fricção, afirma Sanders et al., 2001.

2.5 Dinamômetros em Escala Reduzida para Ensaio de Materiais de Fricção

Na busca por resultados do desempenho do material de fricção independente do sistema de freio, surgiram os dinamômetros em escala reduzida. Porém, assim como os dinamômetros convencionais, esses servem para ensaiar apenas um sistema de freio por vez.

Segundo Wilson et al., 1968, os dinamômetros em escala reduzida empregados para avaliar materiais de fricção muitas vezes não apresentam um resultado do coeficiente de atrito e da temperatura semelhantes aos dos testes em veículos. Os mesmos autores afirmam que os principais fatores dessa falta de semelhança são os seguintes:

- Raio do tambor ou área de contato do disco muito maior do que a área do corpo de prova, o que resulta em temperaturas não representativas da realidade;
- Dissipação de energia variável;
- Materiais de fricção ensaiados em arraste com velocidades constantes em alguns equipamentos, enquanto que o ideal seria ensaiar uma frenagem com desaceleração constante, gerando, dessa forma, um torque frenante constante.

Para resolver esses problemas Wilson et al., 1968, propuseram as seguintes relações de escala:

- Área do disco proporcional à área da pastilha para o ensaio em escala reduzida, mantendo a mesma proporção encontrada no veículo;
- Velocidades de escorregamento (velocidade com que o disco do veículo desliza sobre a pastilha) iguais no raio efetivo para as pastilhas dos veículos e do sistema em escala reduzida;
- Mesma energia por unidade de área da pastilha dos veículos e do sistema em escala reduzida;

- Torque frenante constante para se obter uma desaceleração constante;
- Mesma taxa de resfriamento do rotor tanto para os veículos quanto para o dinamômetro em escala reduzida.

A fim de manter a mesma proporção entre a área do disco e a área da pastilha tanto para o sistema em escala reduzida, quanto para o veículo foi introduzido o fator de escala, o qual é calculado pela Equação 3 [Wilson et al.,1968; Wilson e Bowsher, 1971; Sanders et al., 2001]:

$$S = \frac{A}{a} \quad (3)$$

onde S é o fator de escala, A é a área da pastilha do veículo [m^2] e a é a área da pastilha em escala reduzida [m^2].

Simplificando a Equação 3 em função dos diâmetros têm-se a Equação 4 [Wilson et al.,1968; Wilson e Bowsher, 1971; Sanders et al., 2001]:

$$d = \frac{D}{\sqrt{S}} \quad (4)$$

onde D é o diâmetro do disco do veículo [m^2] e d é o diâmetro do disco em escala reduzida [m^2].

A relação estabelecida pela Equação 4 vale para todas as distâncias quando as relações de escala são aplicadas, inclusive para o raio efetivo.

A fim de garantir que a energia por unidade de área da pastilha dos veículos e do sistema em escala reduzida fosse a mesma deve-se estabelecer uma relação entre os momentos de inércia de massa de ambos. A dedução dessa relação é dada a seguir.

O momento de inércia de massa um veículo é dado pela Equação 5 [Sanders et al., 2001]:

$$I = MR_r^2 \quad (5)$$

onde I é o momento de inércia de massa do veículo [kgm^2], M é a massa do veículo [kg] e R_r é o raio de rolamento ou raio do pneu do veículo [m].

A energia cinética de um veículo por unidade de área da sua pastilha é dada pela Equação 6 [Sanders et al., 2001]:

$$E_a = \frac{1}{2A} M V_e^2 \quad (6)$$

onde E_a é a densidade de energia do veículo [J/m^2] e V_e é a velocidade de escorregamento do veículo [m/s].

Substituindo-se a Equação 5 na Equação 6, obtém-se a Equação 7 [Sanders et al., 2001]:

$$E_a = \frac{1}{2A} I \left(\frac{V_e}{R_r} \right)^2 \quad (7)$$

Igualando a densidade de energia do veículo com a densidade de energia em escala reduzida e isolando o momento de inércia de massa da máquina em escala reduzida obtém-se a Equação 8 [Sanders et al., 2001]:

$$i = \frac{a}{A} I \left(\frac{r_r}{R_r} \right)^2 \left(\frac{V_e}{v_e} \right)^2 \quad (8)$$

onde i é o momento de inércia de massa da máquina em escala reduzida [kgm^2], r_r é o raio de rolamento em escala reduzida [m] e v_e é a velocidade de escorregamento em escala reduzida [m/s].

A razão entre os raios de rolamento na Equação 8 pode ser substituída pela razão entre os raios efetivos, pois ambas as razões resultam na mesma constante ($1/\sqrt{5}$). Assim, obtém-se a Equação 9, que é utilizada para calcular o momento de inércia de massa em escala reduzida [Sanders et al., 2001]:

$$i = \frac{a}{A} I \left(\frac{r_e}{R_e} \right)^2 \left(\frac{V_e}{v_e} \right)^2 \quad (9)$$

onde r_e é o raio efetivo em escala reduzida [m].

Como as velocidades de escorregamento no raio efetivo devem ser iguais tanto no veículo quanto no sistema em escala reduzida, e, substituindo a Equação 3 e a razão entre os raios efetivos como sendo igual a $1/\sqrt{S}$ na Equação 9, finalmente obtém-se a Equação 10, a qual é uma relação entre os momentos de inércia de massa [Wilson et al.,1968; Wilson e Bowsher, 1971; Sanders et al., 2001]:

$$i = \frac{I}{S^2} \quad (10)$$

Desse modo, Wilson et al., 1968, utilizando as relações de escala citadas anteriormente, construíram um dinamômetro em escala reduzida chamado de Dinamômetro em Escala da Girling (*Girling Scale Dynamometer - GSD*), cujo desenho esquemático pode ser visto na Figura 2.7. O sistema de freio escolhido para esse equipamento foi o sistema de freio a disco, pois, segundo Wilson et al., 1968, o freio a tambor é mais difícil de reproduzir em escala reduzida.

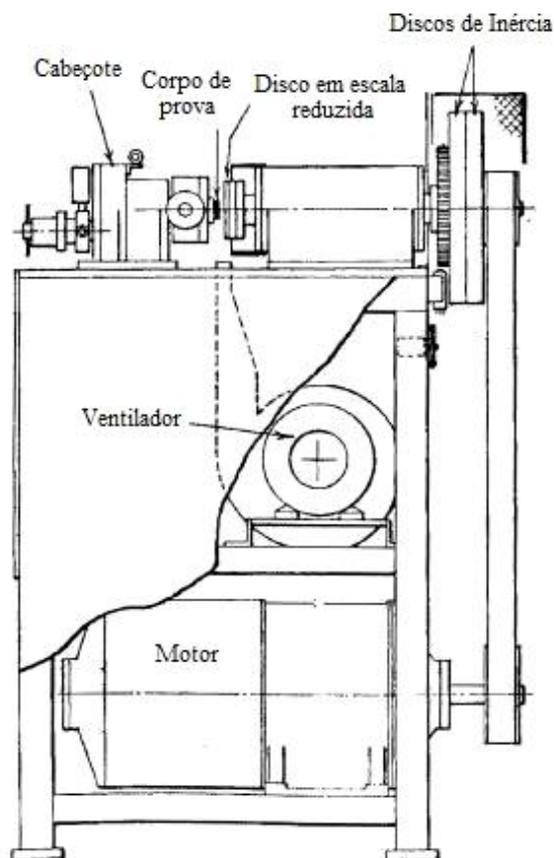


Figura 2.7 - Desenho esquemático do Dinamômetro em Escala da Girling (*Girling Scale Dynamometer - GSD*) [adaptada de Wilson et al., 1968]

O Dinamômetro em Escala da Girling foi utilizado para reproduzir o comportamento do coeficiente de atrito do freio a disco do Ford Zephyr 6 ensaiado no próprio veículo. O fator de escala escolhido foi dez, de modo a reduzir os custos ao máximo possível mantendo, porém, o corpo de prova grande o suficiente para que ele fosse representativo das propriedades da pastilha do veículo em tamanho real, afirmam os autores. O diâmetro do disco e o momento de inércia de massa desse equipamento foram obtidos, respectivamente, pelas Equações 5 e 10. Já, a espessura do disco foi obtida dividindo-se a espessura do disco desse veículo por dois [Wilson et al., 1968]. Os autores concluíram que o coeficiente de atrito médio por frenagem foi semelhante entre o GSD e sistema de freio a disco do Ford Zephyr.

Wilson e Bowsher, 1971, fizeram novos testes com essa máquina para diferentes sistemas de freio, porém, segundo os autores, dessa vez, esse equipamento não apresentou um coeficiente de atrito médio por frenagem na etapa de *fade* semelhante ao dos sistemas de freio a tambor de dois veículos. Isto ocorreu apenas para temperaturas elevadas do *fade* e segundo os autores essa diferença se deve à expansão do tambor causada pelo aumento da temperatura, o que tende a afastar a sapata do tambor no sistema de freio em escala real, reduzindo o atrito medido, o que não ocorre no Dinamômetro em Escala da Girling, pois possui um sistema de freio a disco.

Preston e Forthofer, 1971, também fizeram um novo teste neste dinamômetro em escala reduzida para um sistema de freio a tambor com três materiais de fricção diferentes: um material de montadora (material com o qual o veículo sai da montadora) e os outros dois materiais de reposição com diferentes composições. Segundo os autores, o coeficiente de atrito do GSD foi semelhante ao do veículo para o material de montadora, porém, foi significativamente diferente para os diferentes materiais de reposição. É importante ressaltar que os gráficos desses resultados não foram apresentados pelos autores e que o desgaste não foi avaliado nestes ensaios.

Motivado pelos resultados do Dinamômetro em Escala da Girling, Oldershaw et al., 1973, construíram uma réplica desse dinamômetro, o qual foi chamado de Dinamômetro em Escala da Lockheed (*Lockheed Scale Dynamometer - LSD*), cujo desenho esquemático pode ser visto na Figura 2.8. Os testes preliminares não apresentaram semelhança do coeficiente de atrito médio por frenagem desse equipamento com o sistema de freio a disco de um veículo ensaiado em um dinamômetro convencional, afirmam os autores. Foi constatado pelos autores que os motivos da diferença eram as condições térmicas da máquina em escala reduzida, as quais não eram as mesmas do sistema de freio e, além disso, as velocidades na etapa de assentamento eram diferentes no LSD e no sistema de freio do veículo. Assim, depois de

executadas as correções no equipamento, como a utilização de dois corpos de prova (um de cada lado do disco), a mudança do conjunto disco/cubo de roda para um conjunto com as devidas propriedades térmicas e corrigido o procedimento de ensaio, o equipamento apresentou resultados do coeficiente de atrito semelhantes aos do sistema de freio do veículo.

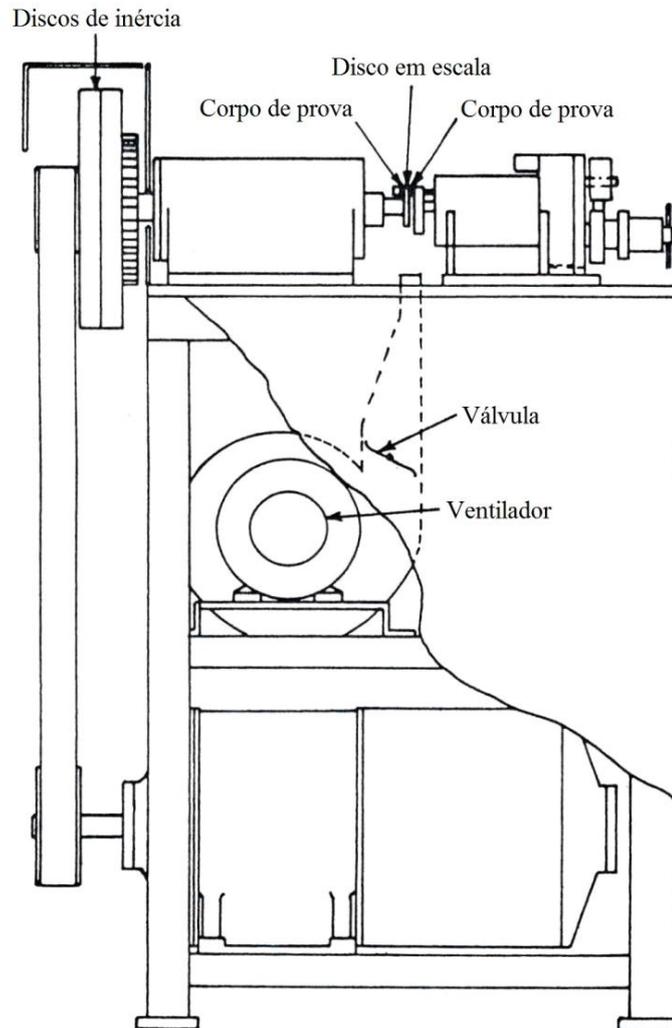


Figura 2.8 - Desenho esquemático do Dinamômetro em Escala da Lockheed (*Lockheed Scale Dynamometer - LSD*) [adaptada de Oldershaw et al., 1973]

Posteriorment, Sanders et al., 2001, em uma parceria entre a *Ford Motor Company* e a *Link Engineering*, desenvolveram um dinamômetro em escala reduzida para ensaiar materiais de fricção. Os autores citam como principais vantagens desse tipo de equipamento:

- Permitir uma avaliação mais precisa do coeficiente de atrito entre o material de atrito e o rotor em relação aos sistemas de freio convencionais, pois eliminam os efeitos desses sistemas de freio como deflexão do calíper e variações de pressão local devido à interface plaqueta/pistão;

- A utilização de um corpo de prova de tamanho padrão elimina as diferenças do coeficiente de atrito devido às diferentes geometrias das pastilhas, o que ocorre normalmente nos ensaios em escala real;

- Custo inferior aos dinamômetros inerciais para ensaio de materiais de fricção convencionais, pois possuem menores dimensões;

- Permitir que o material de fricção seja ensaiado antes que todos os componentes do sistema de freio sejam projetados, reduzindo o seu tempo de desenvolvimento.

Apesar desses equipamentos possuírem vantagens em relação aos dinamômetros convencionais, eles não reproduzem exatamente as mesmas condições de operação que os materiais de fricção experimentam nos veículos, sendo essa a sua desvantagem, afirmam os autores.

O dinamômetro em escala reduzida desenvolvido por Sanders et al., 2001, foi projetado obedecendo as relações de escala propostas por Wilson et al., 1968. Esse equipamento pode ser visto na Figura 2.9, na qual dentro do compartimento indicado por uma das setas está o disco e na outra (indicando a ponta do cilindro) está a pastilha ou corpo de prova.

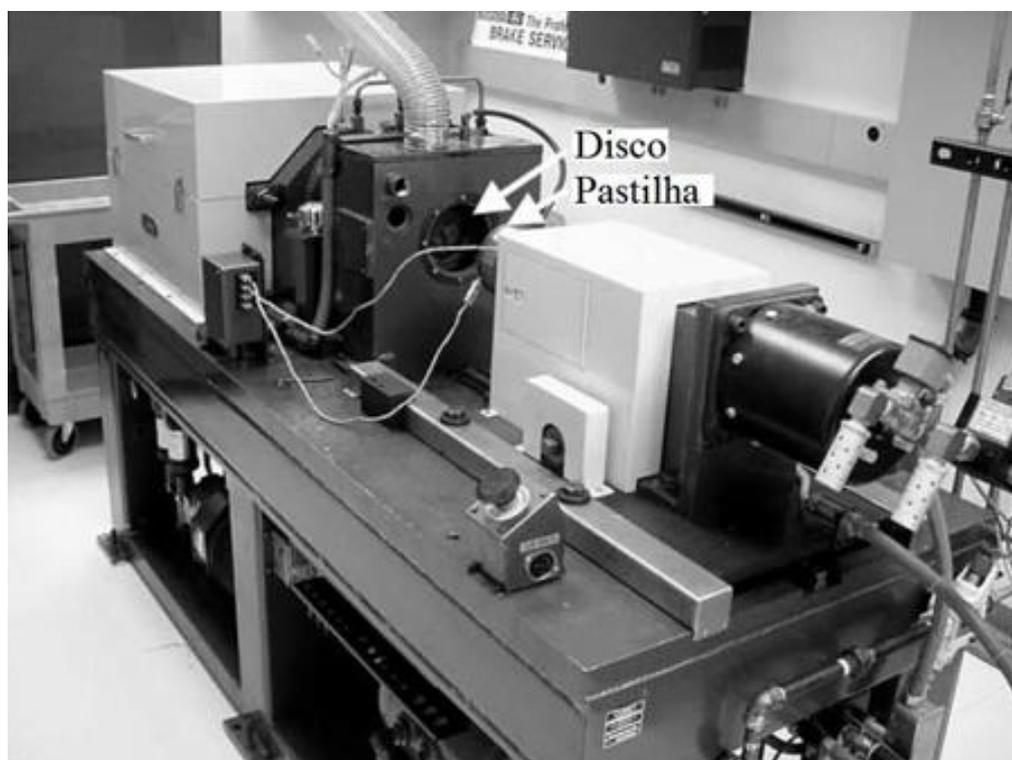


Figura 2.9 - Dinamômetro em escala reduzida desenvolvido por Sanders e colaboradores
[adaptada de Sanders et al., 2001]

Sanders et al., 2001, compararam os resultados desse dinamômetro em escala reduzida com o resultados de um dinamômetro para ensaio de materiais de fricção convencional. Os autores compararam ao longo de uma frenagem com desaceleração constante e outra com pressão constante, para um material orgânico e outro semi-metálico, as seguintes variáveis: o coeficiente de atrito, a pressão de acionamento, a velocidade, a temperatura do disco e da pastilha. Realizaram ainda uma etapa de *fade* apenas para o material semi-metálico. O fator de escala utilizado para o sistema com material orgânico foi onze, enquanto que para o sistema com o material semi-metálico foi quatorze.

Segundo os autores as pressões de acionamento e o torque foram semelhantes para as duas frenagens, uma com pressão constante e outra com desaceleração constante, entre o sistema em escala reduzida e o sistema em escala real. As temperaturas da pastilha e do disco foram semelhantes para o material orgânico entre o ensaio no dinamômetro em escala reduzida e no dinamômetro em escala real nas duas frenagens, com desaceleração e com pressão constante. Porém, para o material semi-metálico, apenas a temperatura do disco foi semelhante entre o dinamômetro em escala reduzida e o em escala real, já a temperatura da pastilha foi diferente. Segundo Sanders et al., 2001, essa diferença da temperatura da pastilha entre os ensaios ocorreu devido à maior condutividade das pastilhas semi-metálicas.

O coeficiente de atrito de cada uma das frenagens foi menor no material semi-metálico ensaiado no dinamômetro em escala reduzida em relação ao ensaiado no dinamômetro em escala real, afirmam os autores. Segundo Sanders et al., 2001, isto ocorreu devido à grande variabilidade entre lotes do material semi-metálico e também devido à menor temperatura da pastilha, pois o coeficiente de atrito tende a aumentar com a temperatura. Sanders et al., 2001, concluíram que o dinamômetro em escala reduzida desenvolvido por eles apresentou resultados semelhantes aos do ensaio realizado em um dinamômetro convencional, principalmente para o material orgânico.

2.6 Dinamômetro em Escala da Fras-le (*Fras-le Scale Dynamometer - FSD*)

O desenvolvimento de novos materiais de fricção é uma tarefa que demanda muito tempo, pois o material de fricção deve ser ensaiado para cada sistema de freio, uma vez que os dinamômetros inerciais convencionais e em escala reduzida são capazes de reproduzir os resultados de apenas um sistema de freio por ensaio. Com base neste problema, foi desenvolvido por Infantini, 2008, o conceito de um dinamômetro inercial em escala reduzida capaz de avaliar o desempenho de materiais de fricção independente do sistema de freio

aplicado e cujos resultados do ensaio de um material de fricção pudessem ser extrapolados para diferentes sistemas de freio. Essa máquina foi chamada de Dinamômetro em Escala da Fras-le (*Fras-le Scale Dynamometer - FSD*) e foi desenvolvida para atender as necessidades de projeto de novos materiais de fricção com maior rapidez, economizando tempo de ensaio e reduzindo o tempo de desenvolvimento de novos materiais de fricção.

O projeto desse equipamento teve início com o levantamento das variáveis que afetam o desempenho dos materiais de fricção: velocidade de escorregamento, pressão de contato e temperatura final para dezenove sistemas de freio representativos do mercado, trabalho o qual foi desenvolvido por Infantini, 2008. Os principais dados geométricos dos dezenove sistemas de freio escolhidos por Infantini, 2008, para fazer o levantamento das variáveis podem ser vistos na Tabela 2.2. Esses dados geométricos são: diâmetro do disco (\emptyset), espessura do disco (Esp), tipo de disco (S - sólido ou V - ventilado), área de uma (unid) ou duas (dupla) pastilhas, raios mínimo (Min), máximo (Máx) e médio da pastilha, raio de rolamento (raio do pneu), número de cilindros (Qty), diâmetro dos cilindros (\emptyset), raio efetivo (R_{efetivo}), área do pistão e momento de inércia de massa de projeto do veículo.

Tabela 2.2 - Sistemas de freio a disco utilizados no levantamento das variáveis

Sistema	Disco			Área [cm ²]		Raios					Cilindro (pistão)				Inércia [kgm ²]
	\emptyset [mm]	Esp [mm]	S ou V	Pastilha		Pastilha [mm]				Pneu [m]	Qty.	\emptyset [mm]	Refetivo [mm]	Área [m ²]	Projeto
				Unid	Dupla	Min	Máx	Médio	Altura						
A	240	12	S	41	82	71	115	93	44	0,280	1	48	96	0,0018	50
B	239	12	S	37	74	79	114	96,5	35	0,280	1	48	96	0,0018	50
C	240	20	V	43	86	75	120	97,5	45	0,281	1	48	96,5	0,0018	40
D	255	25	V	46	92	80	127	103,5	47	0,296	1	57	103,5	0,0026	45
E	239	20	V	38,15	76,3	70	116	93	46	0,280	1	54	96	0,0023	50
F	260	24	V	43,41	86,82	81	118	99,5	37	0,293	1	54	107,5	0,0023	55
G	236	20	V	37,33	74,66	70	116	93	46	0,285	1	54	93	0,0023	50
H	236	13	S	37,46	74,92	72	109	90,5	37	0,275	1	48	97,5	0,0018	45
I	258	22	V	43,41	86,82	81	118	99,5	37	0,290	1	54	105	0,0023	65
J	256	20	V	47	94	79	129	104	50	0,289	1	54	106	0,0023	50
K	280	25	V	56,6	113,2	83	140	111,5	57	0,307	1	57	118	0,0026	65
L	256	22	V	46,6	93,2	89	139	114	50	0,308	1	54	104	0,0023	65
M	287	26	V	54,5	109	84,7	128	106,48	43,65	0,356	2	46	102,7	0,0033	107,5
N	275	30	V	57	114	102	147	124,5	45	0,348	1	66	124,5	0,0034	107,5
O	296	25	V	50	100	91	144	117,25	52,5	0,353	4	42,8	128,9	0,0058	122,5
P	324	30	V	107,34	214,68	83,8	153	118,38	69,25	0,389	2	60	126	0,0057	355
Q	434	45	V	226	452	119	218	168,15	98,7	0,526	-	-	172,7	-	1308
R	430	45	V	200,72	401,44	129	215	172	86	0,527	-	-	171,5	-	1350
S	376	45	V	142,63	285,26	113	189	150,5	76	0,490	-	-	149	-	1040

S - disco sólido V - disco ventilado

Fonte: adaptada de Infantini, 2008.

Como se pode observar na tabela, os sistemas escolhidos apresentam dimensões bem distintas, sendo que os doze primeiros são sistemas hidráulicos utilizados em veículos leves

(A-L) e os quatro seguintes são utilizados em veículos utilitários esportivos - SUVs (M-P). Por fim, os últimos três sistemas (Q-S) são pneumáticos utilizados em veículos pesados (caminhões).

As pressões de contato e velocidades de escorregamento foram calculadas por Infantini, 2008, com a utilização dos dados geométricos da Tabela 2.2, enquanto que as temperaturas do disco foram obtidas experimentalmente para quatro sistemas (Sistemas B, C, D e E). As velocidades de escorregamento dos dezenove sistemas de freio foram calculadas por Infantini, 2008, para velocidades do veículo de 5 e 180 km/h (limites inferior e superior das normas de certificação usualmente utilizadas). As pressões de contato dos dezenove sistemas de freio foram calculadas por Infantini, 2008, para as pressões hidráulicas de atuação de 1,0 e 8,0 MPa (limites inferior e superior das normas usualmente utilizadas), no caso dos sistemas hidráulicos, e pressões pneumáticas de atuação de 0,1 e 0,9 MPa (limites inferior e superior das normas usualmente utilizadas), no caso dos sistemas pneumáticos.

Segundo Infantini, 2008, as pressões de contato dos sistemas pneumáticos chegam a ser três vezes maiores que nos sistemas hidráulicos (veículos leves e SUVs). Essa característica é justificada pelo fato de que sistemas pneumáticos necessitem de elevadas forças de atuação para produzirem o torque frenante necessário à parada de veículos pesados. Por esse motivo os sistemas pneumáticos foram desconsiderados no projeto do sistema de freio do Dinamômetro em Escala da Fras-le por Kruze, 2007.

Infantini, 2008, obteve experimentalmente a temperatura do disco de quatro sistemas de freio (sistemas B, C, D e E) dos dezenove escolhidos inicialmente, dos quais um sistema de freio é com disco sólido (sistema B) e os demais são com disco ventilado (C, D e E). Nos ensaios de cada um dos quatro sistemas foram utilizadas pastilhas orgânicas novas.

A temperatura do disco foi medida com termopares tipo K, sendo o diâmetro de cada um dos fios iguais a 0,4 mm. De modo a prender os termopares por interferência nos discos, ponteiras de cobre são soldadas na junta quente dos termopares por solda prata. Essas ponteiras de cobre possuem aproximadamente 3,5 mm de diâmetro e 4,1 mm de altura.

No sistema com disco sólido foi utilizado um termopar, o qual foi posicionado no ponto vermelho indicado na Figura 2.10, considerando que o disco possui 12 mm de espessura e o furo do termopar possui diâmetro de 3 mm, o termopar foi posicionado a 4 mm das superfícies de atrito do disco. Já, nos discos ventilados dois termopares foram dispostos como mostram os pontos vermelhos na Figura 2.11, ou seja, foram colocados dois termopares a 1 mm da superfície de atrito de cada lado do disco. Essas metodologias de instrumentação dos discos foram realizadas conforme indica a norma de ensaio *AK-Master*, 1998.

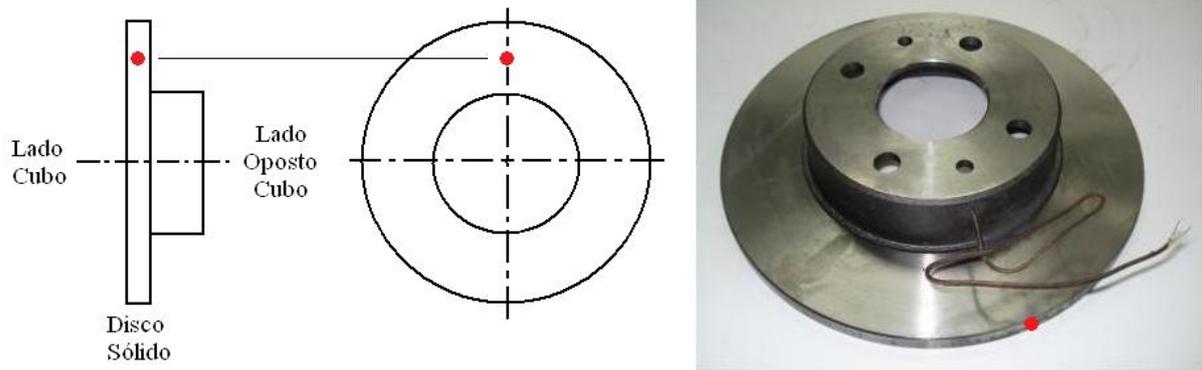


Figura 2.10 - Desenho esquemático e foto da posição do termopar no disco do sistema B (o ponto vermelho indica a posição do termopar) [adaptada de Infantini, 2008]

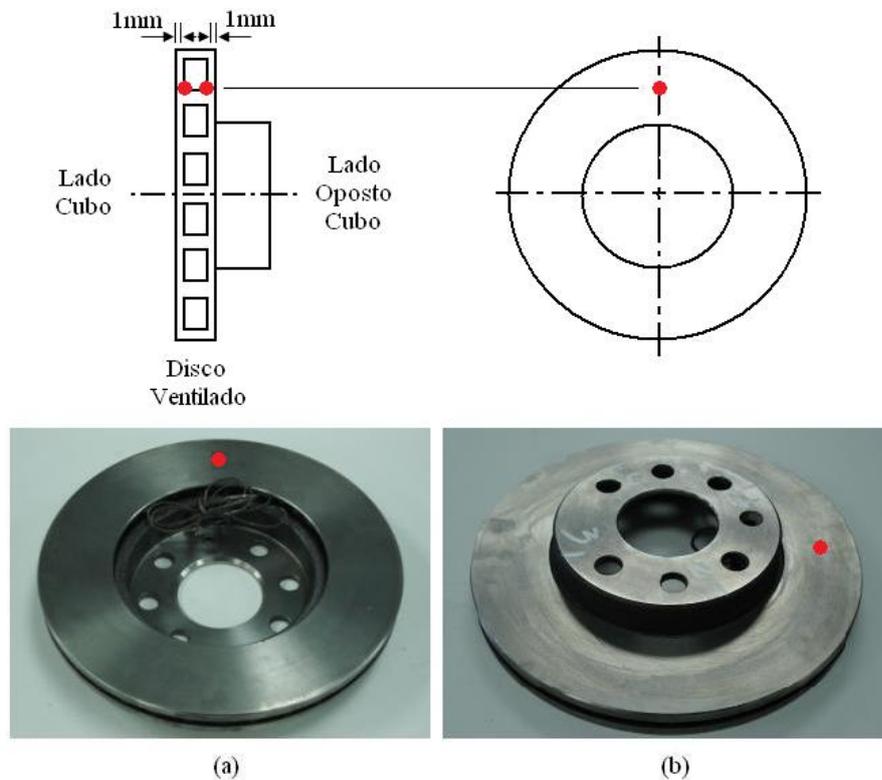


Figura 2.11 - Desenho esquemático da posição dos termopares nos sistemas com disco ventilado e foto do disco do sistema C (os pontos vermelhos informam as posições dos termopares): (a) Face do lado do cubo; (b) Face do lado oposto ao cubo [adaptada de Infantini, 2008]

O procedimento de ensaio elaborado por Infantini, 2008, no qual foi medida a temperatura do disco de cada um dos quatro sistemas de freio, pode ser visto na Tabela 2.3. Esse procedimento de ensaio foi desenvolvido com base na norma *AK-Master*, 1998, da qual foram retiradas as etapas consideradas mais importantes pelo autor para a elaboração do ensaio que foi chamado de ensaio de caracterização térmica. As faixas das pressões de contato

entre o par de fricção, velocidades de escorregamento iniciais e finais e temperaturas iniciais ou de gatilho foram estipuladas pelo autor com base na mesma norma. O símbolo “N^o” na tabela indica o número total de frenagens de cada etapa.

Tabela 2.3 - Ensaio de caracterização térmica

Etapa	N ^o	VELOCIDADE DE ESCORREGAMENTO [m/s]		PRESSÃO CONTATO [MPa]	TEMPERATURA [°C]
		Inicial	Final		Inicial
Assentamento	50	7,4	2,8	1,32	100
Velocidade 1	7	3,7	0,5	0,88 - 1,32 - 1,77 - 2,21 - 2,65 - 3,09 - 3,53	100
Velocidade 2	7	7,4	3,7	0,88 - 1,32 - 1,77 - 2,21 - 2,65 - 3,09 - 3,53	100
Velocidade 3	7	11,1	7,4	0,88 - 1,32 - 1,77 - 2,21 - 2,65 - 3,09 - 3,53	100
Velocidade 4	7	14,8	12,0	0,88 - 1,32 - 1,77 - 2,21 - 2,65 - 3,09 - 3,53	100
Velocidade 5	7	16,6	13,8	0,88 - 1,32 - 1,77 - 2,21 - 2,65 - 3,09 - 3,53	100
Fade	15	9,2	0,5	Desaceleração = 3,92 m/s ²	100 - 215 - 283 - 330 - 367 - 398 - 423 - 446 - 465 - 483 - 498 - 513 - 526 - 539 - 550
Caracterização	18	7,4	2,8	1,32	100
TOTAL	118	frenagens			

Fonte: adaptada de Infantini, 2008.

É importante ressaltar que cada frenagem só se inicia quando a temperatura inicial, ou de gatilho, e a velocidade inicial estipuladas são atingidas, com exceção da primeira frenagem do ensaio na qual o disco está na temperatura ambiente e, portanto nunca se consegue atingir a temperatura de gatilho necessária.

O ensaio de caracterização térmica consiste de cento e dezoito frenagens. A primeira etapa do ensaio, chamada de assentamento, consiste de cinquenta frenagens, cada uma realizada com uma pressão de contato de 1,32 MPa entre o par de fricção, velocidade de escorregamento inicial igual a 7,4 m/s, velocidade de escorregamento final igual a 2,4 m/s e

temperatura inicial ou temperatura de gatilho igual a 100°C. As próximas etapas do ensaio, chamadas de velocidade 1, 2, 3, 4 e 5, consistem cada uma de sete frenagens realizadas com sete diferentes pressões (0,88 - 1,32 - 1,77 - 2,21 - 2,65 - 3,09 - 3,53 MPa), o que muda das etapas de velocidade de 1 a 5 são as velocidades de escorregamento iniciais e finais, as quais variam respectivamente de 3,7 a 16,6 m/s e 2,8 a 13,8 m/s conforme a Tabela 2.3. A penúltima etapa do procedimento, chamada de *fade*, consiste de quinze frenagens, com temperaturas iniciais crescentes segundo uma escala logarítmica, realizadas com velocidades de escorregamento iniciais iguais a 9,2 m/s e finais iguais a 0,5 m/s, onde a pressão é controlada para se obter uma desaceleração igual a 3,92 m/s² (0,4 g). A última etapa do ensaio, chamada de caracterização, consiste de dezoito frenagens realizadas nas mesmas condições de operação do assentamento.

Os momentos de inércia de massa utilizados neste ensaio foram normalizados por Infantini, 2008, de modo que todos os sistemas foram ensaiados com a mesma quantidade de energia por unidade de área da pastilha. Os momentos de inércia de massa utilizados para cada sistema podem ser vistos na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Momentos de inércia de massa utilizados no ensaio de caracterização térmica

INÉRCIA [kgm²]	Sistema
46,3	B
54,9	C
66,2	D
44,3	E

Fonte: adaptada de Infantini, 2008.

Como pode ser observado na Tabela 2.3 as temperaturas iniciais, ou de gatilho, são dadas pelo ensaio e, portanto normalmente gráfica-se apenas as temperaturas finais de cada frenagem para uma comparação entre diferentes materiais ou sistemas e também porque se fossem graficadas todas as temperaturas ao longo de cada frenagem de um ensaio em um mesmo gráfico, seria difícil de compreender esse gráfico devido à grande quantidade de dados contidos nele. A temperatura no final da frenagem vai variar dependendo do sistema de freio, do material de atrito utilizado, ou da frenagem. Exemplificando, a Figura 2.12 mostra o comportamento da temperatura do disco durante uma frenagem (ao longo do tempo) e, o ponto vermelho no gráfico indica o valor da temperatura final (no tempo de 7 s).

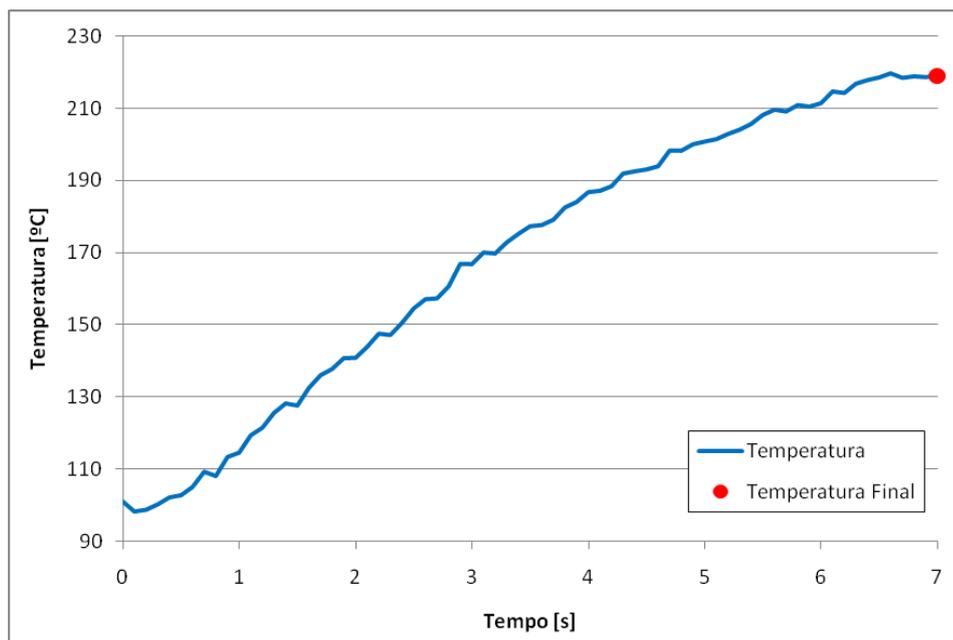


Figura 2.12 - Variação da temperatura do disco durante uma frenagem

Os resultados de temperatura final de cada uma das cento e dezoito frenagens do ensaio de caracterização térmica dos sistemas B, C, D e E, obtidos por Infantini, 2008, podem ser vistos na Figura 2.13, sendo que para os sistemas ventilados a temperatura final é a média da temperatura final dos dois termopares. Estão identificadas no gráfico as etapas do ensaio (assentamento, velocidade de 1 a 5, *fade* e caracterização) separadas por linhas verticais, essas linhas indicam em qual frenagem acaba cada uma das etapas. Por exemplo, o assentamento acaba na frenagem cinquenta, portanto, o gráfico possui uma linha vertical na frenagem número cinquenta indicando que o assentamento corresponde ao intervalo de frenagens de um a cinquenta.

Infantini, 2008, obteve também os resultados do coeficiente de atrito médio de cada frenagem para os quatro sistemas de freio ensaiados. É importante ressaltar que normalmente são graficados os coeficientes de atrito médio por frenagem do ensaio e, quando necessário se faz uma avaliação do coeficiente de atrito ao longo da frenagem em algumas frenagens específicas. Isto é feito dessa forma porque se fossem graficados todos os coeficientes de atrito ao longo de cada frenagem no ensaio, o gráfico resultante teria muita informação e seria complexo de ser avaliado. Exemplificando, a curva em azul da Figura 2.14 mostra o comportamento do coeficiente de atrito ao longo de uma única frenagem, ou seja, ao longo do tempo, e o ponto vermelho indica o valor médio do coeficiente de atrito nesta frenagem. Os resultados do coeficiente de atrito médio por frenagem para cada um dos quatro sistemas de freio, obtidos por Infantini, 2008, podem ser vistos na Figura 2.15.

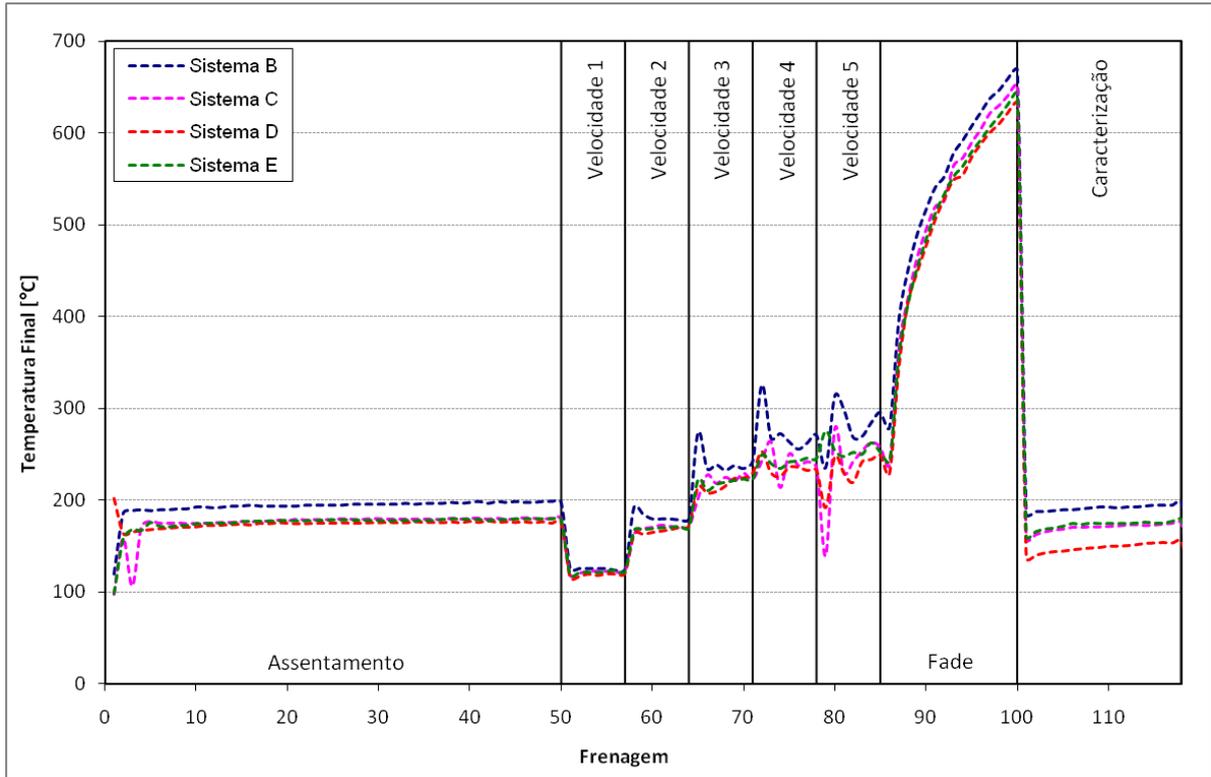


Figura 2.13 - Temperaturas finais médias de cada frenagem dos quatro sistemas ensaiados
[adaptada de Infantini, 2008]

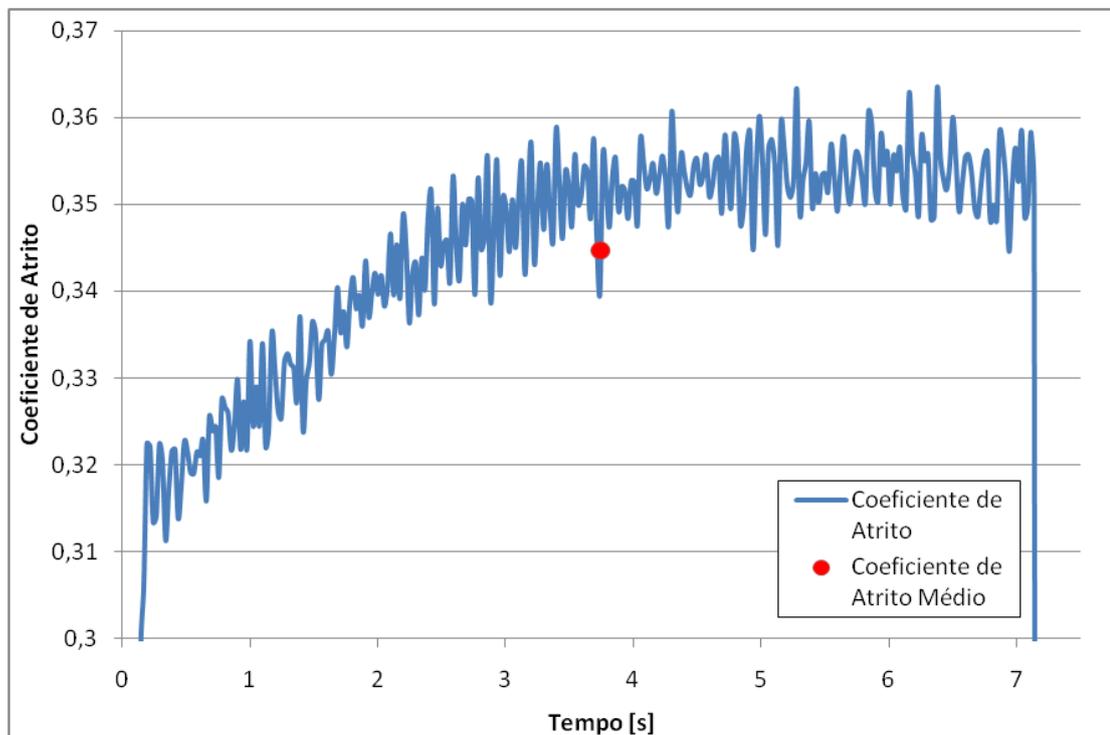


Figura 2.14 - Variação do coeficiente de atrito ao longo de uma frenagem e coeficiente de atrito médio da frenagem

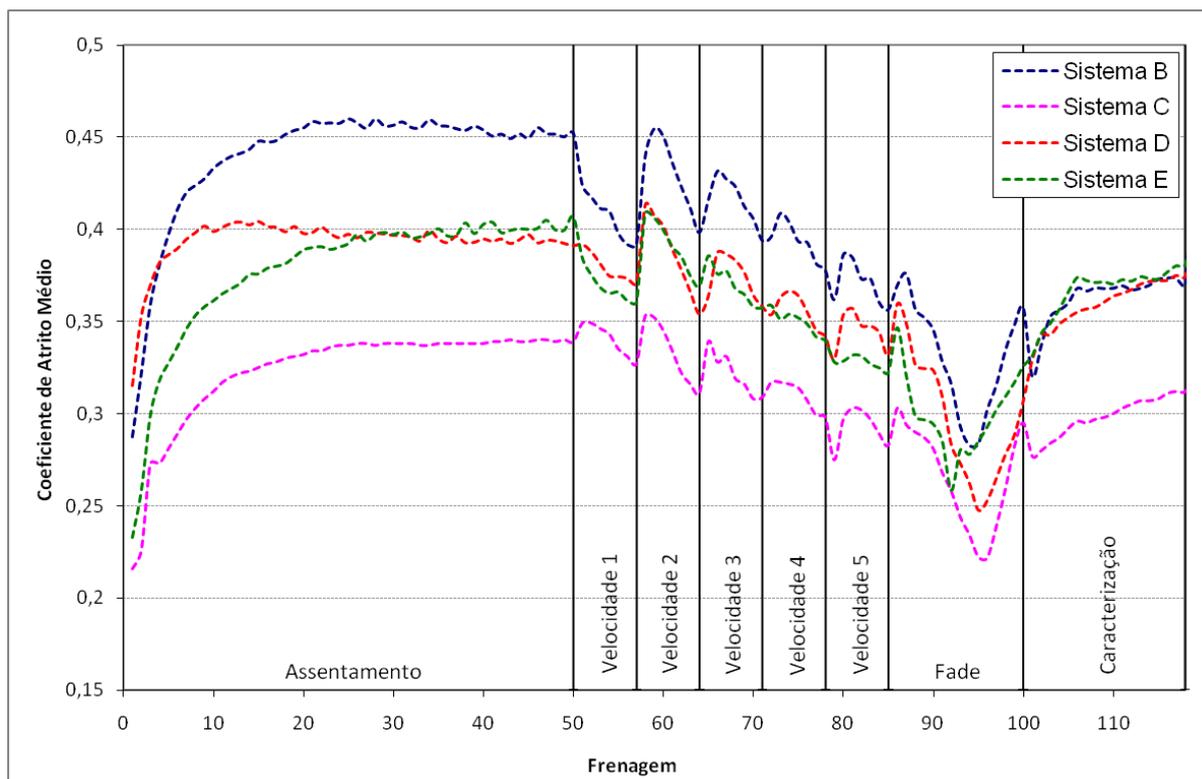


Figura 2.15 - Coeficientes de atrito médios de cada frenagem dos quatro sistemas ensaiados [adaptada de Infantini, 2008]

Pelos resultados das pressões de contato e velocidades de descorregamento dos dezenove sistemas de freio Infantini, 2008, concluiu-se que entre eles não havia diferenças significativas de velocidades de descorregamento e que as pressões de contato são semelhantes entre os veículos hidráulicos (leves e SUVs), porém os veículos pneumáticos possuem pressões de contato cerca de até três vezes maiores. A partir dos dados levantados por Infantini, 2008, iniciou-se o projeto do Dinamômetro em Escala Reduzida da Fras-le. A fim de simplificar a fabricação desse dinamômetro em escala reduzida, um dinamômetro inercial da LINK modelo 1500 existente na Fras-le S/A foi modificado para funcionar como um dinamômetro em escala reduzida.

As modificações feitas foram a fabricação de um sistema de freio específico para esse equipamento, o qual foi desenvolvido por Kruse, 2007, com base nas velocidades de descorregamento e pressões de contato dos dezenove sistemas calculados por Infantini, 2008; e a confecção de novos discos de inércia (sete discos de inércia de 2 kgm^2 , três de $0,5 \text{ kgm}^2$ e quatro de $0,1 \text{ kgm}^2$) para atender os momentos de inércia de massa em escala reduzida dos dezenove sistemas de freio. Dessa forma, a mesma energia por unidade de área pode ser utilizada tanto nos sistemas reais quanto no FSD. Esse equipamento pode ser visto na Figura 2.16.



Figura 2.16 - Dinamômetro em Escala da Fras-le (*Fras-le Scale Dynamometer - FSD*)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão discutidas as metodologias utilizadas para:

- Obter uma estimativa do tempo de resposta do termopar utilizado, a fim de verificar se a instrumentação utilizada é adequada para a medição da temperatura;

- Selecionar uma espessura de disco para o Dinamômetro em Escala da Fras-le, através da comparação do comportamento térmico do dinamômetro e escala reduzida, ensaiado conforme o ensaio de caracterização térmica, com o comportamento térmico dos sistemas B, C, D e E, ensaiados conforme o mesmo procedimento de ensaio;

- Calcular a incerteza de medição do coeficiente de atrito no Dinamômetro em Escala da Fras-le, de modo a utilizá-la na comparação entre o coeficiente de atrito médio por frenagem do dinamômetro em escala reduzida, ensaiado conforme o ensaio de caracterização térmica, e os coeficientes de atrito por frenagem dos sistemas B, C, D e E, ensaiados conforme o mesmo procedimento de ensaio;

- Comparar os resultados do coeficiente de atrito médio por frenagem do Dinamômetro em Escala da Fras-le, ensaiado conforme o ensaio de caracterização térmica, com os resultados do coeficiente de atrito médio por frenagem dos sistemas B, C, D e E, sendo os quatro sistemas ensaiados com o mesmo procedimento de ensaio do FSD.

3.1 Obtenção Experimental do Tempo de Resposta do Termopar Tipo K Utilizado nas Medições

As temperaturas dos discos do Dinamômetro em Escala da Fras-le de diferentes espessuras foram medida com termopares tipo K, sendo o diâmetro de cada um dos fios iguais a 0,4 mm. De modo a prender os termopares por interferência nos discos, ponteiros de cobre são soldadas na junta quente dos termopares por solda prata. Essas ponteiros de cobre possuem aproximadamente 3,5 mm de diâmetro e 4,1 mm de altura.

3.2 Seleção da Espessura do Disco do Dinamômetro em Escala da Fras-le através do Comportamento Térmico Durante o Ensaio de Caracterização Térmica

O disco do sistema de freio do Dinamômetro em Escala da Fras-le foi desenvolvido por Kruze, 2007, cujo diâmetro foi calculado pela Equação 11:

$$d = 2r_e + h_{cp} + 0,002 \quad (11)$$

onde h_{cp} é a altura da pastilha em escala reduzida [m].

É importante ressaltar que segundo as relações de escala propostas por Wilson et al., 1968, o diâmetro do disco do FSD deveria ter sido calculado pela Equação 4, mas Kruze, 2007, definiu o diâmetro do disco dessa máquina pela Equação 11, pois se o diâmetro do disco do dinamômetro em escala fosse calculado pela Equação 4 o valor obtido seria igual a 148,0 mm, ou seja, um raio igual a 74,0 mm, enquanto que o valor do raio máximo da pastilha desse equipamento, o qual foi definido pelo mesmo autor, é 78,5 mm, deste modo uma parte da pastilha estaria tocando fora do disco durante as frenagens, o que não pode acontecer. O valor do diâmetro do disco do Dinamômetro em Escala da Fras-le calculado segundo a Equação 11 foi igual a 159,0 mm, enquanto que se ele fosse calculado pela Equação 4 o valor obtido seria igual a 148,0 mm, o que representa uma diferença de 7,43% dada em porcentual do valor do diâmetro do disco calculado pela Equação 4.

Como o diâmetro do disco do dinamômetro em escala não foi definido pela relação de escala proposta por Wilson et al., 1968, a espessura do disco também não poderia ser estimada por essa relação de escala e uma abordagem diferente foi adotada. Com base nas diferentes temperaturas finais de cada frenagem dos quatro sistemas de freio (B, C, D e E) obtidos por Infantini, 2008, diferentes espessuras de disco foram ensaiadas utilizando o ensaio de caracterização térmica, visando à escolha daquela que possui o comportamento da temperatura final de cada frenagem do ensaio mais próximo dos quatro sistemas de freio. Foram testadas quatro espessuras de disco, 10, 15, 20 e 25 mm. Esses valores foram escolhidos com base nas espessuras de discos existentes no mercado, que variam de 12 a 22 mm.

Como os resultados da temperatura final de cada frenagem dos discos de diferentes espessuras seriam comparados com os resultados das temperaturas finais de cada frenagem dos discos dos quatro sistemas de freio ensaiados por Infantini, 2008, os discos do dinamômetro em escala reduzida tinham que ser ensaiados nas mesmas condições de operação que o autor usou (pressões de contato, velocidades de escorregamento e temperaturas iniciais). Portanto, o ensaio utilizado foi o ensaio de caracterização térmica (Tabela 2.3) e, o momento de inércia de massa utilizado foi de 8 kgm^2 para que a energia por unidade de área da pastilha em escala reduzida fosse a mesma dos quatro sistemas de freio ensaiados anteriormente. As pastilhas utilizadas neste ensaio são feitas do mesmo material orgânico utilizado nos ensaios anteriores.

As temperaturas nos discos de diferentes espessuras do FSD (10, 15, 20 e 25 mm) foram medidas com dois termopares tipo K, sendo o diâmetro de cada um dos fios iguais a

0,4 mm. De modo a prender os termopares por interferência nos discos, ponteiras de cobre são soldadas na junta quente dos termopares por solda prata. Essas ponteiras de cobre possuem aproximadamente 3,5 mm de diâmetro e 4,1 mm de altura. Cada termopar foi colocado a 1 mm de cada uma das superfícies de contato com as pastilhas e defasados em 180° como pode ser visto nos dois pontos vermelhos da Figura 3.1. Os termopares foram colocados em lados opostos devido ao fato do disco mais fino possuir 10 mm de espessura e, como o furo para a colocação do termopar possui 3 mm, se fossem feitos dois furos no sentido radial, ambos alinhados, mas em espessuras diferentes, sobraria pouca parede na espessura do disco o que poderia ocasionar uma trinca no disco durante os ensaios. Vale ressaltar que, apesar dos discos desse equipamento serem do tipo sólido, os termopares foram instrumentados da maneira como as normas recomendam que se instrumente discos ventilados. Isto foi feito para se ter duas temperaturas medidas, diminuindo a incerteza de medição devido ao posicionamento do termopar.

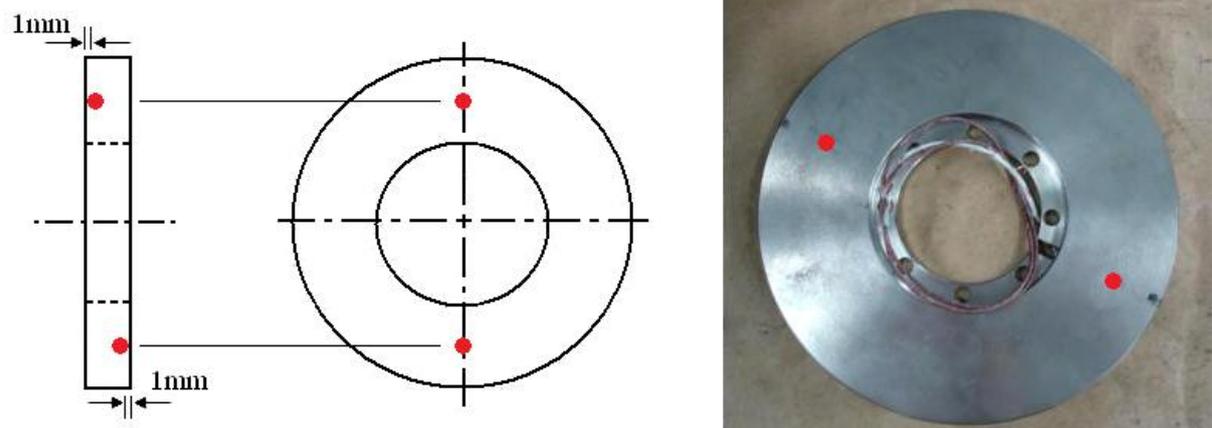


Figura 3.1 - Desenho esquemático da instrumentação dos discos do Dinamômetro em Escala da Fras-le e foto do disco de 10 mm instrumentado com os dois termopares (os pontos vermelhos informam as posições dos termopares)

3.3 Avaliação da Incerteza de Medição do Coeficiente de Atrito no Dinamômetro em Escala da Fras-le

A incerteza de medição do coeficiente de atrito no Dinamômetro em Escala da Fras-le foi calculada para poder ser utilizada na comparação dos resultados do coeficiente de atrito no ensaio de caracterização térmica entre o FSD e os sistemas B, C, D e E. Considerando que todas as variáveis utilizadas no cálculo do coeficiente de atrito do Dinamômetro em Escala da Fras-le são estatisticamente independentes, a incerteza de medição do coeficiente de atrito

nesse equipamento por ser calculada segundo Kline e McClintock apud Santos, 2008, pela Equação 12, onde o coeficiente de atrito é calculado pela Equação 2:

$$\sigma_{\mu} = \left[\sigma_T^2 \left(\frac{\partial \mu}{\partial T} \right)^2 + \sigma_{\eta}^2 \left(\frac{\partial \mu}{\partial \eta} \right)^2 + \sigma_{P_{acion.}}^2 \left(\frac{\partial \mu}{\partial P_{acion.}} \right)^2 + \sigma_{P_0}^2 \left(\frac{\partial \mu}{\partial P_0} \right)^2 + \sigma_{A_{pist\tilde{a}o}}^2 \left(\frac{\partial \mu}{\partial A_{pist\tilde{a}o}} \right)^2 + \sigma_{R_e}^2 \left(\frac{\partial \mu}{\partial R_e} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

onde σ_{μ} é a incerteza de medição do coeficiente de atrito, σ_T é a incerteza de medição do torque [Nm], σ_{η} é a incerteza de medição da eficiência mecânica do sistema de freio, $\sigma_{P_{acion.}}$ é a incerteza de medição da pressão de acionamento [Pa], σ_{P_0} é a incerteza de medição da pressão necessária para superar a força da mola de retorno e o atrito do pistão com o cáliper [Pa], $\sigma_{A_{pist\tilde{a}o}}$ é a incerteza de medição da área do pistão [m²] e σ_{R_e} é a incerteza de medição do raio efetivo [m²].

O torque frenante é medido no Dinamômetro em Escala da Fras-le por um torquímetro da GSE modelo 1132, o qual possui uma incerteza de medição igual a $\pm 0,22\%$ do valor de fundo de escala segundo o fabricante. Como o seu valor de fundo de escala é igual a 2259,69 Nm (20000 lbf pol), o valor da incerteza de medição do torquímetro é igual a $\pm 4,92$ Nm. O valor do torque varia em cada frenagem do procedimento de ensaio utilizado, por isso a incerteza do coeficiente de atrito também varia em cada frenagem ao longo do ensaio e depende do procedimento de ensaio utilizado. O valor da pressão de acionamento, assim como o torque, também varia em cada frenagem do procedimento de ensaio, o que também faz com que a incerteza do coeficiente de atrito varie em cada frenagem ao longo do ensaio e dependa dele. A incerteza de medição da pressão de acionamento vai depender do medidor de pressão utilizado, no caso do FSD o transdutor de pressão utilizado foi o modelo STJE da *Honeywell*, o qual possui uma incerteza de medição igual a $\pm 0,05\%$ do seu valor de fundo de escala. Como o valor do fundo de escala desse instrumento é igual a 20,68 MPa (3000 psi), a sua incerteza de medição é igual a 0,01 MPa.

O valor da eficiência mecânica para sistemas de freio a disco é 1,00 conforme a norma de ensaio *AK-Master*, 1998, e a sua incerteza de medição é $\pm 0,01$ segundo Dohle et al., 2007. Os mesmos autores afirmam ainda que a incerteza de medição da pressão necessária para superar a força da mola de retorno e o atrito do pistão com o cáliper é de $\pm 0,03$ MPa, sendo o valor dessa pressão igual 0,05 MPa conforme a norma de ensaio *AK-Master*, 1998.

A área do pistão é calculada pelo seu diâmetro, sendo assim, a incerteza de medição da área do pistão pode ser calculada, conforme Kline e McClintock apud Santos, 2008, pela Equação 13:

$$\sigma_{A_{\text{pistão}}} = \left[\sigma_{d_{\text{pistão}}}^2 \left(\frac{\partial A_{\text{pistão}}}{\partial d_{\text{pistão}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

onde $d_{\text{pistão}}$ é o diâmetro do pistão [m] e $\sigma_{d_{\text{pistão}}}$ é a incerteza de medição do diâmetro do pistão [m].

As incertezas de medida do diâmetro do pistão e do raio efetivo são ambas iguais a $\pm 0,02\text{mm}$, incerteza dada pelo fabricante do paquímetro digital utilizado (paquímetro da Mitutoyo modelo 500-171-20B). Os valores do diâmetro do pistão e do raio efetivo do Dinamômetro em Escala da Fras-le a serem utilizados no cálculo da incerteza de medição do coeficiente de atrito desse equipamento são, segundo Kruze, 2007, respectivamente iguais a 34,92 mm e 61 mm.

3.4 Curva de Atrito Característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le para o Ensaio de Caracterização Térmica

Como será comentado posteriormente nos resultados, o disco de 10 mm de espessura obteve o comportamento térmico mais semelhante ao dos quatro sistemas com os quais foi comparado para o caso do procedimento de ensaio chamado de caracterização térmica (Tabela 2.3) e, portanto, foi utilizado nos ensaios para a obtenção do coeficiente de atrito médio. Assim, foram realizados dois ensaios no Dinamômetro em Escala da Fras-le, ambos com discos de 10 mm e utilizando o ensaio de caracterização térmica. Um dos objetivos desses dois ensaios foi a avaliação do comportamento do coeficiente de atrito médio por frenagem desse equipamento neste ensaio, verificando se há uma grande dispersão entre os dois resultados. Com essas duas curvas do coeficiente de atrito médio por frenagem ao longo de todo o ensaio, adotou-se como a curva de atrito característica do dinamômetro em escala reduzida para o ensaio de caracterização térmica a média desses dois resultados do coeficiente de atrito.

3.5 Avaliação da Correlação do Coeficiente de Atrito Médio por Frenagem dos Ensaio de Caracterização Térmica

Para comparar o coeficiente de atrito médio de cada frenagem do ensaio de caracterização térmica dos sistemas de freio B, C, D e E com a curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le, a fim de comprovar que a espessura de disco escolhida foi realmente adequada, foram utilizados três diferentes métodos:

- Coeficiente de correlação de Pearson para avaliar o grau de correlação entre o comportamento da curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le para o ensaio de caracterização térmica e o comportamento do coeficiente de atrito médio por frenagem dos quatro sistemas de freio (B, C, D e E) ensaiados conforme o ensaio de caracterização térmica;

- Comparação qualitativa entre a curva de atrito característica do dinamômetro em escala reduzida e os coeficientes de atrito médio de cada frenagem do ensaio de caracterização térmica dos sistemas de freio B, C, D e E. Isto foi realizado através do deslocamento vertical da curva de atrito característica do FSD de modo que ela possua a mesma média, ao longo de todo o ensaio, do coeficiente de atrito médio de cada sistema de freio ensaiado;

- Comparação quantitativa entre a curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le e os coeficientes de atrito médio de cada frenagem dos quatro sistemas de freio ensaiados segundo o ensaio de caracterização térmica. Para esa comparação utilizou-se os seguintes critérios: sensibilidade do coeficiente de atrito à pressão, à velocidade, à temperatura e recuperação do coeficiente de atrito na caracterização.

3.5.1 Avaliação do Coeficiente de Correlação de Pearson

Como pode ser observado nas Figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 há uma alta correlação linear entre a curva de atrito característica do dinamômetro em escala reduzida, ou coeficiente de atrito médio do Dinamômetro em Escala da Fras-le nos gráficos, e os coeficientes de atrito médio por frenagem de cada um dos quatro sistemas de freio a disco ensaiados anteriormente, a qual está representada pelas linhas de tendência nas figuras (linhas em vermelho). Segundo Lopes, 1999, o coeficiente de correlação de Pearson pode ser utilizado para quantificar o grau de correlação linear entre o comportamento do coeficiente de atrito médio entre cada um dos sistemas e o FSD. Vale ressaltar que se, por exemplo, na Figura 3.2 todos os pontos estivessem sobre uma reta qualquer traçada nessa figura, o coeficiente de correlação entre o

coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema B e do dinamômetro em escala reduzida seria igual a 1, independente da diferença das médias dos coeficientes de atrito médios ao longo de todo o ensaio.

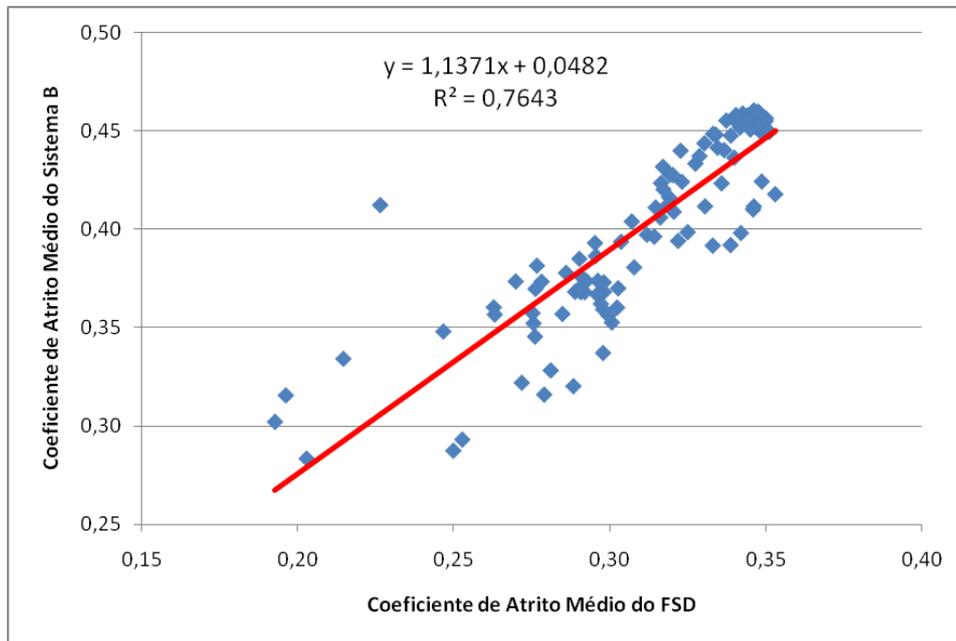


Figura 3.2 - Relação linear entre o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema B e do Dinamômetro em Escala da Fras-le (a linha vermelha representa a linha de tendência linear entre as variáveis)

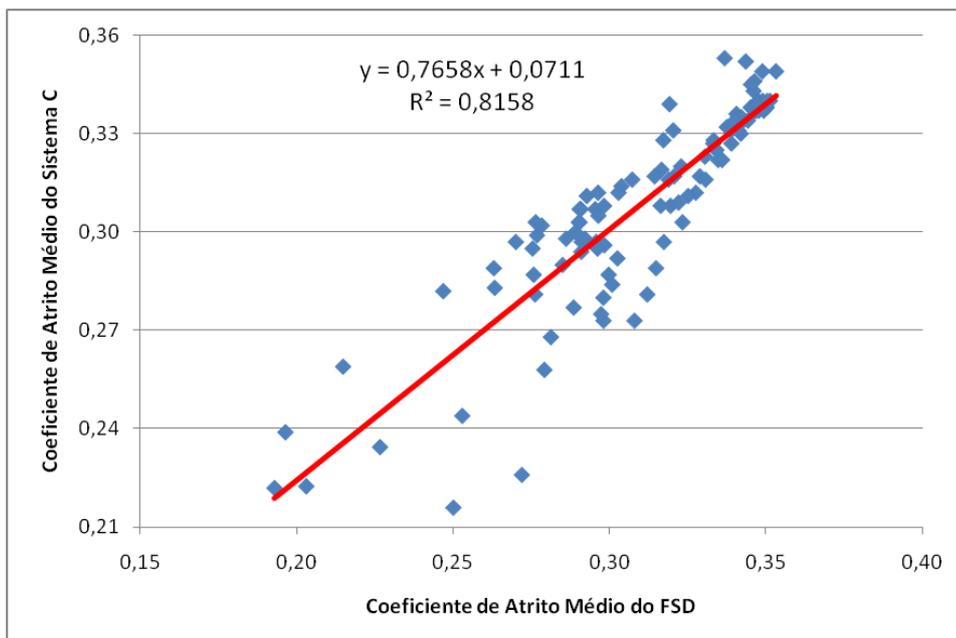


Figura 3.3 - Relação linear entre o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema C versus o coeficiente de atrito médio por frenagem do Dinamômetro em Escala da Fras-le (a linha vermelha representa a linha de tendência linear entre as variáveis)

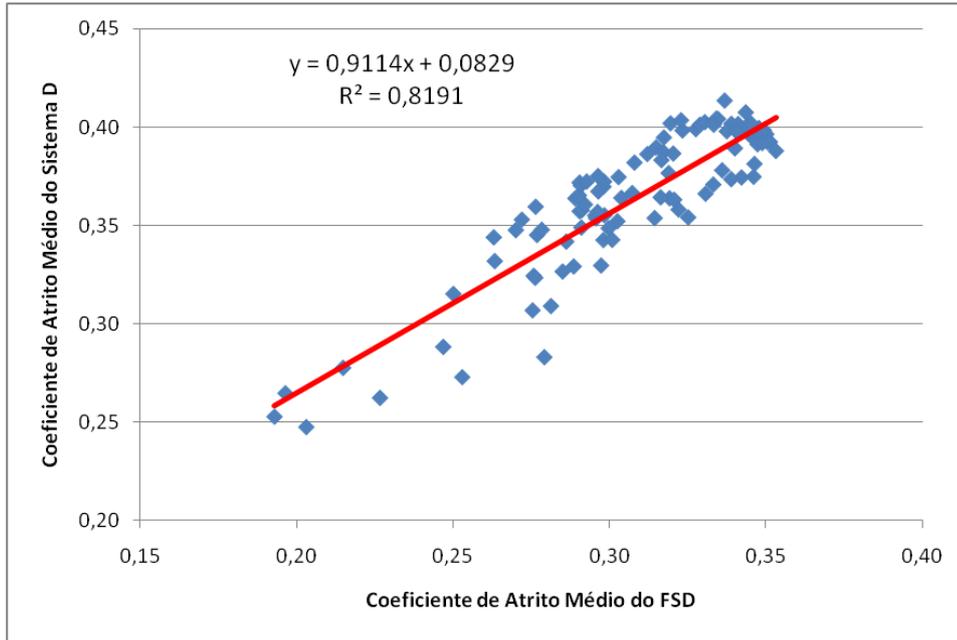


Figura 3.4 - Relação linear entre o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema D e do Dinamômetro em Escala da Fras-le (a linha vermelha representa a linha de tendência linear entre as variáveis)

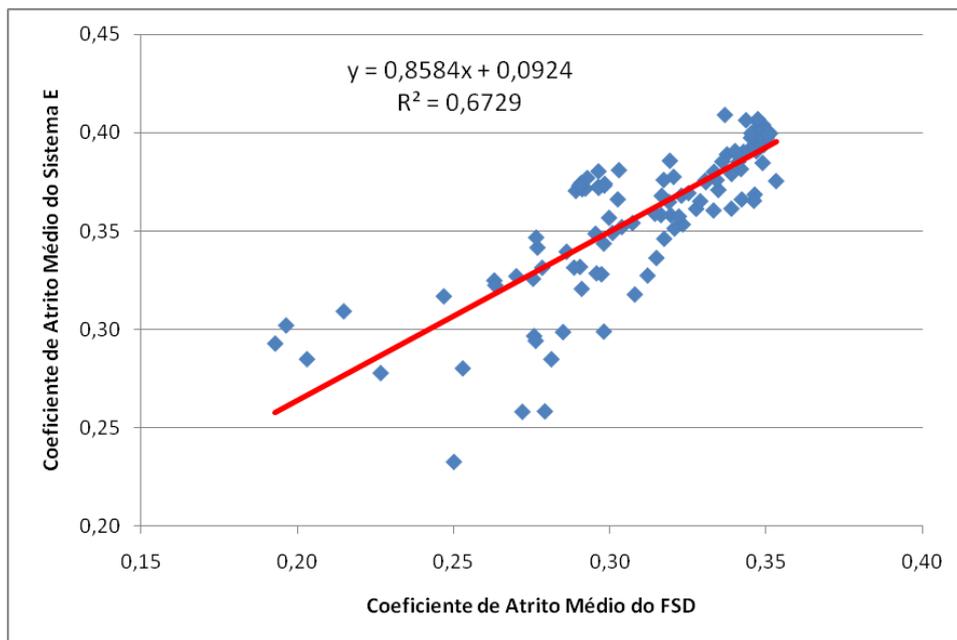


Figura 3.5 - Relação linear entre o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema E versus o coeficiente de atrito médio por frenagem do Dinamômetro em Escala da Fras-le (a linha vermelha representa a linha de tendência linear entre as variáveis)

3.5.2 Comparação Qualitativa

Os coeficientes de atrito médio por frenagem dos sistemas B, C, D e E e a curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le para o ensaio de caracterização térmica possuem patamares diferentes, conforme será discutido nos resultados. Isso se deve as diferenças do rendimento mecânico entre os sistemas, pois neste trabalho o rendimento mecânico utilizado no cálculo do coeficiente de atrito foi igual a 1,00 para todos os sistemas, inclusive o FSD, conforma aconselha a norma de ensaio *AK-Master*, 1998. Porém, como não se sabe os rendimentos mecânicos de cada sistema e inclusive do FSD outro método foi utilizado para se ajustar as curvas de atrito média no mesmo patamar, o que facilita uma comparação das tendências de comportamento entre as curvas de atrito médio.

O método utilizado para comparar de maneira qualitativa os resultados do coeficiente de atrito médio por frenagem dos quatro sistemas B, C, D e E com a curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala reduzida da Fras-le para o ensaio de caracterização térmica, foi o deslocamento vertical da curva de atrito característica do FSD (soma de uma constante a todos os pontos da curva) de modo que o coeficiente de atrito médio de todo o ensaio fosse o mesmo tanto no dinamômetro em escala reduzida quanto para cada um dos quatro sistemas reais. As constantes foram obtidas da diferença entre a média ao longo de todo o ensaio da curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le e do coeficiente de atrito médio de cada sistema. Assim, para cada um dos quatro sistemas de freio a disco, a curva característica dessa máquina teve um deslocamento vertical diferente, de modo que elas pudessem ser visualizadas no mesmo patamar, o que facilita uma comparação das tendências de comportamento entre as curvas de atrito médio. Exemplificando, a Figura 3.6 mostra o deslocamento vertical da curva de atrito característica do FSD em relação ao sistema B, na qual a curva pontilhada representa a curva de atrito característica do dinamômetro em escala reduzida e a curva contínua é essa curva deslocada em relação ao sistema B, ou seja, depois de somada a devida constante.

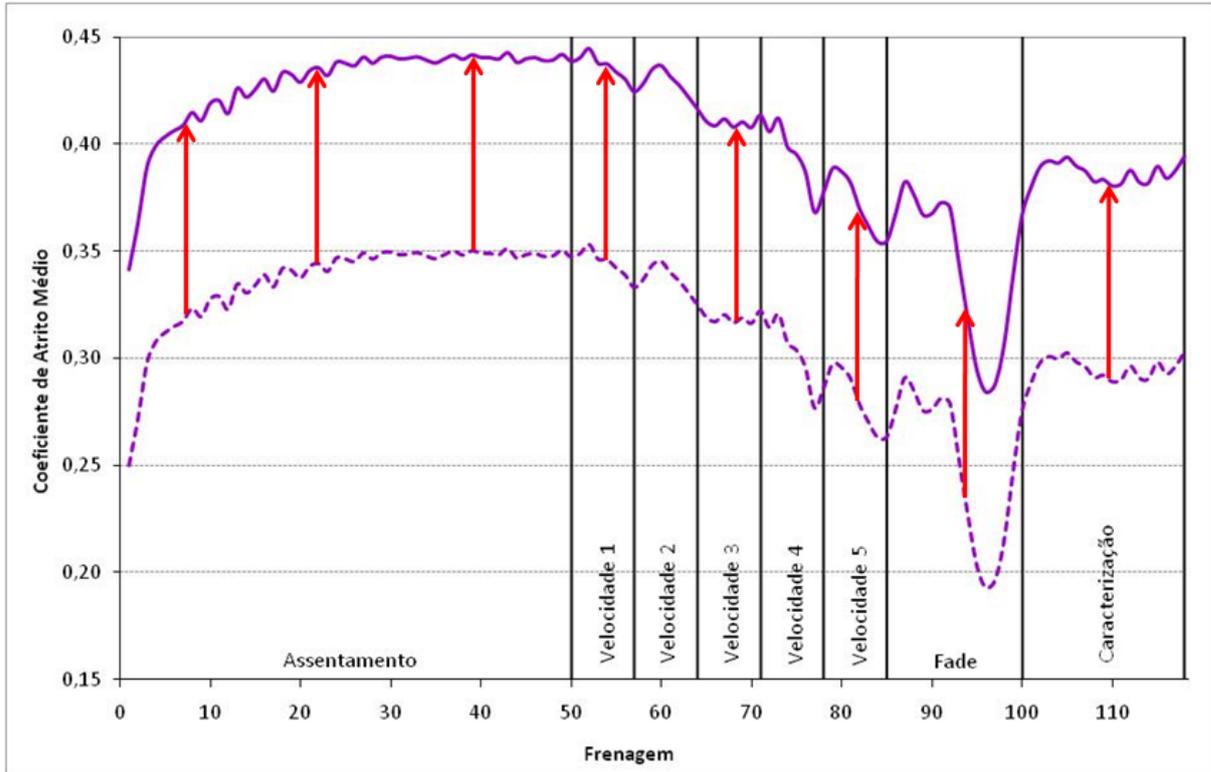


Figura 3.6 - Deslocamento da curva de atrito de característica do Dinamômetro em Escala Reduzida da Fras-le em relação ao sistema B

3.5.3 Comparação Quantitativa

A comparação quantitativa do coeficiente de atrito médio por frenagem dos ensaios de caracterização térmica dos sistemas B, C, D e E com a curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le foi feita através de quatro critérios, os quais foram elaborados com base nos critérios de avaliação do coeficiente propostos no trabalho de Bijwe et al., 2008. Esses critérios são descritos a seguir:

- **Sensibilidade do coeficiente de atrito médio por frenagem à variação da pressão:** representa a variação do coeficiente de atrito médio por frenagem com a pressão. É avaliada pela variação linear do coeficiente de atrito médio por frenagem entre as pressões de 3 e 8 MPa na etapa de velocidade 2. Essa variação é dada em porcentagem do valor do coeficiente de atrito para a pressão de 3 MPa. Esse critério é calculado pela Equação 14:

$$\% \Delta \mu_{p1-p2} = 100 \frac{\mu_{p1} - \mu_{p2}}{\mu_{p1}} \quad (14)$$

onde $\% \Delta \mu_{p1-p2}$ é a sensibilidade do coeficiente de atrito médio por frenagem à pressão, μ_{p1} é o coeficiente de atrito médio da frenagem à pressão de 3 MPa na etapa de velocidade 2 e μ_{p2} é o coeficiente de atrito médio da frenagem à pressão de 8 MPa na etapa de velocidade 2.

- **Sensibilidade do coeficiente de atrito médio por frenagem à variação da velocidade:** representa a variação linear do coeficiente de atrito médio por frenagem com a variação da velocidade. É avaliada pela variação do coeficiente de atrito médio das etapas de velocidade 2 e velocidade 4, para as pressões de 3 a 8 MPa, dada em percentual do valor do coeficiente de atrito médio para a etapa de velocidade 2. Esse critério é calculado pela Equação 15:

$$\% \Delta \mu_v = 100 \frac{\bar{\mu}_{v1} - \bar{\mu}_{v2}}{\bar{\mu}_{v1}} \quad (15)$$

onde $\% \Delta \mu_v$ é a sensibilidade do coeficiente de atrito médio por frenagem à velocidade, $\bar{\mu}_{v1}$ é a média dos coeficientes de atrito médios das frenagens às pressões de 3 a 8 MPa na etapa de velocidade 2 e $\bar{\mu}_{v2}$ é a média dos coeficientes de atrito médios das frenagens às pressões de 3 a 8 MPa na etapa de velocidade 4.

- **Sensibilidade do coeficiente de atrito médio por frenagem à temperatura:** representa a redução máxima do coeficiente de atrito médio por frenagem na etapa de *fade* em relação ao seu valor na última frenagem do assentamento, dada em porcentagem do valor do coeficiente de atrito médio da última frenagem do assentamento. Esse critério é calculado pela Equação 16:

$$\% fade = 100 \frac{\mu_{assentamento} - \mu_{fade}}{\mu_{assentamento}} \quad (16)$$

onde $\% fade$ é a sensibilidade do coeficiente de atrito médio por frenagem à temperatura, $\mu_{assentamento}$ é o coeficiente de atrito médio da última frenagem do assentamento e μ_{fade} é o mínimo coeficiente de atrito médio por frenagem obtido na etapa de *fade*.

- **Recuperação do coeficiente de atrito médio por frenagem na caracterização após a etapa de *fade*:** representa a recuperação do coeficiente de atrito médio da última frenagem da caracterização em relação à última frenagem do assentamento, dada em percentual do coeficiente de atrito médio da última frenagem do assentamento. Esse critério é calculado pela Equação 17:

$$\%characterização = 100 \frac{\mu_{characterização}}{\mu_{assentamento}} \quad (17)$$

onde $\%characterização$ é a recuperação do coeficiente de atrito médio na última frenagem da etapa de caracterização após o *fade*, $\mu_{characterização}$ é o coeficiente de atrito médio da última frenagem da etapa de caracterização após o *fade* e $\mu_{assentamento}$ é o coeficiente de atrito médio da última frenagem do assentamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados da aplicação das metodologias utilizadas para:

- Obtenção de uma estimativa do tempo de resposta do termopar utilizado;
- Seleção da espessura do disco do Dinamômetro em Escala da Fras-le;
- Cálculo da incerteza de medição do coeficiente de atrito no Dinamômetro em Escala da Fras-le;
- Comparação dos resultados do coeficiente de atrito médio por frenagem dos sistemas B, C, D e E, ensaiados conforme o procedimento de ensaio de caracterização térmica, com os resultados do coeficiente de atrito médio por frenagem do Dinamômetro em Escala da Fras-le, ensaiado com o mesmo procedimento de ensaio dos quatro sistemas.

4.1 Seleção da Espessura do Disco do Dinamômetro em Escala da Fras-le através do Comportamento Térmico Durante o Ensaio de Caracterização Térmica

As temperaturas finais para cada frenagem do ensaio das quatro espessuras de disco do dinamômetro em Escala da Fras-le e dos quatro sistemas de freio (B, C, D e E) para o ensaio de caracterização térmica podem ser vistas na Figura 4.1. Segundo Neis et al., 2009, a oscilação da temperatura final para elevadas velocidades (etapas de velocidade 3, 4 e 5) é esperada para esse tipo de material (orgânico). Os mesmos autores investigaram esse fenômeno utilizando duas técnicas de medição distintas (termografia e termopar) em um material de atrito semi-metálico e outro orgânico e observaram que o material orgânico apresentou uma condição pouco repetitiva na distribuição da pressão de contato em velocidades elevadas, condição a qual influenciou a temperatura final medida pelo termopar.

Analisando qualitativamente apenas as temperaturas das últimas dez frenagens do assentamento e da caracterização, (Figura 4.2), percebe-se que o disco com espessura de 10 mm (curva contínua em roxo) é o que possui o comportamento térmico mais próximo dos sistemas de freio a disco ventilado (sistemas C, D e E). Esse é o primeiro critério que justifica a adoção de um disco de 10 mm para representar termicamente os quatro sistemas ensaiados por Infantini, 2008.

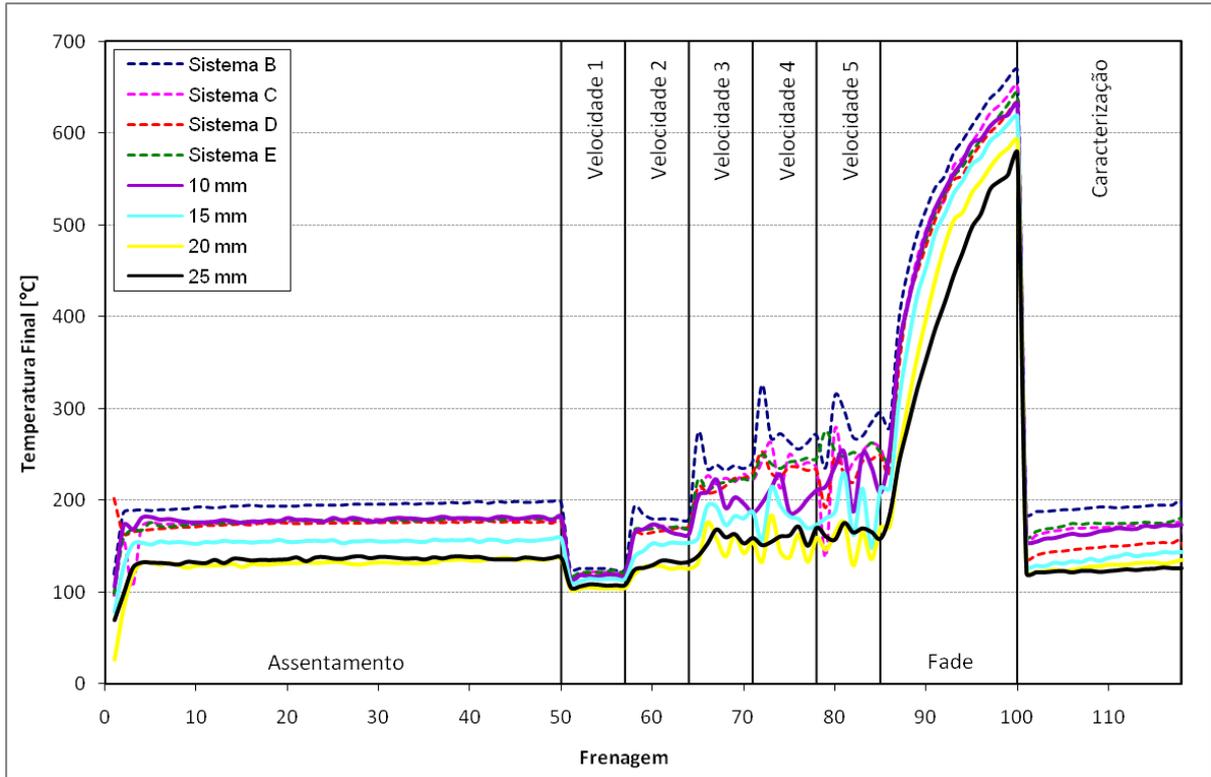


Figura 4.1 - Temperaturas finais de cada frenagem dos sistemas B,C D e E e das diferentes espessuras de disco ensaiadas no Dinamômetro em Escala da Fras-le para o ensaio de caracterização térmica

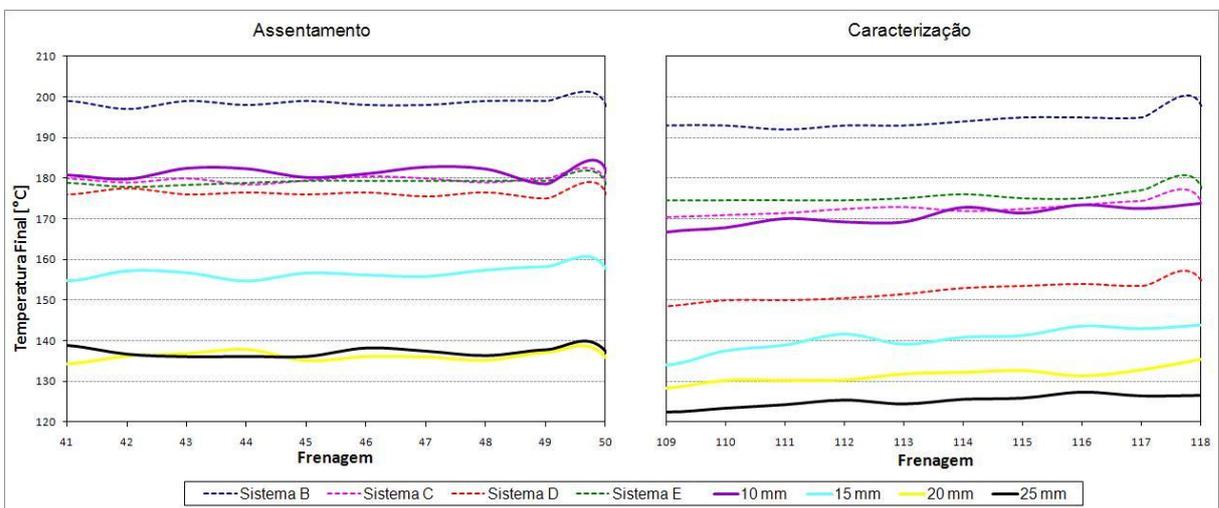


Figura 4.2 - Temperaturas finais dos sistemas B, C, D e E e das diferentes espessuras de disco do Dinamômetro em Escala da Fras-le nas últimas dez frenagens do assentamento e da caracterização

Na Tabela 4.1 estão as médias das temperaturas finais das dez últimas frenagens do assentamento e da caracterização dos sistemas de freio B, C, D e E. Essas médias foram

utilizadas como valores de referência para se avaliar as diferenças absolutas entre elas e as dez temperaturas finais das etapas de assentamento e caracterização para cada uma das espessuras de disco ensaiadas e para cada um dos quatro sistemas de freio ensaiados. Nesta tabela constam ainda os desvios padrão dessas duas médias.

Tabela 4.1 - Médias e desvios padrão das temperaturas finais das dez últimas frenagens das etapas de assentamento e de caracterização dos sistemas B, C, D e E

	TEMPERATURAS FINAIS MÉDIAS [°C]	
	Assentamento	Caracterização
Média	178,7	172,7
Desvio Padrão	12,9	16,7

A Tabela 4.2 mostra as médias das temperaturas finais das últimas dez frenagens do assentamento e da caracterização dos quatro sistemas ensaiados (B, C, D e E) e das diferentes espessuras do disco do Dinamômetro em Escala da Fras-le, juntamente com os respectivos desvios padrão e incertezas de medição. Segundo a norma ASTM E230-03, a incerteza de medição do termopar tipo K é igual ao maior destes dois valores: 2,2°C ou 0,75% do valor medido. Na mesma tabela são apresentadas as diferenças absolutas respectivamente entre os valores médios da Tabela 4.1 e as médias das temperaturas finais das últimas dez frenagens para o assentamento e a caracterização.

Tabela 4.2 - Temperaturas médias e diferenças absolutas das últimas dez frenagens da etapa de assentamento e de caracterização dos sistemas B, C, D e E e das diferentes espessuras do Dinamômetro em Escala da Fras-le

	TEMPERATURA MÉDIA [°C]		DESVIO PADRÃO [°C]		DIFERENÇA ABSOLUTA [°C]	
	Assent.	Caract.	Assent.	Caract.	Assent.	Caract.
Sistema B	198,4 ± 2,2	194,1 ± 2,2	0,7	1,6	19,7	21,4
Sistema C	172,8 ± 2,2	171,3 ± 2,2	0,7	1,8	5,9	1,4
Sistema D	179,6 ± 2,2	148,3 ± 2,2	0,8	2,1	0,9	24,4
Sistema E	163,9 ± 2,2	177,1 ± 2,2	1,1	1,7	14,8	4,4
10 mm	181,2 ± 2,2	170,7 ± 2,2	1,3	2,3	2,5	2,0
15 mm	156,6 ± 2,2	140,4 ± 2,2	1,1	2,9	22,1	32,3
20 mm	136,1 ± 2,2	131,6 ± 2,2	1,0	1,8	42,6	41,1
25 mm	137,2 ± 2,2	125,2 ± 2,2	0,9	1,4	41,5	47,5

Analisando-se as diferenças absolutas da tabela, conclui-se que o disco de 10 mm de espessura é o que possui o comportamento térmico mais próximo dos sistemas de freio a disco nas etapas de assentamento e caracterização para o procedimento de ensaio utilizado, pois ele possui as menores diferenças absolutas da temperatura final média das últimas dez frenagens dessas etapas (diferença de 3°C no assentamento e 2°C na caracterização).

Então, conclui-se pela Figura 4.1 e pela Tabela 4.2 que o disco de 10 mm é o que possui o comportamento da temperatura final de cada frenagem mais próximo dos sistemas B, C, D e E para o ensaio de caracterização térmica, principalmente com os sistemas de freio com disco ventilado (sistemas C, D e E).

Outro critério utilizado para escolher a espessura do disco para o ensaio de caracterização térmica foram as temperaturas iniciais e finais nas frenagens da etapa de *fade*. Para que a temperatura inicial em uma frenagem no *fade* seja igual àquela determinada pelo ensaio de caracterização térmica é necessário que a temperatura final na frenagem anterior do *fade* seja maior que a temperatura inicial da próxima frenagem. Exemplificando, o disco de 15 mm obteve 213°C de temperatura no final da primeira frenagem, valor menor que o necessário para iniciar a segunda frenagem (215°C). Apenas o disco de 10 mm cumpriu o critério das temperaturas iniciais de cada frenagem no *fade* para o ensaio de caracterização térmica, conforme pode ser visto na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Temperatura inicial necessária em cada frenagem da etapa de *fade* e temperatura final medida das cinco primeiras frenagens dessa etapa para cada espessura de disco do Dinamômetro em Escala da Fras-le

Frenagem n°	TEMPERATURA INICIAL [°C]	TEMPERATURA FINAL MEDIDA [°C]			
	Fade	10 mm	15 mm	20 mm	25 mm
1	100,0	255,7 ± 2,2	213,0 ± 2,2	172,0 ± 2,2	185,1 ± 2,2
2	215,0	364,4 ± 2,7	307,0 ± 2,3	249,0 ± 2,2	241,3 ± 2,2
3	283,0	414,7 ± 3,1	369,9 ± 2,8	304,8 ± 2,3	281,7 ± 2,2
4	330,0	455,9 ± 3,4	422,5 ± 3,2	356,0 ± 2,7	321,3 ± 2,4
5	367,0	491,4 ± 3,7	454,8 ± 3,4	399,5 ± 3,0	354,7 ± 2,7

Pelos dois critérios citados anteriormente o disco de 10 mm foi o escolhido para ser utilizado no Dinamômetro em Escala da Fras-le, pois ele apresentou o comportamento térmico mais parecido com os sistemas B, C, D e E, principalmente com os três sistemas com disco ventilado, além de conseguir atingir as temperaturas iniciais necessárias em cada frenagem na etapa de *fade*.

4.2 Avaliação da Incerteza de Medição do Coeficiente de Atrito no Dinamômetro em Escala da Fras-le

Calculando-se a incerteza de medição da área do pistão pela Equação 13, obtém-se 1,09 mm e com esse valor pode-se calcular a incerteza de medição do coeficiente de atrito no Dinamômetro em Escala da Fras-le para cada frenagem do ensaio de caracterização térmica pela Equação 12, pois como foi comentado anteriormente, a incerteza de medição do coeficiente de atrito depende do torque frenante e da pressão de acionamento, as quais variam em cada frenagem do procedimento de ensaio utilizado.

A média dos valores da incerteza de medição do coeficiente de atrito no Dinamômetro em Escala da Fras-le ao longo de todo ensaio de caracterização térmica foi 0,02, com um desvio padrão igual a 0,01. O valor máximo obtido da incerteza de medição do coeficiente de atrito ao longo do ensaio foi igual 0,03.

4.3 Curva de Atrito Característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le para o Ensaio de Caracterização Térmica

Os resultados do coeficiente de atrito médio por frenagem dos dois ensaios realizados com o disco de 10 mm, utilizando o ensaio de caracterização térmica, podem ser vistos na Figura 4.3. A diferença absoluta máxima encontrada entre os coeficientes de atrito médio por frenagem foi de 0,04.

Na Figura 4.4 estão graficados os resultados do coeficiente de atrito médio por frenagem dos dois ensaios realizados com o disco de 10 mm, utilizando o ensaio de caracterização térmica e a média desses dois resultados (curva em roxo), curva a qual foi chamada de curva de atrito característica do FSD para o ensaio de caracterização térmica, com as devidas incertezas de medição do coeficiente de atrito nesse equipamento ao longo do ensaio (representados pelas barras). Observa-se na figura que as incertezas de medição do coeficiente de atrito no Dinamômetro em Escala da Fras-le, calculadas pela equação 12, diminuíram durante a etapa de *fade*, o que ocorreu devido às frenagens dessa etapa possuírem as maiores pressões de acionamento de todo o ensaio, cerca de duas vezes maiores do que as pressões de acionamento da sétima frenagem das etapas de velocidade de 1 a 5 (frenagens as quais possuem a segunda maior pressão de acionamento de todo o procedimento de ensaio). Percebe-se ainda na figura, pela análise das incertezas de medição do coeficiente de atrito no Dinamômetro em Escala da Fras-le, que as duas curvas são iguais, as diferenças observadas no gráfico devem-se apenas as incertezas de mediação.

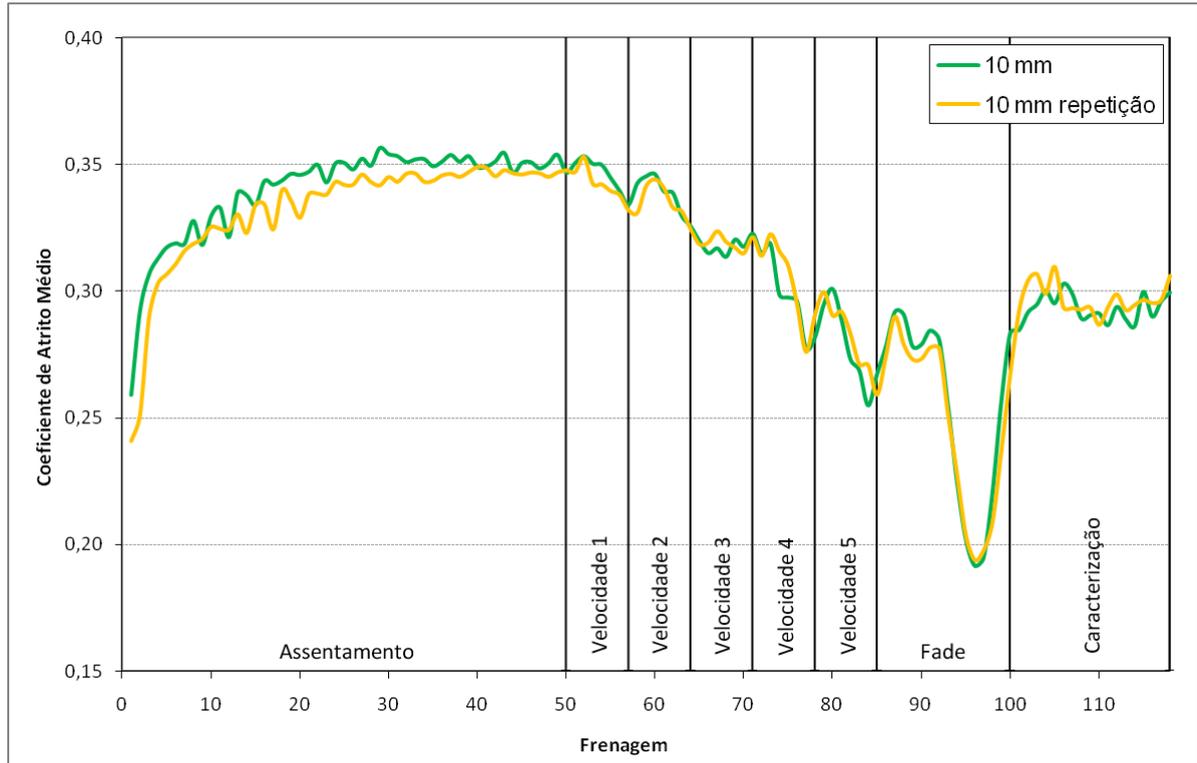


Figura 4.3 - Coeficiente de atrito médio para os dois ensaios realizados com o disco de 10 mm no Dinamômetro em Escala da Fras-le

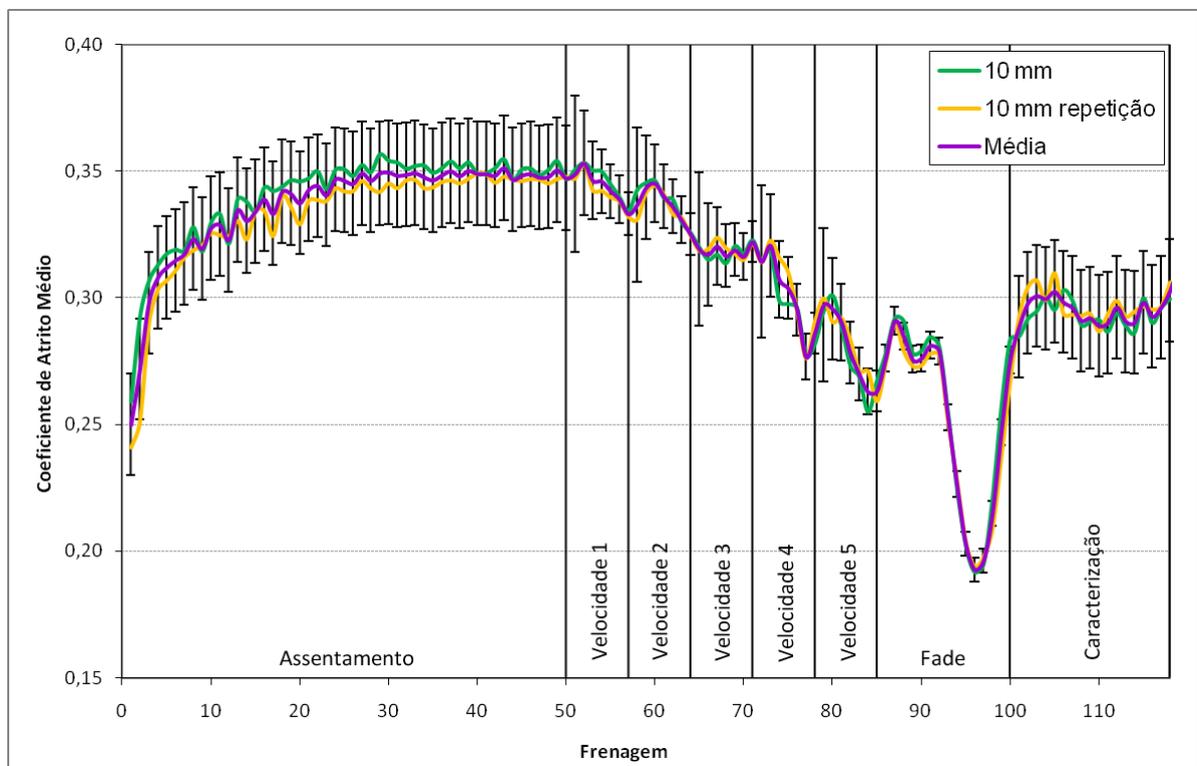


Figura 4.4 - Coeficiente de atrito médio por frenagem para os dois ensaios realizados com o disco de 10 mm no Dinamômetro em Escala da Fras-le, média dessas duas curva (curva de atrito característica do FSD) e as incertezas de medição do coeficiente de atrito no FSD

4.4 Avaliação da Correlação do Coeficiente de Atrito Médio por Frenagem dos Ensaio de Caracterização Térmica

Os coeficientes de atrito médio por frenagem dos sistemas B, C, D e E e a curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le para o ensaio de caracterização térmica podem ser vistos na Figura 4.5. Nessa figura observa-se que há uma diferença de nível entre as curvas, o que se deve as diferenças do rendimento mecânico entre os sistemas, pois neste trabalho o rendimento mecânico utilizado no cálculo do coeficiente de atrito foi igual a 1,00 para todos os sistemas, inclusive o FSD, conforma aconselha a norma de ensaio *AK-Master*, 1998. Porém, pelos resultados da figura fica evidente que o rendimento mecânico dos sistemas não é o mesmo.

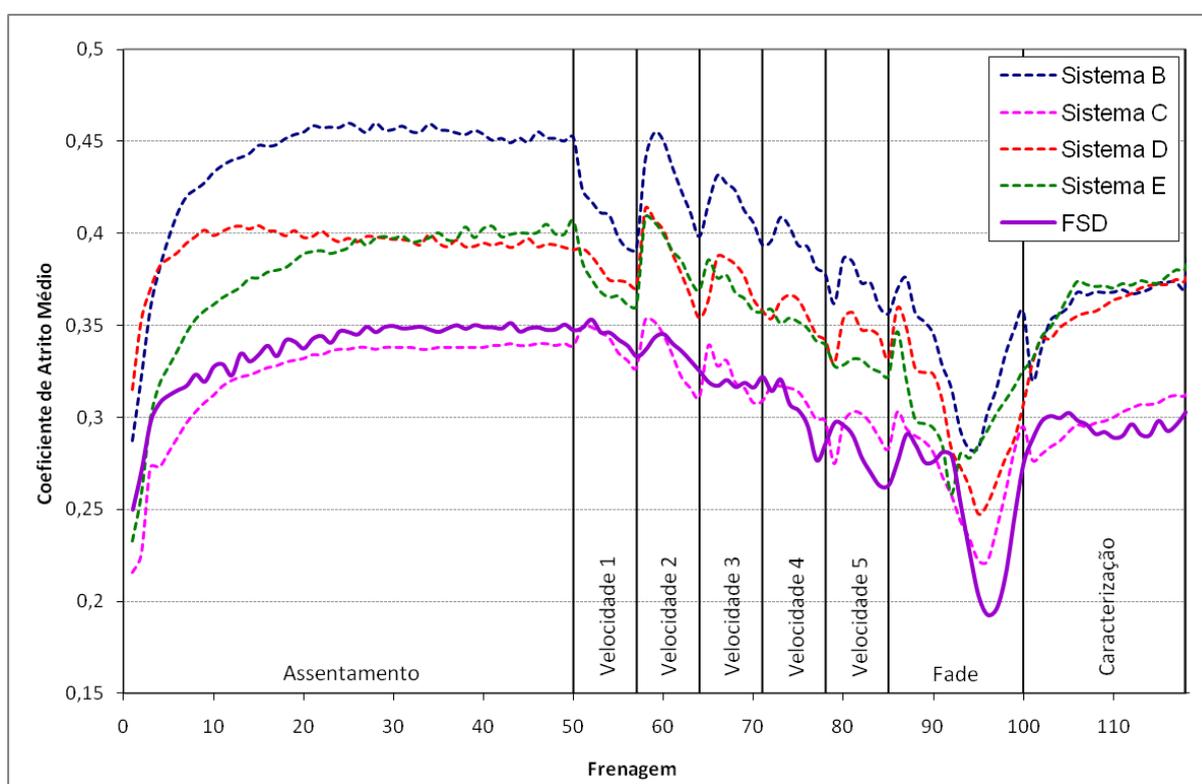


Figura 4.5 - Coeficientes de atrito médio por frenagem dos sistemas B, C, D e E e curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le para o ensaio de caracterização térmica

Os resultados da aplicação dos três métodos (coeficiente de correlação de Pearson, comparação qualitativa e comparação quantitativa) para análise da correlação entre a curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le com os coeficientes de atrito médio

por frenagem de cada um dos sistemas de freio B, C, D e E, no ensaio de caracterização térmica, serão apresentados e discutidos a seguir.

4.4.1 Avaliação do Coeficiente de Correlação de Pearson

Em cada uma das figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 há pontos muito distantes da linha de tendência, chamados de pontos espúrios, os quais ocorreram devido a erros de medição. A fim de filtrar os resultados, eliminando os erros de medição, esses pontos foram retirados das figuras e os novos gráficos da curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le versus o coeficiente de atrito por frenagem dos sistemas B, C, D e E, após a retirada dos pontos espúrios, podem ser vistos nas figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9. Os resultados do coeficiente de correlação de Pearson entre a curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le e o coeficiente de atrito médio por frenagem dos sistemas B, C, D e E no ensaio de caracterização térmica, após a retirada dos pontos espúrios, podem ser vistos na Tabela 4.4.

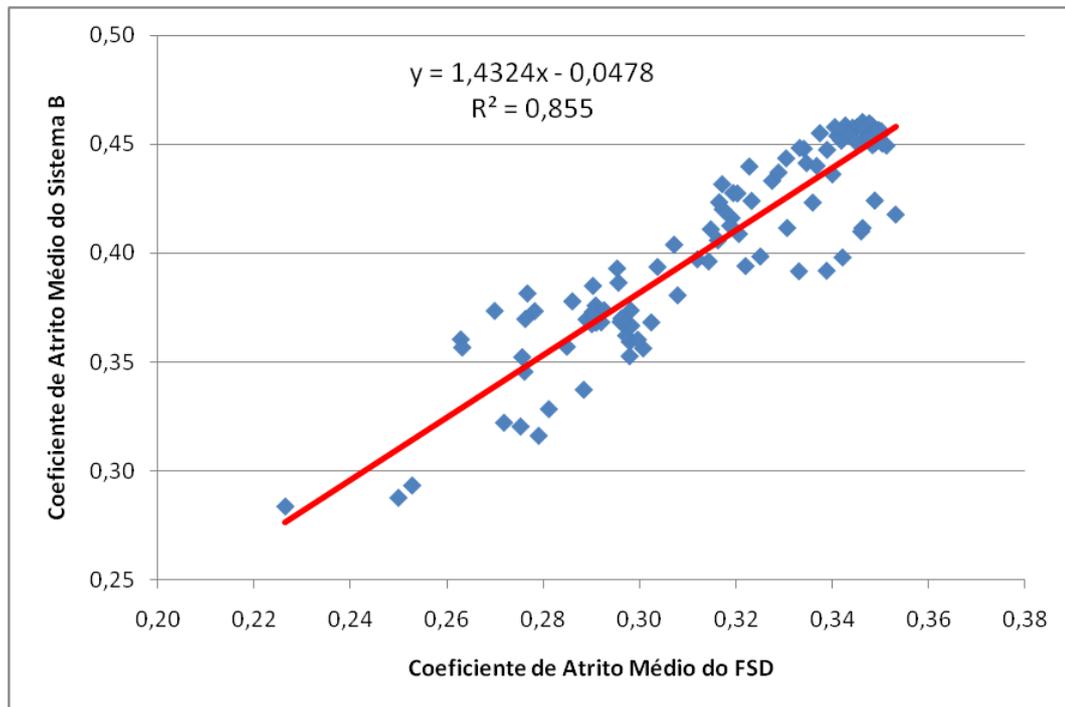


Figura 4.6 - Relação linear entre o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema B e do Dinamômetro em Escala da Fras-le após a retirada dos pontos espúrios (a linha vermelha representa a linha de tendência linear entre as variáveis)

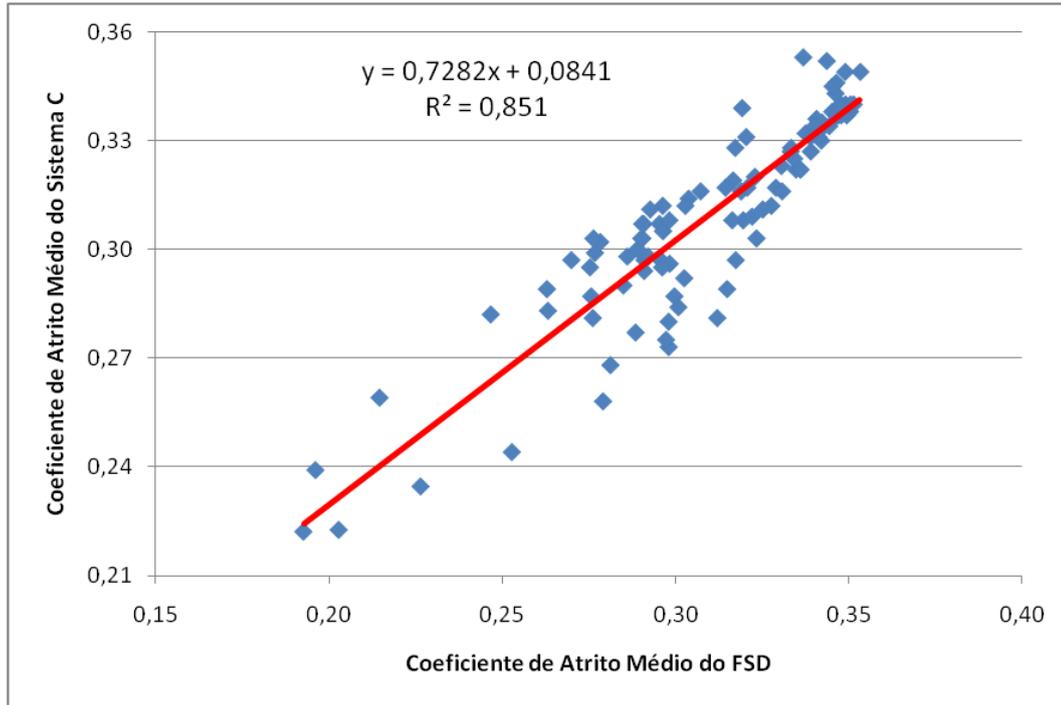


Figura 4.7 - Relação linear entre o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema C versus o coeficiente de atrito médio por frenagem do Dinamômetro em Escala da Fras-le após a retirada dos pontos espúrios (a linha vermelha representa a linha de tendência linear entre as variáveis)

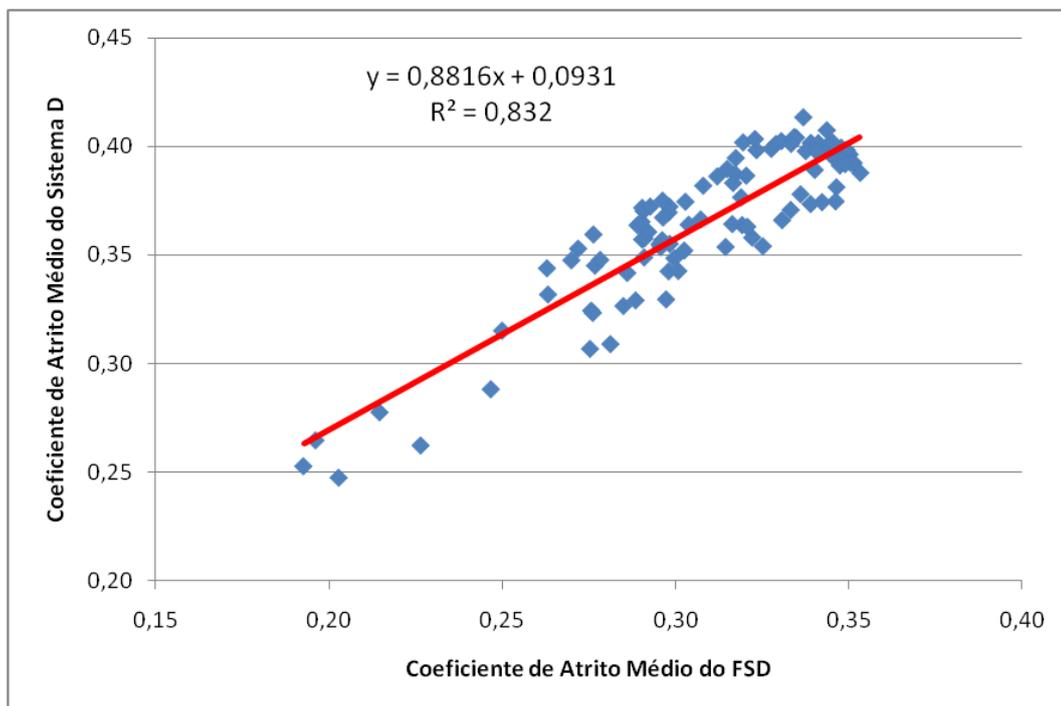


Figura 4.8 - Relação linear entre o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema B e do Dinamômetro em Escala da Fras-le após a retirada dos pontos espúrios (a linha vermelha representa a linha de tendência linear entre as variáveis)

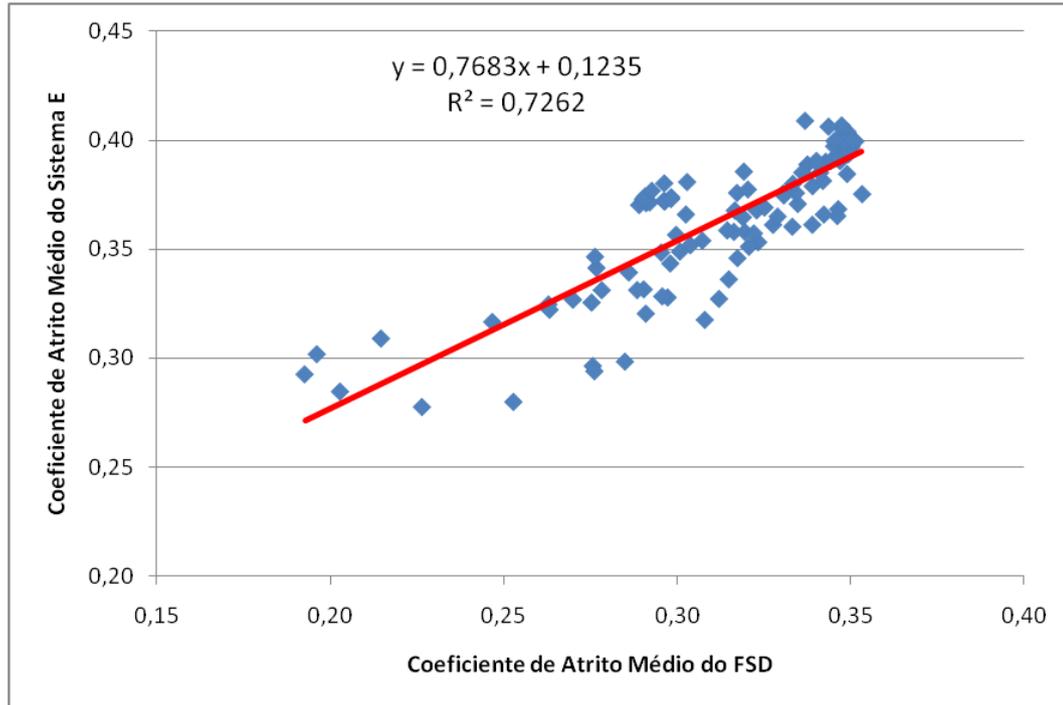


Figura 4.9 - Relação linear entre o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema E versus o coeficiente de atrito médio por frenagem do Dinamômetro em Escala da Fras-le após a retirada dos pontos espúrios (a linha vermelha representa a linha de tendência linear entre as variáveis)

Tabela 4.4 - Valores do coeficiente de correlação de Pearson entre a curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le e o coeficiente de atrito médio por frenagem dos sistemas B, C, D e E no ensaio de caracterização térmica, após a retirada dos pontos espúrios

	Sistema B	Sistema C	Sistema D	Sistema E
FSD	0,9246	0,9225	0,9122	0,8522

Observa-se na tabela que o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema B e a curva de atrito característica do dinamômetro em escala reduzida possuem o maior coeficiente de correlação entre si, ou seja, o dinamômetro em escala reduzida possui um comportamento da sua curva de atrito característica mais próxima ao comportamento do coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema B. O menor coeficiente de correlação obtido foi entre a curva característica do dinamômetro em escala reduzida e o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema E, ou seja, o sistema E possui o comportamento do coeficiente de atrito médio por frenagem menos semelhante em relação ao FSD dentre os quatro sistemas comparados. Percebe-se também pela tabela, que o dinamômetro em escala reduzida possui o

comportamento da sua curva de atrito característica semelhante ao comportamento dos coeficientes de atrito médio por frenagem dos sistemas de freio B, C, D e E, pois o coeficiente de correlação entre eles foi próximo de 1.

4.4.2 Comparação Qualitativa

As constantes utilizadas para ajustar a curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le em relação ao coeficiente de atrito médio por frenagem de cada um dos quatro sistemas de freio podem ser vistos na Tabela 4.5. Essas constantes foram obtidas de modo a igualar a média de todas as frenagens da curva de atrito característica do FSD com a média dos coeficientes de atrito médio de todas as frenagens do ensaio de caracterização térmica. Pelos resultados da tabela percebe-se que a menor constante obtida foi em relação ao sistema C, a qual foi igual a zero, e a maior, foi em relação ao sistema B.

Tabela 4.5 - Constantes somadas a curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le para ajustá-la em relação a cada um dos quatro sistemas de freio

	Sistema B	Sistema C	Sistema D	Sistema E
Constante	0,09	0,00	0,06	0,05

A curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le ajustada em relação ao coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema B, as incertezas de medição do coeficiente de atrito no FSD (representadas pelas barras) e o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema B podem ser vistos na Figura 4.10. A curva de atrito ajustada do FSD em relação ao sistema B foi obtida pela soma de uma constante igual a 0,09 a cada um dos pontos da curva de atrito característica do dinamômetro em escala reduzida.

Nesta figura observa-se pelas incertezas de medição do coeficiente de atrito no Dinamômetro em Escala da Fras-le que o coeficiente de atrito médio do sistema B é diferente da curva de atrito característica do dinamômetro em escala reduzida em dezesseis frenagens no assentamento, nas demais quarenta e quatro frenagens eles são iguais. Nas etapas de velocidade de 1 a 5, quatorze dos coeficientes de atrito médio foram diferentes entre o sistema B e o FSD, sendo que dessas quatorze, seis ocorreram na etapa de velocidade 1, nas demais frenagens dessas etapas (vinte e uma) eles são iguais. Na etapa de *fade* a maioria dos coeficientes de atrito médio foram diferentes entre o sistema B e o dinamômetro em escala reduzida (quatorze das quinze frenagens), sendo os valores mínimos do coeficiente de atrito médio por frenagem iguais entre o sistema B e o FSD, ambos iguais a 0,28, porém, no caso do

sistema B esse valor mínimo ocorre na nonagésima quinta frenagem enquanto que no dinamômetro em escala reduzida ele ocorre na nonagésima sexta frenagem. Na caracterização os coeficientes de atrito médio foram diferentes em nove frenagens das dezoito dessa etapa entre o FSD e o sistema B.

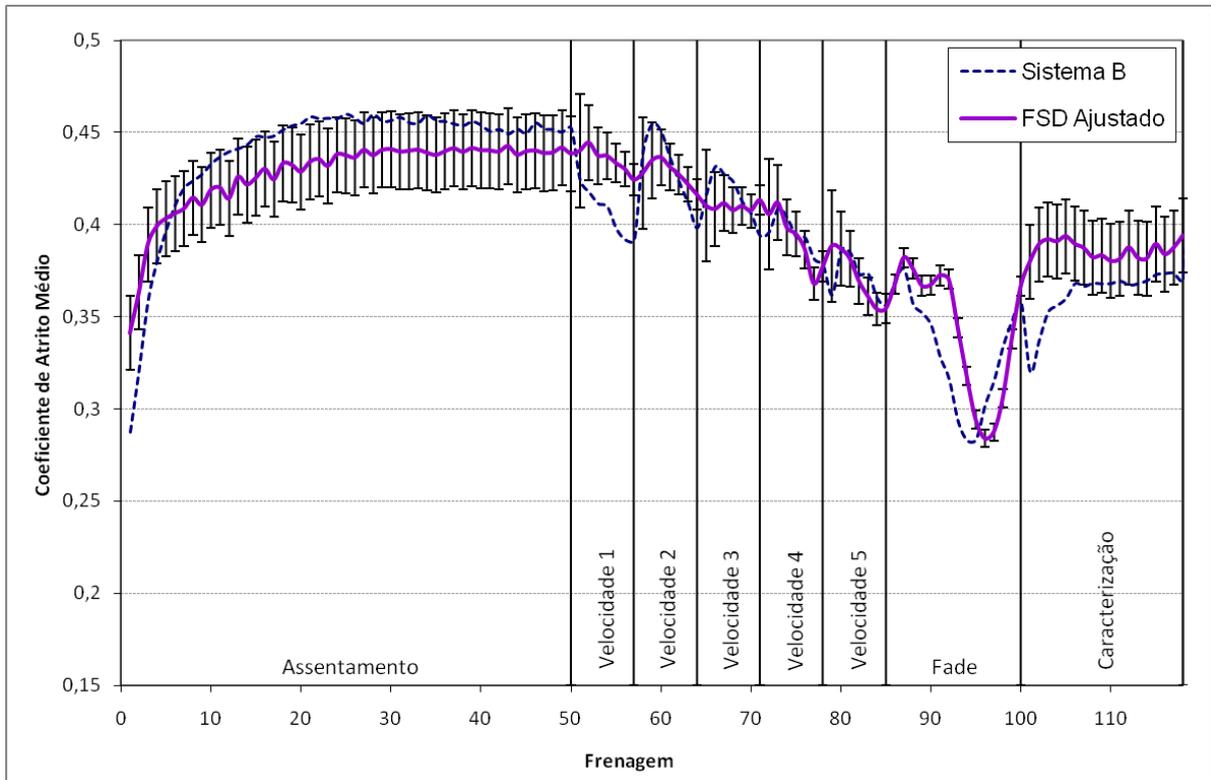


Figura 4.10 - Curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le ajustada em relação ao sistema B, coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema B e incertezas de medição do coeficiente de atrito no FSD (representadas pelas barras)

Os resultados da curva de atrito característica do dinamômetro em escala reduzida ajustada em relação ao sistema C, das incertezas de medição do coeficiente de atrito nesse equipamento (representados pelas barras) e do coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema C estão graficados na Figura 4.11. É importante ressaltar que a constante obtida entre essas curvas foi zero, portanto, a curva de atrito característica do FSD ajustada em relação ao sistema C é a própria curva de atrito característica do FSD.

Pela figura, percebe-se que, no assentamento, a curva de atrito ajustada do FSD e o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema C são diferentes em seis frenagens, analisando apenas as incertezas de medição do coeficiente de atrito no dinamômetro em escala reduzida, nas frenagens restantes (cinquenta e quatro) eles são iguais. Nas etapas de velocidade de 1 a 5, os dois coeficientes de atrito médio são iguais em vinte e três frenagens,

sendo que nas demais frenagens (doze) os coeficientes de atrito são diferentes entre o FSD e sistema C. Na etapa de *fade*, em quatorze das quinze frenagens os coeficientes de atrito médio são diferentes entre o dinamômetro em escala reduzida e o sistema B e o ponto mínimo do coeficiente de atrito médio ocorre na mesma frenagem (nonagésima sexta frenagem) tanto para o FSD quanto para o sistema B, mas esse valor mínimo é maior no caso do sistema C (coeficiente de atrito médio igual a 0,22) em relação ao dinamômetro em escala reduzida (coeficiente de atrito médio igual a 0,19). Na caracterização, os coeficientes de atrito médio são iguais em dezessete das dezoito frenagens entre o Dinamômetro em Escala da Fras-le e sistema C.

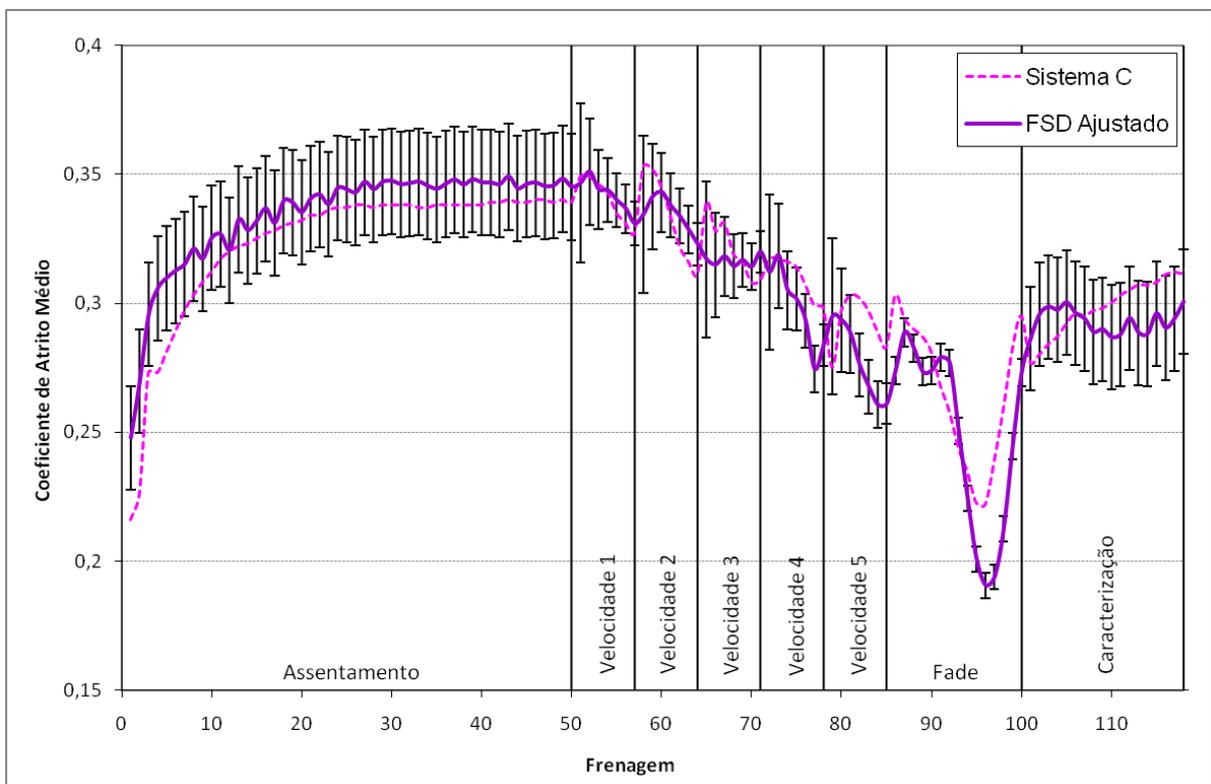


Figura 4.11 - Curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le ajustada em relação ao sistema C, coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema C e incertezas de medição do coeficiente de atrito no FSD (representadas pelas barras)

Na Figura 4.12 podem ser visualizados a curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala Reduzida da Fras-le ajustada em relação ao sistema D, as incertezas de medição do coeficiente de atrito no FSD (representadas pelas barras) e o coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema D. Vale ressaltar que a curva de atrito ajustada do FSD em relação ao sistema D foi obtida pela soma de uma constante igual a 0,06 a cada um dos pontos da curva de atrito característica do dinamômetro em escala reduzida.

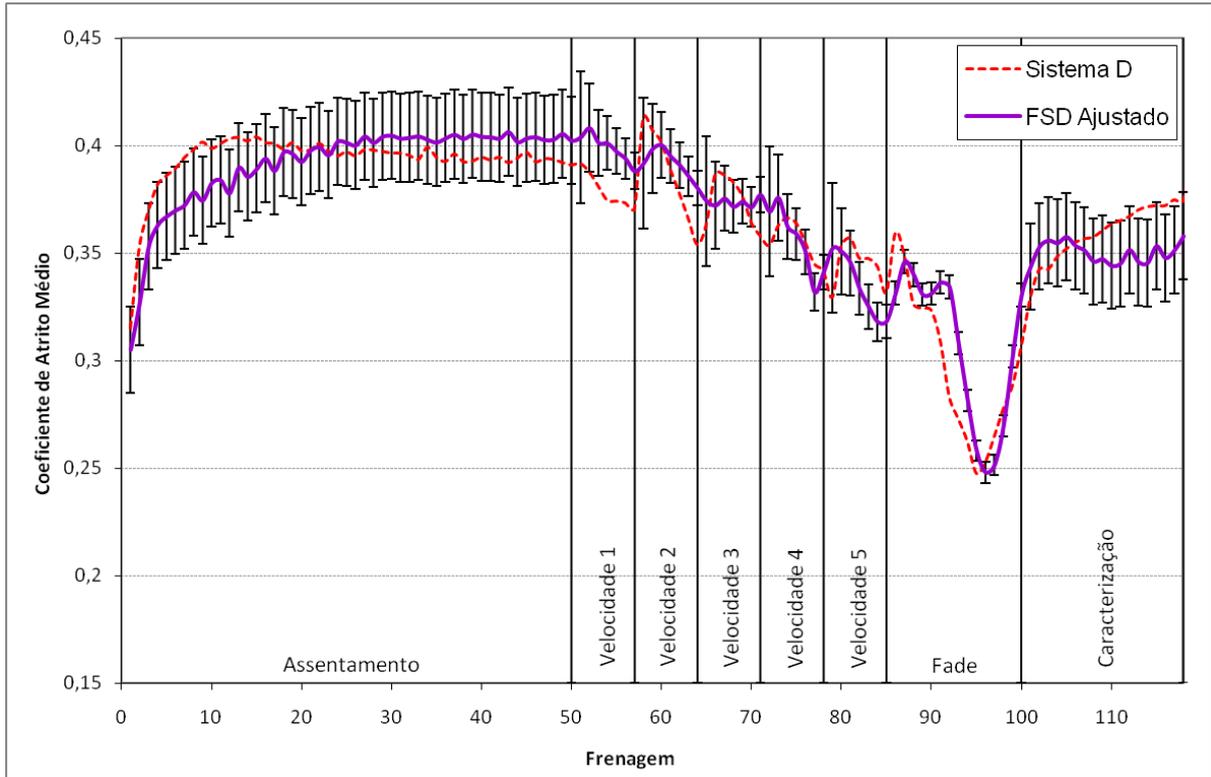


Figura 4.12 - Curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le ajustada em relação ao sistema D, coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema D e incertezas de medição do coeficiente de atrito no FSD (representadas pelas barras)

Analisando as incertezas de medição do coeficiente de atrito no FSD na figura, percebe-se que, no assentamento, em cinco frenagens os coeficientes de atrito médio do dinamômetro em escala reduzida e do sistema D são diferentes. Já, nas etapas de velocidade de 1 a 5, em quinze das trinta e cinco frenagens os coeficientes de atrito médio são diferentes entre o dinamômetro em escala reduzida e o sistema D, sendo que quatro das nove frenagens ocorrem na etapa de velocidade 1. No *fade*, em quatorze das quinze frenagens os coeficientes de atrito médio são diferentes entre o FSD e sistema D e a queda do coeficiente de atrito médio ocorre na nonagésima oitava frenagem para o sistema D e na nonagésima nona para o dinamômetro em escala reduzida, apesar dessa queda ocorrer em frenagens diferentes, os seus valores são iguais (coeficiente de atrito médio igual a 0,24 para ambos). Observa-se pela figura que, na caracterização, o coeficiente de atrito médio foi diferente em quatro frenagens entre o sistema D e o Dinamômetro em Escala da Fras-le, nas quatorze frenagens restantes eles são iguais.

Na Figura 4.13 estão apresentados os resultados da curva de atrito característica do FSD ajustada em relação ao sistema E, das incertezas de medição do coeficiente de atrito no FSD (representados pelas barras) e do coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema E.

A curva de atrito do Dinamômetro em escala da Fras-le ajustada em relação ao sistema E foi obtida pela soma de uma constante igual a 0,05 a cada um dos pontos da curva de atrito característica do dinamômetro em escala reduzida.

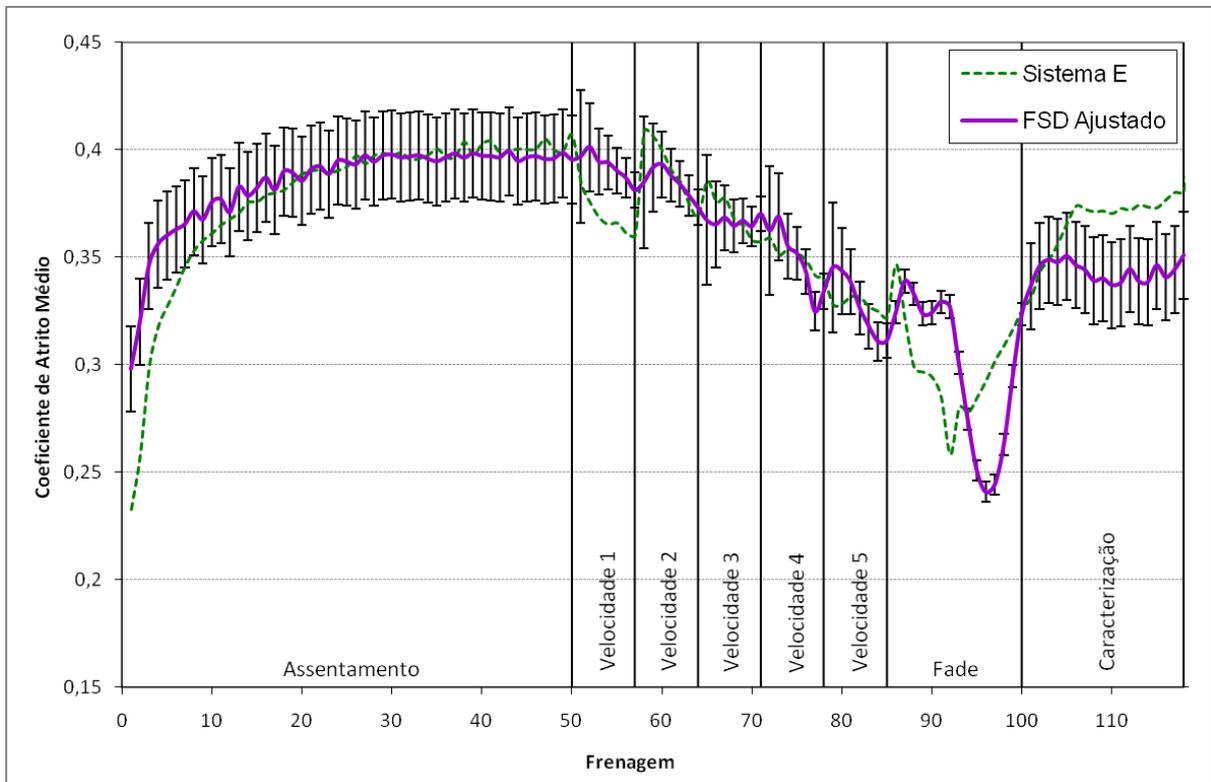


Figura 4.13 - Curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le ajustada em relação ao sistema E, coeficiente de atrito médio por frenagem do sistema E e incertezas de medição do coeficiente de atrito no FSD (representadas pelas barras)

Observa-se na figura que, no início na etapa de assentamento, o coeficiente de atrito médio por frenagem é diferente em seis das sessenta frenagens entre o Dinamômetro em Escala da Fras-le e o sistema E pela análise das incertezas de medição do coeficiente de atrito no dinamômetro em escala reduzida. Nas etapas de velocidade de 1 a 5 o coeficiente de atrito médio por frenagem do Dinamômetro em Escala da Fras-le e do sistema E são diferentes em dez frenagens das trinta e cinco frenagens. Percebe-se também pela figura que, na etapa de *fade*, o coeficiente de atrito médio por frenagem do Dinamômetro em Escala da Fras-le e do sistema E são diferentes em treze das quinze frenagens e que o valor mínimo do coeficiente de atrito médio por frenagem ocorre na nonagésima segunda frenagem no caso do sistema E e na nonagésima sexta frenagem no caso do dinamômetro em escala reduzida (quatro frenagens de diferença) e os valores mínimos são distintos (coeficiente de atrito médio igual a 0,26 para o sistema E e 0,24 para o caso do FSD). Na caracterização, os coeficientes de atrito médio são

diferentes entre o sistema E e o dinamômetro em escala reduzida em treze das dezoito frenagens.

4.4.3 Comparação Quantitativa

Na Tabela 4.6 são apresentados os resultados da aplicação dos critérios quantitativos nos coeficientes de atrito médio dos sistemas B, C, D e E e na curva de atrito característica do Dinamômetro em Escala da Fras-le ajustada em relação a cada um dos quatro sistemas, além das diferenças relativas entre eles dadas em percentual dos critérios dos quatro sistemas de freio (valores em negrito na tabela). Pela tabela, verifica-se que a maior diferença relativa percentual encontrada entre os critérios de sensibilidade do coeficiente de atrito à pressão foi de 65,88%, a qual ocorreu entre o sistema B e a curva de atrito característica do dinamômetro em escala reduzida ajustada em relação a esse sistema. A menor diferença relativa encontrado foi entre o sistema E e a curva do FSD ajustada em relação a esse sistema, cujo valor foi 48,36%.

Tabela 4.6 - Resultados dos critérios quantitativos e diferenças relativas dadas em percentual dos valores dos sistemas B, C, D e E (valores em negrito)

	$\% \Delta \mu_{p1-p2}$	$\% \Delta \mu_v$	$\% \text{Fade}$	$\% \text{Caracterização}$
Sistema B	12,42	8,41	37,33	81,78
FSD Ajustado (Sistema B)	4,24	8,99	35,25	89,85
Diferença FSD/B	65,88	6,85	5,58	9,87
Sistema C	11,65	6,52	34,51	92,04
FSD Ajustado (Sistema C)	5,29	11,26	43,87	87,37
Diferença FSD/C	54,62	72,75	27,11	5,07
Sistema D	13,09	7,01	36,70	95,74
FSD Ajustado (Sistema D)	4,62	9,81	38,40	88,95
Diferença FSD/D	64,70	39,93	4,64	7,09
Sistema E	9,11	10,27	36,49	93,62
FSD Ajustado (Sistema E)	4,70	10,00	39,10	88,75
Diferença FSD/E	48,36	2,68	7,14	5,21

Observa-se também, na tabela, que a maior diferença relativa das sensibilidades do coeficiente de atrito à velocidade ocorreu entre o sistema C e a curva ajustada do FSD em relação a esse sistema (72,75%). A menor diferença relativa obtida foi de 2,68, a qual ocorreu entre o sistema E e a curva do Dinamômetro em Escala da Fras-le ajustada em relação a esse sistema. A maior diferença relativa do critério de sensibilidade do coeficiente de atrito à temperatura foi de 27,11%, a qual ocorreu entre o sistema C e a curva de atrito característica

do dinamômetro em escala ajustada em relação a esse sistema. O menor valor obtido da diferença relativa ocorreu entre o sistema E e a curva ajustada do FSD em relação a esse sistema (2,68%).

Para finalizar, verifica-se na tabela que a maior diferença relativa da recuperação do coeficiente de atrito na caracterização ocorreu entre o sistema B e a curva de atrito característica do dinamômetro em escala reduzida ajustada em relação a esse sistema (9,87%). O menor valor da diferença observado foi de 5,07%, o qual ocorreu entre o sistema C e a curva ajustada do dinamômetro em escala reduzida. Com os resultados dos três métodos utilizados conclui-se que o Dinamômetro em Escala da Fras-le apresenta um comportamento do coeficiente de atrito médio por frenagem no ensaio de caracterização térmica semelhante ao dos sistemas B, C, D e E.

4.5 Variação do Coeficiente de Atrito Médio por Frenagem na Etapa de Fade do Ensaio de Caracterização Térmica

Segundo Cristol-Bulthé et al., 2007, a variação do coeficiente de atrito na etapa de *fade* ocorre devido à degradação da resina fenólica do material de fricção, fenômeno o qual foi observado nas Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13. Assim, a fim de investigar melhor esse fenômeno, quatro ensaios foram realizados com o mesmo material orgânico utilizado anteriormente, dois ensaios foram feitos com pastilhas novas e dois com pastilhas usadas, ou seja, que já passaram por uma etapa de *fade*. O procedimento de ensaio utilizado foi o ensaio de caracterização térmica. Os resultados das etapas de *fade*, correspondente às frenagens de oitenta e seis até cem do ensaio de caracterização térmica, podem ser vistos na Figura 4.14.

Observa-se na figura que as pastilhas usadas não apresentam uma queda do coeficiente de atrito médio por frenagem nesta etapa, pois segundo Critsol-Bulthé et al., 2007, a resina fenólica é praticamente toda degradada no primeiro *fade* devido às elevadas temperaturas, assim, nos *fades* seguintes, o coeficiente de atrito não varia tanto quanto no primeiro.

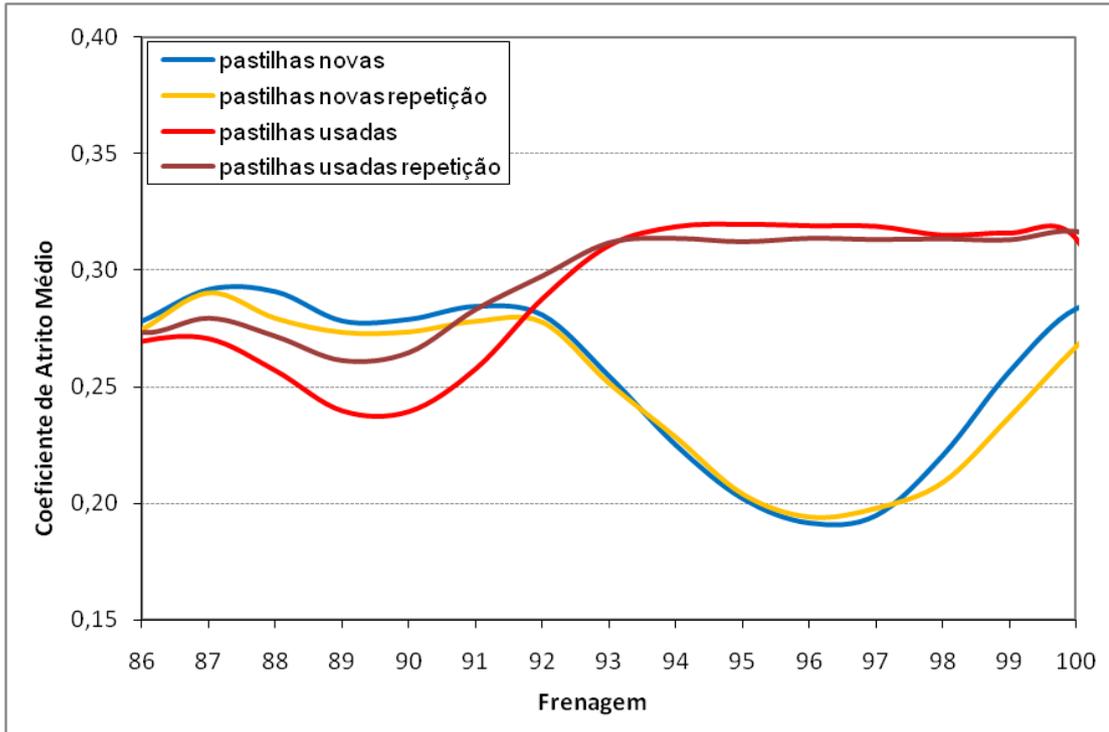


Figura 4.14 - Coeficientes de atrito médio em cada frenagem da etapa de *fade* das pastilhas usadas e novas

5 CONCLUSÕES

As conclusões obtidas neste trabalho foram:

- Das quatro espessuras de disco ensaiadas (10, 15, 20 e 25 mm), aquela que apresentou o comportamento térmico mais próximo ao dos quatro sistemas de freio ensaiados por Infantini, 2008, foi o disco de 10 mm de espessura, portanto, ele foi escolhido para ser utilizado no Dinamômetro em Escala da Fras-le, no caso do ensaio de caracterização térmica;

- O Dinamômetro em Escala da Fras-le apresentou um comportamento do coeficiente de atrito médio por frenagem semelhante ao dos sistemas B, C, D e E no ensaio de caracterização térmica, o que juntamente com os resultados do comportamento térmico do disco, justificam a escolha do disco de 10 mm de espessura para o ensaio de caracterização térmica.

5.1 Propostas de Trabalhos Futuros

Algumas propostas de trabalhos futuros são:

- Criação um banco de dados de materiais, no qual os critérios quantitativos e qualitativos descritos neste trabalho serão aplicados na forma de uma consulta a esse banco de dados. Esse banco de dados poderá ser utilizado no projeto de novos produtos de fricção;

- Obtenção experimental das eficiências mecânicas dos sistemas de freio B, C, D e E, de modo que se possa analisar o comportamento dos coeficientes de atrito desses sistemas e do Dinamômetro em Escala da Fras-le no mesmo patamar;

- Os coeficientes de atrito analisados neste trabalho foram os coeficientes de atrito médio por frenagem, porém esses valores médios dependem muito da “janela de aquisição”. Assim o mais correto é que futuramente se faça uma avaliação mais detalhada pelo coeficiente de atrito ao longo de cada frenagem ao invés de se utilizar apenas o seu valor médio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agudelo, C. E., Ferro, E., 2005. **“Technical Overview of Brake Performance Testing for Original Equipment and Aftermarket in the US and European Markets”**, Link Technical Report FEV2005-01.

AK-Master Standard, dezembro de 1998. In Brake German Procedures, Alemanha.

ASTM E230-03. **“Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples”**. American Society for Testing and Materials.

Bijwe, J., Kumar, M., Gurunath, P. V., Desplanques, Y., Degallaix, G., 2008. **“Optimization of Brass Content for Best Combination of Tribo-performance and Thermal Conductivity of Non-Asbestos (NAO) Friction Composites”**, Wear, v. 265, p. 699-712.

Birch, T. W., 1999. **“Automotive Braking Systems”**, Third Edition, Delmar.

Cristol-Bulthé, A., Desplanques, Y., Degallaix, G., Berthier, Y., 2007. **“Mechanical and Chemical Investigation of the Temperature Influence on the Tribological Mechanisms Occurring in OMC/Cast Iron Friction Contact”**, Wear, v. 264, p. 815-825.

Dohle, A., Elvenkemper, A., Lange, J., Degenstein, Th., 2007. **“The μ - Value - Friction Level Determination in Brake Systems”**, 8º Colloquium Internacional de Freios, SAE, Brasil.

Eriksson, M., 2000. **“Friction and Contact Phenomena of Disc Brakes Related to Squeal”**, Thesis, Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala.

Eriksson M., Bergman F., Jacobson S., 2002. **“On the Nature of Tribological Contact in Automotive Brakes”**, Wear 252, p. 26-36.

Eriksson M., Jacobson S., 2000. **“Tribological Surfaces of Organic Brake Pads”**, Tribol. Int. 33, p. 817-827.

Haynes Publishing, 1999. **“Automotive Disc Brake Manual”**, Techbook Series.

Infantini, M. B., 2008. **“Variáveis de Desempenho dos Sistemas de Freio”**,

Dissertação, PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Iombriller, 2003. “**Análise Térmica e Dinâmica do Sistema de Freio a Disco de Veículos Comerciais Pesados**”, Tese, Escola de Engenharia de São Carlos.

Kruze, G. A. S., 2007. “**Projeto de uma Pinça de Freio de Acionamento Hidráulico para um Dinamômetro em Escala Reduzida**”, Monografia, DEMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Limpert, R., 1999. “**Brake Design and Safety**”, Second Edition, SAE International.

Lopes, P. A., 1999. “**Probabilidades e Estatística**”, Reichmann e Affonso Editores.

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

Oldershaw, R. M, Prestidge, A. F, Birkmyre R C., 1973. “**Brake Road Testing in the Laboratory**”, SAE Technical Paper Series 730563.

Preston, J. D, Forthofer, R. J., 1971. “**Correlation of Vehicle, Dynamometer and Other Laboratory Tests for Brake Friction Materials**”, SAE Technical Paper Series 710250.

Pompon, J., 1997. “**The Brake Disc Manual**”, Brembo.

Puhn, F., 1985. “**Brake Handbook**”, HPBooks, U.S.A..

Rehkopf, J., Halderman, J. D., 2006. “**Automotive Brake Systems**”, Prentice Hall, 4th edition.

Sanders, P. G., Dalka, T. M., Basch, R. H., 2001. “**A Reduced-Scale Brake Dynamometer for Friction Characterization**”, Tribology International, v. 34, p. 609-615.

Santos, F. S., 2008. “**Análise de Incertezas na Determinação do Coeficiente de Atrito de Materiais de Fricção Utilizando um Tribômetro**”, Monografia, DEMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, R.G., 2005. “**Projeto de Engenharia Mecânica**”, Bookman, 7ª edição.

Wilson, A. J, Belford, W. G, Bowsher G. T., 1968. “**Testing Machines for Scale Vehicle Brake Installations**”, The Engineer, p. 317-323.

Wilson, A. J., Bowsher, G. T., 1971. “**Machine Testing for Brake Lining Classification**”, SAE Technical Paper Series 710249.

Zimmer D., Teves A., 1982. “**ATE Friction Test Machine and Other Methods of Lining Screening**”. SAE Technical Paper Series 820163.