

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

COMPARAÇÃO TÉRMICA DE FRENAGENS REALIZADAS EM
UM TRIBÔMETRO E UM DINAMÔMETRO VISANDO CONTRIBUIR PARA
A CORRELAÇÃO DE RESULTADOS DE ATRITO

por

Fabiano Edovirges Arrieche

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

Porto Alegre, Novembro de 2009



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

COMPARAÇÃO TÉRMICA DE FRENAGENS REALIZADAS EM
UM TRIBÔMETRO E UM DINAMÔMETRO VISANDO CONTRIBUIR PARA
A CORRELAÇÃO DE RESULTADOS DE ATRITO

por

Fabiano Edovirges Arrieche

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

Prof. Dr. Walter Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Flávio José Lorini

Prof. Dr. José Antônio Esmério Mazzaferro

Prof. Dr. Rafael Antônio Comparsi Laranja

Porto Alegre, 27 de novembro de 2009.

ARRIECHE, F.E.; **Comparação térmica de frenagens realizadas em um tribômetro e um dinamômetro visando contribuir para a correlação de resultados de atrito**. 2009. 17 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

RESUMO

Tribômetros de frenagem têm surgido como uma alternativa visando à diminuição de custos e de tempo no desenvolvimento de materiais de fricção para sistemas de freios veiculares. Porém, neste equipamento os ensaios são executados sem desacelerar o disco de freio (arrasto constante), diferentemente da situação que ocorre em frenagens veiculares e nos dinamômetros inerciais. Além disso, as temperaturas alcançadas durante os testes não são as mesmas que as encontradas em um veículo. O presente trabalho buscou contribuir para a realização de frenagens com desaceleração do disco de freio em um tribômetro, valendo-se da comparação térmica com os resultados de ensaios de frenagem realizados em uma máquina de referência (dinamômetro). Aplicou-se a mesma densidade de energia em todas as amostras avaliadas em ambas as máquinas, seguindo a teoria das escalas encontrada na literatura especializada. A taxa de aquecimento do disco do tribômetro foi modificada através da alteração da área dos corpos de prova testados, cujos diâmetros avaliados foram 18, 25 e 30mm. O tribômetro se mostrou capaz de reproduzir adequadamente os parâmetros do ensaio do corpo de prova de 18 e de 25 mm, apresentando dificuldades técnicas com o corpo de prova maior, de 30 mm, devido à insuficiência de carga do sistema de atuação. Sob o ponto de vista térmico, a amostra de 30 mm de diâmetro foi a que proporcionou temperaturas do disco mais próximas das apresentadas no dinamômetro. Os resultados deste trabalho indicam que para poder correlacionar os resultados para o atrito entre ambos os equipamentos é fundamental que as temperaturas atingidas durante a frenagem sejam semelhantes.

PALAVRAS-CHAVE: Tribômetro, atrito, fade, freio.

ARRIECHE, F.E.; **Thermal comparison of brakings performed on a tribometer and a dynamometer to contribute to the correlation of results of friction.** 2009. 17 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ABSTRACT

Braking tribometer has appeared as alternative to reduce the cost and time in the development of friction materials for vehicular brakes. However, in this equipment the tests are carried out without slowing down the brake disc (constant drag), while the situation that occurs during braking on vehicle and inertial dynamometers is different. Furthermore, the temperatures reached during tests are not the same as those found in a vehicle. This present work intended to contribute for realization of brakings with constant deceleration in a tribometer, taking aim of thermal comparison with the results of braking tests performed on a reference machine (dynamometer). It was applied same energy density in all samples on both machines, following the theory of scales found in the literature. The rate of heating in brake disc on the tribometer was modified by changing the area of the specimens tested, whose diameters assessed were 18, 25 and 30mm. The tribometer has been shown capable to adequately reproduce the parameters of the test on specimen of 18 and 25 mm, presenting technical difficulties with the largest specimen of 30 mm, due to insufficient loading of the actuation system. Under the thermal point of view, the sample of 30 mm presented the nearer temperatures those achieved in the dynamometer. The results of this study indicate that in order to correlate the results to the friction between both equipment is essential that the temperatures achieved during braking must be similar.

KEYWORDS: Tribometer, friction, fade, brake.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO.....	1
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3.1	Atrito	1
3.2	Materiais de Atrito	1
3.3	Influência da Temperatura no Atrito	2
3.4	Equipamentos para Ensaios de Materiais de Atrito	4
3.4.1	Dinamômetro Inercial	4
3.4.2	Tribômetro.....	4
4	METODOLOGIA.....	5
4.1	Adequação dos Parâmetros de Ensaio	5
4.2	O Ensaio Realizado.....	7
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	9
5.1	Assentamento no FSD	9
5.2	Fade no FSD.....	10
5.3	Assentamento no Tribômetro	11
5.4	Fade no Tribômetro.....	12
5.5	Estimativa para o tamanho do corpo de prova	15
6	CONCLUSÕES.....	16
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	16
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	17

1 INTRODUÇÃO

Muitos parâmetros devem ser levados em conta durante o desenvolvimento de novos materiais de atrito para pastilhas e lonas de freio. Para avaliá-los adequadamente é necessário realizar diversos ensaios, que geralmente são realizados em dinamômetros inerciais e posteriormente submetidos a testes veiculares. Dessa forma, o custo para o desenvolvimento desses novos materiais acaba tornando-se muito elevado, uma vez que os equipamentos envolvidos nos ensaios são caros e, além disso, os testes demandam um tempo relativamente grande e consomem energia proporcionalmente [Infantini, 2008].

A fim de reduzir os custos com o desenvolvimento desses materiais, Wilson et. al., 1968, desenvolveram um dinamômetro em escala reduzida, para ensaios em materiais de atrito. Para isso, propuseram uma teoria de escala para correlacionar as condições do equipamento com as encontradas nos sistemas mecânicos dos veículos. Os resultados obtidos mostraram uma relação entre os ensaios no dinamômetro e no veículo. A partir dessa teoria, outros equipamentos em escala reduzida foram propostos [Oldershaw et. al., 1973; Sanders et. al., 2001].

Outro equipamento capaz de avaliar propriedades tribológicas chama-se Tribômetro. É muito utilizado para pesquisas que visam compreender melhor o comportamento dos efeitos tribológicos dos materiais. Esse equipamento, além de ter um custo baixo frente aos dinamômetros, é uma ferramenta que serve de apoio durante a fase de pesquisa dos materiais de fricção [Desplanques et. al., 2006; Blau e McLaughlin, 2003]. Uma característica importante desses tribômetros é que são equipamentos que operam em arrasto constante (ou drag), ou seja, o rotor (disco ou tambor de freio) gira durante o contato com o material de fricção sem desacelerar, situação diferente da encontrada em dinamômetros e veículos, onde o rotor desacelera ao longo da frenagem, dissipando a energia cinética em forma de calor.

2 OBJETIVO

Reproduzir em um tribômetro frenagens com desaceleração constante, da mesma forma que em dinamômetro inercial, buscando correlacionar os resultados frente a variação da temperatura e adequando os parâmetros de ensaio através da teoria de escalas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Atrito

O atrito é definido como a dissipação da energia gerada no escorregamento de corpos em contato, podendo ser energia térmica, acústica e mecânica. A energia de atrito, a princípio, é dissipada através de deformações nas camadas superficiais por mecanismos elásticos e plásticos. A força de atrito é proporcional a força normal aplicada aos corpos, e não depende da área de contato aparente. A proporcionalidade entre força de atrito e a força normal é definida pelos coeficientes de atrito cinético e dinâmico [Stachowiak e Batchelor, 2005].

3.2 Materiais de Atrito

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

Os materiais de atrito utilizados em pastilhas e lonas de freio consistem em mais de 20 componentes diferentes [Ostermeyer, 2003]. Segundo Eriksson et. al., 2002, é necessário que se tenha os seguintes componentes:

- **Materiais Estruturais:** Fornecem resistência mecânica, geralmente são utilizadas fibras metálicas, carbono, vidro, etc.
- **Aditivos:** Para lubrificação e estabilização dos materiais de atrito (grafita ou sulfetos metálicos) ou para aumentar e promover a limpeza das superfícies dos discos por abrasividade (alumina e sílica). Partículas abrasivas como o silício e alumínio também ajudam a aumentar o coeficiente de atrito. A adição de silício ainda promove uma superfície de contato mais aderente, pois remove óxidos e outros filmes da superfície do disco de freio.
- **Enchimento:** Promovem uma facilidade para a manufatura a preenchem espaços sem altos custos. Podem ser utilizados, por exemplo, mica, vermiculita ou sulfato de bário.
- **Aglutinantes:** Para união e preenchimento dos materiais da pastilha, formando um composto termicamente estável (resinas fenólicas), onde eventualmente são adicionados anti-ruídos (elastômeros). Frequentemente adiciona-se borracha para melhorar as propriedades de amortecimento.

Os materiais de atrito dividem-se basicamente em dois grupos, segundo Birch, 1999, que são os materiais orgânicos sem asbestos, conhecidos como NAO (Non-Asbestos Organic), e os semi-metálicos.

Os NAO são compostos por resinas, materiais orgânicos e inorgânicos, grafite, mica, fibras metálicas (em baixa porcentagem) e aramida. São materiais macios, que proporcionam um desgaste menos severo dos discos de freio e uma frenagem mais confortável. São mais suscetíveis a variações do atrito com a temperatura.

Os materiais semi-metálicos possuem em sua formulação uma carga maior de materiais metálicos, podendo chegar a 50%. Possuem maior resistência ao desgaste e ao serviço em elevadas temperaturas.

3.3 Influência da Temperatura no Atrito

Um dos problemas mais comuns que ocorrem em frenagens a elevadas temperaturas é o “fade” [Limpert, 1999]. O “fade” é a redução do coeficiente de atrito em função do aumento da temperatura durante uma frenagem. Geralmente é o que ocorre em veículos que submetem o sistema de freio a longas aplicações, como é verificado em casos de descidas de serra, por exemplo.

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

Pode-se observar que a temperatura do disco de freio durante a frenagem não é uniforme [Morelli, 2002]. Na figura 2.1 observa-se que no início da frenagem há uma diferença de 250°C entre o centro e a superfície do disco. Devido a essa diferença na temperatura, ocorrem deformações axiais (a) e radiais (ΔR) que tendem a alterar a condição de contato entre pastilha e disco, diminuindo assim a eficiência da frenagem.

Silva, 2007, através do uso de elementos finitos, determinou que a quantidade de calor total gerada durante a frenagem é distribuída da seguinte forma: 93% é transferido para o disco, 5% para a pastilha de freio e 2% é dissipado para o meio. Este estudo foi realizado com um material de atrito semi-metálico.

De acordo com Rhee et. al., 1970, uma forma de reduzir o efeito do “fade” seria diminuir a temperatura na interface entre a pastilha e o disco. Uma das maneiras mais adequadas para atingir esse objetivo é alterar o disco de freio, pois, o disco absorve a maior parte do calor total gerado durante a frenagem. Rhee et. al., 1970, realizaram ensaios com 3 tipos de materiais de diferentes difusividades térmicas. A figura 2.2 mostra que o aumento da temperatura durante a frenagem diminui com o aumento da difusividade térmica do material.

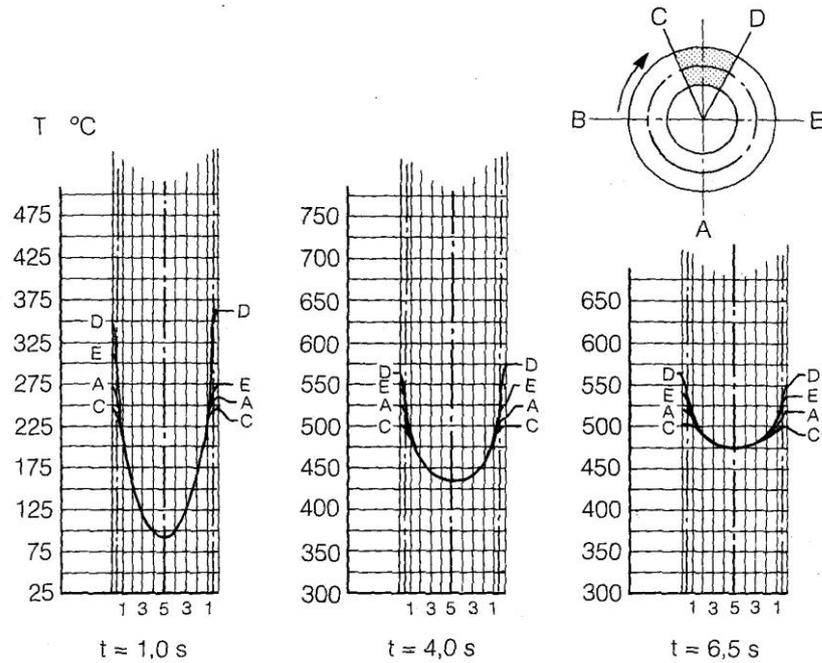


Figura 2.1 - Distribuição de temperatura na seção radial do disco e deformações causadas pelas tensões térmicas [Adaptado de Morelli, 2002].

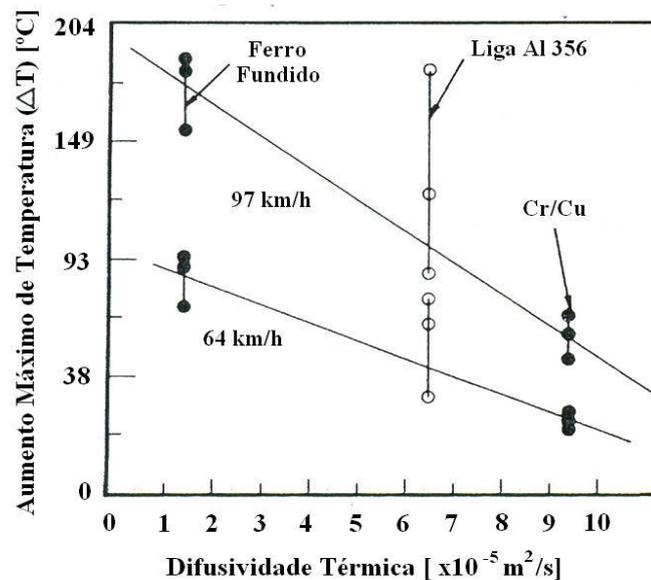


Figura 2.2 - Difusividade térmica X Aumento máximo de temperatura [Rhee et. al., 1970].

Outro efeito relacionado com o aumento da temperatura durante a frenagem, segundo Blau e McLaughlin, 2003, seria o aumento da taxa de formação de óxidos metálicos. Como alguns óxidos metálicos têm propriedades lubrificantes, poderá haver uma influência na redução do coeficiente de atrito entre a pastilha e o disco de freio. De acordo com Cristol-Bulthé et. al., 2007, durante o aumento da temperatura ocorre a degradação da matriz de resina fenólica. Durante essa fase o coeficiente de atrito diminui, apresentando então a influência da degradação da resina fenólica para o aparecimento do comportamento de “fade”.

Neuman et.al., 1983, destacam ainda que o histórico de temperatura do material de fricção é muito importante porque a maioria dos materiais tem as suas propriedades alteradas em função de condições de operação anteriores. O melhor exemplo disso é a recuperação do atrito que ocorre após a etapa do “fade”, quando as condições de frenagem são menos severas que as aplicadas durante a etapa anterior. O autor também menciona que as razões para essas mudanças são diversas e incluem a cura adicional do material, alterações químicas (reversíveis e irreversíveis) e vaporização de componentes voláteis.

3.4 Equipamentos para Ensaio de Materiais de Atrito

Uma variedade de testes são conduzidos durante o desenvolvimento de materiais de atrito para freios, mas o teste de qualificação final para os materiais de freio requer que sejam realizados em veículos com componentes em tamanho real. Já para reduzir os custos de qualificação preliminar de materiais bem, como para atuar no controle de qualidade, várias máquinas de testes em escala foram desenvolvidas [Blau, 2001].

A seguir são descritos os equipamentos que foram utilizados no desenvolvimento desse trabalho.

3.4.1 Dinamômetro Inercial

Os dinamômetros inerciais são, dentre os equipamentos para testes de materiais para freio, os que apresentam a melhor correlação com os resultados obtidos em veículo, porém, possuem um elevado custo, sendo isso sua principal desvantagem [Preston e Forthofer, 1971]. O dinamômetro inercial consiste basicamente de um motor para acionamento do sistema, discos de inércia que simulam a energia cinética do veículo e um sistema de freio, todos conectados através de um eixo. O sistema de freio utilizado no dinamômetro é o mesmo do veículo sobre o qual está sendo feito o ensaio [Infantini, 2008].

O funcionamento do dinamômetro inercial se resume, basicamente, em acelerar os discos de inércia através do motor até a velocidade desejada e, após o motor ser desligado, o freio é acionado para atuar na desaceleração dos discos de inércia. A figura 3.1 apresenta uma representação esquemática de um dinamômetro inercial.

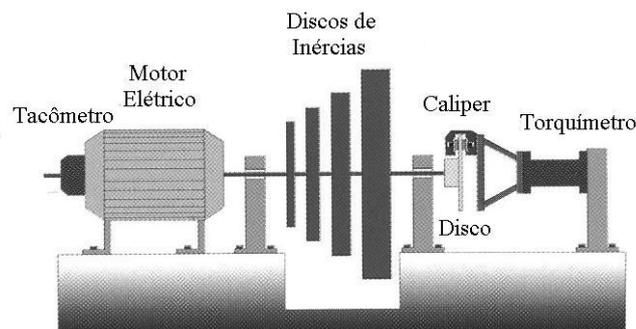


Figura 3.1 – Representação do dinamômetro inercial [Haynes Publishing, 1999].

Existem também os dinamômetros em escala reduzida, que visam obter a mesma correlação que apresentam os dinamômetros em escala real, mas com um menor custo. Diversos equipamentos desse tipo foram propostos [Wilson et. al., 1968; Oldershaw et. al., 1973; Sanders et. al., 2001] e apresentaram resultados semelhantes aos obtidos nos veículos.

O dinamômetro utilizado como referencial para a comparação dos resultados obtidos através do tribômetro, para o presente trabalho, é em escala reduzida. O FSD (Fras-le Scale Dynamometer) foi desenvolvido em parceria entre uma fabricante de materiais para freio e o GPFAI-UFRGS. O diferencial na concepção desse equipamento é, ao contrário dos demais dinamômetros inerciais em escala relatados na literatura, a capacidade de correlacionar os resultados com mais de um sistema mecânico. Com isso surge a perspectiva de geração de um banco de dados para materiais de fricção. Desta forma, o FSD é capaz de isolar a influência da variável do sistema de freios sobre os resultados de atrito.

3.4.2 Tribômetro

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

pesquisa em materiais para freio, ou tribômetro de frenagem, apresenta o mesmo princípio de funcionamento que o tipo pino-no-disco, porém é projetado de forma a atingir as condições reais de frenagem experimentadas em veículos. Além disso, podem possuir instrumentação específica para o ensaio de materiais de atrito para freios [Neis, 2008].

O tribômetro utilizado nesse trabalho, desenvolvido por Neis, 2008, figura 3.2, foi projetado para atender as condições reais, tais como pressão de contato e velocidades de escorregamento, seguindo o levantamento realizado por Infantini, 2008. Neste equipamento o corpo de prova tem um tamanho reduzido, a fim de permitir a versatilidade nos ensaios com custos menores.

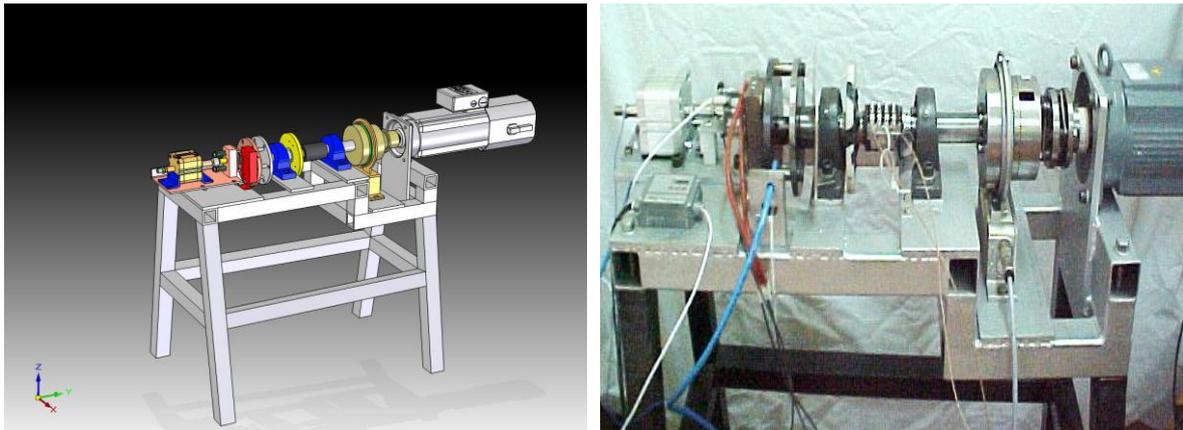


Figura 3.2 – Tribômetro utilizado nos ensaios. [Neis, 2008]

4 METODOLOGIA

4.1 Adequação dos Parâmetros de Ensaio

Para a realização dos ensaios, foi necessário adequar os parâmetros de ensaio conforme a teoria de escalas proposta por Wilson, 1968. De acordo com a teoria, é importante garantir que a energia dissipada na frenagem por unidade de área da pastilha de freio, ou simplesmente densidade de energia, seja mantida a mesma, tanto para o FSD quanto para o tribômetro. Além disso, outros parâmetros que também devem ser mantidos constantes estão listados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros constantes

Parâmetro	Unidade
<i>Velocidade de escorregamento</i>	<i>m/s</i>
<i>Desaceleração</i>	<i>m/s²</i>
<i>Tempo de Frenagem</i>	<i>s</i>
<i>Densidade de Energia</i>	<i>J/m²</i>

Para adequação dos parâmetros foi feito primeiramente o levantamento de todas as variáveis utilizadas no ensaio realizado no FSD. Dessa forma foi possível obter o valor para a densidade de energia através da equação 4.1 [Wilson et. al., 1968].

$$\text{Densidade de Energia} = \frac{\Delta E}{A_p} = \frac{I(\omega_i^2 - \omega_f^2)}{2A_p} \quad (4.1)$$

onde ΔE é a variação da energia cinética durante a frenagem no FSD, em J , A_p é a área da pastilha utilizada, em m^2 , I é a inércia montada na máquina, em $kg.m^2$, e ω é a velocidade angular, em rad/s , cujo sub-índice i representa a velocidade inicial e o sub-índice f representa a velocidade final.

A inércia que deverá ser simulada no tribômetro para que a densidade de energia seja a mesma em ambos os equipamentos é calculada através da equação 4.2, que representa a variação da energia cinética que deve ser alcançada pelo tribômetro, para uma dada área de pastilha.

$$\frac{\Delta E}{A_p} = \frac{\Delta e}{a_p} \quad (4.2)$$

onde ΔE é a variação da energia cinética do FSD, Δe é a variação da energia cinética no tribômetro, A_p a área da pastilha do FSD e a_p a área da pastilha do tribômetro.

Como visto na tabela 4.1, outro pré-requisito da teoria de escala é que a velocidade de escorregamento seja a mesma para os dois equipamentos. Assim, de posse do valor do raio efetivo (distância entre o centro do disco e o centro da pastilha) do tribômetro e do FSD, determinaram-se as velocidades angulares a ser ensaiadas no tribômetro. Com os valores de variação de energia cinética e as velocidades angulares do tribômetro, foi possível calcular, através da equação 4.3, a inércia i que deverá ser simulada através da imposição de um torque no tribômetro.

$$i = \frac{2 \cdot \Delta e}{(\omega_i^2 - \omega_f^2)} \quad (4.3)$$

Como comentado no item 3.4.1, os dinamômetros utilizam discos de inércia para simularem a massa equivalente do veículo, mas o tribômetro não utiliza esse recurso. Portanto para simular a inércia no tribômetro é necessário impor uma desaceleração definida no servo-motor. Para o ensaio de "fade" um dos requisitos é realizar a frenagem com uma desaceleração linear constante de $3,92 \text{ m/s}^2$, conforme exigido pela norma AK-Master, 1998, para ensaios de frenagem em dinamômetros AK-Master. No dinamômetro esse controle é feito através do torque frenante, e será conduzido da mesma forma para o tribômetro. Dessa forma, mantendo o torque constante, a inércia simulada será constante e a desaceleração também será constante, mantida pelo servo-motor.

Para definir o torque T_t que deve ser imposto pelo servo-motor do tribômetro utilizou-se a equação 4.4, ao passo que, para encontrar a desaceleração angular α foi utilizada a equação 4.5. O valor para a inércia já foi definido na equação 4.3.

$$T_t = i \cdot \alpha \quad (4.4)$$

onde T_t é o torque que deve ser empregado pelo tribômetro, em $N.m$, i é a inércia simulada na máquina, em $kg.m^2$, e α é a desaceleração angular, em rad/s^2 .

$$\alpha = \frac{\omega_{ii} - \omega_{ff}}{t} \quad (4.5)$$

onde α é a desaceleração angular, em rad/s^2 , ω é a velocidade angular do tribômetro, em rad/s , cujo sub-índice ti representa a velocidade inicial da frenagem e o sub-índice tf representa a velocidade final da frenagem. O tempo t é a duração da frenagem, em s, que é o mesmo para ambos os equipamentos comparados, conforme tabela 4.1.

4.2 O Ensaio Realizado

O ensaio realizado no *Frasle Scale Dynamometer* para avaliação do “fade”, e que serviu de referência para análise do ensaio realizado no tribômetro, foi baseado na norma AK-Master, 1998, para ensaio de sistemas de freio em dinamômetros inerciais. Dessa norma retiraram-se duas etapas, as quais foram utilizadas para a realização do ensaio usado nesse trabalho. A primeira etapa, chamada de *Assentamento*, consiste na aplicação de 30 frenagens, de 80 km/h a 30 km/h, com uma pressão de contato constante de 1,08 MPa e temperatura inicial do disco de 100°C, para cada frenagem. Essa etapa tem como objetivo promover a estabilização do coeficiente de atrito do material e também uniformizar o contato entre a pastilha e o disco de freio.

A segunda etapa, chamada *Ciclo de Fade*, consiste em realizar 15 frenagens, de 100 km/h até 0 km/h, com desaceleração de 3,92 m/s² ou 0,4g e temperaturas iniciais de 100, 215, 283, 330, 367, 398, 423, 446, 465, 483, 498, 513, 526, 539, 550°C. Cabe ressaltar que a temperatura inicial é a temperatura de gatilho para que a frenagem inicie. Para que essa etapa seja satisfatoriamente cumprida, é necessário que no final de cada frenagem, a temperatura do disco seja capaz de atingir, no mínimo, a temperatura do próximo gatilho, permitindo que a frenagem seguinte se inicie.

As velocidades e a desaceleração mencionadas nas etapas acima são referentes ao veículo. Portanto, para realização do ensaio esses valores foram convertidos para a velocidade de rotação da máquina, utilizando para isso a relação do raio do pneu do veículo ensaiado.

O sistema de freio utilizado no FSD opera com duas pastilhas de freio, uma de cada lado da superfície do disco, enquanto o tribômetro apresenta apenas uma pastilha. Dessa forma optou-se por utilizar um disco de freio no tribômetro com a metade de espessura do disco de freio do dinamômetro, a fim de buscar uma mesma distribuição da temperatura sobre o disco durante a frenagem.

Em função da pequena espessura do disco de freio ensaiado no tribômetro a utilização de um termopar para medição da temperatura no disco se tornou impraticável, sendo empregado um pirômetro óptico. Este sensor foi instalado a 30 mm de distância da superfície de atrito do disco, sendo que a medição do pirômetro é a média encontrada em uma circunferência de diâmetro igual a 3 mm. Já no dinamômetro foram utilizados ambos os sensores, o pirômetro óptico e o termopar, conforme figura 4.1.

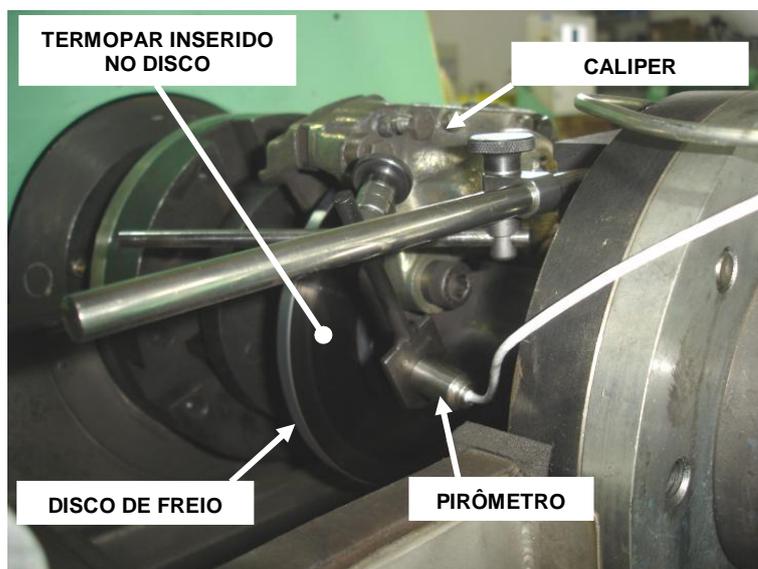


Figura 4.1 – Bancada do FSD com detalhe da montagem do pirômetro.

Devido a limitações de leitura do sistema de aquisição do FSD (saturação da escala máxima), foi necessário ajustar a emissividade do pirômetro para o valor 1,0, diferente da emissividade recomendada para o ferro fundido, que é por volta de 0,2. Este valor de emissividade foi ajustado também para utilização no tribômetro. Os valores de temperatura do pirômetro que serviram de gatilho para os ensaios do tribômetro foram os mesmos registrados por este instrumento no dinamômetro durante o instante em que a temperatura do termopar registrava as temperaturas de gatilho exigidas pela norma AK-Master, 1998.

As amostras (disco e pastilha) empregadas durante os testes foram fornecidas por um fabricante de sistemas freios, sendo a pastilha constituída de um material experimental e o disco fabricado a partir de ferro fundido cinzento. Na figura 4.2 estão apresentados os corpos de prova utilizados no ensaio. Os diâmetros dos corpos de prova testados no tribômetro foram 18 mm, 25 mm e 30 mm, com o objetivo de avaliar o tamanho adequado para que sejam atingidas as mesmas temperaturas do disco alcançadas no dinamômetro em escala da Frasle, durante as frenagens.



Figura 4.2 – Configurações dos corpos de prova utilizados no tribômetro.

A tabela 4.2 e tabela 4.3 apresentam os valores para os parâmetros de ensaio para ambos os equipamentos.

Tabela 4.2 – Parâmetros do Ensaio da etapa de Assentamento

Parâmetro	FSD	Tribômetro		
<i>Rotação Inicial</i>	1248 rpm	1906 rpm		
<i>Rotação Final</i>	456 rpm	686 rpm		
<i>Velocidade de Escorregamento Inicial</i>		8,0 m/s		
<i>Velocidade de Escorregamento Final</i>		2,9 m/s		
<i>Temperatura Inicial*</i>		46 °C		
<i>Área da Pastilha</i>	1600 mm ²	255 mm ²	491 mm ²	707 mm ²
<i>Força de Contato</i>	1724 N**	275 N	528 N	761 N
<i>Pressão de Contato</i>		1,08 MPa		
<i>Tempo Médio de Frenagem</i>		6,7 s		

* Temperatura medida com pirômetro com emissividade 1,0.

** Força de contato em cada pastilha.

Tabela 4.3 – Parâmetros do Ensaio da etapa do Ciclo de Fade

Parâmetro	FSD	Tribômetro		
<i>Rotação Inicial</i>	1564 rpm	2385 rpm		
<i>Rotação Final</i>	0 rpm			
<i>Velocidade de Escorregamento Inicial</i>	10,0 m/s			
<i>Velocidade de Escorregamento Final</i>	0 m/s			
<i>Temperatura Inicial*</i>	46 – 86 – 107 – 125 – 142 161 – 186 – 210 – 240 – 270 293 – 314 – 325 – 342 – 354°C			
<i>Área Total da Pastilha</i>	3200 mm ²	255 mm ²	491 mm ²	707 mm ²
<i>Inércia</i>	5,8 kg.m ²	0,2 kg.m ²	0,4 kg.m ²	0,6 kg.m ²
<i>Energia Cinética</i>	77791 J	6186 J	11933 J	17183 J
<i>Torque Frenante</i>	130 N.m	6,35 N.m	12,25 N.m	17,64 N.m
<i>Tempo de Frenagem</i>	7,8 s			

* Temperatura medida com pirômetro com emissividade 1,0.

Na tabela 4.3 verifica-se que ao aumentar a área do corpo de prova utilizado no tribômetro, a energia cinética também aumenta, isso ocorre pois a densidade de energia deve permanecer constante.

O tribômetro tem capacidade de operar em modo força constante ou em modo torque constante. No primeiro caso, a força de frenagem é mantida constante enquanto o torque frenante está livre para variar de acordo com o coeficiente de atrito. No segundo caso, o torque de frenagem é mantido constante independente da força de atrito. Isso é feito controlando a força aplicada pelo atuador a cada fração de segundo. Para a etapa de *Assentamento* foi utilizado a força constante, conforme definido no ensaio, e na etapa do *Ciclo de Fade* o torque foi mantido constante, também definido pelo ensaio.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Assentamento no FSD

Na figura 5.1 pode-se observar o resultado obtido no ensaio de *Assentamento*, realizado no FSD. Para facilitar a visualização foram apresentadas apenas 06 frenagens, do total de 30 frenagens dessa etapa. A medida que o número de frenagens aumenta, o atrito tende a aumentar, ficando com uma variação constante depois de um certo número de frenagens. Isso indica que o coeficiente de atrito estabilizou. Isso ocorre devido à uniformização da área de contato da pastilha com o disco (assentamento) e das propriedades iniciais do material de fricção, atingindo, portanto, o objetivo dessa etapa do ensaio. A diminuição do tempo de frenagem verificado na figura 5.1 é em função do aumento no coeficiente de atrito. Como nessa etapa a força foi mantida constante para desacelerar o disco de inércia, a medida que o atrito aumenta, o torque de frenagem também aumenta, gerando com isso uma frenagem em menor tempo.

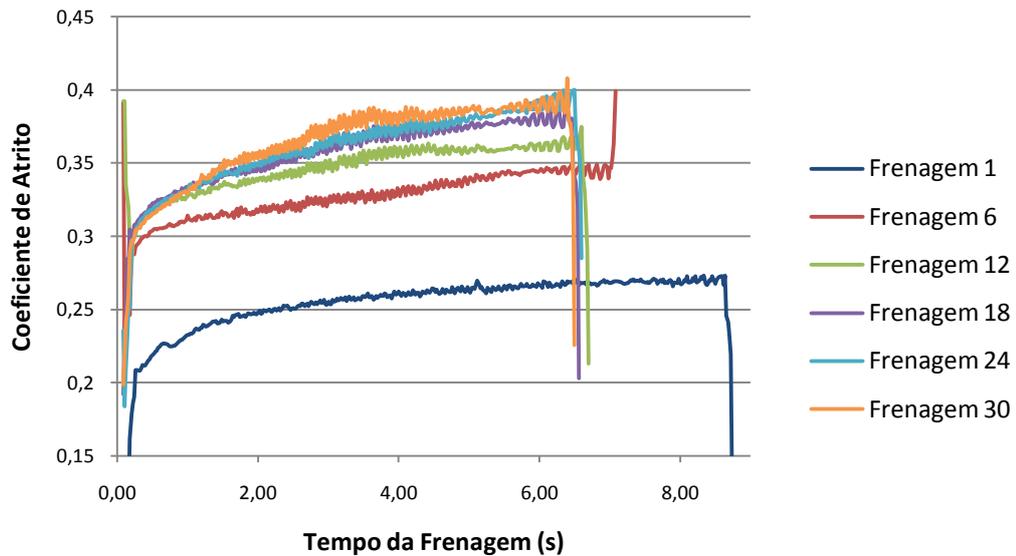


Figura 5.1 – Evolução do atrito durante a etapa de assentamento do FSD.

5.2 Fade no FSD

Durante o ensaio do *Ciclo de Fade* conduzido no FSD, pode-se observar o comportamento já esperado para o coeficiente de atrito com o aumento da temperatura. A figura 5.2 apresenta os resultados médios do coeficiente de atrito em cada frenagem realizada nessa etapa. Percebe-se que valor para o coeficiente de atrito no início da etapa de Fade foi muito próximo ao valor no final da etapa de Assentamento. Também foi verificado o aumento da temperatura do disco de freio durante cada frenagem realizada nessa etapa. Os resultados estão apresentados na figura 5.3. Pode-se observar que a variação da temperatura do disco, ou seja, a diferença entre a temperatura máxima e a inicial, para cada frenagem se mantém relativamente constante durante todo o ensaio do *Ciclo de Fade*.

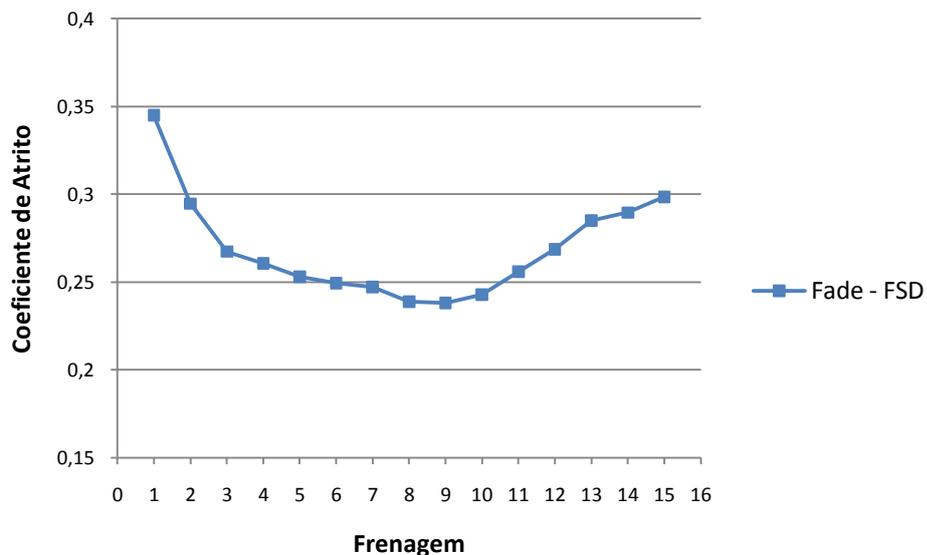


Figura 5.2 – Comportamento do atrito médio a cada frenagem, no FSD.

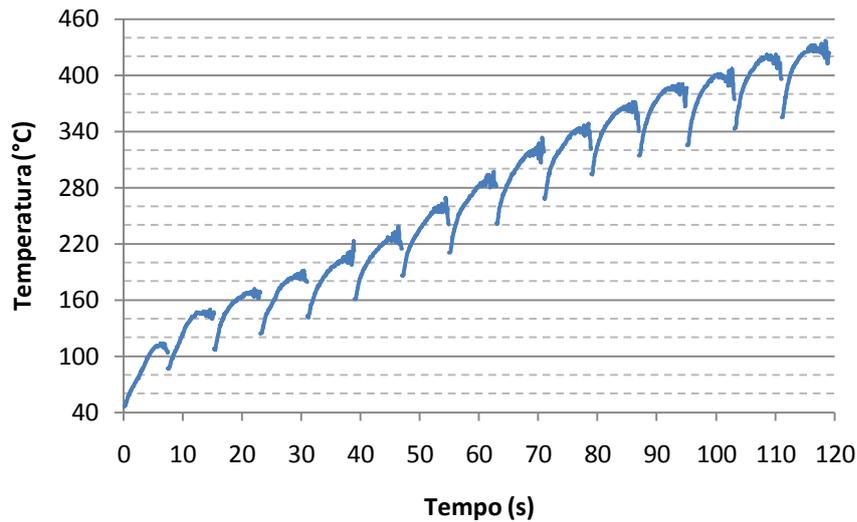


Figura 5.3 – Variação da temperatura a cada frenagem da etapa de Fade.

5.3 Assentamento no Tribômetro

Os resultados obtidos no ensaio de assentamento realizado no tribômetro estão apresentados na figura 5.4. Para uma melhor visualização dos resultados, foram apresentados as mesmas 6 frenagens utilizadas no assentamento realizado no FSD, até a última.

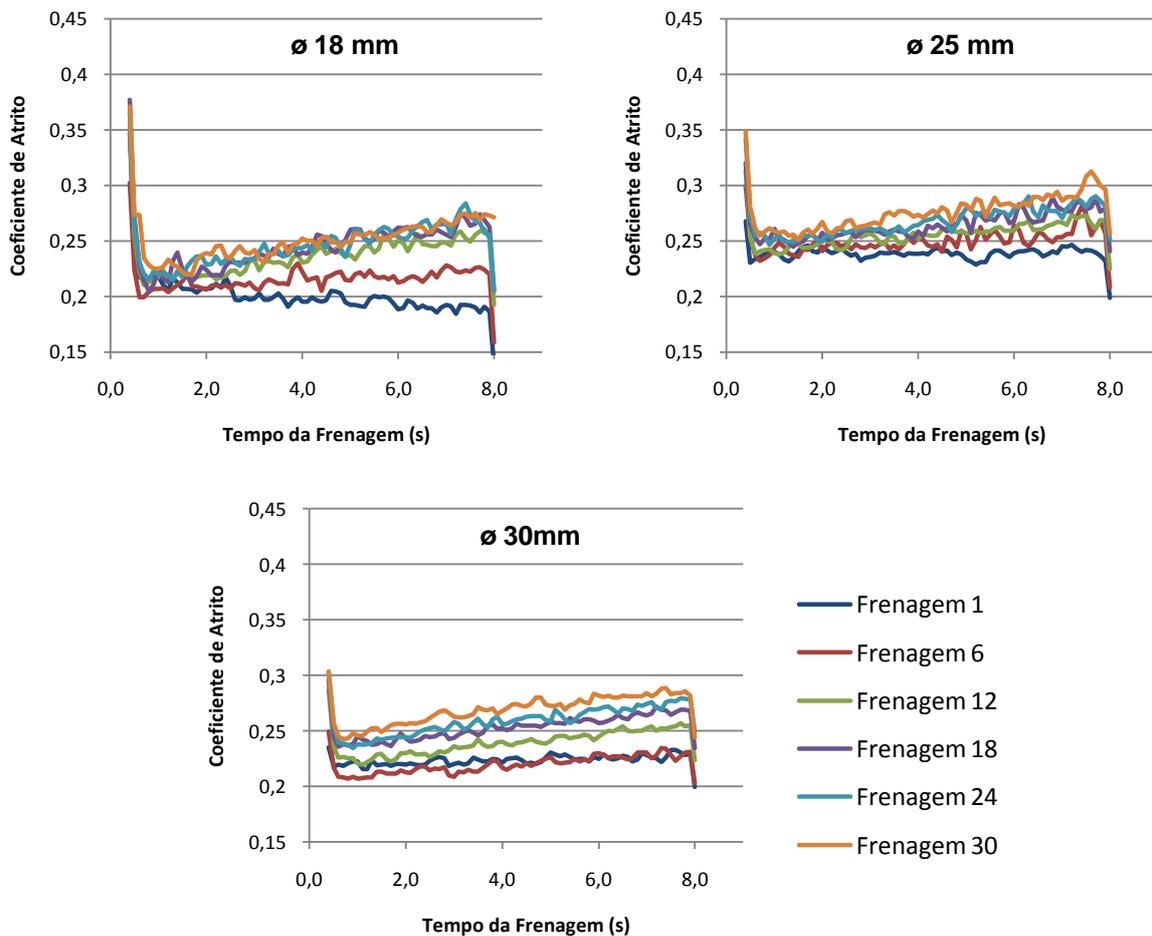


Figura 5.4 – Ensaio de assentamento realizado no tribômetro.

Nota-se que, para os três tamanhos de corpo de prova utilizados, o aumento do coeficiente de atrito não foi tão expressivo quanto no ensaio realizado no FSD. Para o corpo de prova de 18 mm, no início do ensaio o coeficiente de atrito não apresentou a tendência de aumentar durante a frenagem, ocorrendo apenas a partir da 6ª frenagem. O corpo de prova de 30 mm apresentou uma taxa de crescimento do atrito mais uniforme a cada frenagem, enquanto os demais apresentaram aumentos diferentes a cada frenagem realizada. Mesmo assim, os valores atingidos para o coeficiente de atrito ao final da etapa de assentamento foram relativamente próximos para os três corpos de prova testados, por volta de 0,28. A estabilização do coeficiente de atrito durante essa etapa do ensaio não foi tão efetiva quanto à ocorrida no ensaio realizado no FSD, indicando a necessidade de um número maior de frenagens para o assentamento.

Na figura 5.5 está representada a temperatura máxima atingida durante cada frenagem analisada, da etapa de assentamento. Pode-se verificar que as temperaturas atingidas no FSD são mais elevadas que nos três corpos de prova ensaiados no tribômetro. Essa diferença na temperatura máxima possivelmente contribuiu para que o coeficiente de atrito fosse diferente do encontrado no FSD, já que, como citado por Neuman et. al., 1983, o histórico das temperaturas influencia no comportamento do atrito dos materiais de fricção.

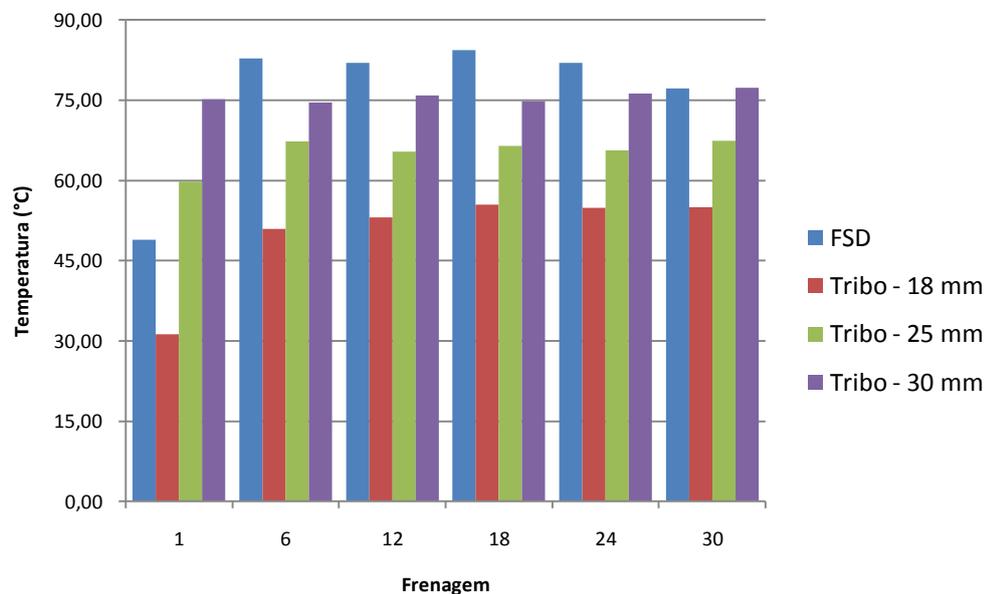


Figura 5.5 – Máxima temperatura atingida na frenagem do assentamento.

5.4 Fade no Tribômetro

A figura 5.6 mostra o valor instantâneo do coeficiente de atrito e o torque para cada frenagem realizado na etapa do Fade. O círculo vermelho do gráfico correspondente ao corpo de prova de 30 mm, destaca que durante as frenagens 8, 9 e 10, o torque não se manteve constante e caiu significativamente. Isso ocorreu devido ao fato da força aplicada na pastilha ter atingido seu limite (saturação), não conseguindo compensar a diminuição do atrito para manter o torque constante. Nos outros ensaios esse fato não ocorreu porque o torque objetivo, e conseqüentemente a força aplicada, era menor. Atualmente a força máxima que o tribômetro consegue impor é 1650 N. Através da utilização de corpos de prova maiores, torna-se possível atingir temperaturas mais elevadas. Porém, para isso, é preciso alterar o atual sistema de atuação do tribômetro, através da configuração de um pistão com maior capacidade de carga.

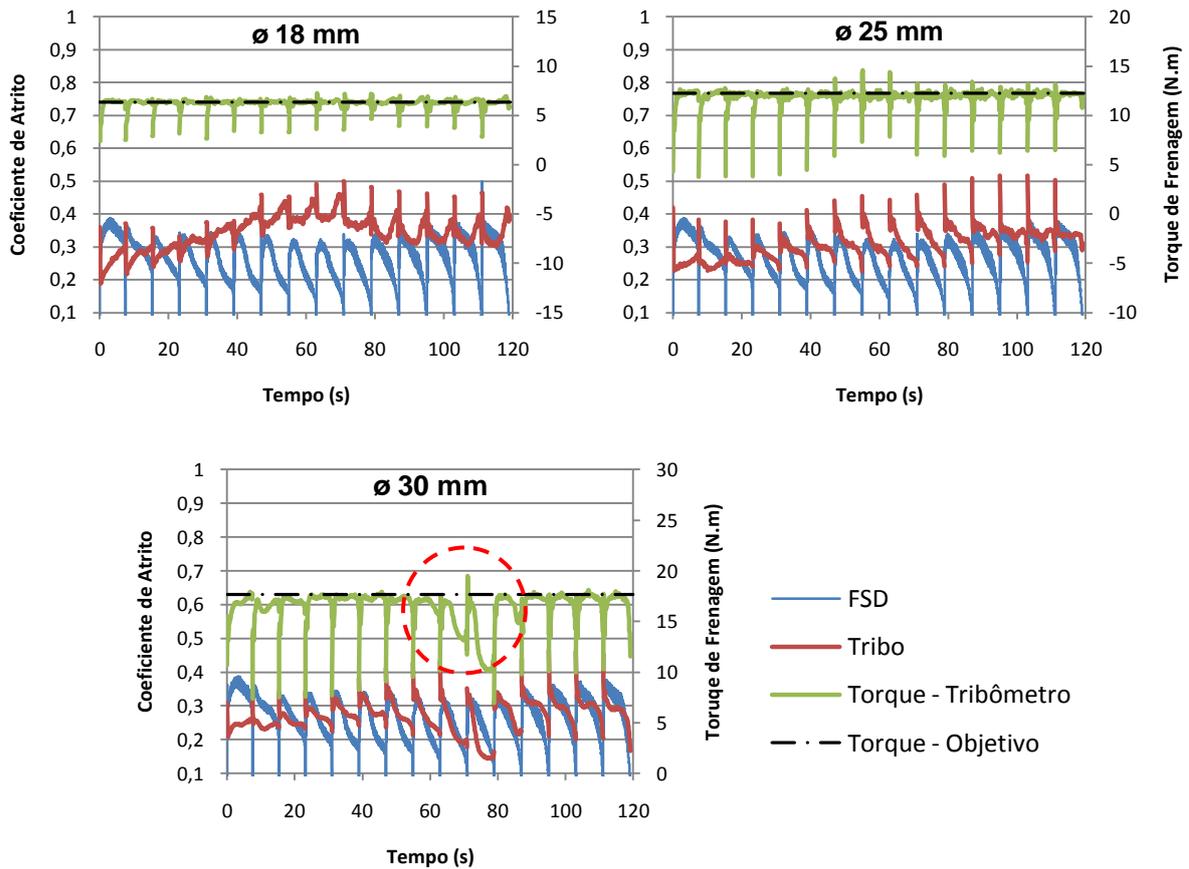


Figura 5.6 – Atrito de torque para cada frenagem na etapa de Fade.

Como a temperatura afeta as propriedades tribológicas do material de fricção, é fundamental que se atinjam os mesmos ganhos de temperatura para ambos os equipamentos. Dessa forma, para poder correlacionar os resultados para o atrito é necessário que a variação da temperatura, durante cada frenagem, seja a mesma.

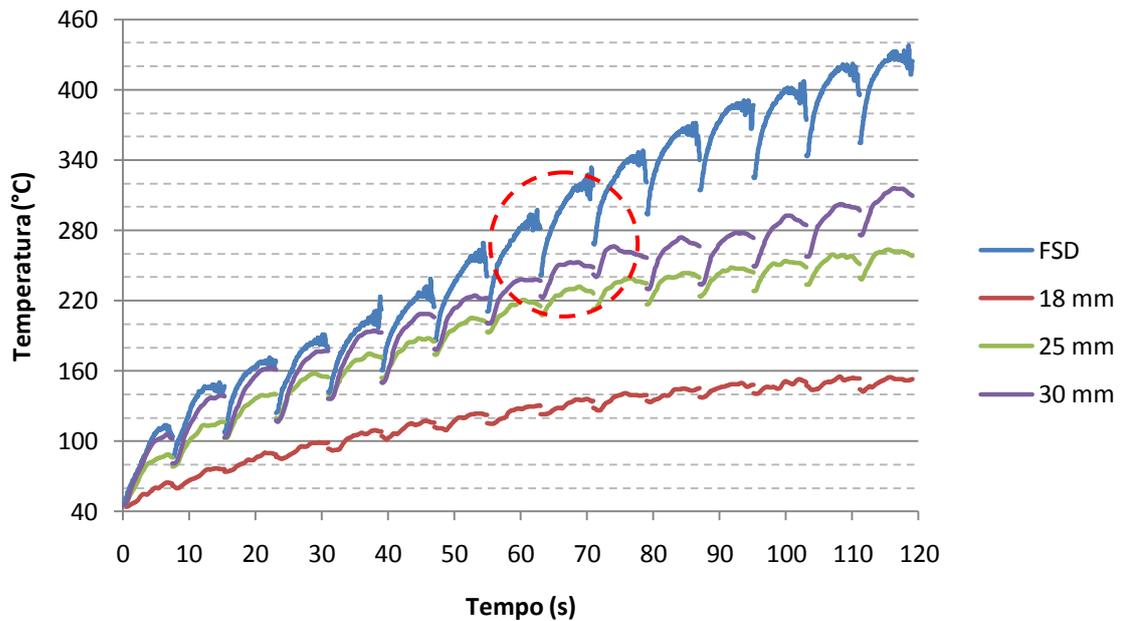


Figura 5.7 – Aumento da temperatura a cada frenagem.

Analisando a figura 5.7, que apresenta a evolução da temperatura durante cada frenagem realizada na etapa de Fade, é possível observar que para os três ensaios realizados no tribômetro a temperatura se manteve abaixo da temperatura obtida no FSD, a exceção das primeiras frenagens com o corpo de prova de 30 mm. No detalhe verifica-se a queda na temperatura durante a diminuição do torque, mencionado na figura 5.6.

O corpo de prova de 18 mm apresentou um aumento relativamente pequeno na temperatura durante todas as 15 frenagens e em nenhum momento atingiu as temperaturas de gatilho. Os corpos de prova de 25 mm e 30 mm, mesmo atingindo em parte as temperaturas de gatilho no início do teste, não conseguiram atingir a mesma variação de temperatura ocorrida durante cada frenagem conduzida no FSD. O gráfico da figura 5.7 mostra uma tendência ao aumento da variação de temperatura a cada frenagem bem como da temperatura final máxima com o aumento da área do corpo de prova. Isso se explica pelo fato de quanto maior a área de contato entre pastilha de disco, maior será a energia entregue para o sistema, considerando a densidade de energia constante.

A variação de temperatura, ou ganho, a cada frenagem do fade pode ser verificado na figura 5.8. Para o ensaio realizado no FSD, os valores oscilaram em torno dos 70°C. Para o corpo de prova de 18 mm o ganho de temperatura a cada frenagem mostrou-se abaixo dos demais. Já o corpo de prova de 25 mm teve um ganho intermediário enquanto o de 30 mm teve o maior ganho relativo. Nota-se uma queda brusca no ganho de temperatura do corpo de prova de 30 mm, entre as frenagens 7 e 11, que, como visto na figura 5.6, foi o ponto onde o torque da frenagem diminuiu devido a insuficiência da força.

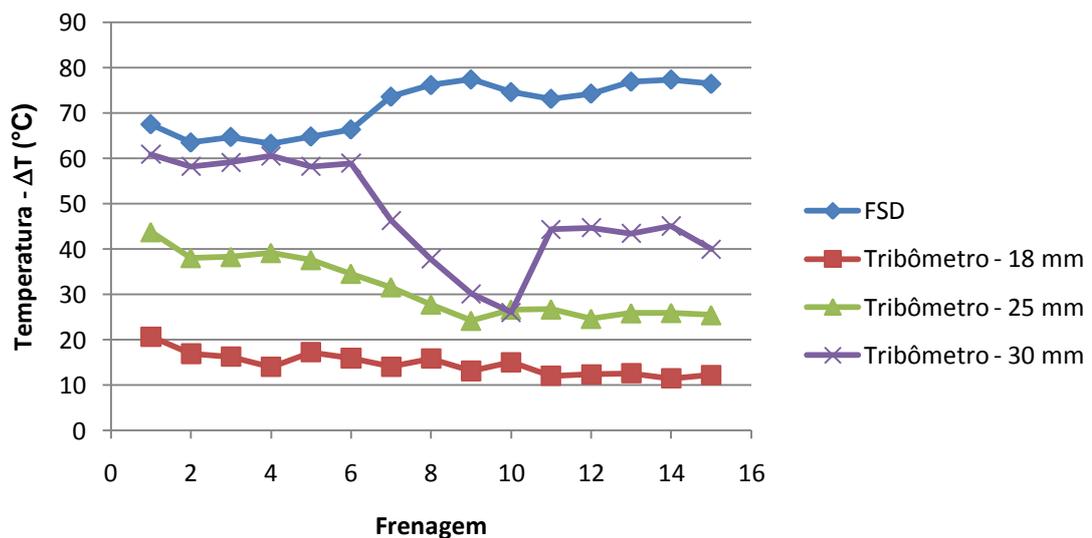


Figura 5.8 – Ganho de temperatura a cada frenagem do fade.

Conforme as curvas da figura 5.8, todos os corpos de prova apresentaram uma queda do ganho de temperatura na região intermediária, com posterior estabilização a partir da 11ª frenagem. Possivelmente isso se deve a maior perda de calor por convecção na parte posterior do disco no caso do tribômetro. Isso não acontece no FSD porque a frenagem ocorre com uma pastilha de cada lado do disco, o que diminui a dissipação térmica para o meio. Para minimizar esse efeito no tribômetro seria necessário isolar termicamente a parte posterior do disco de freio.

Apesar dos testes realizados com o corpo de prova de 30 mm terem atingido, durante as 6 primeiras frenagens, temperaturas muito próximas às dos testes no FSD, o atrito médio verificado nessas etapas foi relativamente diferente entre os equipamentos. Possivelmente essa diferença tenha ocorrido em função da etapa de assentamento não ter sido satisfatoriamente cumprida, já que no tribômetro o tempo de frenagem é o tempo médio entre as 30 frenagens do assentamento executadas no FSD, resultando em diferenças entre as curvas de temperatura registradas em cada máquina durante os ensaios de assentamento.

Além disso, conforme visto anteriormente, durante o fade também não se atingiram as temperaturas registradas pelos ensaios de referência do FSD. Assim, o comportamento do atrito para os corpos de prova ensaiados no tribômetro apresentaram resultados diferentes dos do dinamômetro. A figura 5.9 apresenta o resultado para os três corpos de provas, comparados com o ensaio do FSD. Para os corpos de prova de 18 e 25 mm, o comportamento do coeficiente de atrito foi significativamente diferente da referência. O corpo de prova de 30 mm apresentou certa tendência à correlação com os resultados do dinamômetro. As maiores diferenças ocorreram por conta da diferença entre o histórico térmico existente entre o assentamento executado no FSD e no tribômetro, da insuficiência de força do sistema atuador do tribômetro (círculo vermelho no detalhe da figura 5.9) e da maior dissipação térmica do disco do tribômetro.

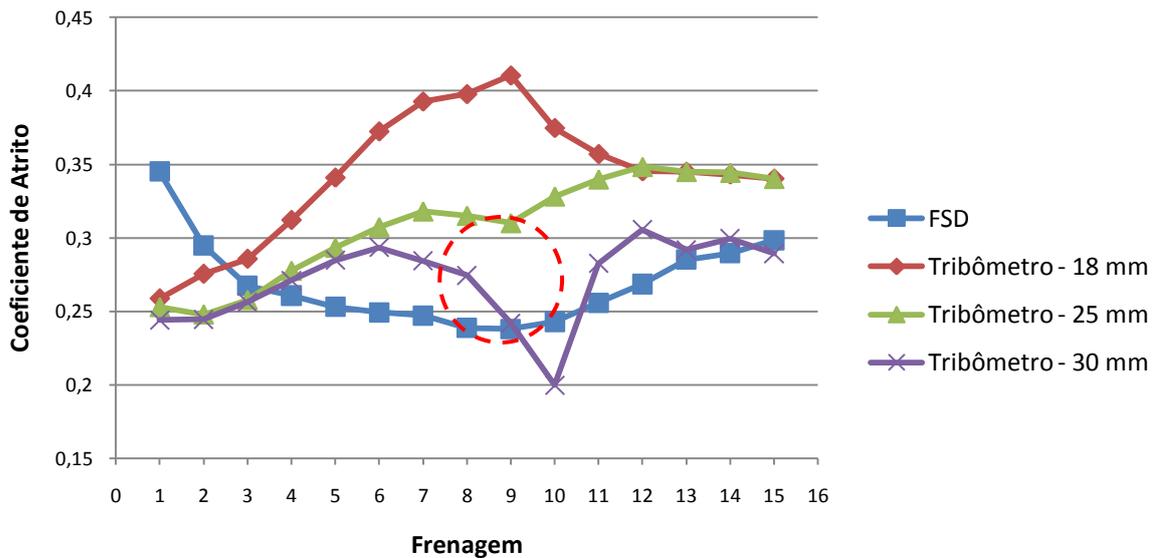


Figura 5.9 – Atrito médio para cada frenagem da etapa de Fade.

5.5 Estimativa para o tamanho do corpo de prova

Considerando apenas as seis primeiras frenagens, onde o efeito dissipativo do calor no disco do tribômetro não foi tão significativo e nem ocorreu o problema de insuficiência da força citado anteriormente, estimou-se qual é a área adequada para o corpo de prova a fim de obter um ganho de temperatura similar ao do FSD. A figura 5.10 mostra o ganho de temperatura médio nas seis primeiras frenagens para os corpos de prova ensaiados no tribômetro.

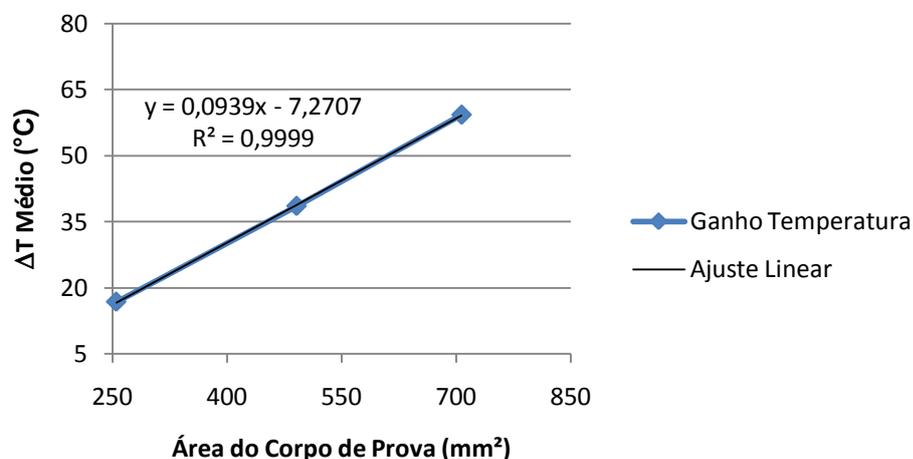


Figura 5.10 – Estimativa da área do corpo de prova a ser ensaiado no tribômetro.

. Foi feito também a média para as seis primeiras frenagens para o ensaio do FSD, cujo valor é 65°C. Seguindo a tendência da curva do gráfico da figura 5.9, a área do corpo de prova necessária para atingir o ganho de 65°C é de 770 mm², o que corresponde a um diâmetro de 31,5 mm.

6 CONCLUSÕES

Do trabalho realizado pode-se concluir que:

- O tribômetro se mostrou capaz de reproduzir os parâmetros necessários a realização do ensaio de fade, como a desaceleração constante e a manutenção do torque para corpos de prova de até 25 mm de diâmetro.
- Na atual configuração o tribômetro não é capaz de atingir as temperaturas necessárias para uma adequada correlação com dinamômetros. Porém, com algumas modificações, como um atuador com capacidade mais elevada, que possibilitaria o uso de um corpo de prova maior, e o uso de um isolador térmico no disco de freio, possivelmente as temperaturas atingiriam os patamares verificados no FSD.
- A área do corpo de prova tem uma influência no ganho de temperatura do disco durante as frenagens, uma vez que quanto maior a área, mais energia está sendo fornecida para o sistema, já que a densidade de energia deve ser a mesma.
- À medida que as temperaturas durante as frenagens aumentam, mais próximo do dinamômetro ficam os resultados para o coeficiente de atrito, demonstrando que a temperatura tem influência significativa sobre essa propriedade do material de fricção.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Substituir o atuador atual por um de maior capacidade, de forma a permitir o uso de corpos de prova maiores.
- Realizar o isolamento térmico na parte posterior do disco de freio, permitindo que essa superfície seja considerada o mais adiabática possível.
- Adequar o sistema de controle de modo que seja possível simular a inércia do sistema, e com isso possibilitar a realização de ensaios onde haja variação do coeficiente de atrito e do torque.
- Após adequação da máquina, repetir os ensaios realizados nesse trabalho, com o corpo de prova estimado de 770 mm² de área, verificando se esse atinge as temperaturas verificadas no FSD, e a partir da obtenção dos mesmos valores, poder correlacionar os resultados do atrito entre os equipamentos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

“**AK-Master Standard**”, In Brake German Procedures, Alemanha, Ak-Master de dezembro de 1998.

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

Blau, P.J.; McLaughlin, J.C.; “**Effects of water films and sliding speed on the frictional behavior of truck disc brake materials**”, Tribology International 36, pg. 709-715, 2003.

Blau, P.J.; “**Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives**”, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, USA, 2001.

Cristol-Bulthé, A.L.; Desplanques, Y.; Degallaix, G.; Berhier, Y.; “**Mechanical and chemical investigation of the temperature influence on the tribological mechanisms occurring in OMC/cast iron friction contact**”, Wear 264, pg. 815-825, 2008.

Desplanques, Y.; Roussette, O.; Degallaix, G.; Cristol-Bulthé, A.L.; Sabatier, L.; “**A reduced-scale test for pad-disc contact tribological analysis in railway braking**”, Wear 262, 2006.

Eriksson, M.; Bergman, F.; Jacobson, S.; “**On the nature of tribological contact in automotive brakes**”, Wear 252, pg. 26-36, 2002.

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

Infantini, M.B.; “**Variáveis de Desempenho dos Sistemas de Freios**”, Dissertação de Mestrado, 96 folhas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 2008.

Kim, S.J.; Jang, H.; “**Friction and Wear of Friction Materials Countaining Two Different Phenolic Resins Reinforced with Aramid Pulp**”, Tribology International 33, pg. 477-484, 2000.

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

Morelli, A.; “**Progetto dell' Autoveicolo**”, Celid, Torino – Itália, 2002

Neis, P.D.; “**Projeto e Construção de um Tribometro para Estudos Relacionados a Materiais de Fricção Veiculares**”, Dissertação de Mestrado, 84 folhas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 2008.

Neuman, R.F.; Urban, J.A.; McNinch, J.H.; “**Performance Characterization of Dry Friction Materials**”. In: Braking of Road Vehicles. London: Mechanical Engineering Publications Ltd, pg. 233-238, 1983.

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

Ostermeyer, G.P.; “**On the dynamics of the friction coefficient**”, Wear 254, pg. 852-858, 2003.

Preston, J.D.; Forthofer, R.J.; “**Correlation of Vehicle, Dynamometer and Other Laboratory Tests for Brake Friction Materials**”. Society of Automotive Engineers, paper 710250, 1971.

Rhee, S.K.; Turak, J.L.; Spurgeon, W.M.; “**An Inertial Dynamometer Evaluation of Three Alloys for Automotive Brake Drums**”, Society of Automotive Engineers, paper 700138, 1970.

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

Silva, D. T.; “**Determinação do Fluxo de Calor entre Pastilha e Disco de Freio Durante um Intervalo de Frenagem**”, Monografia, Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil, 2007.

Stachowiak, G.W.; Batchelor, A.W.; “**Engineering Tribology**”, Elsevier, Third Edition, 2005.

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