

# DESGASTE DE FERROS FUNDIDOS USADOS EM DISCOS DE FREIO DE VEÍCULOS AUTOMOTORES

**Gustavo Cueva e André Paulo Tschiptschin**  
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais  
Escola Politécnica - Universidade de São Paulo

**Amilton Sinatora**  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Escola Politécnica - Universidade de São Paulo

**Wilson Luiz Guesser**  
Indústria de Fundição Tupy - UDESC.

## RESUMO

Foi estudada a resistência ao desgaste de um ferro fundido com grafita vermicular, visando sua utilização em discos de freio. Os ensaios de desgaste foram realizados numa máquina de ensaios tipo pino no disco, usando-se carregamentos cíclicos de 4 MPa a 500 rpm. O pino foi fabricado a partir de uma pastilha de freio comum, e os discos do ferro fundido vermicular. Os resultados obtidos foram comparados com outros adquiridos em ensaios semelhantes, realizados com três ferros fundidos cinzentos normalmente usados em disco de freio.

Os resultados mostraram que a melhor resistência ao desgaste, medida através da perda de massa, foi apresentada pelo ferro fundido cinzento com alto carbono, seguido do ferro fundido vermicular, de um ferro fundido cinzento conhecido como Fe250 e de um ferro fundido cinzento com titânio. Os maiores valores de força de atrito foram alcançados pelos materiais que mais se desgastaram, ou seja, nesta ordem: ferro fundido com titânio, ferro fundido Fe250, ferro fundido vermicular e ferro fundido de alto carbono. Finalmente, as maiores temperaturas de contacto foram atingidas pelo ferro fundido vermicular, seguido do ferro com Ti, o ferro Fe250 e do ferro de alto C.

## INTRODUÇÃO

Durante a interação das pastilhas com os discos há conversão de energia cinética em energia térmica ou calor. A quantidade de calor produzida depende do peso do veículo e da velocidade no momento em que os freios são aplicados. Um veículo pesando 1.500 kg, converterá aproximadamente 0,5 kW-h de energia cinética em calor se for freado de 145 km/h até a parada total. Essa grande quantidade de calor faz com que o disco possa atingir por curtos períodos, temperaturas de até 800 °C. Isso provoca um gradiente térmico entre a superfície do disco e seu núcleo, que às vezes excede 500 °C. [1]

A pressão hidráulica exercida em frenagens típicas é de 2 – 4 MPa dependendo da utilização. [2]

O material dos discos de freio deve ser capaz de resistir à fadiga térmica, [3] e a grande quantidade de calor gerado durante a frenagem deve ser absorvida e depois dissipada tão rápido quanto possível. O material deve ter também uma boa resistência mecânica, ser fácil de usar, leve, barato e fácil de fundir.

O desempenho dos sistemas de frenagem de veículos automotores, submetidos a solicitações mecânicas e térmicas, é função de uma combinação de propriedades que devem ser otimizadas. Em geral, o tipo de solicitação é complexo não sendo possível dimensionar o componente e selecionar o material, com base em apenas uma dessas propriedades. Sabe-se que ferros fundidos possuem boa resistência à variações térmicas e, freqüentemente, são utilizados em peças sujeitas a grandes mudanças de temperatura, tais como tambores e discos de freio.

A otimização de um material para discos de freio é conseguida quando se obtém uma boa relação entre condutividade térmica e resistência mecânica. Veículos com alta quantidade de movimento (velocidade x massa, tais como trens, caminhões de mineração e carros de corrida) requerem principalmente resistência mecânica enquanto que veículos leves (carros de passageiros) requerem, principalmente, condutividade térmica.

Um tipo de ferro fundido que vem encontrando utilização crescente em aplicações onde condições de resistência mecânica, fadiga térmica e altas temperaturas estão presentes é o ferro fundido com grafita vermicular.

Este material apresenta a grafita em forma de vermes, que confere propriedades mecânicas e térmicas intermediárias entre o ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular. O ferro fundido com grafita vermicular tem resistência à tração pelo menos 75% maior e tenacidade 35% mais elevada que a do ferro cinzento. O ferro fundido vermicular tem aproximadamente o dobro de resistência à

tração e tenacidade e mais de cinco vezes a resistência à fadiga térmica em temperaturas de operação semelhantes quando comparados com o Alumínio. Na tabela 1 são mostradas algumas propriedades dos ferros fundidos cinzentos, vermiculares e nodulares. [4, 5]

**Tabela 1.**  
**Propriedades Comparativas dos Ferros Fundidos [4]**

Material	Matriz	Resistência à Tração Mpa	Condutividade Térmica W/m-K
Cinzentos	Perlita	200-270	44-52
Vermicular	Ferrita Perlita	330-410 410-580	40-45 31-40
Nodular	Ferrita Perlita	400-600 600-700	32-28 25-32

Os ferros fundidos com grafita vermicular podem conter elementos de liga, sendo usual o uso de Mo e de altos teores de Si, objetivando melhorar as propriedades a quente, ou adições de Ti, para melhorar a resistência ao desgaste visando sua potencial de utilização em discos e tambores de freio. [6]

Apesar de conhecidas as boas propriedades mecânicas e térmicas dos ferros fundidos vermiculares, pouca informação é encontrada na literatura técnica com relação ao uso deste em aplicações onde resistência mecânica e condutividade térmica são necessárias, tais como em discos de freio de veículos.

Na literatura há evidências de que a resistência ao desgaste dos ferros fundidos com grafita vermicular quando comparados com a resistência ao desgaste de ferros fundidos cinzentos ou nodulares é superior, independentemente da pressão de contacto ou velocidade de deslizamento; isto se deve à excelente combinação de alta resistência mecânica e boa capacidade de transferência de calor que dá ao material uma boa resistência ao lascamento por fadiga térmica das superfícies. [7]

Neste trabalho foi estudada a resistência ao desgaste de ferros fundidos cinzentos normalmente utilizados nessas aplicações e de um ferro fundido vermicular utilizado na fabricação de blocos de motores, visando o uso deste material em discos de freio de veículos de grande porte.

## METODOLOGIA

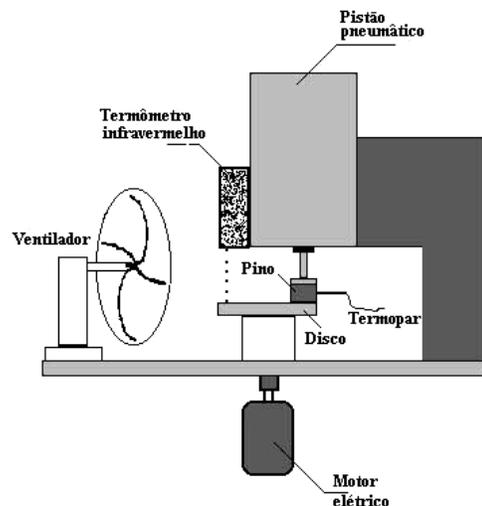
Foram estudados três ferros fundidos cinzentos: um denominado Fe250, um de alto teor carbono (FeAC) e outro ligado com Ti (FeTi) além de um ferro fundido com grafita vermicular (Vermic), cujas composições químicas e propriedades mecânicas básicas são mostradas na Tabela 2.

Os ensaios de desgaste foram feitos numa máquina de ensaios de desgaste tipo pino no disco, acoplado a um computador, Marca Plint, com sistema pneumático de aplicação de carga e capacidade máxima de 1000 N. Na figura 1 são mostrados esquematicamente a máquina e os acessórios utilizados. Os pinos foram fabricados a partir de material normalmente utilizado em pastilhas de freio de

automóveis, com base quadrada de 12 X 12 mm de lado (Área = 144 mm<sup>2</sup>) e acabamento superficial em lixa 400. Os discos foram usinados a partir dos ferros fundidos estudados, com 70 mm de diâmetro, 6 mm de espessura e acabamento superficial com abrasivo de 1 µm.

**Tabela 2**  
**Composição Química (% em peso) e Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**

	Fe250	FeAC	FeTi	Vermic
C	3.54	3.73	3.49	3.63
Si	2.15	2.07	2.27	2.6
Mn	0.51	0.78	0.53	0.51
P	0.054	0.058	0.052	
S	0.1	0.085	0.09	
Ti	0.012	0.014	0.028	< 0.1
Cr	0.034	0.27	0.06	
Cu	0.69	0.56	0.71	0.47
Sn	0.061	0.039	0.064	
C. E.	4.27	4.44	4.26	4.49
Dureza (HB)	190	180	190	230
Resistência (MPa)	255	240	255	460



**Figura 1.** Esquema da máquina de ensaios pino no disco.

O ensaio de desgaste foi realizado da seguinte maneira: enquanto o disco girava a 500 rpm foi submetido a uma pressão cíclica de frenagem de 4 MPa. O ciclo total de frenagem foi de 4 min sendo que durante 1 min foi aplicada a pressão de frenagem e nos 3 min restantes o disco girou descarregado. Durante os ciclos de frenagem o sistema pino – disco foi resfriado por convecção forçada através de um ventilador. O tempo total de ensaio foi de 34 horas, completando-se nesse intervalo 500 ciclos de frenagem (carregamento - descarregamento).

O ensaio foi interrompido depois de 7, 20 e 34 horas para serem realizadas medidas de perda de massa dos discos e dos pinos, usando-se uma balança Marca Scientech de 0,0001g de precisão. Durante os ciclos de frenagem foram determinadas, também, as temperaturas alcançadas pelos pinos e pelos discos através de termopares inseridos nos pinos e de um termômetro a laser colocado sobre o disco, diametralmente oposto ao pino. Foram registradas as forças normais e tangenciais e calculado o coeficiente de atrito no decorrer de cada ensaio.

O desgaste dos discos e dos pinos foi calculado através da perda de massa acumulada durante os ciclos de frenagem dividida pela área de contacto do pino. Pelo menos dois discos de cada material foram ensaiados para verificar a reprodutibilidade dos resultados.

Visando determinar a relação entre o desgaste medido (perda de massa) e a pressão de contacto, a dureza e a distância percorrida durante os ensaios, foram calculados a constante de desgaste  $k_a$  e o produto  $k_a * H$  ( $H$  = dureza). Em desgaste por deslizamento é conhecido que para um determinado valor de pressão  $P$ , os materiais com menores valores de  $k_a$  são os mais resistentes ao desgaste. Para uma relação de pressão  $P/P_{max}$  ( $P_{max}$ : capacidade da superfície de resistir à pressão estática), os materiais com menores valores de  $k_a * H$  são os melhores. Os valores  $k_a$  e  $k_a * H$  foram calculados da seguinte forma:

A taxa de desgaste é convencionalmente definida como:

$$W = \frac{\text{Volume de material removido}}{\text{Distância percorrida}} \quad (1)$$

Uma expressão mais usada para definir desgaste é a taxa específica de desgaste

$$\Omega = \frac{W}{A_n} \quad (2)$$

onde  $A_n$  é a área nominal de contacto.  $\Omega$  aumenta com a pressão de contacto  $P$  (onde  $P$  é a força normal  $F_n$  dividida para a área nominal  $A_n$ ), tal que a relação:

$$k_a = \frac{W}{F_n} = \frac{\Omega}{P} \quad (3)$$

é uma constante. O valor  $k_a$  é uma medida da propensão ao desgaste de um par deslizante: altos valores de  $k_a$  significam rápido desgaste para uma dada pressão e vice-versa. [8]

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os 4 ferros fundidos utilizados nesta pesquisa apresentaram microestruturas diferentes como mostrado na tabela 3. Esta tabela mostra que as microestruturas dos ferros fundidos cinzentos foram muito semelhantes entre si, consistindo basicamente de perlita e grafita lamelar e diferenciando-se umas das outras unicamente pela fração de

grafita presente. O ferro fundido vermicular apresentou uma matriz composta de perlita, ferrita e grafita. Esta grafita tinha morfologia predominantemente vermicular, contendo traços de grafita nodular.

**Tabela 3**  
**Características Microestruturais dos Ferros Fundidos**

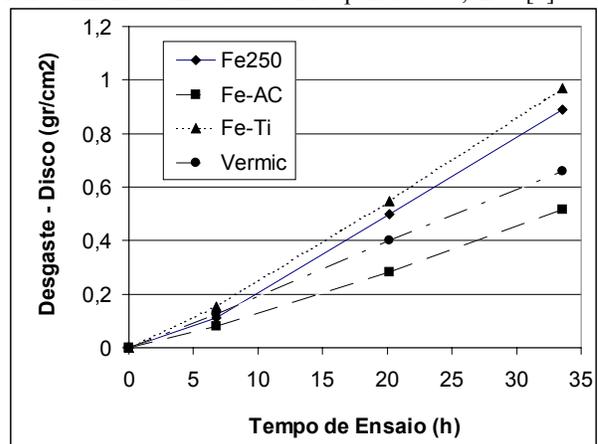
	Fe250	FeAC	FeTi	Vermic
% Grafita	10,5	13,5	12,5	7,0
Tipo de Grafita	IA3	IA3	IA3	90% IIIA5 10% VIA6
% Perlita	88	85	86	78
% Ferrita	< 1	< 1	< 1	14

As análises químicas realizadas nos pinos (pastilhas), revelaram a presença preponderante de ferro e pequenas proporções de alumínio, enxofre, silício, cálcio, magnésio e bário.

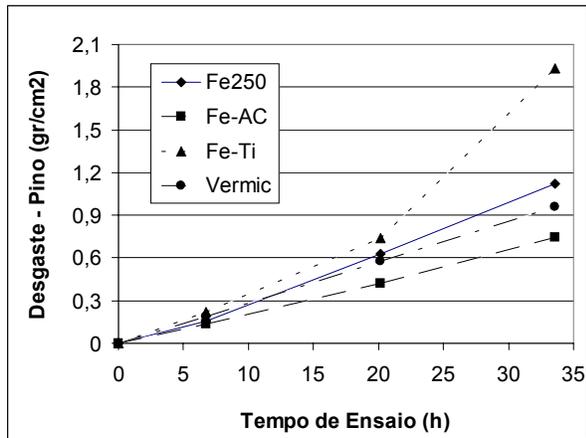
O desgaste acumulado dos discos no decorrer dos ensaios é mostrado na figura 2. Observa-se que para todos os materiais, o desgaste aumenta uniformemente com o aumento do tempo de ensaio e que a melhor resistência ao desgaste foi apresentada pelos discos de ferro fundido com alto teor de carbono (FeAC) seguido dos vermiculares, Fe250 e dos de ferro fundido com titânio (FeTi).

Na figura 3, é mostrado o desgaste acumulado dos pinos, verificando-se que há também nesse caso, aumento uniforme de desgaste com o aumento do tempo de ensaio. Observa-se, também, que as posições relativas das curvas de desgaste dos pinos coincidem com as posições relativas das curvas de desgaste dos discos, ou seja, os pinos que menos se desgastaram foram aqueles ensaiados com discos de FeAC, seguidos por aqueles ensaiados com vermiculares, Fe250 e FeTi.

Nota-se também, que os pinos ensaiados com discos de FeTi, sofreram desgaste mais severo que os outros. A razão para que isto aconteça pode estar relacionada à presença de carbonitreto de titânio na microestrutura dos discos de ferro cinzento com teores de Ti superiores a 0,02%. [9]



**Figura 2.** Desgaste medido nos discos de ferro fundido com relação ao tempo de ensaio.



**Figura 3.** Desgaste medido nos pinos dependendo do material do disco e do tempo de ensaio.

Os carbonitreto de Ti são partículas muito duras dispersas na matriz metálica (relativamente mole) e durante o processo de frenagem se desprendem, ficando algumas engastadas na superfície do pino (pastilha), e atuando como partículas abrasivas que aceleram o desgaste dos discos. Este fato foi verificado através de análises EDS de raios X, das superfícies desgastadas dos pinos, verificando-se a presença de traços de titânio nelas; a presença dos carbonitreto de titânio explicariam não só o maior desgaste apresentado pelos discos de FeTi, mas também, o maior desgaste dos pinos que atuaram sobre os mesmos. Além disso, o par pino - disco de FeTi apresentou, com relação aos outros pares, os maiores valores de força e de coeficiente de atrito como é mostrado na tabela 4. Este fato somado à influência dos carbonitreto explicaria o maior desgaste apresentado por estes discos.

**Tabela 4**  
**Valores de forças e coeficientes de atrito e desgaste medidos e calculados.**

Material	Força de Atrito(N)	Coefficiente de Atrito	$k_a$ ( $m^2/N$ )	$k_a * H$
Fe250	$307 \pm 15$	$0,51 \pm 0,03$	$6,0 \times 10^{-15}$	$1,1 \times 10^{-15}$
FeAC	$259 \pm 11$	$0,43 \pm 0,02$	$3,4 \times 10^{-15}$	$5,9 \times 10^{-15}$
FeTi	$309 \pm 22$	$0,52 \pm 0,04$	$6,5 \times 10^{-15}$	$1,2 \times 10^{-15}$
Vermic	$278 \pm 13$	$0,47 \pm 0,02$	$4,2 \times 10^{-15}$	$9,6 \times 10^{-15}$

Os valores de força de atrito da tabela 4 variam, nos materiais estudados, de maneira semelhante à variação de resistência ao desgaste. Verifica-se que quanto maiores são a força de atrito e o coeficiente atrito, maior é o desgaste medido; e vice-versa. Considerando que os discos de FeAC possuem menores propriedades mecânicas (Tabela 1), era de se esperar que desgastassem mais, porém, o oposto ocorreu. A menor taxa de desgaste observada é devida à presença de grafita que atua como lubrificante sólido,

diminuindo o atrito entre o disco e o pino [10] e facilitando também, a dissipação de calor.

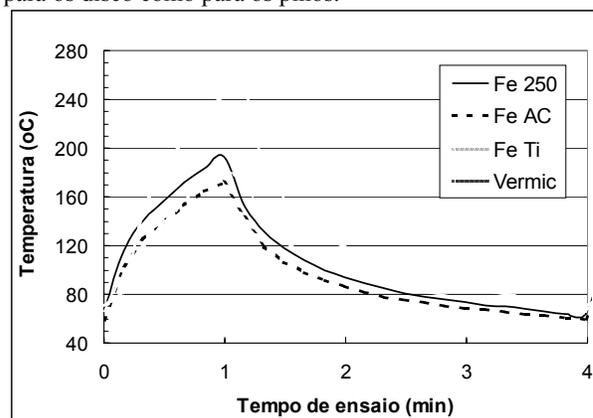
Ao contrário do que se esperava, o ferro fundido vermicular, de propriedades mecânicas mais elevadas, apresentou resistência ao desgaste mais baixa que o FeAC. Este fato se deve ao seu menor teor de grafita, o que faz com que as camadas de grafita lubrificantes sejam mais finas ou descontínuas, deixando a matriz mais exposta ao processo de desgaste e promovendo maiores perdas de massa. Além disso, a ferrita presente na microestrutura, que é uma fase muito mole, seria rapidamente arrancada da superfície dos discos, facilitada ainda pelas elevadas temperaturas e a lenta dissipação de calor.

Nos FeTi, as maiores forças de atrito encontradas também estão relacionadas à quebra da camada de grafita lubrificante devido à ação das partículas de carbonitreto de titânio, que removeriam essas camadas deixando a matriz metálica desprotegida e possível de ser atacada pelos abrasivos, fato que faria aumentar também a temperatura de contacto entre as superfícies.

Os valores de atrito e desgaste medidos nos discos de Fe250, mostram que este material é o que melhor combinação de propriedades de frenagem apresenta, pois mesmo sofrendo desgaste maior que o FeAC e o Vermicular, teve um comportamento muito uniforme durante todos os ciclos de frenagem, com alta força de atrito e baixas temperaturas de funcionamento.

Além disso, na tabela 4 são mostrados os valores de  $k_a$  e do produto  $k_a * H$ , comprovando-se também, através deste critério que para a pressão usada de 4 MPa, os materiais que menos se desgastaram foram justamente aqueles que apresentaram menores valores de  $k_a$  e menores valores de  $k_a * H$

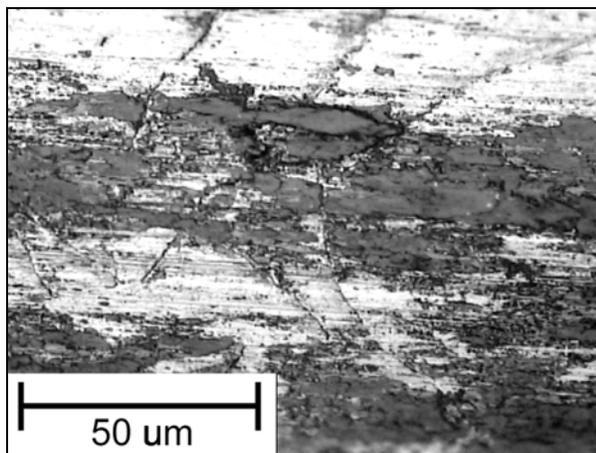
As temperaturas alcançadas pelos discos e os pinos durante um ciclo de frenagem são mostrados na figura 4. Praticamente não foi verificada diferença nenhuma entre as temperaturas medidas pelo termopar inserido nos pinos e as temperaturas das superfícies dos discos medidos através do termômetro infravermelho, e dessa forma, os valores de temperatura indicados podem ser considerados iguais tanto para os disco como para os pinos.



**Figura 4.** Temperatura de contacto pino – disco durante os ciclos de frenagem.

Nesta figura observa-se que os discos de ferro fundido vermicular são os que atingem as temperaturas mais altas (250 °C) seguidos pelos Fe250 (190 °C), FeTi (180 °C) e os FeAC (170 °C). Verifica-se também, que durante o ciclo de descarregamento e resfriamento, os discos apresentam pequenas variações no que se refere às temperaturas inferiores alcançadas, notando-se que os que mais se resfriam são os FeAC, seguidos dos Fe250, FeTi e dos vermiculares. Estes valores são coerentes com os esperados já que eles dependem principalmente do teor e tipo de grafita de cada material.

A observação das superfícies dos discos após os ensaios de desgaste, revelou a presença de escamas aderidas, formando camadas, como é mostrado na figura 5. Essas aderências foram analisadas quimicamente tendo sido identificadas como restos de pino (pastilhas de freio) que se desprenderam durante a frenagem. As escamas funcionam como uma camada isolante ou filme lubrificante, entre as duas superfícies de contacto, que as protege do desgaste [11] e que diminuiriam a força de atrito. Observou-se que a quantidade de aderências nas superfícies foi maior nos ferros fundidos vermiculares do que nos outros ferros analisados. No ferro vermicular, os detritos provocaram o aparecimento de ruídos durante a frenagem, coisa que não foi observada nos ferros fundidos cinzentos.

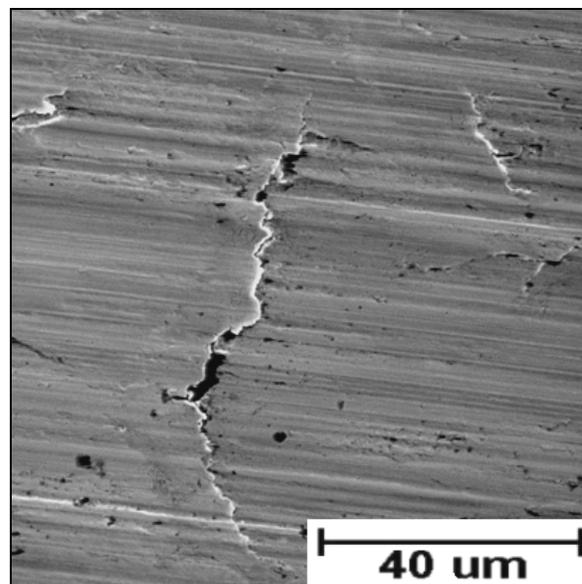


**Figura 5.** Micrografia da superfície desgastada de um FeAC, mostrando aderências na superfície.

Notou-se, também, que durante o processo de desgaste, houve arrancamento de grafita, e preenchimento dos vazios com aderências resultantes do desgaste na superfície dos discos.

Além disso, verificou-se que um grande número de lamelas de grafita foram parcial ou totalmente cobertas por camadas de matriz metálica que sofreram deformação plástica, como mostrado na figura 6. Durante a frenagem ocorrem grandes deformações plásticas, que nem sempre resultam em remoção de material, podendo haver recobrimento da grafita ou preenchimento dos vazios deixados por essa fase parcialmente arrancada. É possível observar, na mesma fotografia, que os extremos das lamelas

de grafita funcionam como concentradores de tensões que facilitam a nucleação e propagação de trincas.



**Figura 6.** Micrografia da superfície desgastada de um FeAC, mostrando evidências de deformação plástica e propagação de trincas.

## CONCLUSÕES

Os ensaios de desgaste de pino no disco realizados com 4 diferentes ferros fundidos e pressões de frenagem de 4MPa a 500 rpm permitiram concluir:

- A maior resistência ao desgaste foi apresentada pelo ferro fundido de alto carbono, seguido do ferro fundido vermicular, Fe 250 e Fe ligado com Ti.
- O desgaste dos pinos foi tanto menor quanto maior a resistência ao desgaste do material do disco ensaiado
- A força e o coeficiente de atrito também tiveram uma relação direta com o desgaste dos discos, sendo maiores as forças e coeficientes de atrito nos discos que mais se desgastaram.
- Os valores calculados da constante de desgaste  $k_a$  e do produto  $k_a \cdot H$ , seguiram a mesma ordem de resistência ao desgaste, observada através das medidas de perda de massa.
- A temperatura de contacto entre o pino e o disco foi muito maior no ferro fundido vermicular do que nos ferros fundidos cinzentos, sendo quase 100 °C maior que a do FeAC, material que menor temperatura apresentou.
- As superfícies dos discos de ferro fundido vermicular apresentaram maior quantidade de aderências provenientes dos pinos, nos discos.
- Os veios ou vermes de grafita são arrancados e tendem a ser recobertas por material dos pinos ou da matriz metálica deformada plasticamente. Em suas extremidades nucleiam e se propagam trincas que contribuem para o desgaste do material.

**Palavras Chave:** ferro fundido vermicular, ferro fundido cinzento, discos de freio, desgaste.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Indústria de Fundição Tupy Ltda. pela doação dos materiais utilizados no presente trabalho, à FAPESP, processo n° 99/ (projeto dos discos) e a CAPES pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS

1. MACNAUGHTA, M. Cast iron brake discs – a brief history of their development and metallurgy. Technical Report. **FOUNDRYMAN**. Out. 98, p. 321 – 324.
2. ESPOSITO, A & THROWER, J. **Machine Desing**. Delmar Publishers Inc. 1991
3. JIMBO, Y. et al. Development of high thermal conductivity cast iron for brake disk rotors. SAE Technical Paper Series. In: **International Congress and Exposition**. Detroit - Michigan. Feb 1990.
4. [www.sintercast.com](http://www.sintercast.com)
5. PYE, A. M. Technical Report. Applications of Some of the News Cast Irons. **Materials & Desing**. v.3. Ag 1992 p. 534 – 537.
6. GUESSER, W. L. & GUEDES L.C. Desenvolvimentos recentes em ferros fundidos aplicados à indústria automobilística. **IX Simpósio de Engenharia Automotiva, AEA**. São Paulo, Ag.1997.
7. ZHANG, Y., CHEN, Y. & SHEN, B. Investigation of tribological properties of brake shoe materials phosphorous cast iron with different graphite morphologies. **Wear**, v.166, 1983, pag. 179 - 186
8. ASHBY, M. F. **Materials Selection in Mechanical Design**. Butterworth-Heinemann, 2da. Edition, 1999, pag 59 - 61
9. CHAPMAN, B. J. & MANNION G. Titanium-bearing cast iron for automotive braking applications. **Foundry Trade Journal**, v.25, Feb.1982, pag. 232 - 246
10. SUGISHITA, J. & FUJIYOSHI, S. The efect of cast iron graphites on friction and wear performance. I: Graphite film formation on grey cast iron surfaces. **Wear**, v.66, 1981 p. 209 - 221
11. ANDERSON, A. friction and wear of automotive brakes. **Metals Hanbook**, Friction, lubrication and wear technology, V18, Oct. 1992, pag. 569 – 577.