

Discos de freio automotivos: aspectos históricos e tecnológicos

Omar Maluf

Doutor em Engenharia de Materiais - USP
e-mail: omarramo@sc.usp.br

Mauricio Angeloni

Doutorando em Engenharia de Materiais - USP
e-mail: mauricio_angeloni@yahoo.com.br

Alan Rodrigo Gualberto

Mestrando Engenharia de Materiais - USP
Professor do Centro Universitário Anhanguera - Unidade Pirassununga
e-mail: alan@cdcc.sc.usp.br

Dirceu Spinelli

Pós-Doutorado - University of Sheffield, SHEFFIELD, Inglaterra
Professor da Escola de Engenharia de São Carlos - USP
e-mail: dspinell@sc.usp.br

Waldek Wladimir Bose Filho

Pós-Doutorado - University Of Tennessee At Knoxville, U.T.K*, Estados Unidos
Professor da Escola de Engenharia de São Carlos - USP
e-mail: wladek@sc.usp.br

Resumo

No final do século XIX surgiu a necessidade da criação de sistemas de frenagem para os recém inventados veículos automotivos. A partir de então, e durante o século XX, deu-se o desenvolvimento destes aparatos que utilizam diversos componentes, dentre eles, o disco de freio. Foi após o início da segunda guerra mundial, em 1938, que o avanço tecnológico dos sistemas de freio, em termos de projetos e materiais, ganhou grande impulso devido à demanda da indústria aeronáutica. Historicamente, o primeiro material usado na fabricação dos discos de freio foi o ferro fundido cinzento que é um material adequado às características que se exige para o fim a que se destina, ou seja: boa condutividade térmica; boa resistência à corrosão; baixo ruído; baixo peso; longa durabilidade; atrito estável; baixa taxa de desgaste e boa relação custo/benefício. A partir daí e ao longo de mais de cem anos foram desenvolvidos um grande número de materiais para este fim, mas o que ainda continua sendo o mais usado é o ferro fundido cinzento que é barato e fácil de produzir. Atualmente muita ênfase tem sido dada ao estudo da resistência à fadiga das ligas de ferro fundido cinzento através de modelamentos, com o intuito aumentar a vida útil do componente. Embora este tipo de análise apresente resultados significativos, existe a necessidade de trabalhos experimentais que os validem, ou seja, há necessidade do componente ser estudado sob condições reais e não apenas virtuais.

Palavras-chave: Disco de freio; Ferro fundido cinzento; Fadiga; Veios de grafita.

Introdução

Foi no final do século XIX, com o desenvolvimento dos trens e início da fabricação dos automóveis, que surgiu a necessidade de se desenvolver um mecanismo para a frenagem dos mesmos. O propósito deste aparato (freio) é desacelerar um veículo transformando energia cinética em energia térmica pelo atrito e dissipando o calor para o ambiente.

Quando se fala na história do automóvel, esta teve início em 1700 quando Nicholas Cugnot convenceu o rei da França a financiar seu projeto de um veículo pesando quase 10 toneladas, para arrastar as peças da artilharia de então, conforme pode ser visto na Figura 1.

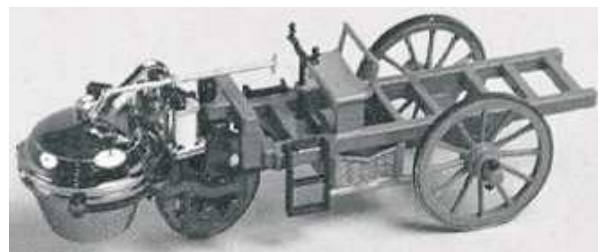


Figura 1 - Primeiro automóvel de que se têm notícias

O veículo, movido por uma caldeira a vapor, desenvolvia velocidade de 10 Km/h, mas o inventor, na sua viagem inaugural, descobriu que não pensara sobre como parar seu “monstrengo”. Assim ocorreu o primeiro acidente automobilístico que se tem notícia, dado que o

pesado carro derrubou um muro. Por esse motivo, foi afastado da corte e morreu na miséria, porém, o mérito de seu trabalho não pode ser desprezado. O veículo de Cugnot está preservado até hoje no Museu do Automóvel de Torino, Itália.

Por volta do ano de 1886, na Alemanha, Gottlieb Daimler e Carl Benz mudariam a história do mundo para sempre, pois desenvolveram, de maneira independente, os primeiros protótipos dos automóveis à combustão interna, que começaram a ser fabricados efetivamente por volta de 1896. Esta invenção desencadeou a reboque o desenvolvimento dos diversos componentes do automóvel, dentre eles o sistema de freio.

Nos Estados Unidos, em 1890, de acordo com Hugles (1971), o americano Elmer Ambrose Sperry (1860-1930) inventou um freio que se assemelhava com o atual disco eletromagnético [SPERRY, 1894; SPERRY, 1896]. O disco, conhecido como freio magnético era colocado em contato com um outro disco (disco de freio) para aplicar um torque de frenagem. O interessante é que Sperry notou que aquele torque de frenagem era parcialmente devido as correntes de Foucault e parcialmente ao atrito entre os discos.

Segundo Nicholson (1995), o inventor do primeiro material usado no revestimento dos freios foi Herbert Froad em 1897. O material era feito a base de algodão impregnado com uma solução de betume e foi usado tanto em rodas de vagão de trem como nos primeiros automóveis. Sua invenção conduziu a fundação da Ferodo Company, uma empresa que até hoje fabrica materiais para freio.

A história registra o uso de muitos tipos de materiais diferentes para freios (materiais de fricção). Por exemplo, usava-se madeira e couro nos freios dos vagões de trem. Ainda hoje, muitos materiais de freio contêm elementos de base orgânica, tais como polímeros e fibras vegetais.

Com o desenvolvimento do transporte ferroviário, a tecnologia dos materiais de freio para trabalhar com altas cargas e velocidades também se desenvolveu e começaram a ser realizadas as primeiras experiências de frenagem, como aquela com freios de ferro, por volta de 1900 (Figura 2).

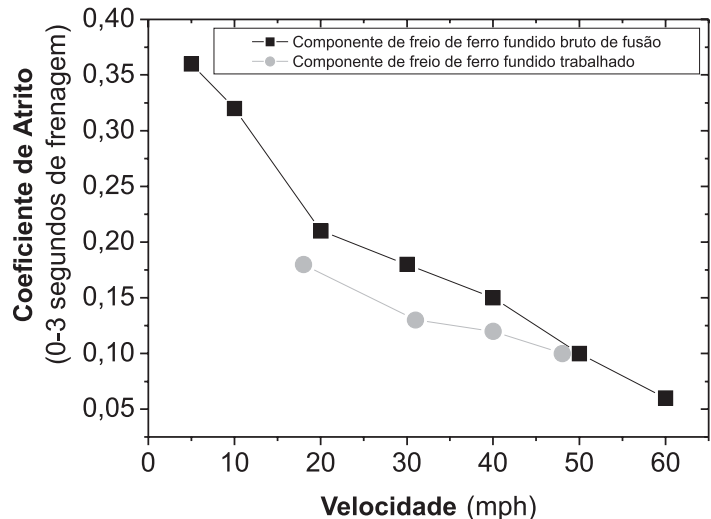


Figura 2 - Resultado do trabalho do capitão D. Galton (1878) usando um simulador de frenagem especial na roda de aço de um trem

Um dos primeiros aparatos para frenagem com discos de freio de que se têm notícias é creditado ao engenheiro inglês Frederick William Lanchester (1868-1946), que patenteou o produto (CLARK, 1995; HARPER, 1998). Em sua patente (1902) (LANCHESTER, 1902), descreve o disco de freio como sendo um disco de metal, em formato de folha, rigidamente conectado a cada uma das rodas traseiras do veículo. Para frear o mesmo tem sua borda pressionada por um par de garras.

Este período também evidenciou o desenvolvimento de novas tecnologias para frenagem. Por exemplo, de acordo com Newcomb e Spurr (1989), as empresas Mercedes e Renault introduziram, em 1903, variantes em seus protótipos do que viriam a ser os atuais freios a tambor.

Abaixo uma seqüência cronológica do aparecimento dos materiais mais comuns usados em freios, segundo Nicholson (1995):

- Ferro fundido sobre aço → usado em blocos e outros componentes do freio de vagões ferroviários → 1870;
- Algodão ou cabelo (correias) → roda de carroça e primeiros automóveis → 1897;
- Tecido de asbesto com bronze e outros fios para aumentar a resistência e desempenho → caminhões e automóveis → 1908;
- Partículas de bronze com carvão betuminoso de baixo teor de cinzas, produzidos com reforço interno de fibras curtas de crisolita, → caminhões e automóveis → 1926;
- Material moldado a partir de uma mistura seca de pós-metálicos para substituir o frágil bloco de freio de ferro fundido nos trens elétricos - metrô

de Londres → 1930;

- Resina flexível desenvolvida com elementos aglutinantes de formulação mais complexa → reforço de freios a tambor → 1930;
- Metal ligado com resina → aplicação na indústria de aeronaves → 1950;
- Fibras de vidro, de minerais, metálicas, de carbono e, também sintéticas para dar aos semi-metais desempenho melhor que o dos amiantos (início da discussão sobre a segurança do amianto) → automóveis e caminhões → 1960;
- Compostos sem amianto → freios a tambor e equipamentos para o carro → 1980;
- Sugestão do uso de fibra de carbono → freios automotivos → 1991.

É desnecessário dizer que os projetos dos primeiros freios de Lanchester e Sperry (1995) foram substancialmente modificados durante o século XX, em particular, quanto aos materiais usados e métodos de atuação que foram sendo melhorados. Até o início da segunda guerra mundial, em 1938, o desenvolvimento dos sistemas de frenagem ocorreu de maneira lenta e gradual. A partir de então, de acordo com Harper (1998) houve um rápido e consistente avanço motivado pela demanda da indústria da aviação. Para as aeronaves, foram desenvolvidos discos de freio do tipo-embreagem (clutch-type), onde o contato, das pastilhas com o disco, ocorria em uma região anular, que se estendia sobre a maior parte da região angular do disco e este contato é o que gerava o atrito. O conceito é diferente do usado, atualmente, nos discos de freio tipo-ponto (spot-type) de veículos de passeio onde a região de contato ocorre na região média superior do disco.

Idealmente, os materiais a serem utilizados em sistemas de frenagem devem atender as seguintes exigências: boa condutividade térmica; boa resistência à corrosão; baixo ruído; baixo peso; longa durabilidade; atrito estável; baixa taxa de desgaste e boa relação custo/benefício.

Para atender as propriedades requeridas, muitas vezes é necessário combinar muitos materiais com diversas formas e dimensões. Hoje em dia, existem mais de 2000 tipos de materiais diferentes que são usados em componentes de freio comerciais (WEINTRAUB, 1998).

A evolução dos discos de freio do tipo-ponto (spot-type) em automóveis pode ser traçada pelo desenvolvimento da Corporação Dunlop, Girdling, e Lockheed em 1950 (HARPER, 1998; NEWCOMB, 1969), cujos discos eram muito similares àqueles usados

nos automóveis hoje em dia.

A geometria, a dimensão e a composição química dos freios afetam o fluxo de calor, a durabilidade, as características de ruídos e a facilidade de manutenção afetam o desempenho dos dois tipos principais de sistemas de freios existentes, a tambor e a disco.

Comparados com os sistemas de freios a tambor, os sistemas de freio a disco tem resistência superior ao desgaste e são de manutenção mais fácil, principalmente em função de sua geometria (HALDERMAN, MITCHELL, 2000). Dentre os vários componentes dos sistemas de freio este estudo deverá ater-se somente ao disco e sua evolução nas últimas décadas. Para o leitor interessado em um conhecimento mais profundo dos sistemas de frenagem automotiva como um todo, recomenda-se o livro de Halderman and Mitchell (2000).

Discos de Freio

Composição Química

Como já visto, as duas principais funções de um disco de freio são a transmissão de uma considerável força mecânica e a dissipação do calor produzido na operação. Para carros de passeio a temperatura de trabalho, dependendo da severidade e do número de frenagens, pode estar situada entre a temperatura ambiente e, em alguns casos até 700° C. Esta grande faixa acaba por gerar altos gradientes de temperatura no disco, o que ocasiona problemas de fadiga térmica. No entanto, o componente também está sujeito à ação de uma carga mecânica cíclica aplicada pela pastilha durante a frenagem, contribuindo para o desgaste do mesmo. Portanto, em condições reais de trabalho o disco está sujeito a uma solicitação de fadiga termomecânica e não apenas térmica (MACKIN, 2002).

De um ponto de vista teórico, vários materiais seriam capazes de atender a solicitação. No entanto, por razões de melhor estabilidade de comportamento, custo da matéria prima e facilidade comparativa de produção, o ferro fundido é um material muito usado (BREMBO).

Usam-se outros tipos de materiais para frenagens a partir de altas solicitações em que o componente é submetido a altíssimas temperaturas. Por exemplo, materiais compósitos com matriz de carbono são empregados na produção de discos de freio para carros de competição e aeronaves. Apresentam excelentes desempenho a quente, mas o custo de fabricação e a forma de utilização os inviabiliza para uso em veículos automotivos comuns. Outro exemplo são os discos de

freio de ferro fundido com adição de titânio, elemento que aumenta a resistência do componente, mas diminui o valor do coeficiente de atrito, o que pode ser um grande problema quando se tem uma curta distância de frenagem. A Figura 3 ilustra a queda no coeficiente de atrito com o aumento na porcentagem de titânio no disco (BREMBO).

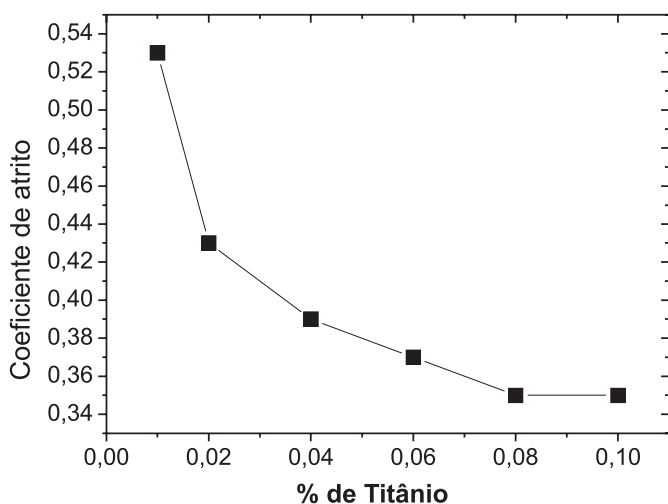


Figura 3 - Comportamento do coeficiente de atrito com a variação na porcentagem de Titânio [14]

Ligas de alumínio contendo carbeto de silício também podem ser usadas, pois possuem baixa densidade. No entanto, apesar do menor peso, estas ligas não dissipam tão bem o calor como, por exemplo, o ferro fundido cinzento. Para utilizá-las a saída seria aumentar a área superficial do componente o que, no mínimo, reduziria a vantagem de seu menor peso (MACKIN, 2002).

Portanto, comparativamente, os ferros fundidos são os materiais preferidos na confecção de componentes dos sistemas de frenagem e são classificados, geralmente, da seguinte maneira: cinzentos, nodulares, vermiculares, maleáveis e brancos.

As ligas de ferro fundido cinzento são aquelas que apresentam, atualmente, a melhor relação custo/benefício para uso em discos de freio automotivos principalmente naqueles utilizados nos veículos mais populares.

Para a produção dos diversos tipos de ferro fundido a carga metálica a ser fundida, normalmente, é composta de gusa (minério de ferro reduzido), sucatas ferrosas e elementos de liga, tais como ferro silício, ferro manganês, ferro cromo, ferro níquel dentre outros.

Todos os elementos de liga tendem a aumentar a resistência mecânica, sendo os mais eficientes, nesse sentido, o vanádio, o molibdênio e o cromo. Por exemplo, as ligas mais usadas para fabricação de discos de freio pela indústria General Motors do Brasil, são

ferros fundidos cinzentos, com ou sem adição de elementos químicos, conforme pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Composições químicas nominais em uso (% em peso)- GME-05002, Engineering Standards Europe, General Specification to Brake Disc., 1999, p.1-7.

Elementos	Ligas Metálicas			
	A	B	C	D
%C	3,20 3,60	3,20 3,60	3,60 3,80	3,70 3,90
%Si	1,90 2,40	1,90 2,40	1,80 2,20	1,75 1,95
%Mn	0,60 0,90	0,60 0,90	0,60 0,80	0,50 0,80
%P	Max 0,20	Max 0,10	Max 0,10	Max 0,10
%S	Max 0,12	Max 0,10	Max 0,12	Max 0,13
%Cr	-	0,25 0,40	0,10 0,25	Max 0,20
%Mo	-	0,40 0,50	0,30 0,60	Max 0,10
%Cu	-	-	0,30 0,45	Max 0,40

Como resultado, as ligas de ferro fundido cinzento, dependendo da composição química e velocidade de resfriamento, as mesmas apresentam microestruturas com o carbono na forma de veios de grafita sobre matrizes que podem ser ferríticas, ferríticas-perlíticas e perlíticas.

Propriedades Físicas e Mecânicas

Difusividade

Os ferros fundidos são materiais indicados para a produção de discos de freio porque, além do baixo custo de produção, possuem excelente condutividade térmica, o que facilita a dissipação do calor gerado pela fricção da pastilha de freio contra si durante a frenagem, e capacidade de amortecer vibrações, características primordiais para este tipo de componente.

Uma das maneiras de se melhorar a propriedade do material de transferir calor é aumentar sua difusividade térmica. Esta descreve a taxa de propagação do calor durante o processo transiente, e também é um parâmetro fundamental para o projeto de freios. A difusividade térmica pode ser usada para calcular a condutividade térmica que é uma medida intrínseca de quão bem o material transmite calor. Discos de freio com condutividade térmica melhorada apresentam aumento

na resistência a trincas térmicas (JIMBO ET AL., 1990), possibilitando aumento no seu tempo de vida útil, ou seja, se a característica do ferro fundido cinzento de transportar calor puder ser aumentada sem sacrificar outros critérios objetivos, o desempenho do disco pode ser melhorado. Os principais fatores que influenciam a transferência de calor nos ferros fundidos são a distribuição, o tamanho e a morfologia da fase grafita, pois os veios de grafita possuem condutividade térmica muito maior que as matrizes. A condutividade térmica do ferro fundido é tanto maior quanto maior for a razão entre a sua área superficial da grafita e seu respectivo volume. Portanto, ferros fundidos com a grafita na forma de nódulos são piores condutores do que aqueles com a grafita em forma de vermiculos, que por sua vez são piores que aqueles com a grafita na forma de veios. Nas Figuras de 4 a 6 pode-se ver a microestrutura dos três tipos de ferro fundido (MILAM ET AL., 2004).

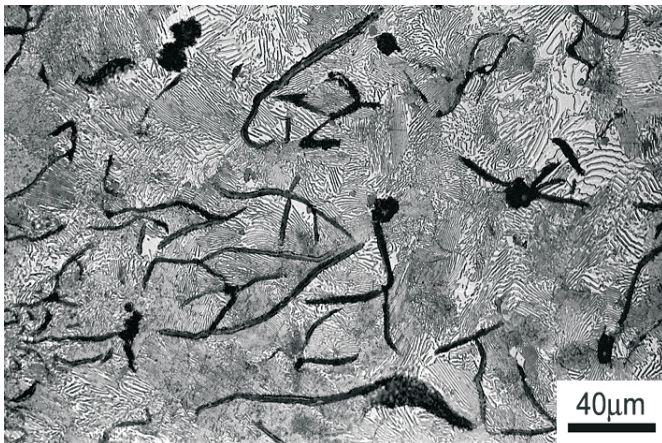


Figura 4 - Ferro fundido cinzento contendo veios de grafita em matriz perlítica. Ataque: Nital 2%.

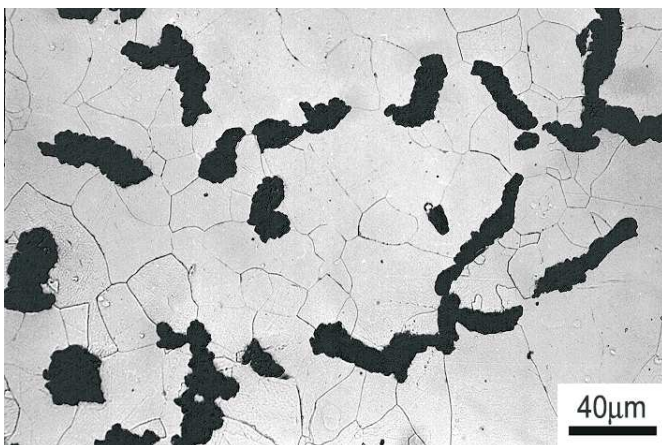


Figura 5 - Ferro fundido vermicular. Ataque: Nital 2%.

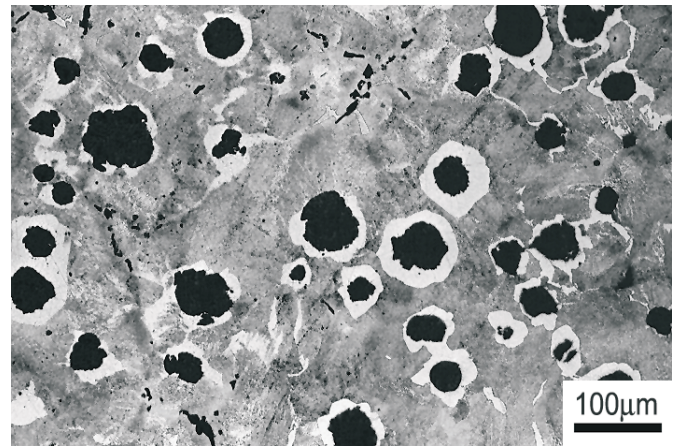


Figura 6 - Ferro fundido nodular em uma matriz perlítica mostrando a estrutura conhecida por “olho de boi”, que consiste em nódulos de grafita circundados por ferrita livre (branca). Ataque: Nital 2%.

O trabalho de Okamoto et al. (1983) relata que a condutividade térmica do ferro fundido é proporcional à forma dos veios de grafita (ou nódulos de grafita).

Hecht et al. (1999) observaram que a difusividade térmica do ferro fundido cinzento é influenciada por uma sutil mudança na composição química e apresentaram uma relação linear entre difusividade térmica e carbono equivalente (ou comprimento máximo dos veios de grafita), conforme pode ser visto na Figura 7. Notaram, também, que em ferros fundidos cinzentos a difusividade diminui com o aumento da temperatura até 500°C. Acima desta temperatura, diminui a diferença observada na difusividade das ligas que tem valores similares em 500°C. Estes dados sugerem que difusividades altas e benefícios térmicos podem ser alcançados através do controle do processo de fundição de discos de freio em ferro fundido cinzento, com veios de grafita mais longos.

A Figura 7 mostra que tanto para amostras tiradas do componente (disco) como para aquelas obtidas a partir dos blocos padrão fundidos existe um ponto positivo que é a dependência quase linear da difusividade térmica com o aumento do carbono equivalente (CE), onde $CE = \%C + 1/3(\%Si + \%P)$.

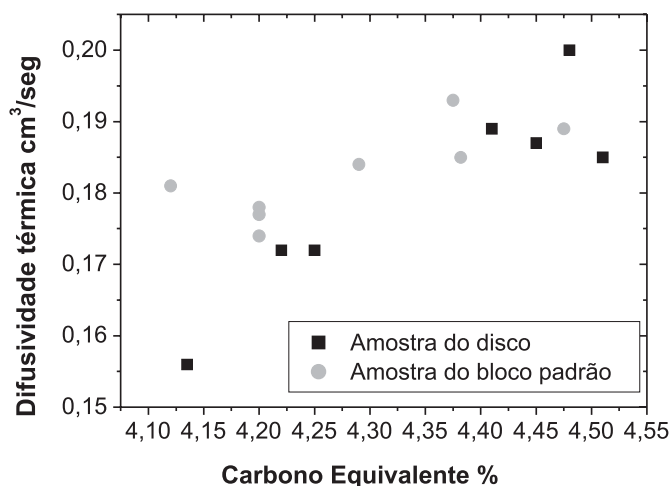


Figura 7 - Aumento da difusividade térmica à temperatura ambiente em função do carbono equivalente (CE) (Jimbo et al., 1996).

A dependência linear era esperada, pois aumentar o percentual de C ou CE é a maneira mais rápida de melhorar a grafitação no ferro fundido cinzento. Em amostras de disco de freio ocorreu um aumento de 25% na difusividade com um aumento de 0,40% no CE (JIMBO ET AL., 1990; JIMBO ET AL., 1996; YAMADA, KURIKUMA, 1998).

A taxa de solidificação influi na morfologia dos veios de grafita, portanto diferentes configurações nos moldes de fundição, tais como número de machos, tipo de areia de moldagem e processo ou novo projeto do componente pode resultar em modificação, ainda que pequena, na morfologia dos veios de grafita.

Sabendo como a morfologia da grafita influi na transferência de calor, pode-se avaliar como uma variação de processo durante a fundição dos discos pode alterar seus desempenhos, pois como já foi visto uma propriedade tridimensional importante para a transferência de calor é a relação área superficial da grafita/volume. Hoje em dia existem programas de computador, que através da análise de imagens bidimensionais são capazes de medir os parâmetros morfológicos dos veios de grafita, dividindo o perímetro (P) pela área (A) por ele encerrada, como pode ser visto na Figura 8. Sabe-se, também, que quanto maior o comprimento dos veios, maior a difusividade e a condutividade. (JIMBO ET AL., 1996; PALMER, BCIRA, 1960).

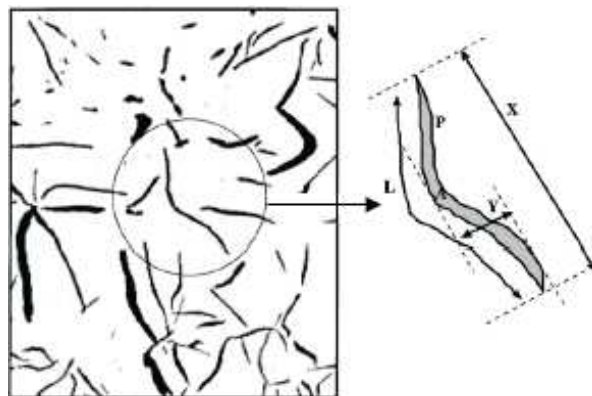


Figura 8 - Apresentação esquemática da caracterização da morfologia através de programas computacionais, onde P é o perímetro, X o eixo maior, Y o eixo menor, L o comprimento real e A a área.

Resistência à Abrasão

O valor da difusividade da fase ferrita é maior que o da microestrutura perlítica. Desta maneira, com o que já foi visto, se poderia concluir que a melhor liga de ferro fundido para a produção de discos de freio seria uma de cinzento que apresentasse veios de grafita mais longos sobre uma matriz ferrítica. Isto não é verdade, pois além do tipo da matriz influenciar pouco o processo de difusividade (FITZGEORGE, POPE, 1959; OMEROD, 1978), o disco tem que apresentar uma boa resistência mecânica, principalmente à abrasão. Por esse motivo a maioria dos discos de freio usados nos chamados carros de passeio é produzida com ferros fundidos cuja microestrutura apresenta veios de grafita sobre matriz perlítica. A perlita por ser composta de lamelas da fase ferrita intercaladas com lamelas da fase cementita (Fe₃C), muito dura, é um microconstituente que confere à matriz maior dureza e ao componente, por consequência, maior resistência mecânica (FITZGEORGE, POPE, 1959; OMEROD, 1978).

Para evitar que componentes produzidos a partir de ligas de ferro fundido cinzento, com composições químicas idênticas, apresentem propriedades mecânicas diferentes é necessário que a taxa de solidificação seja a mesma, de forma que não se altere a microestrutura. Para tanto os parâmetros de moldagem, fusão e vazamento devem ser rigorosamente controlados a cada nova produção.

Caso as composições químicas venham a ser alteradas, através da adição de elementos de liga, alterar-se-ão as propriedades mecânicas. Resumindo, para se alterar as propriedades mecânicas dois fatores são de vital importância: velocidade de resfriamento e composição química.

Apesar de ser possível produzir ferros fundidos

de boa qualidade, sem adição de elementos de liga, apenas controlando com rigor o carbono, livre e combinado; os teores de silício e manganês e a técnica de fabricação são usuais a adição de elementos de liga para a obtenção não só de maiores resistências com o carbono equivalente mais elevado, como também porque as microestruturas resultantes são menos susceptíveis à variação da espessura das peças. Praticamente todos os elementos de liga tendem a aumentar a resistência à tração e a dureza, sendo os mais eficientes, nesse sentido, para o ferro fundido cinzento, o manganês, o vanádio, o molibdênio, o cromo e o cobre. O Mn promove a formação de microestrutura perlítica, aumentando a resistência mecânica e a dureza; o V é forte formador de perlita e refinador de grafita; o Mo aumenta a resistência mecânica a quente, à fluência e à corrosão; o Cr aumenta a resistência à abrasão e à corrosão e o Cu é um forte estabilizador da perlita.

O efeito de endurecimento provocado por elementos de liga em solução sólida na ferrita pode ser visto na Tabela 2. (MILAM ET AL., 2004).

Observa-se que apesar de todos os elementos aumentarem a dureza da liga, aqueles que formam soluções sólidas intersticiais, têm este efeito mais pronunciado que os substitucionais.

Tabela 2 - Efeito endurecedor dos elementos de liga em solução sólida na ferrita

Elemento	Efeito endurecedor
C, N	↑
P	
Si	
Ti	
Al	
Cu	
Mn	
Mo	
V	
Ni	
Cr	

Além da forma direta, através de formação de solução sólida e de precipitados de segunda fase, os elementos de liga podem atuar indiretamente no aumento da resistência através do refino de grão, dessulfurando ou globulizando sulfetos, estabilizando carbonetos, desgaseificando e, ainda, aumentando a temperabilidade do material.

Rhee et al. (1972) mostraram que a mudança na composição química do disco afetou fortemente as propriedades mecânicas e a taxa de desgaste do

revestimento e do disco, sugerindo que o disco foi quimicamente ativado com o revestimento durante a frenagem.

Libsch e Rhee (1979) relataram os efeitos da variação na composição química sobre o desgaste do disco. Mostraram que pequenas mudanças no nível dos elementos de liga mudaram o nível de desgaste do revestimento e do disco.

Anderson (1992) relatou que veios de grafita finos reduzem o desgaste do disco e do revestimento.

Zhang et al. (1993) estudaram as propriedades tribológicas do ferro fundido em termos da concentração de fósforo e morfologia da grafita e observaram que um ferro fundido contendo fósforo e com morfologia da grafita compacta (vermicular), apresentou alto coeficiente de atrito e baixa perda de massa por desgaste.

Cho et al. (2003) investigaram as características do ferro fundido cinzento em relação às quantidades de fase, grafita e ferrita, e do micro-constituente perlita, controlando a microestrutura, pela variação na quantidade de carbono (carbono equivalente) e velocidade de resfriamento. Eles notaram que a quantidade de ferrita livre e de perlita no disco de ferro cinzento não afeta o coeficiente de atrito. E mais, observaram um aumento do coeficiente de atrito com o aumento percentual da área de grafita.

Fadiga

É conhecido que a forma e as propriedades físicas do disco de freio podem afetar a frenagem e causar problemas tais como: vibração; perda de material durante a frenagem; e ruído (METZLER, 1990; RHEE, THESIER, 1972). Isto acontece porque as propriedades físicas do ferro fundido cinzento tais como a condutividade térmica, o amortecimento de vibrações, o coeficiente de expansão térmica e o calor específico, mudam de acordo com as fases presentes no ferro fundido cinzento (OKAMOTO ET AL. 1983; CHAPMAN, MANNION, 1982).

Durante as últimas décadas uma grande atenção tem sido dada no sentido de melhorar o desempenho dos discos de freio no que diz respeito ao seu comportamento quando do atrito com as pastilhas de freio. Este grande esforço levou ao desenvolvimento de materiais tais como: ligas não ferrosas de cobre, compósitos de matriz alumínio e, atualmente, os compósitos de carbono (RHEE, 1970; WYCLIFFE, 1993).

No entanto, o ferro fundido cinzento continua sendo muito usado em discos de freio automotivos, pois

conforme já visto, além de apresentar boas propriedades físicas e mecânicas, é de fácil fabricação e baixo custo. Faz-se necessário, no entanto, uma caracterização mais minuciosa destas ligas, principalmente quanto a resistência à fadiga para determinar qual delas é mais adequada para a operação de frenagem, pois com a melhoria no desempenho dos caminhões e veículos de passeio, há um crescente aumento na demanda por melhoria tecnológica nos discos de freio.

Como, talvez, parte mais importante do sistema de freio a disco, o disco de freio, dentre outros esforços, é submetido a três tipos de fadiga: térmica, onde o componente é submetido apenas a variações bruscas de temperatura sem nenhum carregamento; isotérmica, onde a temperatura é constante e o carregamento variável; e termomecânica (em fase ou fora de fase), onde as temperaturas e o carregamento são variáveis. A mais importante por melhor representar a realidade das solicitações a que o disco é submetido durante o processo de frenagem é a fadiga termomecânica fora de fase, ou seja, onde o máximo carregamento é aplicado quando a temperatura é a menor possível e vice-versa.

Os discos sujeitos às elevadas tensões térmicas, como nos caminhões, requerem materiais que ofereçam maiores resistências à fadiga térmica. Nestes casos, ferros fundidos cinzentos contendo níquel, cromo e molibdênio têm sido usados (YAMABE, 2002), como por exemplo, os utilizados pela Mitsubishi Motors que tem 12% de níquel, mais cromo e molibdênio (SAKAMOTO ET AL., 1993). Todavia a desvantagem do uso destas ligas é, sem dúvida, o alto custo.

Yamabe et al. (2002), estudaram a possibilidade de produzir discos de caminhões com uma liga de ferro fundido de menor custo e alta resistência à fadiga térmica. Utilizaram protótipos de diferentes ligas com quantidades variáveis de elementos e em algumas foi inoculado cério. Verificaram a relação entre a resistência à fadiga térmica do material, suas propriedades físicas e mecânicas e a correspondente microestrutura. Notaram que a razão de propagação da trinca é menor quanto maior for a quantidade de grafita distribuída em uma matriz com grãos refinados e que o número de veios de grafita na microestrutura aumenta com a adição de níquel e alguma inoculação de cério. Observaram também que o limite de fadiga térmica de um disco de freio não é muito afetado pelo número de ciclos antes da iniciação da trinca, mas sim depois do seu início. A partir deste estudo foi desenvolvida uma liga para disco de freio de baixo custo (B) equivalente a liga atualmente usada (A).

Nas Tabelas e Figuras abaixo, encontram-se os resultados obtidos por Yamabe et al. (2002). Nota-se

que na Tabela 3, na liga proposta, o teor de níquel é menos da metade daquele encontrado na liga usual, o que faz com que a liga desenvolvida tenha um custo mais baixo em função do altíssimo preço deste elemento.

Tabela 3 - Composição química (% peso).

	C	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	S	Ce
A	3,35	2,16	1,25	0,32	0,30	0,32	0,023	-
B	3,36	1,92	0,58	0,50	0,37	0,50	0,050	0,023

O efeito do Cério pode ser observado na Tabela 4, onde o valor da resistência à tração da liga desenvolvida é quase 52% maior do que a liga usual, sem prejuízo para os valores de condutividade e expansão térmica.

Tabela 4 - Propriedades físicas e mecânicas.

		A	B
Resistência a tração (Mpa)	Amb.	290	440
	500°C	205	320
Condutividade térmica (W/m.°C)	Amb.	45,8	43,8
	500°C	37,2	37,2
Coef. Expansão térmica (10 ⁻⁵ /°C)	100 ~	1,32	1,33
	500°C		

Na Tabela 5, observa-se que o único valor cuja diferença é significativa é o de dureza da matriz, em que o da liga B é bem maior do que o da A, confirmando inclusive a tendência apresentada na resistência à tração.

Tabela 5 - Parâmetros microestruturais

	A	B
Dureza da Matriz (Hv)	301	394
Número de células Eutéticas/cm ²	318	288
Comprimento médio da trinca (µm)	53	57
% de área de grafita	21,6	19,9
Número de veios de grafita/mm ²	200	153

Abaixo, na Figura 9, é possível observar que quanto maior o número de veios de grafita menor é taxa de propagação da trinca e que quanto maior a adição de níquel maior o número de veios de grafita tanto para a liga sem inoculação de cério como para aquela inoculada.

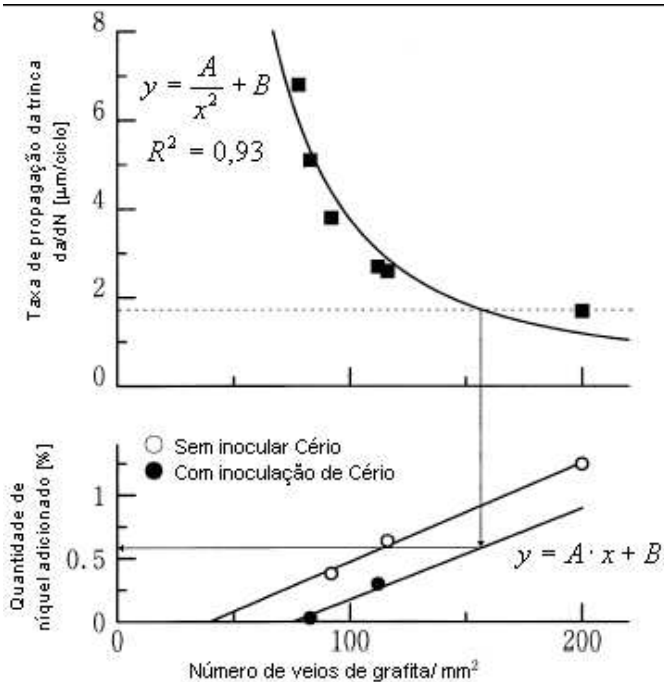


Figura 9 - Relação entre o número de veios de grafita, razão de propagação da trinca e quantidade adicionada de níquel.

A taxa de propagação da trinca no material desenvolvido, para um determinado número de ciclos, é praticamente a mesma que para o material usual, como pode ser observado nas Figuras 10 e 11.

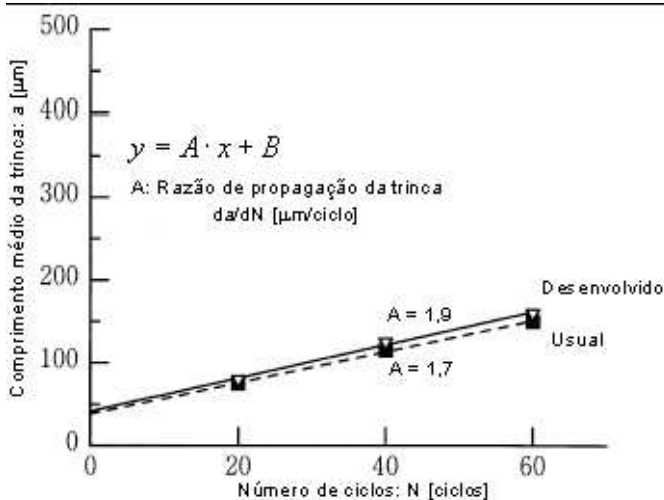


Figura 10 - Relação entre o comprimento médio da trinca e o número de ciclos no teste simulado.

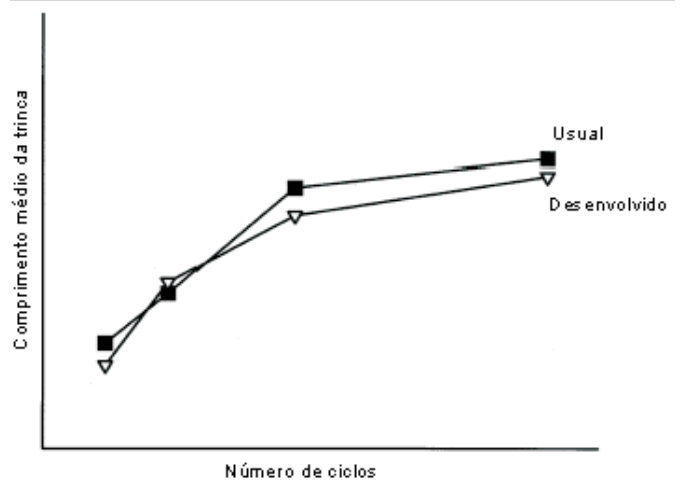


Figura 11 - Relação entre o comprimento médio da trinca e o número de ciclos em teste de frenagem de alta velocidade no componente.

Com estes resultados torna-se evidente que quanto maior a quantidade de carbono equivalente distribuído em grãos refinados, menor é a razão de propagação da trinca. Mostra também que a razão de propagação da trinca foi praticamente a idêntica para os dois materiais, o que viabiliza o material de mais baixo custo.

Conclusão

Historicamente observa-se que apesar de toda evolução ocorrida durante o século XX os discos de freio de veículos automotivos continuam sendo produzidos, com o centenário e muito barato, ferro fundido cinzento, que mesmo tendo recebido a adição de elementos de liga continua oferecendo a melhor relação custo benefício.

Do ponto de vista tecnológico, foram realizados ao longo do tempo, uma quantidade grande de experimentos principalmente a partir de 1938 com o início da IIª Guerra Mundial. Acontece que, como projetos experimentais, do tipo dos citados acima, têm alto custo e execução demorada, atualmente o avanço no desenvolvimento dos materiais e projetos para discos de freio tem se baseado, quase que exclusivamente, em métodos de modelamento em função do baixo custo e rapidez. No modelamento, através de elementos finitos, procura-se, simulando diversos parâmetros, prever o comportamento (vida) do componente sob fadiga térmica, isotérmica e, principalmente, termomecânica, que é a que melhor representa a situação real de frenagem. Embora este tipo de análise apresente resultados significativos, existe a necessidade de trabalhos experimentais que os validem, ou seja, há necessidade do componente ser estudado sob condições reais e não apenas virtuais.

Há pouca literatura sobre fadiga térmica e

isotérmica que não seja de modelamento, e menos ainda sobre fadiga termomecânica. Isto é preocupante, pois apenas ensaios experimentais de fadiga podem validar de maneira definitiva os resultados obtidos através de modelamento e esclarecer os mecanismos atuantes no componente.

No sentido de cooperar para o esclarecimento da questão, está sendo desenvolvido no Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da Universidade de São Paulo – USP, um projeto tecno-científico, de caráter experimental, em parceria com a empresa General Motors do Brasil (GMB), no qual se busca determinar as propriedades de fadiga isotérmica, térmica e termomecânica, em várias temperaturas, principalmente através de ensaios de fadiga de baixo ciclo em sete diferentes ligas de ferro fundido cinzento utilizadas na fabricação de discos de freio. Além disto, ensaios tradicionais de tração, impacto, dureza e difusividade servirão para melhor caracterizá-las. A partir daí, procurar-se-á estabelecer modelos de previsão de vida para os discos de freio, tentando reduzir o número de ligas possíveis e gerando um banco de dados relativo às ligas mais empregadas na fabricação do componente. A maior gama de conhecimentos permitirá o desenvolvimento mais rápido de produtos com maior confiabilidade que trarão benefícios comerciais importantes pelo ganho na economia de escala e diminuição da variedade de itens em estoque.

Referências Bibliográficas

ANDERSON, A.E. *Friction and wear of automotive brakes*. Materials Park, OH: ASM Handbook, vol. 18. 1992.

BREMBO. *Il Manual del Disco Freno*, capítulo 2.

CHAPMAN, B.J., MANNION, G. Titanium-bearing cast irons for automotive braking applications. *Foundry Trade Journal*, 1982; 23:2–246.

CHO, M.H., KIM, S.J., BASCH, R.H., FASH, J.W., JANG, H. *Tribological study of gray cast iron with automotive brake linings: The effect of rotor microstructure*. *Tribology International*. 36 (2003) 537–545.

CLARK, C.S. *The Lanchester Legacy, a Trilogy of Lanchester Works*. Vol. 1, Butler & Tanner, Frome and London, England, 1995, pp. 1895–1931.

FITZGEORGE, D. & POPE, J.A. *Transactions of the North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders* 75 (1959) 284.

HALDERMAN, J.D., MITCHELL Jr., C.D. *Automotive Brake Systems*, 2nd Edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2000.

HARPER, G.A. *Brakes and Friction Materials: The*

History and Development of the Technologies. Mechanical Engineering Publications Limited, London, England, 1998.

HUGHES, T.P. *Elmer Sperry: Inventor and Engineer*. John Hopkins Press, Baltimore, MD, 1971.

JIMBO, R.L., DINWIDDIE, R.B., PORTER, W. & WANG, H. *SAE Technical Paper*. Series 962126, 1996.

JIMBO, Y., MIBE, T., AKIYAMA, K., MATSUI, H., YOSHIDA, M. & OZAWA, A. *SAE International*. SAE 900002, 1990, 22.

LANCHESTER, F.W. *Improvements in the brake mechanism of power-propelled road vehicles*, G.B. Patent No. 26407, 1902.

LIBSCH, T.A., RHEE, S.K. *The effects of compositional variations in heavy truck rotors upon rotor and pad wear*. *Wear of Materials*, 1979;34:3–350.

MACKIN, T.J. Thermal cracking in disc brakes. *Engineering Failure Analysis*, February 2002, vol 9, no. 1, pp. 63–76(14).

METZLER, H. *The brake rotor-friction partner of brake linings*. SAE Technical Papers 1990; 900847.

MILAM, M., MALUF, O., SPINELLI, D., BOSE FILHO, W.W. *Metais - Uma visão objetiva*. São Carlos, Brasil, 2004.

NEWCOMB, T.P., SPURR, R.T. *A Technical History of the Motor Car*, Adam Hilger, New York, 1989.

NEWCOMB, T.P., SPURR, R.T. *Automobile Brakes and Braking Systems*. R. Bentley Inc., Cambridge, MA, 1969.

NICHOLSON, G. *Facts About Friction*. P&W Price Enterprises, Inc., Croydon, PA, 1995.

OKAMOTO, T., KAGAWA, A., KAMEI, K., MATSUMOTO, H. Effects of graphite shape on thermal conductivity, electrical resistivity, damping capacity and Young's Modulus of cast iron below 500 deg. C. *Journal of the Japanese Foundrymen's Society*, 1983;55:32–6.

OMEROD, J., TAYLOR, R.E. & EDWARDS, R.J. *Met. Tech.* Abril (1978) 109.

PALMER, K.B, BCIRA, J. 8 (540) (1960) 266.

RHEE, K., TURAK, J.L., SPURGEON, W.M. *An inertial dynamometer evaluation of three alloys for automotive brake drums*. SAE Technical Papers 1970; 700138.

RHEE, S.K., DUCHARME, R.T., SPURGEON, W.M. *Characterization of cast iron friction surfaces*. SAE Technical Papers 1972;720056.

RHEE, S.K., THESIER, P.A. *Effects of surface roughness of brake drum on coefficient of friction and lining wear*. SAE Technical Papers 1972;720449.

SAKAMOTO, H, et al. Heavy-duty brake disk for high speed trains(in Japanese with English summary). *Technical Report of Sumitomo Metal Industries, Ltd.*, Vol. 45, No. 6, pp. 11–29, 1993.

SPERRY, E.A. *Electric brake*. US Patent No. 565937, 1896.

SPERRY, E.A. *Electric brake*. US Patent Nos. 534974, 534977, 1895.

SPERRY, E.A. *The electric brake in practice*, Transactions AIEE 11, 1894, 682–728.

WEINTRAUB, M. *Brake additives consultant*. Private communication, 1998.

WYCLIFFE, P. *Friction and wear of Duralcan reinforced aluminum composites in automotive braking systems*. SAE Technical Papers 1993; 930187.

YAMABE, J., TAKAGI, M., MATSUI, T., KIMURA, T., SASAKI, M. Development for disc brake rotors for trucks with high thermal fatigue strength. *JSAE Review* 23, 2002, 105-11.

YAMADA, S. & KURIKUMA, T. Paper F98T683. *Proceedings form 1998 FISITA World Automotive Congress*, Paris, September-October 1998.

ZHANG, Y., CHEN, Y., HE, R., SHEN, B. *Investigation of tribological properties of brake shoe materials-phosphorous cast irons with different graphite morphologies*. *Wear* 1993; 166:179–86.

Recebido em 01 de outubro de 2007 e aprovado em 24 de outubro de 2007.