

# UM ESTUDO DOS MECANISMOS DE DESGASTE EM DISCO DE FREIO AUTOMOTIVO<sup>(1)</sup>

Edison Marcelo Serbino<sup>(2)</sup>  
Marco Antonio Colosio<sup>(3)</sup>

## Resumo

O objetivo deste é abordar os principais mecanismos de desgaste ocorridos em um disco de freio ventilado, quando submetido a um teste de frenagem em um simulador dinamométrico inercial. Esta peça foi manufaturada em ferro fundido cinzento com grafita lamelar. Os ensaios foram realizados sob condições fixas dos parâmetros de frenagem, que são: velocidade inicial do veículo de 100 km/h, momento de inércia com 45 kg.m<sup>2</sup>, temperatura da superfície próxima à temperatura ambiente, porém variando a pressão no cáliber de 2 a 10 MPa, resultando em força normal aplicada nas pastilhas de 650 a 3 300 N. Os mecanismos de desgaste foram determinados através de medidas da taxa de desgaste da perda de massa dos pares de frenagem (discos de freio e pastilhas), medidas da topografia da superfície através das grandezas  $Rpk$  e  $Rvk$ , tribografias e análise microestrutural. O sistema tribológico formou severas condições de carregamento térmico e deformação plástica, que influenciaram a atuação dos mecanismos de desgaste verificados nas superfícies dos discos, que foram principalmente abrasivos, oxidativos e de fadiga. Esta plastificação resultou em encobrimento da grafita e tensões residuais compressivas nas camadas subsuperficiais. Verificou-se que, a resistência ao desgaste do disco de freio pode ser inversamente proporcional à força normal aplicada, porém os mecanismos atuantes apresentam transições de regime.

**Palavras-chave:** Disco de freio; Tribologia; Frenagem automotiva; Ferro fundido cinzento.

---

(1) *Contribuição Técnica ao 60º Congresso Anual da ABM – São Paulo, SP, 2005.*

(2) *Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, M.Sc.; Centro Tecnológico de Materiais; Volkswagen do Brasil; SBC, SP*

(3) *Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, Dr.; Departamento Engenharia de Materiais; USP- São Carlos*

## 1 INTRODUÇÃO

Os discos de freio são importantes componentes de um veículo, sendo considerado item de segurança e por este motivo, pesquisas abordando as mais avançadas técnicas experimentais ainda não se esgotaram ou melhor, muitas delas ainda estão em caráter embrionário, havendo campo para muito estudos e conseqüentemente aumentar o entendimento do complexo comportamento de um sistema de freio em um veículo, seja ele a frio ou a quente, Maluf *et al* (2005).

O importância pelo qual este trabalho está sendo realizado é tecno-econômico-científico, pois o estudo dos mecanismos de desgaste nos pares de frenagem auxilia seu desenvolvimento tecnológico, gerando maior eficiência em trabalho, tornando veículos mais seguros e eventualmente com custo de fabricação reduzido, pois com o histórico aumento gradativo da velocidade média dos carros de passeio, a frenagem se torna proporcionalmente mais crítica. O desenvolvimento científico também pode ser beneficiado com o maior grau de entendimento no campo tribológico, os quais atualmente acreditam que ainda esteja em fase de estruturação fundamental.

Quando é abordado a questão da eficiência do sistema de freios, alguns conceitos técnicos necessitam ser abordados, sendo cada um deles, individualmente ou agindo em sinergia múltipla, tem uma grande importância na aplicação dos freios, são eles: desgaste, contato, atrito, adesão, deformação plástica e por fim, a frenagem automotiva.

O termo desgaste normalmente é utilizado como dano ao material (superfície sólida), geralmente envolvendo perda de material, devido ao movimento relativo entre a superfície e as substâncias em contato. Embora, pareça ser simples esta questão, o fato é que os estudos realizados neste campo estão ainda em fase inicial, ou seja, atualmente a mecânica deste fenômeno se encontra em nível de estruturação em sua compreensão básica, onde possivelmente o grande desafio para resolver este tipo de problema seja antecipar o tipo de desgaste a que o componente será submetido.

Quando duas superfícies estão em contato, o contato real deve ser relacionado ao contato microscópico, pois por melhor que seja o acabamento, dificilmente a superfície será perfeitamente lisa, assim, é de se esperar, que a área real de contato seja muito menor que a área nominal, aumentando proporcionalmente com a aplicação de uma força externa no sentido normal à superfície, devido à deformação dos picos das heterogeneidades superficiais ou asperezas.

No final do século XIX, Hertz desenvolveu as primeiras análises, consideradas satisfatórias sobre a teoria de contato entre dois sólidos, realizando o modelamento matemático das tensões de contato, atualmente referenciado como contato de Hertz, que ocorre quando dois corpos sólidos, sob acoplamento geométrico não conforme, são submetidos a um estado de tensão compressiva, gerando comportamento elástico em uma pequena área de contato. A teoria foi baseada na hipótese de que cada uma das superfícies em contato poder ser descrita por dois raios de curvatura, porém devido à elevada quantidade de simplificações definidas durante a elaboração do modelo, os resultados aplicados em casos práticos são limitados.

Assim, a força  $F$  aplicada entre dois corpos sólidos, gera uma pressão  $p$  em uma área de contato, infinitamente pequena e estática,  $dx.dy$ , onde considerando a ausência do atrito, a pressão  $p$  assume a forma de um potencial de campo elástico, em que as tensões compressivas associam-se as deformações elásticas na região de contato, sendo zero tais deformações na zona de contato, conforme equação 1.

$$F = \iint p \cdot dx \cdot dy \quad (1)$$

As deduções e conclusões de Hertz, ainda fundamentam as teorias da mecânica do contato, no regime elástico. São eventualmente extrapoladas ao regime plástico ou ao contato cíclico de rolamento e/ou deslizamento.

Do ponto de vista de energia, o atrito é um processo onde a energia cinética é convertida em outras formas de energia, como: térmica, acústica, ótica, elétrica e mecânica. O balanço desta energia dissipada dependerá da natureza dos corpos e do tribocontato.

O atrito é definido pela resistência que um corpo desenvolve quando sobre ele se move outro corpo, o qual pode ser entre sólidos (atrito sólido), gás e sólido (atrito aerodinâmico), líquido e sólido (atrito líquido) ou devido a um processo de dissipação de energia interna (atrito interno).

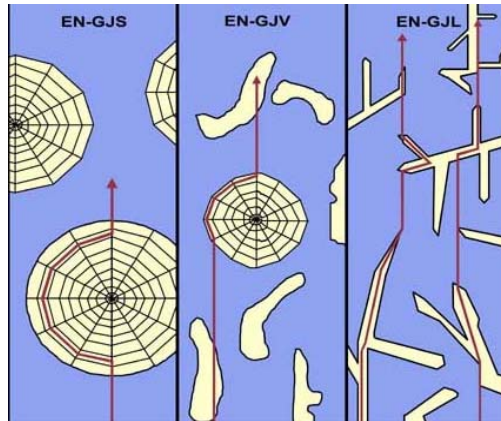
Os mecanismos básicos de atrito são **adesão** e **deformação plástica**, fenômenos que tem seus mecanismos aparentemente ainda são objetos de discussão. A energia de atrito, a princípio, é dissipada através de deformações nas camadas superficiais por mecanismos elásticos, plásticos, viscoelásticos e/ou através de microfaturas de partículas da superfície sob modo II (cisalhamento) ou uniões entre interfaces adesivas, e também sob ação de eventual terceiro corpo presente entre superfícies.

As teorias atuais sobre as explicações físicas para o atrito se dividem em duas linhas de pensamento, onde a escola francesa enfatiza a interação mecânica (elástica) da irregularidade ou asperezas da superfície, e a escola inglesa que enfatiza a coesão ou adesão entre os materiais.

Devido à influência direta na segurança veicular, o sistema de frenagem é item crítico no projeto de um automóvel. Os freios são, em essência, dispositivos de conversão de energia, transformando energia cinética do veículo em energia térmica, entre outras formas de energia, proporcionalmente a sua quantidade de movimento (massa e velocidade), sendo que a pressão hidráulica pode resultar em força acima de 400 kgf em cada um dos quatro conjuntos de freios.

Atualmente o ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar é o material mais tradicional, bem como o mais utilizado atualmente para fabricação de discos e tambores de freio para veículos. A principal vantagem deste material é a alta condutividade térmica, assegurada pela estrutura contínua da grafita, dissipando calor com eficiência, Hect *et al* (1996).

Esta eficiência em dissipar calor, diminui o gradiente térmico da peça melhorando o desempenho em âmbito de fadigas térmica e termomecânica, e é explicada pela morfologia da grafita lamelar, onde a condutividade térmica é maior do que a matriz ferrítica ou perlítica, e também maior do que a grafita nodular ou vemicular, pois a condutividade paralela ao seu plano basal é aproximadamente 4 vezes maior em relação ao seu plano prismático, conforme Figura 1, adaptada de Kempers (1966), além da conectividade do esqueleto da grafita, tipo lamelar.



**Figura 1.** Transporte de calor em ferro fundido contendo grafita nodular (GJS), vermicular (GJV) e lamelar (GJL). Adaptada de Kempers (1966).

O estudo presente tem como meta principal a determinação dos tipos de mecanismos de desgaste, atuantes em uma condição simulada de frenagem em laboratório, em disco de freio automotivo ventilado para carros e passeio.

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os discos de freio foram produzidos em condições normais de produção e são do tipo ventilados com aletas radiais angulares, o material utilizado foi o EN-GJ-L-250 (ferro fundido cinzento perlítico), conforme norma alemã DIN EN 1560:1997.

As pastilhas de freio também foram produzidas em condições normais de produção de modo compatível com a dimensão dos discos de freio e o cáliper de acoplamento, e apresentaram composição química normal de linha do fabricante, identificado conforme especificação com código Fras-le PD/954.

O material utilizado neste estudo foi avaliado através da realização de testes metalográficos, relevo de superfície, taxa de desgaste e tribografia, conforme são apresentados na Tabela 1.

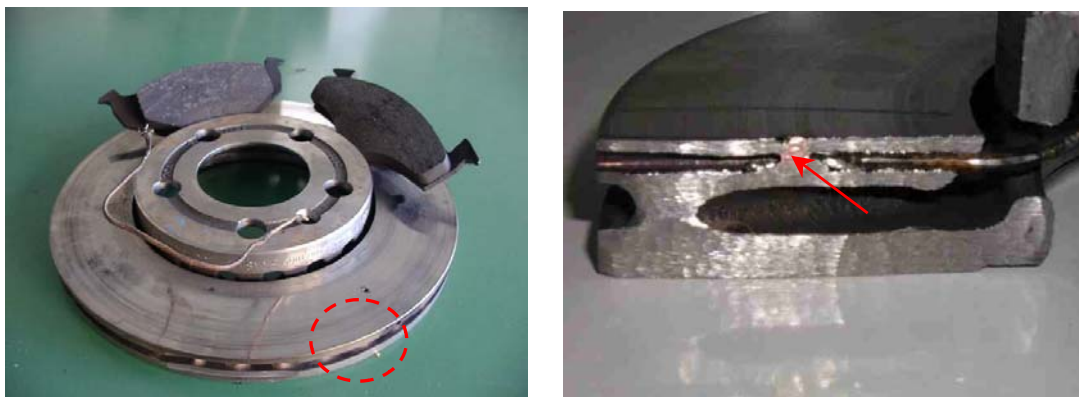
**Tabela 1.** Ensaios realizados no estudo experimental.

ENSAIO	MÉTODO
Análise Microestrutural	Análise metalográfica por microscopia ótica
Relevo da Superfície	EN ISO 13565-1:1998 e EN ISO 1365-2:1998
Taxa de desgaste	Massa e volume / distância percorrida sob contato
Tribografia	Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV)

O teste de bancada foi realizado é um simulador de frenagem automotiva, constituído de um dinamômetro de massas inerciais variáveis, que produz momentos de inércia entre 4,6 a 81 kg.m<sup>2</sup>, equivalendo à faixa da quantidade de movimento possível de ser gerado em todos os veículos de passeio nacionais com ou sem carga,

realizando frenagens bruscas ou gradativas em temperatura ambiente e condições climáticas secas, sob ar forçado com velocidade entre 12 a 14 m/s.

Com finalidade de uma boa aproximação do estudo experimental e a funcionalidade de um disco de freio, os corpos-de-prova são os próprios pares de atrito, isto é, os discos de freio e as pastilhas, e foram instrumentados através de um termo elemento inserido no núcleo da pista de rodagem do disco, conforme indicado na Figura 2.



**Figura 2.** Corpos-de-prova, instrumentado com termoelemento, após amaciamento inicial. À direita, seção transversal da amostra, a seta indica o ponto exato de leitura da temperatura.

O conjunto disco/pastilha foi submetido a um amaciamento ou *run-in*, simulando um veículo de passeio médio, em frenagem, para evitar problemas de acoplamento ou desalinhamento lateral, os quais poderiam mascarar os resultados, retirando marcas de usinagem dos discos e removendo a camada mais superficial e heterogênea do material de atrito das pastilhas.

O amaciamento é finalizado, quando os números de revoluções ficaram estáveis após cada ciclo de frenagem, onde a experiência prática mostra que isto ocorre após duas centenas de acionamentos, até que a área de atrito das pastilhas resulte em um contato aparente maior que 90% da área útil.

Os ensaios seguiram os seguintes parâmetros: momento de inércia de 45 kg.m<sup>2</sup>, velocidade inicial estimada do veículo de 100 km/h, para um raio dinâmico simulado de 281 mm e raio médio de atrito de 90 mm, sob pressão variando na faixa entre 1 à 10 MPa, aplicado no pistão do caliper numa área de 18,1 cm<sup>2</sup>, até a parada total. Este pico supera as pressões máximas geralmente atingidas em carros de passeio. O reacionamento ocorrerá quando esta temperatura nesta região abaixar para 50°C, sendo que a temperatura na superfície já estará próxima ao ambiente devido ao fluxo de ar forçado.

Ao término deste amaciamento, as massas “iniciais” dos discos e respectivas pastilhas foram medidas e o ensaio continuado até o ponto de 3 000 revoluções em atrito, sob a carga ou pressão constante aplicada. Como as frenagens com maior carga realizaram menor número de revoluções até a parada, foi necessária maior quantidade de acionamentos para atingir o mesmo número de revoluções em atrito.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

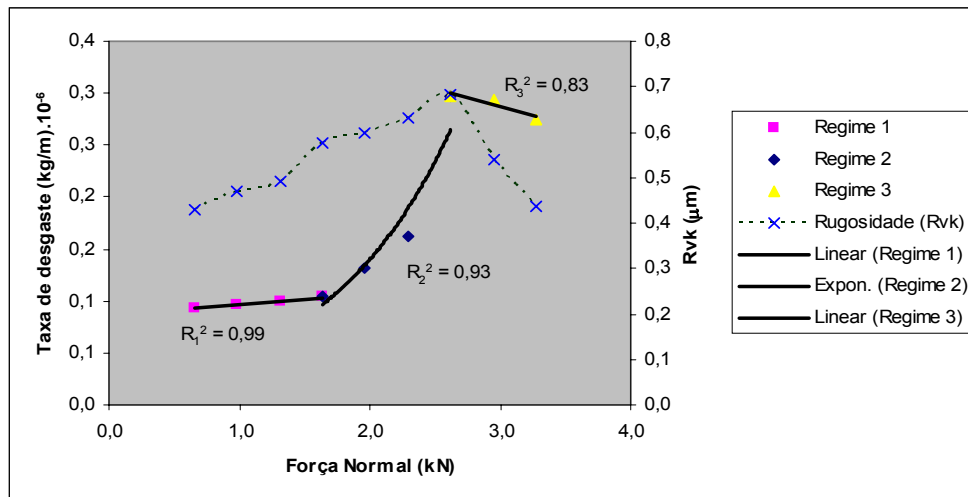
O gráfico da Figura 3 foi construído a partir da força normal em função da taxa de desgaste e rugosidade, e para torna-lo mais explicativo em relação ao comportamento da perda de massa, o mesmo foi dividido em três seguimentos distintos para obter o melhor enquadramento matemático possível através de tratamento estatístico ( $R^2$ ), apesar de pequena quantidade de eventos e também impresso sua rugosidade, interligado com linhas suavizadas.

Com o aumento da força normal aplicada, os materiais apresentaram maiores taxas de desgaste, porém com alterações de regime.

Com o incremento da força normal, a taxa de desgaste inicial apresenta comportamento linear levemente positivo (regime 1), formado pelo respectivo aumento da profundidade dos riscos, evoluindo para um comportamento exponencial (regime 2), possivelmente devido à diminuição da efetividade da camada de lubrificação, promovida pela camada de óxidos, agora gerando riscos maiores, possivelmente com predominância de menos riscamento com deslocamento de massa lateral, para mais formação de proa ou de micro corte, conforme exemplificado por Kato (1990).

Finalmente, a taxa de desgaste apresenta uma inflexão (regime 3), coincidindo com a inflexão de tendência da dimensão da profundidade dos riscos. Possivelmente este comportamento é influenciado pela degradação dos materiais orgânicos contido nas pastilhas, que podem atuar como um lubrificante temporário e também pelo aparecimento de uma fina camada mais resistente à abrasão, proveniente de transformação de fase por processo termomecânico, conforme mostrado na Figura 4.

Um importante fato pode ser obtido de maneira indireta, é que não deve haver variações significativas nas taxas de desgaste, com a alteração das dimensões das lamelas de grafita, devido ao encobrimento observado nas tribografias, onde esta hipótese foi confirmada no estudo realizado por Leach; Borland (1983).



**Figura 3.** Influência da força normal na taxa de desgaste e na rugosidade dos discos; aplicado linhas de tendência em trechos distintos.

Houve alteração significativa da altura média dos picos  $Rpk$  e das profundidades dos vales  $Rvk$ , após término dos ciclos de frenagem, em relação aos valores encontrados após usinagem ( $Rvk=0,71$  e  $Rpk=2,39$ ), esta característica é esperada, pois operações de usinagem neste tipo de peça tendem a apresentar maior rugosidade devido a alta taxa de remoção de material para otimização da velocidade de produção.

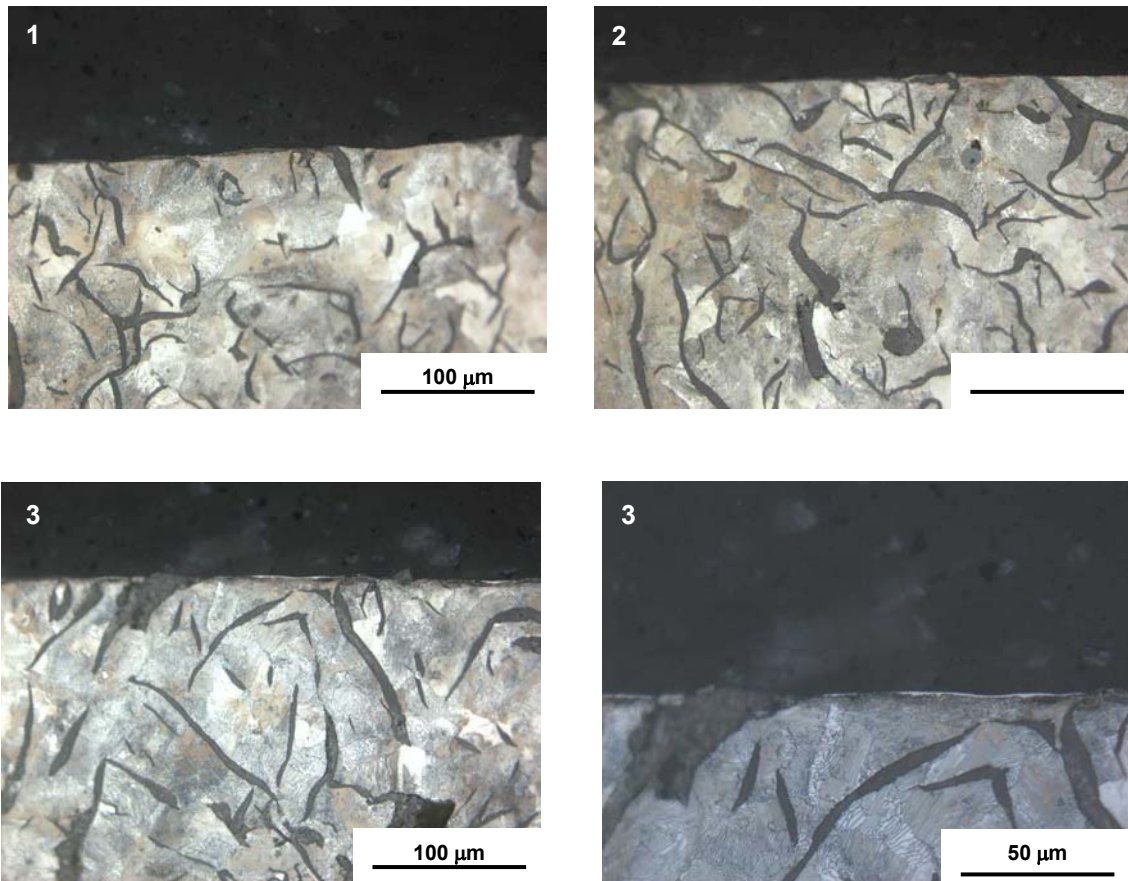
Por outro lado, desconsiderando esta característica inicial, o gradativo acréscimo da força normal resultou em maiores  $Rpk$  e  $Rvk$ , ou seja, mais rugosa, entretanto esta tendência apresenta um leve desvio positivo na região dos 2000 N e uma inflexão de tendência na região dos 2600 N. Possivelmente, este desvio da rugosidade está associado a uma alteração de predominância de mecanismos de desgaste, com a eventual diminuição da efetividade de lubrificação promovida pela camada de óxidos, rompidas pelo acréscimo da força normal aplicada. Por outro lado, a inflexão deve ser resultado da degradação por processo termomecânico dos materiais contidos no substrato da pastilha, pois além de maior força, existem maiores temperaturas. Conforme sugerido por Rhee (1971) e Ostermeyer (2001), este cenário gera produtos de desgaste que podem estar atuando como lubrificantes, além do provável endurecimento superficial, promovido pela camada de contato do disco de freio, verificado na análise metalográfica.

Avaliando as variáveis tribológicas, a Figura 4 mostra as microestruturas das superfícies dos discos de freio, na região de contato após a frenagem, obtidas por microscopia ótica, onde se nota que a camada plastificada é relativamente pequena e de difícil observação através desta técnica.

Não foi verificada diferença significativa na microestrutura, em nível microscópico, na superfície de contato com o aumento da força normal aplicada, exceto o surgimento de uma fina camada na superfície das amostras com maiores cargas.

Nota-se que a amostra do regime 3, com maior carga de frenagem apresenta uma fina camada distinta, que possivelmente trata-se de região com transformação de fase.

A causa para esta transformação de fase, possivelmente martensítica, ou camada branca, presente na amostra, deve-se ao cenário termodinâmico, pois além de apresentar maiores cargas, também apresentam maiores temperaturas, conforme verificado por Serbino (2005), as quais são relativamente baixas para causar austenitização, porém devemos considerar a eventual presença de pontos mais quentes do que os medidos pela técnica utilizada neste trabalho, conforme proposto por Anderson; Knapp (1990).



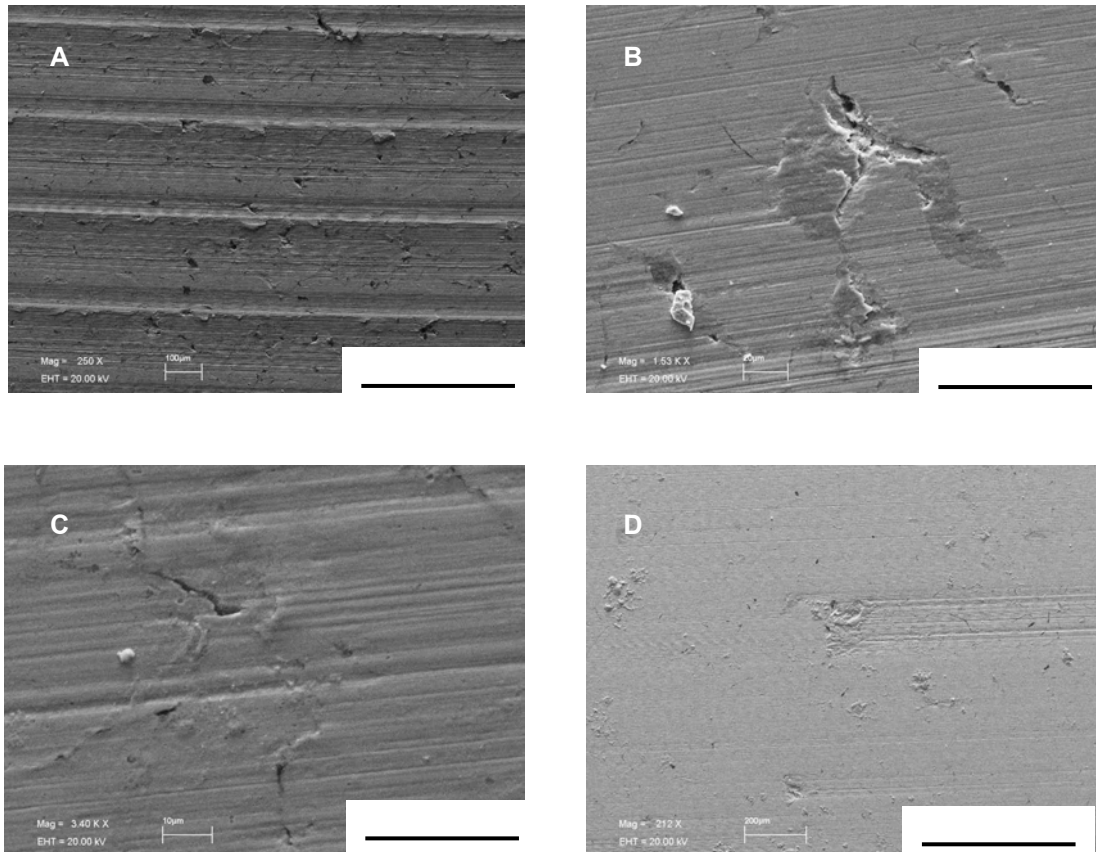
**Figura 4.** Microestruturas das superfícies dos discos de freio, na região de contato, após ensaio de frenagem, obtidas por microscopia ótica (seção radial). Regime 1, 2 e 3 conforme Figura 3.

As características citadas anteriormente, também podem ser visualizadas na Figura 5, onde são verificados alguns aspectos típicos encontrados em todas as superfícies de contato onde os mecanismos de desgaste foram abrasivos, gerando riscos de dimensões variáveis e posições aleatórias na mesma superfície, sendo que na amostra no estado de entrega, estes riscos são regulares, conforme quadro (A). Outros aspectos típicos encontrados em todas as amostras são: Quadro (B), descontinuidades geradas por remoção do material que estava encobrindo a grafita e manchas de óxidos, (C) descontinuidades geradas pela extração da grafita, gerando sítios de acúmulo de partículas de desgaste ou regiões de interferência frente aos abrasivos da pastilha e também os chamados “cometas”, conforme quadro (D), que são materiais mistos e oxidados, provenientes da pastilha e disco, impregnados na superfície, e que foram parcialmente removidos gerando riscos mais profundos após este desprendimento, o qual pode ser caracterizado como um mecanismo misto de abrasão e oxidação. Embora o desgaste oxidativo não seja facilmente visualizado de maneira direta, pois além do óxido ser uma camada muito fina, ele é removido e formado de maneira contínua, a sua presença pode ser comprovada pela Figura 6, principalmente em maiores temperaturas.

A superfície em contato com o disco apresenta riscos com remoção de material de forma heterogênea, devido à dispersão aleatória dos diversos constituintes deste produto, os quais também apresentam resistência distinta ao desgaste.



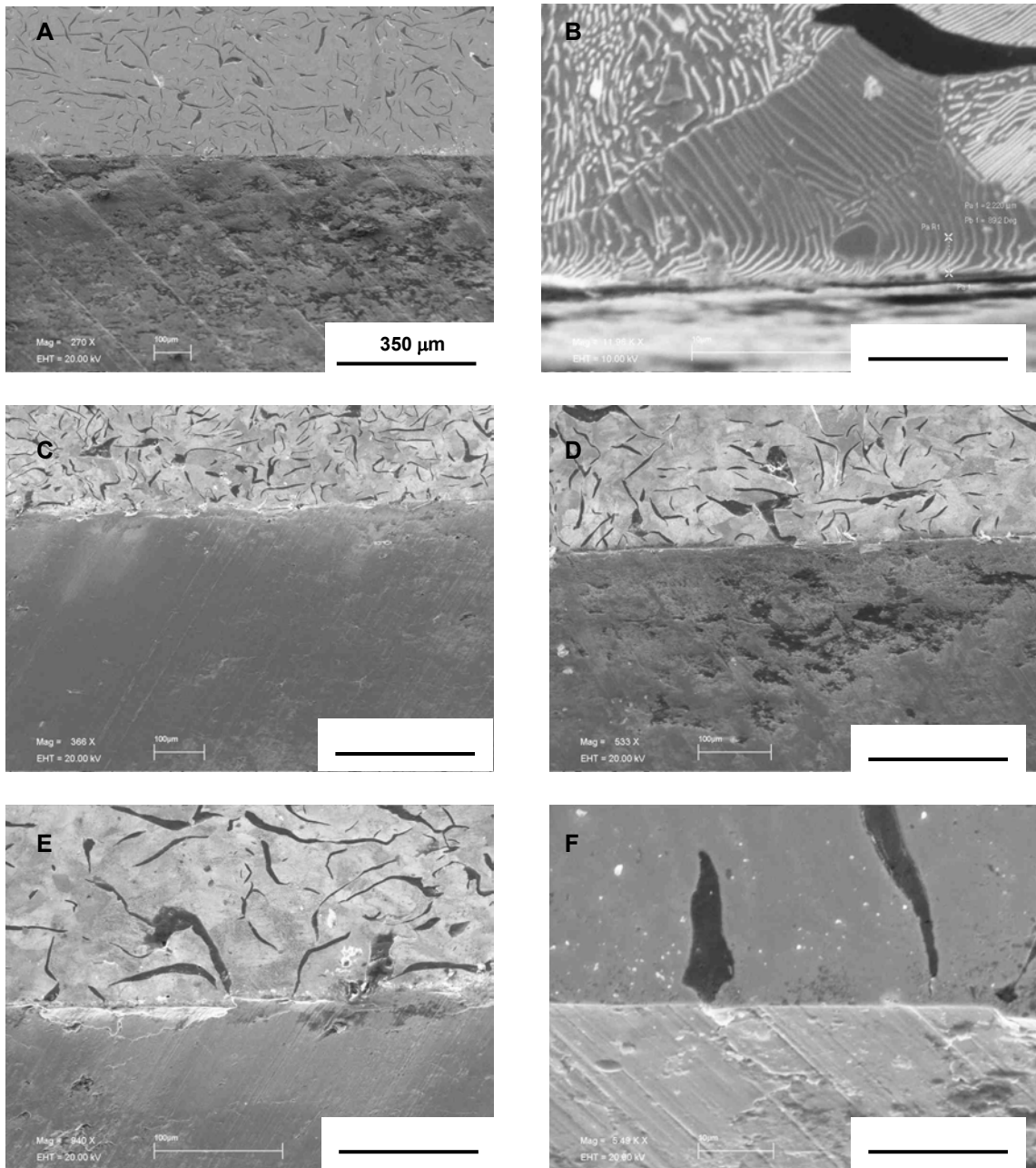
Por outro lado, a superfície usinada na Figura 5 “A” apresenta aspecto significativamente distinto em relação às superfícies sob o tribocontato de frenagem, com maiores dimensões de riscos, maior plastificação aparente e também devido à presença de “células abertas” ou “*open cells*”, que são descontinuidades geradas pela extração da grafita ou ainda com sua presença, devido à interação em modo cisalhante com a ferramenta de corte.



**Figura 5.** Tribografias dos discos de freio, após ensaio de frenagem, obtidas através de MEV, vista de topo. Quadro A (estado de entrega), B (660 N), C (1640 N) e D 3280 N).

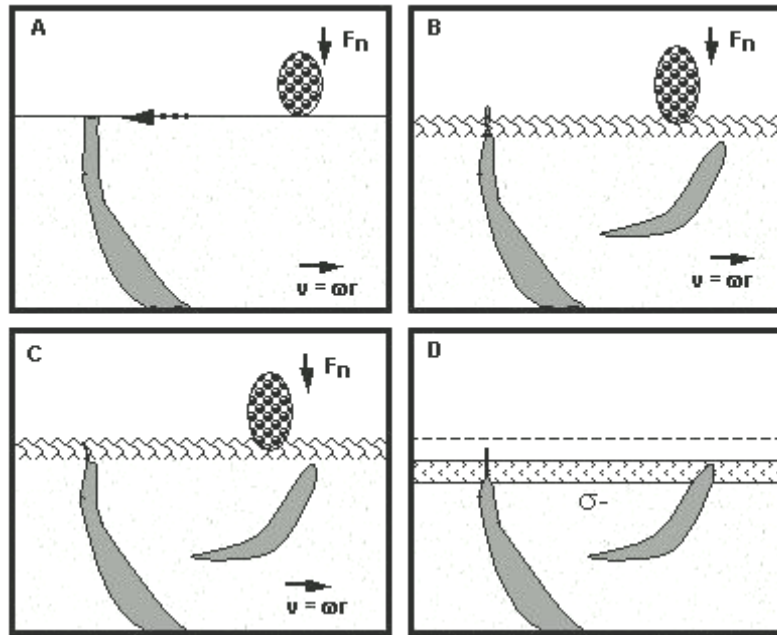
Outro ângulo de imagem para determinação destes aspectos do tribocontato é a visualização da superfície com sua subsuperfície em três dimensões, conforme mostrado na Figura 6.

No quadro A da Figura 6, nota-se a regularidade do passe de ferramenta de desgaste que forma uma espiral em relação ao centro do disco, no quadro B nota-se que a camada plastificada visível possui dimensões da ordem de 2 µm. O quadro C e D mostra a diferença de superfícies com maior oxidação na amostra submetida a maiores temperaturas. A iminente delaminação é mostrada no quadro E, e finalmente o quadro F evidencia o fenômeno de compressão, extrusão, colapso e selamento da região que continha grafita, onde se nota que em todos os quadros a superfície de tribocontato apresenta volume de grafita aparente, significativamente reduzido em relação a um desbaste em nível laboratorial.



**Figura 6.** Tribografias dos discos de freio, após ensaio de frenagem, obtidas através de MEV, vista em ângulo de  $45^\circ$  em relação ao plano de contato. A superfície superior foi desbastada por preparação metalográfica em laboratório e a inferior pelo tribocontato com as pastilhas de freio após ensaio de frenagem. Quadro A (estado de entrega), B (2620 N), C e E (660 N), D (3280 N) e F (2620 N).

Uma proposta de explicação para o selamento da superfície ou o encobrimento da grafita pode ser visualizada na Figura 7, onde o escoamento da matriz metálica, gerado por plastificação, atua de forma a comprimir e extrudar a lamela de grafita, em direção à superfície, com posterior colapso e selamento do volume, por tensões residuais compressivas, conforme medido por Serbino (2005), anteriormente ocupado por esta fase.



**Figura 7.** Esquema proposto para encobrimento da grafita, devido ao tribocontato: a) Atuação da força normal e compressão da grafita; b) Escoamento da superfície com extrusão da grafita; c) Colapso do volume anteriormente ocupado pela grafita; d) Desgaste da superfície e tensões residuais compressivas selando a região colapsada, expondo temporariamente parte da grafita.

#### 4 CONCLUSÕES

Para o estudo dos tipos de mecanismos do desgaste atuantes durante a simulação de frenagem até o estacionamento, utilizando disco de freio ventilado automotivo, construído com ferro fundido cinzento perlítico, sob condições experimentais estipuladas em: velocidade inicial estimada do veículo de 100 km/h, momento de inércia com 45 kg.m<sup>2</sup>, pressão no cáliper de 2 a 10 MPa, sob temperatura inicial da superfície próxima ao ambiente, foi concluído que:

- A resistência ao desgaste do disco de freio, de modo geral, é inversamente proporcional à força normal aplicada, porém apresenta transições e inflexões em seu regime, devidas principalmente à alteração dos mecanismos de desgaste predominantes.
- Os principais tipos de mecanismos de desgaste verificados nas superfícies dos discos foram abrasivos, oxidativos e de fadiga.
- O sistema tribológico impõe severas condições de carregamento térmico e deformação plástica, que influenciam significativamente para a atuação dos mecanismos de desgaste.
- A plastificação ocorrida na superfície, gera encobrimento da grafita, por mecanismo de compressão, extrusão e colapso do volume anteriormente ocupado por esta fase e também seu selamento, por tensões residuais compressivas nas camadas superficiais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ANDERSON, A. E.; KNAPP, R. A.; **Hot spotting in automotive friction systems**, *Wear*, vol.135, 1990, p.319-337.
- 2 HECT R.L.; DINWIDDIE R.B.; PORTER W.D., WANG h.; **Thermal transport properties of grey cast irons**; SAE paper 962126, 1996.
- 3 KATO, K.; **Wear mode transitions**; *Scripta Metall.*, vol.24, 1990, p.815-820.
- 4 KEMPERS H.; **Stahlwerkskokillen aus Gusseisen mit Kugelgraphit**, *Giesserei*, 1966, p.53.
- 5 KEMPERS, H; **Giesserei**, vol 53, no. 1, 1966, p.15.
- 6 LEACH, P.; BORLAND, D.; **The unlubricated wear of flake graphite cast iron**; *Wear*, v.85, p.257-266, 1983.
- 7 MALUF, O.; ANGELONI, A.; SANTOS, J.C; COLOSIO, M.A.; SPINELLI. D.; BOSE, W.W. Fo.; **Desenvolvimento histórico e tecnológico dos discos de freio automotivos**, 7<sup>th</sup> *International Brake Colloquium*, Gramado, RS, Brazil; May 5 and 6, 2005.
- 8 OSTERMEYER, G.P.; **Friction and wear of brake systems**; *Forschung im Ingenieurwesen*, Springer-Verlag; v.66; 2001.
- 9 RHEE S.K, **Influence of rotor metallurgy on the wear of friction materials in automotive brakes**, SAE transactions, vol.80, technical paper series 710247, 1971.
- 10 SERBINO; EDISON M.; **Um estudo dos mecanismos de desgaste em disco de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar**, Dissertação apresentada à EPUSP, 2005, p. 80-81.

# WEAR MECHANISM ANALYSIS IN AUTOMOTIVE BRAKE DISC <sup>(1)</sup>

Edison Marcelo Serbino <sup>(2)</sup>  
Marco Antonio Colosio <sup>(3)</sup>

## Abstract

The present study has goal to approach main wear mechanisms occurred in ventilated brake disc when submitted to the braking test in inertial dynamometric simulator. This component was manufactured in pearlitic gray cast iron with lamellar graphite. The braking tests were carried out under fixed parameters, such as 100 km/h vehicle initial speed, with 45 kg.m<sup>2</sup> moment of inertia, surface temperature close to ambient temperature, however varying the pressure in caliper from 2 to 10 MPa, resulting in 650 to 3300 N normal force applied in the pads. The wear mechanisms were determined based on measurements of the wear taxes through the mass loss of the pairs (brake discs and pads), measurements of the surface topography through Rpk and Rvk, tribographics and microstructural analysis and measurements of residual stresses on the tribocontact region. The tribological system originated severe conditions of thermal load and plastic deformation, which influenced the performance of the wear mechanisms verified on the disc surfaces, which were mainly abrasive, oxidative and fatigue. This plastification resulted in closing of the graphite and compressive residual stresses at the subsurface layers. It was verified that, the wear strength in the brake disc might be inversely proportional to the applied normal force; however the operating mechanisms show regimen transitions.

**Key-words:** Brake disc; Tribological; Automotive braking; Gray cast iron.

---

(1) *Technical Contribution to the 60<sup>th</sup> Annual Congress of Brazilian Society for Metallurgy and Materials (ABM) – São Paulo, SP, Brazil, 2005.*

(2) *ABM Member; Metallurgical Engineer, M.Sc., Materials Technological Center, Volkswagen of Brazil, SP, Brazil.*

(3) *ABM Member; Metallurgical Engineer, Dr., Engineering Materials Department, USP- São Carlos*