

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS, ENGENHARIAS E
TECNOLOGIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

IZAIAS DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE DESGASTE DO
FERRO FUNDIDO CINZENTO FC25 COM ADIÇÃO DE
ANTIMÔNIO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Roberto da Rocha

**CRICIÚMA
2015**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

O48a Oliveira, Izaias de.

Avaliação do comportamento de desgaste do ferro fundido cinzento FC25 com adição de antimônio / Izaias de Oliveira ; orientador: Márcio Roberto da Rocha. – Criciúma, SC : Ed. do Autor, 2015.

85 p. : il. ; 21 cm.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2015.

1. Ferro fundido. 2. Ferro fundido – Propriedades mecânicas. 3. Antimônio. 4. Desgaste adesivo. I. Título.

CDD. 22. ed. 669.1413

FOLHA DE APROVAÇÃO

Izafas de Oliveira

Avaliação do comportamento de desgaste de ferro fundido cinzento FC25 com adição de antimônio.

Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

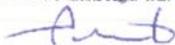
Criciúma, SC, 31 de agosto de 2015.

Banca Examinadora:



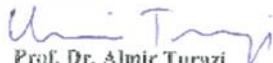
Prof. Dr. Elídio Angioletto

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Almir Turazi

Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC

AGRADECIMENTOS

Aos meus muito amados pais, Raimundo e Almira pelo exemplo de vida e pelos ensinamentos que perdurarão durante toda a minha vida.

A meus diletos irmãos, companheiros insubstituíveis nesta caminhada.

A meus amados filhos Filipe Augusto e Anna Júlia presentes de Deus na minha vida.

Ao professor Doutor Márcio Roberto da Rocha, meu encorajador orientador, sem cujo apoio não seria possível a realização deste trabalho.

Ao PPGCEM/UNESC; seu corpo docente e à secretária Vivian Souza pelo apoio e colaboração.

Ao amigo Dr. Adalberto Bierrenbach pelos ensinamentos metalúrgicos que formam a base deste trabalho.

A Giovana, Maiara e Lucas pela cortesia, disponibilidade e empenho na elaboração das amostras.

A Carla Patrícia, pelo amor, apoio, compreensão e incentivo nesta empreitada.

A Metalúrgica DS (www.mds.ind.br) pelo fornecimento das amostras e apoio para a realização deste projeto.

A Fras-Le (www.frasle.com) pela parceria no aumento mútuo do conhecimento.

A Deus, pela dádiva da vida.

RESUMO

Nas fundições de discos de freios para o mercado de reposição tem sido empregado o antimônio como perlitzante, em ligas de ferro fundido cinzento. Percentuais de 0,020% a 0,030% são empregados empiricamente para aumentar a quantidade de perlita, o limite de resistência a tração e a dureza. Este trabalho buscou comparar o comportamento de desgaste de uma liga de ferro fundido da classe FC25 sem a adição de antimônio e de outras 3 com adições de (0,010%; 0,025% e 0,040%). Foram realizadas análises químicas espectrométricas, micrográficas, testes de dureza e microindentação e teste de desgaste pino sobre disco e teste funcional em dinamômetro, para caracterização das amostras. A medida que o percentual de antimônio aumentou houve aumento da dureza, da resistência à tração, do percentual de perlita e houve redução da perda de massa no teste de desgaste pino sobre disco. As microestruturas foram avaliadas via microscopia óptica e eletrônica de varredura e foi observado o aumento do percentual de perlita e de cementita. O ensaio de pino sobre disco evidenciou ainda aumento do coeficiente de atrito, que é condição desejável no sistema de frenagem.

Palavras-chave: Antimônio. Ferro fundido cinzento. Desgaste Adesivo.

ABSTRACT

In castings of brake discs for the spare parts market have been using Antimony as pearlite promoting element in gray iron alloys. Percentages of 0.020% to 0.030% are used empirically to increase the amount of pearlite and the tensile strength and hardness. This study aimed to compare the wear behavior of a cast iron alloy FC25 without the addition of antimony and 3 others with additions (0.010%, 0.025% and 0.040). Some tests were performed as: spectrometric chemical analyzes, micrographs, hardness testing and micro indentation. As the antimony percentage was increased, the tensile strength, hardness, pearlite percentage and reducing weight loss in the pin on disk test were also increased. The microstructures were evaluated by optical and scanning electron microscopy and was noted that the percentage of pearlite and cementite increased. The pin on disk test showed the decrease of loss in mass and the friction coefficient increasing, which are desirable conditions in braking system.

Key words: Antimony. Gray iron casting. Adhesive wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sobreposição dos Diagramas de Equilíbrio Ferro – Carbono estável e metaestável.....	27
Figura 2 -Micrografia da Ferrita obtida em aço de baixo carbono.....	28
Figura 3 – Fotomicrografia da Austenita	28
Figura 4 - Cementita em ferro fundido branco.....	29
Figura 5 – Perlita em aço hipoeutetóide.....	30
Figura 6 – Ledeburita transformada na reação eutetóide	30
Figura 7– Solidificação do ferro fundido branco	33
Figura 8- Esquema de solidificação de um ferro fundido cinzento hipoeutético.....	34
Figura 9 - Diagrama de Equilíbrio Ferro – Carbono.....	36
Figura 10 - Forma do Carbono no Ferro Fundido Branco	37
Figura 11 - Forma da Grafita no Ferro Fundido Cinzento	38
Figura 12- Tipos de grafita segundo a ASTM A247.....	39
Figura 13 - Forma da Grafita nos Ferro Fundido Nodular	40
Figura 14 - Forma da Grafita no Ferro Fundido Vermicular	41
Figura 15 -Representação Esquemática do Sistema de Frenagem	47
Figura 16 – Representação Esquemática dos Tipos de Desgaste.....	49
Figura 17 - Mecanismo de desgaste entre as pastilhas e o disco de freio.....	50
Figura 18 - Esquema de freio de veículos de passageiros.....	51
Figura 19 - Desgaste na Pista de Frenagem do Disco de Freio.....	52
Figura 20 - Disco de Freio Ventilado.....	52
Figura 21 - Disco ventilado fabricado em compósitos de carbono	53
Figura 22 - Disco de Freio Sólido	53
Figura 23 - Disco de Freio Fundido Utilizado nos Testes.....	54
Figura 24 - Micrografia da amostra Sb(0).....	60
Figura 25 - Micrografia da amostra Sb(0,010).....	60
Figura 26 - Micrografia da amostra Sb(0,025).....	61
Figura 27 - Micrografia da amostra Sb(0,040):	61
Figura 28 - Micrografia da amostra Sb(0).....	63
Figura 29 - Micrografia da amostra Sb(0,010).....	63
Figura 30 - Micrografia da amostra Sb(0,025).....	63
Figura 31 - Micrografia da amostra Sb(0,040).....	64
Figura 32 - Espaçamento Interlamelar da Perlita	66
Figura 33 - Discos para Ensaio de Desgaste:	67
Figura 34 – Pista de Desgaste do Ensaio Pino sobre Disco.	71
Figura 35 – Ampliação da Pista de Desgaste	72
Figura 36 – Fragmentos do Ensaio Pino sobre Disco	72

Figura 37 - Equipamento de Ensaio de Discos e Pastilhas de freio. 76

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Dureza Brinell dos Discos de Freio	58
Gráfico 2 - Limite de Resistência a Tração Corpos de Prova Cilíndricos	59
Gráfico 3 -Microindentação das Amostras Metalográficas dos Discos de Freio	68
Gráfico 4 -Microindentação das Amostras Metalográficas dos Discos de Desgaste	68
Gráfico 5 - Comportamento do ensaio de desgaste pino sobre disco (a) Sb(0); (b) Sb(010); (c) Sb(0,025); (d) Sb(0,040).	70
Gráfico 6 - Variação de massa dos discos de desgaste	73
Gráfico 7 - Coeficiente de atrito do ensaio pino sobre disco	74
Gráfico 8 - Profundidade da Pista de Desgaste dos Discos.....	75
Gráfico 9 - Ensaio funcional de atrito dos discos de freios com pastilhas sinterizadas na Fras-Le. (a) 0%Sb; (b) 0,010%Sb; (c) 0,025%Sb e (d) 0,040%Sb, em peso.....	77
Gráfico 10 – Coeficiente de Atrito dos Discos de Freio	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Propriedades Mecânicas das Classes de Ferro Fundido cinzento de acordo com a norma ASTM A159 – 83 (2011).	39
Tabela 2 - Propriedades do Antimônio e do Estanho.....	44
Tabela 3 - Composições químicas utilizadas	57
Tabela 4 - Caracterização da Grafita e da Matriz Metálica das Amostras dos Discos de Freio.	62
Tabela 5 - Caracterização da Grafita e da Matriz Metálica das Amostras dos Discos de Desgaste.....	64
Tabela 6 - Parâmetros do equipamento de teste:.....	76

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	23
1.1 OBJETIVO GERAL	24
1.1.1 Objetivos Específicos	24
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1 FERROS FUNDIDOS	25
2.1.1 Fases e constituintes dos ferros fundidos	27
2.1.2 Carbono equivalente	31
2.1.3 Solidificação dos ferros fundidos	31
2.1.3.1 Ferro fundido branco hipoeutético	31
2.1.3.2 Ferro fundido branco eutético	32
2.1.3.3 Ferro fundido branco hipereutético	32
2.1.3.4 Ferro fundido cinzento hipoeutético	33
2.1.3.5 Ferro fundido cinzento eutético	35
2.1.3.6 Ferro fundido cinzento hipereutético	35
2.2 TIPOS DE FERROS FUNDIDOS	36
2.2.1 Ferro Fundido Branco	37
2.2.2 Ferro Fundido Cinzento	37
2.2.3 Ferro Fundido Nodular	40
2.2.4 Ferro Fundido Vermicular	40
2.3 INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA NOS FERROS FUNDIDOS:	41
2.3.1 Influência dos elementos químicos nos ferros fundidos.....	41
2.4 ADIÇÃO DE ANTIMÔNIO COMO ELEMENTO DE LIGA.....	43
2.4.1 Influência do antimônio sobre as propriedades dos ferros fundidos.....	44
2.5 TRIBOLOGIA	46
2.6 ATRITO	46
2.7 DESGASTE ADESIVO.....	48
2.8 DESGASTE ABRASIVO.....	48
2.9 FADIGA SUPERFICIAL	48
2.10 REAÇÃO TRIBOQUÍMICA.....	49
2.11 FRENAGEM AUTOMOTIVA.....	50
2.12 TIPOS DE DISCOS DE FREIO	52
3 METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	54
3.1 FUNDIÇÃO DOS DISCOS DE FREIO	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	58

4.2 CARACTERIZAÇÃO METALOGRAFICA	60
4.2.1 Avaliação das microestruturas.....	60
4.2.2 Análise metalográfica dos discos de freio.....	60
4.2.3 Análise metalográfica dos discos de desgaste	62
4.3 ENSAIO DE DESGASTE	67
4.3.1 Caracterização da rugosidade.....	67
4.3.2 Microindentação	67
4.3.3 Caracterização do comportamento de desgaste	70
4.3.4 Variação de Massa	73
4.3.5 Coeficiente de Atrito	74
4.3.6 Profundidade da Pista de Desgaste.....	75
4.3.7 Ensaio Funcional em Dinamômetro	75
4.3.8 Análise Econômica	79
4.3.9 Segurança do Trabalho no Uso de Antimônio.....	79
5 CONCLUSÃO	80
REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

Ferros fundidos são ligas ferrosas que apresentam interessantes características técnicas, onde se destacam boa resistência mecânica, boa fundibilidade e usinabilidade. Estas características os tornam aptos a uma variedade de aplicações, envolvendo peças simples de maquinaria geral, até o aproveitamento para construção de componentes de motores e sistemas de frenagem de automóveis (CHIAVERINI – 2012).

No que tange a sua aplicação na indústria automobilística, e em particular, em aplicações no sistema de frenagem, é verificado que com o aumento constante da potência dos motores dos veículos, as velocidades tem aumentado significativamente e, com isso, exigido uma maior capacidade dos sistemas de frenagem.

A indústria automobilística vem utilizando para a fabricação de sistemas de frenagem ferro fundido cinzento, pois apresenta além das características de resistência mecânica, boas propriedades térmicas e atenuação de ruído. 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 às variações térmicas e, frequentemente, são utilizados em peças sujeitas a grandes mudanças de temperatura, tais como os 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. (CUEVA et al - 2003).

Por exemplo, veículos com alta quantidade de movimento (velocidade x massa, tais como trens, caminhões de mineração e carros de corrida) requerem principalmente resistência mecânica enquanto veículos leves (carros de passageiros) requerem, principalmente, condutividade térmica. (CUEVA et al - 2003).

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

Como uma alternativa para aumentar a resistência mecânicas destas peças, adota-se como prática de fundição dos ferros fundidos cinzentos a adição de pequenas quantidades de antimônio. Porém,

embora isto resulte em melhora no desempenho dos discos de freios, pouca informação está disponível quanto ao comportamento de desgaste destes materiais e, qual a principal contribuição do antimônio para este fim.

Diante do potencial de uso do antimônio, torna-se necessário um estudo mais aprofundado visando esclarecer os benefícios técnicos e econômicos, as quantidades aplicáveis e até eventuais riscos relacionados a sua adição nos ferros fundidos cinzentos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência do antimônio sobre a microestrutura e comportamento tribológico do ferro fundido cinzento Classe FC25 utilizado na fabricação de discos de freio para automóveis.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência da adição de antimônio na microestrutura dos ferro fundido FC25;
- Avaliar o comportamento de desgaste adesivo do FC25 com a adição de quantidades variadas de antimônio;
- Avaliar a resistência ao desgaste no ensaio de pino sobre disco do ferro fundido com variações de Sb.
- Avaliar o comportamento dos discos de freio produzidos com variações de Sb, no ensaio funcional em dinamômetro.
- Avaliar a viabilidade econômica da substituição do estanho pelo antimônio como elemento perlítico, para a obtenção de ferro fundido cinzento perlítico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A utilização de ferros fundidos cinzentos na indústria automotiva é bastante comum, em função das características que estes materiais apresentam frente as necessidades de aplicação (CUEVA et al - 2003). Embora a literatura técnica apresente informações sobre as propriedades destes materiais, poucos trabalhos abordam a avaliação tribológica dos ferros cinzentos comumente utilizados em sistemas de frenagem, principalmente quanto à adição de antimônio. Atualmente o antimônio é utilizado no Brasil como elemento de liga, de forma empírica, na fabricação de discos de freio para automóveis. A bibliografia referente a aplicação do antimônio como elemento de liga é ainda bastante limitada, sendo mais frequentemente apresentado como elemento nocivo na fabricação dos ferros fundidos nodulares, onde atua como elemento com tendência a deformação da grafita (acima de determinados percentuais). (ALLUYN et al. - 1985).

Assim, a seguir será apresentada uma revisão das principais características dos ferros fundidos e, dos aspectos tribológicos aplicados a ele.

2.1 FERROS FUNDIDOS

“Ferros fundidos são ligas a fase de ferro com composição química próxima do eutético ferro-carbono. A definição clássica separa aços e ferros fundidos empregando o limite de aproximadamente 2% de carbono, a solubilidade máxima deste elemento na austenita” (COLPAERT- 2008).

“Ferro fundido é a liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2,0%, em quantidade superior à que é retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita” (CHIAVERINI - 2012).

Os diagramas de fase ou diagramas de equilíbrio ferro – carbono têm por finalidade mostrar alterações de estado físico e de estrutura que sofrem as ligas metálicas, em decorrência de aquecimentos ou resfriamentos lentos e são divididos em duas faixas baseadas no percentual de carbono:

A faixa correspondente aos aços, de 0,008% até 2,0% de carbono, recebendo a denominação de:

- Aços hipoeutetóides: 0,008% a 0,8% de carbono
- Aços eutetóides: 0,8% de carbono.

- Aços hipereutetóides: 0,8% a 2,0% de carbono

A faixa correspondente aos ferros fundidos de 2,0% a 6,7% de carbono, assim denominados:

- Ferros Fundidos hipoeutéticos: possuem carbono equivalente de 2,11% a 4,3%.
- Ferros Fundidos eutéticos: possuem carbono equivalente de 4,3%.
- Ferros Fundidos hipereutéticos: possuem carbono equivalente acima de 4,3%.

O diagrama de equilíbrio ferro carbono se caracteriza por três pontos principais:

Ponto peritético com 0,16% de carbono a 1493°C. De pouca aplicação técnico/comercial. Neste ponto a austenita apresenta estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) Ponto H na figura 1.

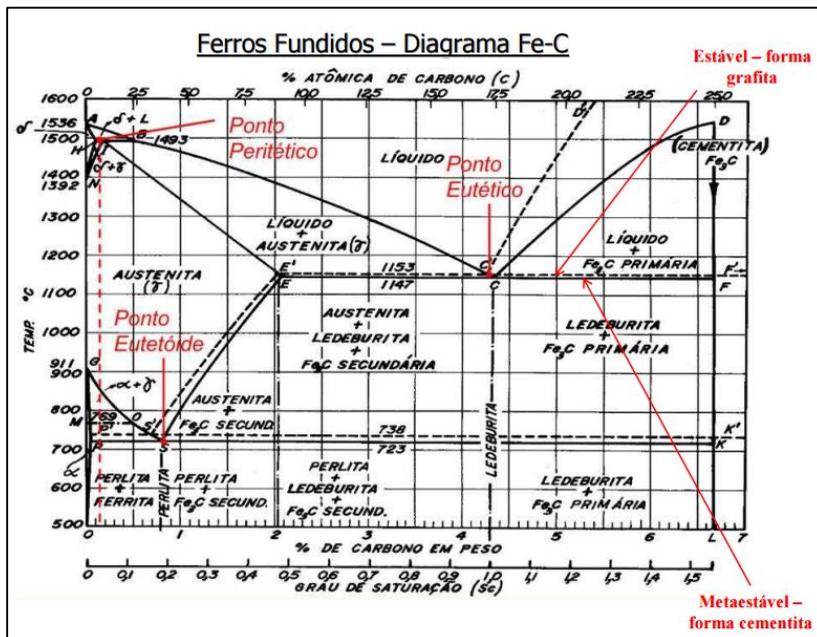
Ponto eutético com 4,3% de carbono representa a liga com menor temperatura de fusão ou solidificação. Ponto C na Figura 1.

Na reação eutética metaestável o carbono se solidifica na forma de carboneto de ferro – cementita (Fe_3C). O metal líquido se transforma em austenita e cementita. Temperatura do eutético metaestável (TEM) igual a 1147°C. O diagrama de equilíbrio metaestável é representado pelas linhas cheias na figura 1. Esta transformação é chamada metaestável devido a que, se mantida a temperaturas em torno de 700°C por longo período de tempo, a cementita se transformará em grafita e ferrita, que é a forma estável do carbono. Ponto E da figura 1.

Na reação eutética estável o carbono se solidifica na forma de grafita. O metal líquido se transforma em 2 sólidos – austenita e grafita na temperatura do eutético estável (TEE) igual a 1153°C. Ponto E' da figura 1. Este é o diagrama de equilíbrio de interesse no caso de produção de ferros fundidos cinzentos. O diagrama de equilíbrio estável é representado pelas linhas tracejadas na figura 1.

Ponto eutetóide ocorre em 0,8% de carbono a 723°C. Ponto S na figura 1. Na reação eutetóide a austenita se transforma em perlita – microestrutura constituída de um agregado lamelar alternado de ferrita e cementita.

Figura 1 - Sobreposição dos Diagramas de Equilíbrio Ferro – Carbono estável e metaestável



Fonte: Mecatrônica Atual (2002).

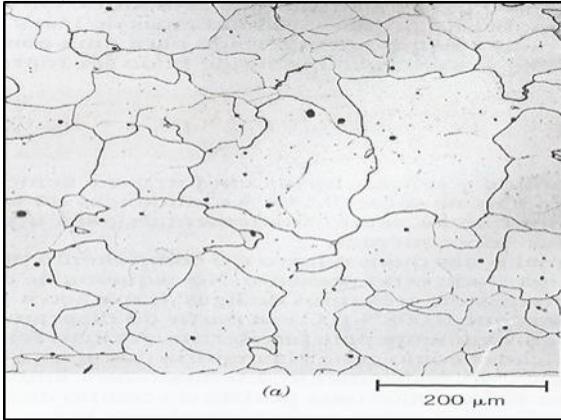
A Figura 1 indica os pontos das reações peritética, eutética e eutetóide no diagrama de equilíbrio (destacadas em vermelho no lado esquerdo e centro da figura) e as linhas correspondentes ao diagrama de equilíbrio estável e metaestável do ferro – carbono (destacadas em vermelho do lado direito da figura)

2.1.1 Fases e constituintes dos ferros fundidos

Campo ferrítico (fase α) – Solução sólida de carbono no ferro α , nesse campo a estrutura atômica é cúbica de corpo centrado (CCC). Possui solubilidade máxima de 0,023% de carbono a 723°C.

A ferrita é macia e dúctil com limite de resistência abaixo de 32 kgf/mm² e dureza Brinell em torno de 90HB. Figura 2.

Figura 2 -Micrografia da Ferrita obtida em aço de baixo carbono.

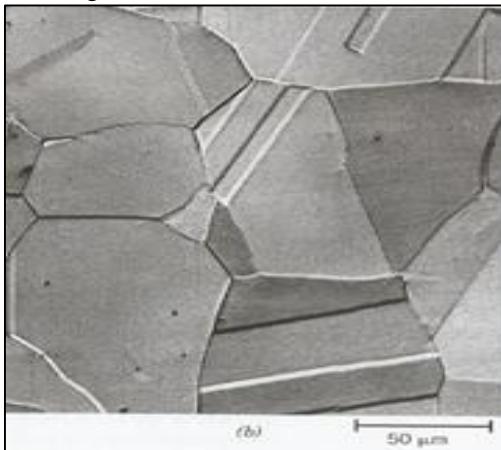


Fonte: Callister (2013).

A Figura 2 apresenta a fotomicrografia de grãos de ferrita – parte clara – em um aço comercial de baixo carbono. A parte escura se refere a perlita formada nos contornos de grão.

Campo austenítico (fase γ) – Solução sólida de carbono no ferro γ , correspondente à forma estável do ferro puro entre 910°C e 1400°C. A austenita– mostrada na figura 3 – apresenta estrutura atômica cúbica de face centrada (CFC) e solubilidade máxima de 2,06% de carbono à 1147°C.

Figura 3 – Fotomicrografia da Austenita



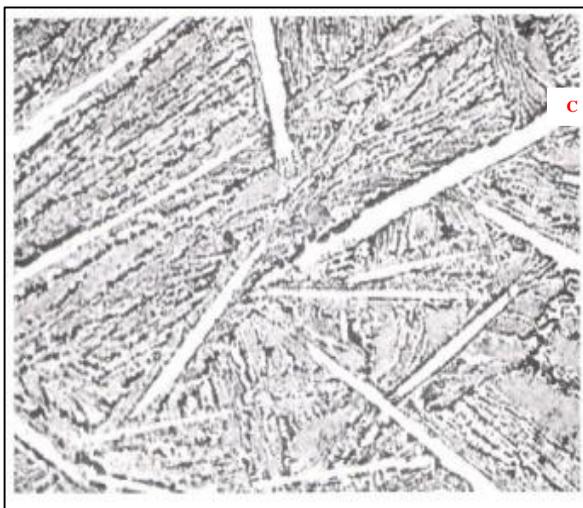
Fonte: Callister(2013).

A Figura 3 mostra as placas de austenita. A austenita é estável a temperatura ambiente somente com a adição de elementos de liga como o níquel.

Ferro delta (δ): formado acima de 1400°C a austenita volta a ter estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). A solubilidade máxima é de 0,09% de carbono a 1495°C .

Cementita (Fe_3C) – Micro constituinte composto de ferro e carbono, apresenta elevada dureza (67HRC ou 900HV). Possui estrutura atômica ortorrômbica com 12 átomos de ferro e 4 de carbono por célula, que corresponde a 6,7% de carbono. Associada a ferrita em lamelas finas, aumenta a resistência dos ferros fundidos inibindo o escorregamento e evitando o cisalhamento da fase dúctil - ferrita. A cementita é mostrada na figura 4.

Figura 4 - Cementita em ferro fundido branco.

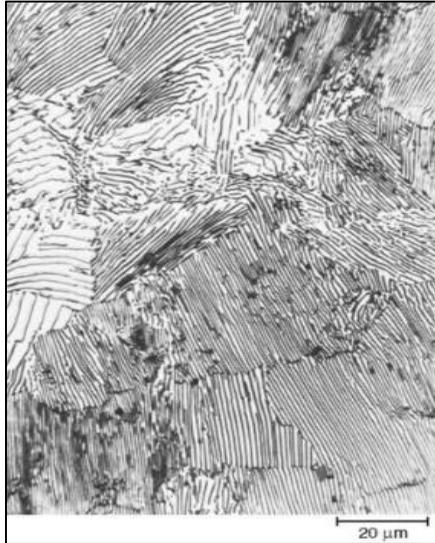


Fonte: Chiaverini, (2012).

A Figura 4 mostra a fotomicrografia da cementita [c] em forma de agulhas. Aumento original 100X.

Perlita: Na reação eutetóide (723°C e 0,78%C) ocorre a transformação da austenita na forma de lamelas alternadas de ferrita (88,5%) e de cementita (11,5%) que recebe o nome de perlita – figura 5.

Figura 5 – Perlita em aço hipoeutetóide

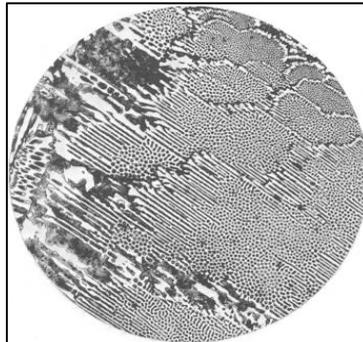


Fonte: ASM – Volume 3 (2010).

A Figura 5 mostra a perlita – estrutura lamelar formada por ferrita – parte clara e cementita – parte escura na fotomicrografia retirada de um aço hipoeutetóide.

Ledeburita: constituinte eutético formado no resfriamento a partir do equilíbrio de fases austenita de um lado e cementita do outro. Durante o resfriamento a 723°C a austenita se transforma em perlita na forma globular sobreposta ao fundo de cementita. Figura 6.

Figura 6 – Ledeburita transformada na reação eutetóide



Fonte: ASM – Volume 9 (2010).

A Figura 6 mostra a estrutura da ledeburita transformada na reação eutetóide, constituída de perlita na forma globulizada (esferas escuras) sobre uma matriz de cementita (matriz branca). As regiões brancas maiores se referem a cementita formada antes da reação eutética. Aumento original 100X.

2.1.2 Carbono equivalente

Alguns elementos comumente presentes nos ferros fundidos como o silício e fósforo alteram a composição química do eutético e o modo de solidificação destas ligas. (COLPAERT – 2008).

O efeito destes elementos é de um terço da influência do carbono, o que leva a da definição da equação do cálculo do carbono equivalente (CE) como sendo:

Cálculo do Carbono Equivalente:

$$CE = \%C + 0,33(\%Si + \% P) \quad (\text{Equação 1})$$

Fonte: Chiaverini (2012).

O carbono equivalente deve ser usado para definir o comportamento da liga no diagrama de equilíbrio.

2.1.3 Solidificação dos ferros fundidos

Solidificação segundo o diagrama de equilíbrio metaestável.

2.1.3.1 Ferro fundido branco hipoeutético

- A Figura 7, apresenta o esquema de solidificação de um ferro fundido branco hipoeutético na composição 3% de carbono.

- A partir do metal líquido, com resfriamento constante inicia-se a precipitação das dendritas de austenita (1300°C).

- Estes cristais crescem continuamente aumentando o teor de carbono no líquido restante. Na reação eutética o líquido se transforma em ledeburita (estrutura lamelar de austenita e cementita).

- Na reação eutetóide as dendritas primárias de austenita e a austenita contida na ledeburita se transformam em perlita. O resultado desta solidificação é de perlita sobre uma matriz de cementita.

2.1.3.2 Ferro fundido branco eutético

- Resfriando-se um metal com composição química eutética a partir da fase líquida – Figura 7 na composição 4,3% C – a primeira transformação acontece na reação eutética onde todo o líquido se transformará em ledeburita (agregado lamelar de austenita e cementita).

- Ao continuar o resfriamento, na reação eutetóide, a austenita se transformará em perlita.

- A microestrutura resultante será de perlita sobre uma matriz de cementita.

2.1.3.3 Ferro fundido branco hipereutético

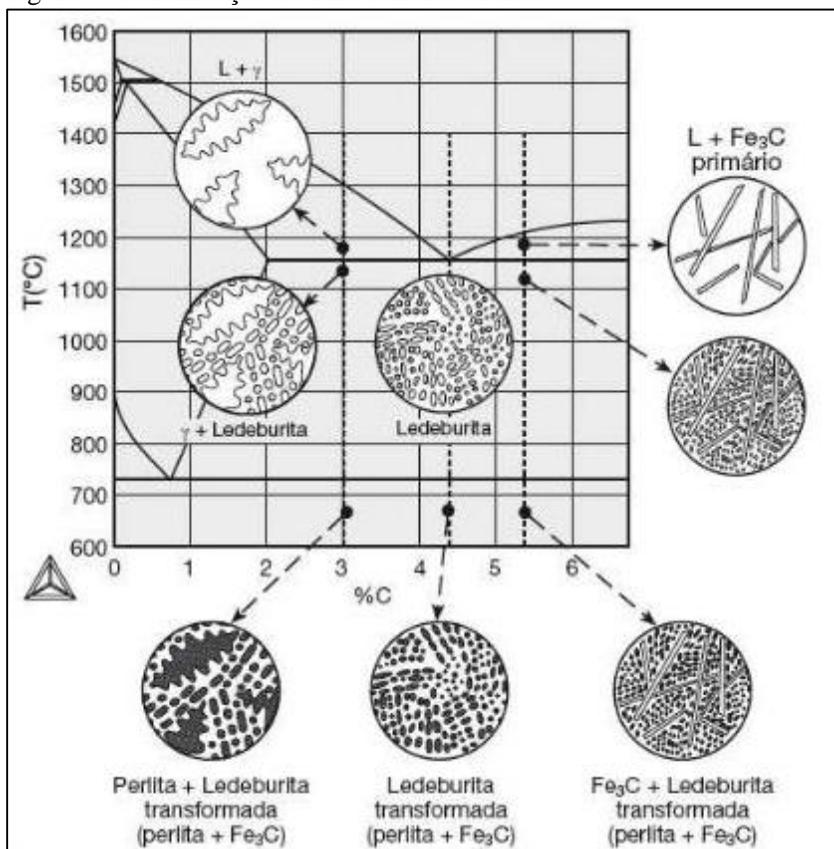
A partir do líquido em resfriamento constante surgirão os primeiros cristais de cementita. Estes cristais crescerão reduzindo o percentual de carbono do líquido que tenderá a composição eutética (4,3%C).

Na reação eutética, o líquido restante se transformará em ledeburita (austenita e cementita). Neste ponto a matriz será composta de cementita primária (formada antes da reação eutética e ledeburita – resultado da reação eutética).

Ao continuar o resfriamento, na reação eutetóide a austenita contida na ledeburita se transformará em perlita.

A microestrutura resultante será de perlita sobre uma matriz de cementita e de cristais de cementita primária. O esquema desta solidificação é apresentado na Figura 7 na composição 5,5% C.

Figura 7– Solidificação do ferro fundido branco



Fonte: Colpaert (2008).

A Figura 7 apresenta o esquema de solidificação de três ferros fundidos: hipoeutético (3%C); eutético (4,3%C) e hipereutético (5,5%C) destacando as fases e estruturas obtidas do metal líquido até a temperatura ambiente.

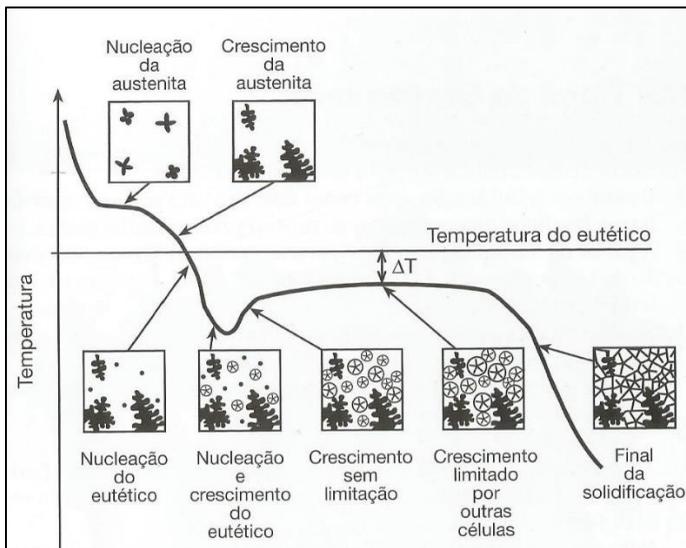
Solidificação segundo o diagrama de equilíbrio estável.

2.1.3.4 Ferro fundido cinzento hipoeutético

Tomando como exemplo um ferro fundido com 3% de carbono na figura 9:

- Acima da linha BC' todo o material estará líquido.
 - Ao se atingir a linha (BC') inicia-se a precipitação dos cristais de austenita. A medida que a temperatura é reduzida os cristais crescem e a solubilidade do carbono na austenita é reduzida, enriquecendo de carbono o líquido restante.
 - A medida que o teor de carbono cresce no líquido, a composição química se desloca em direção ao ponto C'.
 - Ao alcançar o ponto C', à temperatura do eutético estável a 1153°C, o líquido restante possui 4,3% de carbono e transforma-se em austenita e grafita.
 - Continuando o resfriamento mais carbono é expulso da austenita e migra para as lamelas de grafita formadas na reação eutética.
 - Ao atingir o ponto eutetóide S' (738°C), a austenita restante se transforma em ferrita e cementita. Parte desta ferrita ficará na forma livre e parte na forma de perlita (lamelas de ferrita e cementita).
 - A transformação está completa tendo como resultado uma matriz perlítica/ferrítica com o carbono livre em forma de lamelas de grafita.
- O esquema desta solidificação é mostrado na figura 8.

Figura 8- Esquema de solidificação de um ferro fundido cinzento hipoeutético.



Fonte: Colpaert, (2008).

A Figura 8 mostra o esquema de solidificação de um ferro fundido cinzento hipoeutético. A solidificação inicia-se com a nucleação da austenita que cresce dentro do líquido até a reação eutética. Nesta reação o líquido restante se transforma em grafita e austenita. Continuando o resfriamento mais carbono migra da austenita para a grafita. Na reação eutetóide a austenita se transformará em perlita e ferrita gerando uma matriz perlítica/ferrítica e lamelas de grafita.

No caso de um ferro fundido eutético não haveria transformação antes da reação eutética e no caso do ferro fundido hipereutético a grafita seria a primeira fase a nuclear, ao invés da austenita.

2.1.3.5 Ferro fundido cinzento eutético

Tendo como base um ferro fundido 4,3% de carbono na figura 9:

- Acima de 1153°C, todo o material se encontra na fase líquida.
- Durante o resfriamento, ao tocar o ponto eutético C' o líquido se transforma em austenita e grafita lamelar.
- Entre os pontos C' e S', devido à redução da solubilidade de carbono na austenita, mais carbono se difunde para as lamelas de grafita formadas no ponto eutético.
- Ao atingir o ponto eutetóide S' a austenita se transforma em ferrita e cementita formando a perlita.

O resultado destas transformações é uma matriz perlítica com lamelas de grafita.

2.1.3.6 Ferro fundido cinzento hipereutético

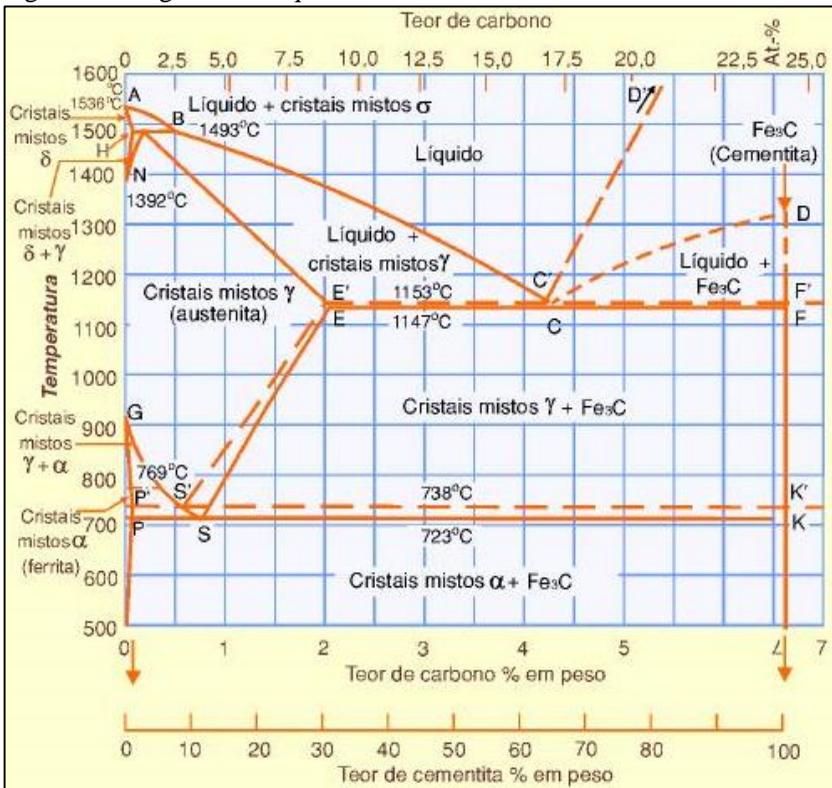
Tendo como base um ferro fundido 5,5% de carbono na figura 9:

- Acima da linha C'D todo o material se encontrará na fase líquida. Durante o resfriamento, ao atingir esta linha, aparecerão os primeiros núcleos de grafita.
- O carbono continuará a migrar do metal líquido para a grafita – formando lamelas, se deslocando sobre a linha C'D em direção a C'.
- Ao atingir o ponto eutético C', o líquido restante terá o percentual de carbono do eutético estável (4,3%C) e se transformará em austenita e grafita.
- Continuando o resfriamento, mais carbono migrará da austenita para as lamelas de grafita até atingir o ponto eutetóide S', onde a

austenita existente se transformará em cementita e ferrita dando origem a perlita. Caso o resfriamento seja muito lento, parte da cementita poderá se transformar em carbono e ferrita.

A estrutura final será uma matriz perlítica com lamelas de grafita. O tamanho dos veios de grafita formados nesta transformação será maior que os das outras reações já citadas, uma vez que haverá mais tempo para migração do carbono do líquido para as lamelas.

Figura 9 - Diagrama de Equilíbrio Ferro – Carbono



Fonte: Adaptado de Chiaverini (2012).

A Figura 9 mostra o diagrama de equilíbrio Fe-C e Fe-Fe₃C como base para exemplificar a solidificação dos ferros fundidos hipoeutético, eutético e hipereutético segundo o equilíbrio estável.

2.2 TIPOS DE FERROS FUNDIDOS

Os principais ferros fundidos fabricados industrialmente são: Ferro Fundido Branco, Ferro Fundido Cinzento, Ferro Fundido Nodular, Ferro Fundido Vermicular.

2.2.1 Ferro Fundido Branco

O Ferro Fundido Branco é uma liga ferro-carbono-silício, com teor de silício menor que o cinzento e que, devido a composição química e às condições de fabricação, apresenta o carbono combinado na forma de Fe_3C , resultando numa fratura de coloração clara. Este material é obtido pela adição de elementos de liga, geralmente o cromo. O ferro fundido branco apresenta elevada dureza e resistência ao desgaste, decorrente da alta quantidade de carbonetos presentes.

Devido a suas características mecânicas é empregado em revestimentos e bolas para moinhos, cilindros de laminação para borracha, vidro, plásticos e metais, peças empregadas em equipamento para britagem de minérios e moagem de cimento.

Figura 10 - Forma do Carbono no Ferro Fundido Branco



Fonte: ASM Handbook, volume15 (2010).

Na figura 10 o P representa a perlita e o C os carbonetos. No ferro fundido branco, o carbono está combinado na forma de carbonetos (de ferro ou outros) ou como perlita. Não há carbono livre na forma de grafita.

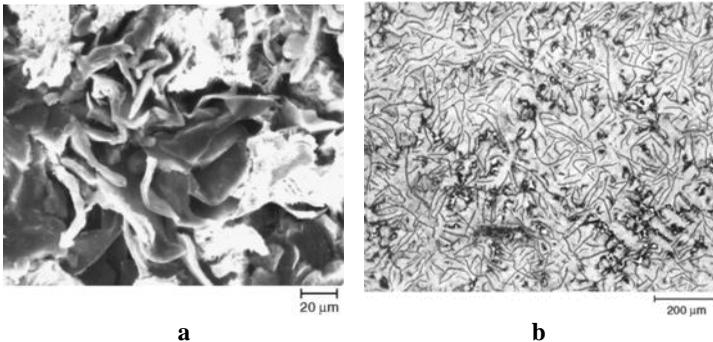
2.2.2 Ferro Fundido Cinzento

Apresenta o carbono na forma de lamelas de grafita - Figura 11. Dentre as propriedades apresentadas pelos ferros fundidos cinzentos destacam-se:

- Menor ponto de fusão comparado as demais ligas de ferro carbono, principalmente os aços,
- Possibilidade de moldagem em areia a base de sílica, de baixo custo comparadas as areias especiais empregadas na moldagem de aços,
- Usinabilidade – menor desgaste das ferramentas de usinagem – quando comparados com outros ferros fundidos como o nodular e o vermicular ou aços de baixo carbono.
- Resistência mecânica inferior aos demais ferros fundidos;
- Resistência ao desgaste proporcional ao percentual de perlita presente na microestrutura;
- Capacidade de amortecimento de vibrações.

Devido a suas características mecânicas, o ferro fundido cinzento é empregado em elementos estruturais de máquinas operatrizes, tais como barramentos, cabeçotes, mesas e peças submetidas a solicitações térmicas como discos de freio, blocos de motor, entre outros. (COLPAERT – 2008).

Figura 11 - Forma da Grafita no Ferro Fundido Cinzento

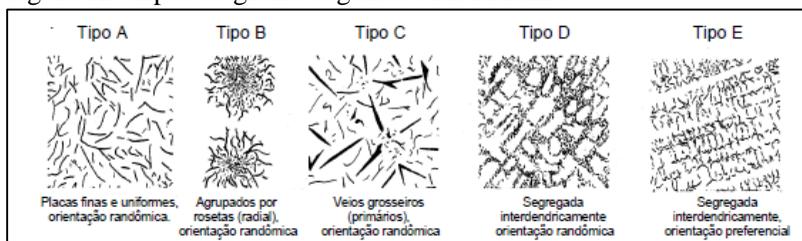


Fonte: ASM Handbook, Volume 9 – (2010).

A Figura 11 apresenta: a) grafita do ferro fundido em forma de placas de carbono. Em b): fotomicrografia de um ferro fundido. As placas de grafita se apresentam em linhas devido ao sentido do corte da amostra.

A Figura 12 mostra a classificação da grafita segundo ASTM A247 - 10, aumento padrão é de 100X para efeito de comparação.

Figura 12- Tipos de grafita segundo a ASTM A247.



Fonte: adaptado de ASTM A247 – 10.

O tipo A apresenta distribuição mais uniforme e são os mais utilizados nas especificações dos produtos. O tipo B possui baixo limite de resistência à tração devido ao agrupamento das lamelas de grafita. O tipo C apresenta características intermediárias entre A e B. Os tipos D e E apresentam maiores limites de resistência e dureza que os demais tipos, porém esta dureza dificulta a usinagem. São geradas normalmente por resfriamento muito rápido das peças no molde ou em regiões finas das peças. Mais de um tipo pode ser encontrado na mesma peça dependendo de suas geometrias.

Os ferros fundidos são especificados por classes. A tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas especificadas pela ASTM A159 – 83 para os ferros fundidos cinzentos.

Tabela 1 -Propriedades Mecânicas das Classes de Ferro Fundido cinzento de acordo com a norma ASTM A159 – 83 (2011).

Grade	Faixa de Dureza [HB]	Limite Mínimo de Resistência [kgf/mm ²]	Resistência Mínima ao Cisalhamento [kg]	Flexão [mm]
G1800	143 – 187	14,0	780	3,6
G2500	170 – 229	17,5	910	4,3
G3000	187 – 241	21,0	1000	5,1
G3500	207 – 255	24,5	1090	6,1
G4000	217 – 269	28,0	1180	6,9

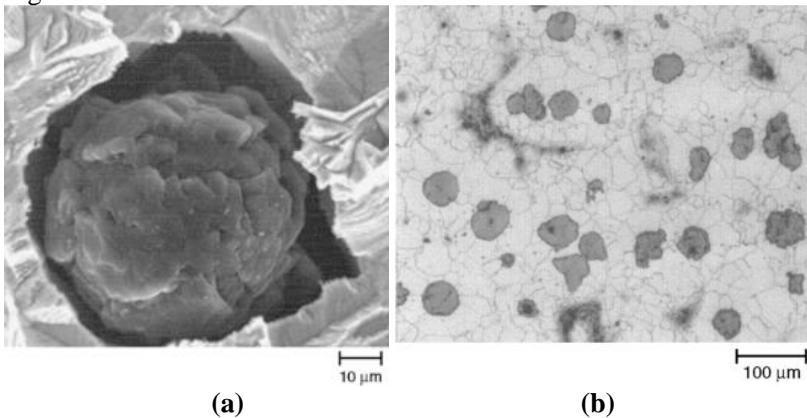
Fonte: adaptado pelo autor de ASTM A159-83 (2011)

2.2.3 Ferro Fundido Nodular

O Ferro Fundido Nodular é uma liga ferro-carbono-silício, apresenta a grafita na forma esferoidal, resultante do tratamento de nodularização (nodulização) realizado no material em estado líquido através principalmente da adição de magnésio e cério. Possui elevada resistência mecânica, tenacidade e ductilidade. Seu limite de escoamento é mais elevado do que nos ferros fundidos cinzentos e nos aços carbono sem elementos de liga.

As aplicações compreendem peças sujeitas a pressão e peças que exijam maior resistência ao choque. Comparados aos ferros fundidos cinzentos, possuem menor capacidade de transferência de calor e menor capacidade de amortecimento de vibrações. (ASM, Volume 9; 2010).

Figura 13 - Forma da Grafita nos Ferro Fundido Nodular



Fonte: ASM Handbook, Volume 9 (2010).

A Figura 13 mostra: a) grafita em forma de nódulo (esfera). b) fotomicrografia de uma amostra de ferro fundido nodular. As esferas escuras referem se a grafita e a parte clara a matriz metálica.

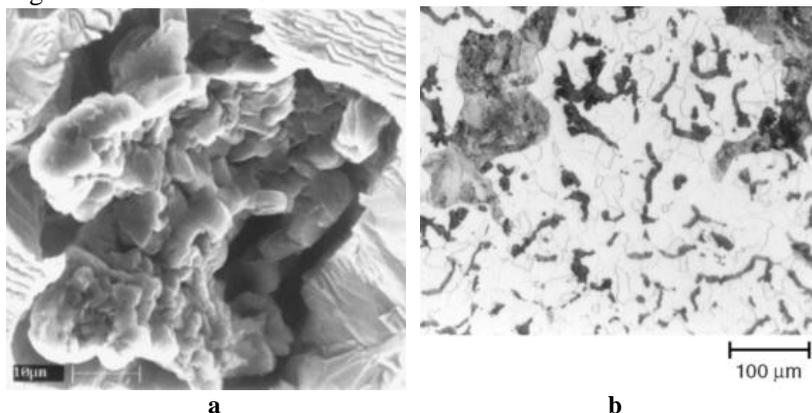
2.2.4 Ferro Fundido Vermicular

Também denominado de Ferro Fundido de Grafita Compacta, é uma liga ferro-carbono-silício que apresenta a grafita na forma compactada ou vermicular – Figura 14. Situa-se na transição do ferro fundido cinzento para o nodular. As propriedades obtidas neste ferro são intermediárias as do ferro cinzento e nodular. Esta forma de grafita é

obtida utilizando-se os mesmos elementos da nodularização, porém em menores quantidades.

A principal vantagem deste material está em se obter um ferro fundido com maior resistência e tenacidade (próximas ao nodular), enquanto se mantém a condutividade térmica elevada (característica dos ferros fundidos cinzentos). Este material tem sido amplamente aplicado na fabricação de blocos de motores a diesel (ASM, Volume 9 - 2010).

Figura 14 - Forma da Grafita no Ferro Fundido Vermicular



Fonte: ASM Handbook, Volume 9 (2010).

A Figura 14 mostra: a) forma da grafita vermicular ou compactada. Em b) fotomicrografia de uma amostra de ferro fundido vermicular. Devido ao sentido do corte as grafitas se apresentam bidimensionais na forma de linhas.

2.3 INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA NOS FERROS FUNDIDOS:

2.3.1 Influência dos elementos químicos nos ferros fundidos

Segundo Colpaert (2008), existem elementos químicos com potencial grafitizante positivo – favorecem a formação da grafita e elementos com potencial grafitizante negativo – favorecem a formação de carbonetos. Estes elementos alteram os intervalos entre as temperaturas do eutético estável e metaestável. Sua aplicação depende das microestruturas necessárias para obter as propriedades mecânicas desejadas.

- Elementos grafitizantes: carbono, estanho, fósforo, silício, alumínio, cobre e níquel.

- Elementos formadores de carbonetos: manganês, cromo, molibdênio e vanádio.

Elementos químicos exercem influência na microestrutura e nas propriedades dos ferros fundidos. Além dos elementos normais como C, Si, Mn, P e S, podem ser adicionados outros elementos aos ferros fundidos para se obter estruturas e propriedades desejadas. (CHIAVERINI – 2012).

O efeito da composição química sobre a formação da grafita ou cementita depende, principalmente, do efeito dos elementos de liga sobre a estabilidade da cementita. (COLPAERT – 2008).

Compilando os trabalhos de SANTOS, et al. (1991), COLPAERT (2008), CHIAVERINI (2012) e ASM Volume 15 (2010), tem-se como influência dos elementos químicos nos ferros fundidos:

- Carbono: elemento mais importante do ferro fundido, é responsável pelas propriedades mecânicas. A medida que seu teor aumenta, facilita a obtenção de lamelas de grafita. Nos ferros fundidos brancos o aumento do carbono é acompanhado do aumento da dureza devido a formação de mais cementita.

- Silício: atua como grafitizante tanto na solidificação como nas transformações no estado sólido, reduz a estabilidade da cementita e favorece sua decomposição em grafita e ferrita. Nos ferros fundidos encontra-se em solução sólida na ferrita. É utilizado na inoculação dos ferros fundidos para facilitar a formação da grafita.

- Manganês: dificulta a decomposição da cementita além de neutralizar o efeito do enxofre impedindo que este se ligue ao ferro formando sulfeto de ferro. Em teores elevados promove a formação de carbonetos na solidificação e de perlita na reação eutetóide. O teor de Mn deve ser, geralmente, 1,7 vezes o teor de S, mais 0,12%.

- Enxofre: forma sulfetos de ferro que segregam para os contornos das células eutéticas e atua como fragilizante das propriedades mecânicas. É neutralizado pela adição de manganês. Sua presença é importante para a formação da grafita e a quebra do cavaco na usinagem.

- Fósforo: Atua como promovedor fraco de grafita na solidificação e de perlita na reação eutetóide. Aumenta a fluidez do metal. Em teores elevados pode formar fosfetos ou eutéticos binários prejudiciais aos ferros fundidos.

- Cromo: Forma carbonetos acima de 0,30% em peças de seções finas. Em pequenos teores facilita a obtenção de uma estrutura completamente perlítica sem formação de carbonetos livres nos contornos das células eutéticas ou sob a forma de ledeburita.

- Molibdênio: aumenta a resistência à tração, a dureza e o módulo de elasticidade. Em baixos teores, favorece a obtenção de ferrita na matriz. Aumenta a temperabilidade e é também usado para aumentar as propriedades a temperaturas elevadas.

- Níquel: elemento grafitizante médio, diminui a tendência a formação de carbonetos na solidificação. Na reação eutetóide atua como perlitizante e tende a aumentar a dureza e a resistência à tração.

- Cobre: possui ação grafitizante, reduz a tendência à formação de regiões coquilhadas. É eficiente perlitizante para eliminar a ferrita residual e aumentar a resistência e a dureza.

- Estanho: atua como forte estabilizador da perlita, sem apresentar tendência para formação de carbonetos na solidificação e sem afetar significativamente a morfologia da grafita. É usado para eliminar as áreas de ferrita que aparecem junto à grafita de super-resfriamento. O seu efeito é mais efetivo em ferros fundidos hipoeutéticos. É o elemento mais utilizado como perlitizante na produção de ferros fundidos perlíticos comuns.

- Vanádio: O vanádio tem um efeito favorável nas propriedades a quente do ferro fundido cinzento. Na reação eutetóide atua como estabilizador e refinador da perlita

- Titânio: em baixos teores atua como grafitizante, refina a grafita e reduz a tendência ao coquilhamento. Em teores elevados atua como estabilizador de carbonetos.

- Alumínio: quase sempre está presente como residual nos ferro-ligas, ou eventualmente em outras matérias-primas. Em baixos teores, menores que 0,25%, tem forte ação grafitizante tanto durante a solidificação como no estado sólido. Em teores elevados (acima de 4%) pode atuar também como estabilizador de carbonetos.

2.4 ADIÇÃO DE ANTIMÔNIO COMO ELEMENTO DE LIGA

Quando em estado metálico bruto, é um sólido cristalino, porém friável, de coloração branca-acinzentada e brilho metálico, sendo bom condutor térmico e elétrico. Apresenta estrutura cristalina hexagonal de empacotamento compacto (17 átomos dispostos em 6 vértices de cada

face hexagonal, com 1 átomo no centro e mais 3 átomos centrais à estrutura hexaédrica dispostos de forma triangular).

O antimônio normalmente é usado em ligas com chumbo e estanho na fabricação de metal antifricção, sendo amplamente empregado na preparação de placas para baterias, revestimento de cabos e tipos de impressão. Compostos de antimônio são também empregados na indústria da borracha e em pigmentos na fabricação de vidros. Em pequena quantidade, seus compostos entram na elaboração de produtos farmacêuticos (ATKINS – 2012). A tabela 2 apresenta algumas propriedades do antimônio e do estanho.

Tabela 2 - Propriedades do Antimônio e do Estanho

Propriedade	Antimônio	Estanho
Número atômico:	51	50
Peso atômico:	121,75	118,69
Ponto de fusão:	630,5°C	232°C
Ponto de ebulição:	1.380°C	2270°C
Peso Específico:	6700 kg/m ³	7400 kg/dm ³

Fonte: Atkins (2012).

2.4.1 Influência do antimônio sobre as propriedades dos ferros fundidos

O antimônio está presente no ferro gusa em percentuais próximos a 0,02% em peso e, pode advir também da sucata de aço. O antimônio tende a estabilizar a perlita, reduzir o limite de resistência a tração a resistência ao impacto e aumenta a dureza do material. (ANGUS, H.T, - 1976).

O estanho em percentuais de 0,04% a 0,1% em peso e o antimônio em quantidades menores que 0,03% em peso, possuem características especiais como excelentes estabilizadores da perlita. Estes elementos promovem uma barreira a difusão do carbono e seus efeitos são tão potentes que produzem uma matriz perlítica com uma distribuição refinada do carbono em ferros fundidos. Porém, a adição destes elementos acima dos valores citados pode causar fragilidade nos materiais (ELLIOT, R; 1988).

SANTOS, A.B.S. *et al* (1981) estudaram adições de 0,12% a 0,93% de antimônio em ferros fundidos nodulares de composição química próxima a eutética, no estado bruto de fusão e concluíram que

teores a partir de 0,12% de Sb promoveram matrizes totalmente perlíticas. Quando a adição ficou entre 0,12% e 0,18% Sb, ocorreu a formação de uma espécie de anel de grafita ao redor dos nódulos. Maiores adições promoveram a formação de grafita lamelar. Os limites de resistência à tração especificados em norma não foram alcançados.

Quantidades residuais de chumbo e antimônio tem efeito prejudicial sobre as propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento, pois promovem a formação de tipos de grafitas anormais responsáveis pela redução da resistência a tração do material. A formação destas grafitas está relacionada a segregação para o contorno de grãos de metais não ferrosos de baixo ponto de fusão. À medida que se aumenta a seção dos fundidos, a influência desta segregação é mais prejudicial devido ao maior tempo de solidificação (SY – 1963).

Elementos como o estanho e o antimônio aumentam a possibilidade de coquilhamento durante a solidificação porque aproximam as linhas de solidificação do eutético estável (transformação do metal líquido em austenita e grafita) e do eutético metaestável (transformação do metal líquido em austenita e cementita). Como a formação da cementita é mais rápida que a da grafita, a transformação metaestável é facilitada (KANNO et al – 2005).

Antimônio em percentuais abaixo de 0,1% é provavelmente o mais efetivo elemento disponível para promover a formação de perlita em ferros fundidos cinzentos. A perlita formada é muito estável mesmo quando submetido a repetidos ciclos térmicos acima de 700°C. Ferros fundidos tratados com antimônio irão apresentar 200% a mais de resistência quando submetidos a ciclo térmicos (antes que ocorram falhas por crescimento de descontinuidades e oxidação) quando comparados a ferros fundidos sem adição do mesmo. (BCIRA – 1988)

O aumento da adição de antimônio até a obtenção de uma estrutura totalmente perlítica é acompanhado pelo aumento da dureza e da resistência nos ferros fundidos. Acima deste valor, há perda da resistência a tração e da resistência ao impacto. Para ferros fundidos nodulares sem a presença de cério, o antimônio deve ser usado em valores máximos de 0,005% e outros elementos deletérios devem ser criteriosamente controlados, devido ao risco de degeneração da grafita. O emprego de antimônio na produção de peças em ferro fundido nodular de seções espessas é recomendado para a prevenção da formação de grafita *chunky* (BCIRA – 1988). Grafita *chunky* é uma deformação da grafita nodular, que reduz o limite de resistência à tração devido a formação de arestas ao redor da grafita que geram pontos de concentração de tensão na matriz metálica.

2.5 TRIBOLOGIA

Tribologia é a ciência que estuda a interação de superfície em movimento relativo. Foi introduzido por um grupo de pesquisadores do Departamento de Educação e Ciência da Inglaterra, através de um relatório chamado *Lubrication (Tribology)* em 1966, apresentando importante conteúdo científico, tecnológico e econômico (GWIDON et al. – 2006).

Quando duas superfícies de engenharia estão em movimento relativo, deseja-se conhecer o coeficiente de atrito entre elas e o desgaste que ocorre neste par. Estes dois valores dependem:

- Das cargas aplicadas,
- Das geometrias das partes em contato,
- Da natureza do par de corpos,
- Do meio ambiente,
- Da existência ou não de um terceiro corpo entre eles.

Estes elementos compõem o sistema tribológico, cujas morfologias dos danos superficiais de contato mostram o resultado do tribocontato. Este por sua vez é aplicado em várias etapas consecutivas e por diferentes micro mecanismos em regime cumulativo. A tribografia é definida como a descrição micrográfica de uma modificação topográfica e estrutural causada pelo tribocontato (ANDERSON, 1992).

Entre duas superfícies em contato, o contato real deve ser analisado a nível microscópio onde por melhor que seja o acabamento superficial é de se esperar que a área real de contato seja muito menor que a área nominal. Isto se deve ao fato de que o contato ocorrerá somente nos picos das heterogeneidades superficiais e nas asperezas. Com a aplicação de uma força no sentido normal à superfície é de se esperar um aumento na área de contato devido a deformação destes picos e asperezas (SILVA – 2000). De uma forma geral e, de acordo com a norma DIN 50320, podem ser classificados em quatro mecanismos de desgaste: adesão, abrasão, fadiga superficial e reação triboquímica.

2.6 ATRITO

O atrito é definido pela resistência que um corpo desenvolve quando existe movimento relativo de 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).

Em termos de energia, o atrito é um processo onde energia cinética é convertida em outras formas de energia, como: térmica, acústica, ótica, elétrica e mecânica. O balanço da energia dissipada depende: da natureza dos corpos e do tribocontato.

A energia de atrito é em princípio dissipada através de deformações nas camadas superficiais por mecanismos elásticos, plásticos, viscoelásticos e/ou através de microfaturas de partículas da superfície sob modo de cisalhamento ou uniões entre interfaces adesivas, bem como sob ação de um eventual terceiro corpo presente entre as superfícies (SILVA – 2000). Os mecanismos básicos de atrito são a adesão e a deformação plástica.

A equação básica do coeficiente de atrito pode ser descrita como:

Coeficiente de atrito [μ]

$$\mu = F/N \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

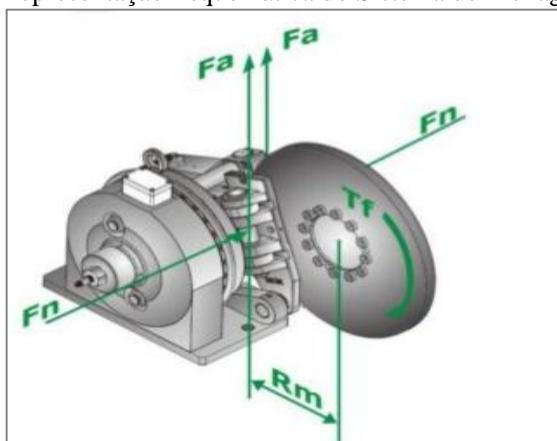
μ é o coeficiente de atrito, (adimensional);

F é a força de atrito

N é a força normal.

A figura 15 apresenta a representação esquemática da aplicação das forças em um sistema de frenagem industrial.

Figura 15 -Representação Esquemática do Sistema de Frenagem



Fonte: Tec Tor (2015).

A figura 15 apresenta um esquema de frenagem industrial. Fa se refere a Força de atrito, F_n a força Normal, R_m o raio médio e T_f o torque de frenagem.

2.7 DESGASTE ADESIVO

Ocorre quando o desgaste é causado pela união pontual entre superfícies sólidas em contato, gerando material de transferência entre as superfícies ou perda de uma das superfícies. Como a área de contato é pequena entre as asperezas, ocorrem altas pressões pontuais levando a deformação plástica destas e provocando interação e união entre as asperezas.

Esta união é rompida no deslizamento relativo das superfícies transferindo material entre elas ou gerando partículas de desgaste (MECKLENBURG; BENZING – 1976).

Forças interfaciais causadas por adesão predominam somente quando as superfícies entre as asperezas se encontram limpas, gerando a soldagem a frio, formando uma união entre os átomos através da interface. Este fenômeno pode ocorrer sem carga, a força adesiva dependerá da proximidade entre as superfícies, do potencial de adsorção superficial do material e da afinidade entre as superfícies. A forte adesão entre superfícies deslizantes é fator importante somente quando existem superfícies limpas, em alto vácuo, como no espaço. A representação deste desgaste é mostrada na figura 16(a).

2.8 DESGASTE ABRASIVO

É o desgaste gerado por partículas duras e protuberantes atuando contra a superfície sólida em movimento. O mecanismo abrasivo é provocado pela remoção do material, pela ação de eventuais partículas duras presentes entre as superfícies com movimento relativo, ou embutidos em uma das superfícies de contato. É de forma simplificada um processo de riscamento (ASTM G40 – 2013; MECKLENBURG; BENZING, 1976). A figura 16 (b) representa este tipo de desgaste.

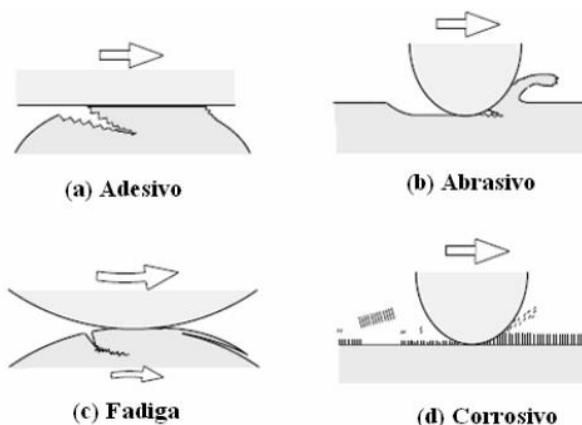
2.9 FADIGA SUPERFICIAL

Fadiga de contato ou desgaste por rolamento, é o desgaste decorrente do contato por rolamento entre duas superfícies sólidas. Normalmente é causado pelo alto número de repetições do movimento entre as superfícies. Este tipo de desgaste é ilustrado na figura 16 (c).

2.10 REAÇÃO TRIBOQUÍMICA

Neste tipo de desgaste são formados produtos de reação devido às interações químicas e eletroquímicas. Inicia com adesão entre as superfícies e a taxa de remoção de material é relativamente alta. A medida que filmes de óxidos se formam as taxas de desgaste diminuem. Quando o filme é rompido se reinicia o processo por adesão e formação de novo filme de óxido. Ocorre em meios corrosivos líquidos ou gasosos. A representação deste tipo de desgaste é mostrado na figura 16 (d).

Figura 16 – Representação Esquemática dos Tipos de Desgaste



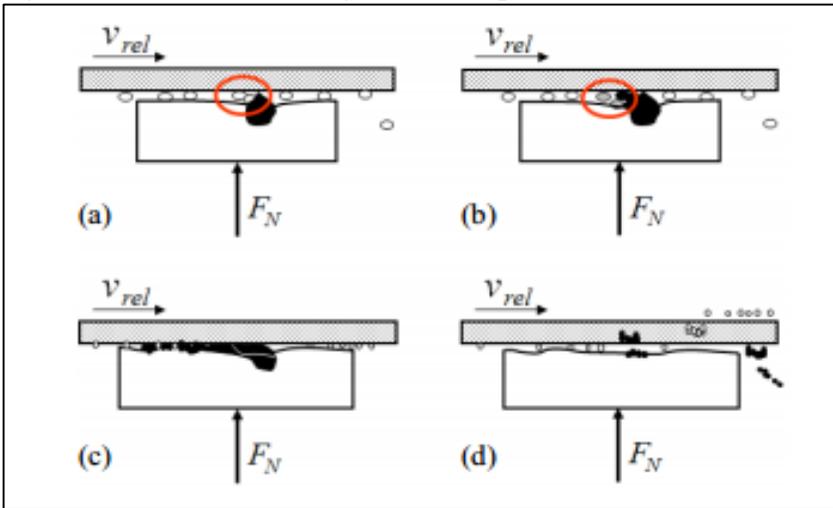
Fonte: Kato (2001).

A figura 16 apresenta um esquema com os tipos de desgaste por: (a) adesão, (b) abrasão, (c) fadiga de contato e (d) corrosão.

O mecanismo predominante na interface entre o disco de freio e a pastilha é o contínuo crescimento e destruição do material de enchimento da pastilha.

A figura 17 apresenta o esquema proposto por OSTERMEYER et al, (2006) para explicar o mecanismo de desgaste entre as pastilhas e o disco de freio.

Figura 17 - Mecanismo de desgaste entre as pastilhas e o disco de freio.



Fonte: Ostermeyer, 2006. [v_{rel} = velocidade relativa e F_N = força normal].

Figura 17: Em (a) e (b) é demonstrado o aumento do material entre o par, causado pela aglomeração de debris nas faces dos materiais de maior dureza da pastilha como carbeto de silício (SiC) e óxido de silício (SiO₂). Observam-se altas temperaturas nestes pontos, causadas pelo fato das partículas carregarem a maior parte da força de atrito devido a processos de fusão e sinterização com a pastilha e o disco.

Estas estruturas resistentes ao desgaste possuem propriedades que diferem significativamente dos materiais macios de que compõem o restante da matriz da pastilha. Devido à perda de estabilidade e a ocorrência e propagação de trincas estes materiais apresentarão redução nos tamanhos das partículas e serão eliminadas do sistema conforme apresentado na Figura 17 (c) e (d). Este mecanismo contínuo mantém num circuito de interação entre as variáveis físicas de aquecimento, desgaste e resistência ao deslizamento.

2.11 FRENAGEM AUTOMOTIVA

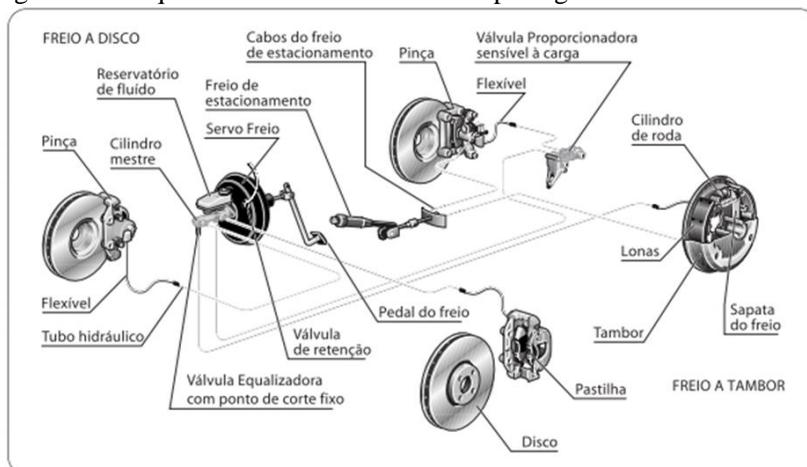
Devido à influência direta na segurança veicular, o sistema de frenagem é item crítico no projeto de um automóvel. Os freios são, em essência, dispositivos de conversão de energia, transformando energia cinética do veículo em energia térmica, entre outras formas de energia, proporcionalmente a sua quantidade 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 freio.

Durante a frenagem as superfícies dos pares analisadas são caracterizadas por um estado de temperaturas não estáveis em regime de altas pressões produzindo temperaturas pontuais que podem ultrapassar os 800°C na região de contato entre as asperezas (ANDERSON;1992).

O sistema básico de freio automotivo para veículos consiste em um sistema hidráulico acionado pelo pedal e intensificado pelo servo freio. Na figura 18 está representado um sistema típico de freio com discos ventilados na dianteira, disco sólido na roda traseira direita e tambor na roda traseira esquerda, além do freio de estacionamento.

Figura 18 - Esquema de freio de veículos de passageiros.



Fonte: Piquet Pneus – 2015.

A Figura 18 mostra que ao se acionar o pedal de freio, a força é amplificada pelo servo freio que atua o cilindro mestre. Este por sua vez aciona os pistões situados nas rodas que pressionam as pastilhas de freio contra o disco ou as lonas contra o tambor.

A força de frenagem é aplicada 70% nas rodas dianteiras e 30% nas rodas traseiras. O freio serve para parar as rodas e o atrito destas com o chão é que irá parar o veículo.

A parte útil dos discos de freio representa menos de 10% do seu peso total. Uma pequena parte da pista de frenagem é usada, sendo o restante do disco descartado. A figura 19 mostra um disco substituído onde é possível observar a parte desgastada na pista de frenagem.

Figura 19 - Desgaste na Pista de Frenagem do Disco de Freio



Fonte: Acervo do autor (2015).

A seta na Figura 19 mostra a pista de frenagem de um disco de freio com desgaste. Ao se atingir a espessura mínima o disco deve ser substituído, mesmo tendo gasto menos de 10% de seu peso original. A espessura mínima que indica quando o disco deve ser trocado é gravada no diâmetro externo da pista de frenagem.

2.12 TIPOS DE DISCOS DE FREIO

Existem basicamente 2 tipos de discos de freio. Os discos ventilados – figuras 20 e 21 e os discos sólidos – figura 22.

Figura 20 - Disco de Freio Ventilado



Fonte: Acervo do autor (2015).

Os discos ventilados possuem 2 pistas de frenagem separadas por nervuras (aletas). Esta configuração permite a passagem de ar entre as pistas aumentando a eficiência no resfriamento do disco.

Figura 21 - Disco ventilado fabricado em compósitos de carbono



Fonte: BREMBO (2015).

Figura 21; Disco de freio ventilado, construído em compósitos de carbono e utilizado em carros de competição. Além de carros, estes freios apresentam eficiência de frenagem somente acima de 350°C.

Figura 22 - Disco de Freio Sólido



Fonte: Acervo do autor(2015).

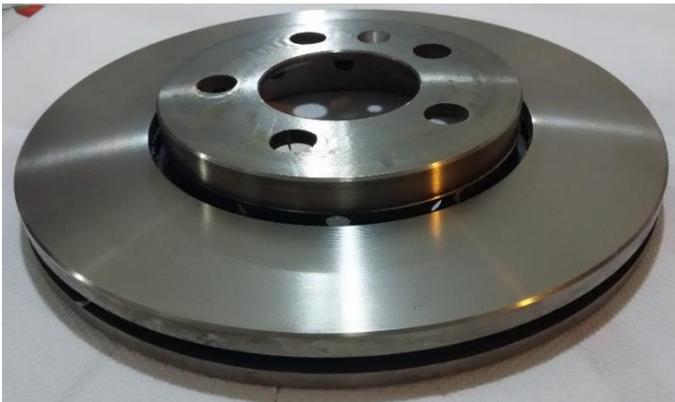
Nos discos sólidos a pista é maciça não existindo a passagem de ar para o resfriamento. Este modelo de disco tem sido descontinuado, sendo substituído pelo disco ventilado.

3 METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 FUNDIÇÃO DOS DISCOS DE FREIO

Para avaliação das propriedades tribológicas do ferro fundido cinzento classe FC25, foram fabricados discos de freio ventilados, modelo D35E – utilizado no veículo VW/Golf geração 4. Estes discos foram produzidos pela Metalúrgica DS Ltda. A peça fundida e usinada é apresentada na Figura 23.

Figura 23 - Disco de Freio Fundido Utilizado nos Testes



Fonte: Acervo do autor (2015).

Para a preparação destes discos, foram fundidos 1.000 kg de metal em um forno a indução com composição química típica da classe G2500 da ASTM A159 – 83 (2011). Para avaliar o efeito do antimônio sobre as propriedades tribológicas deste ferro fundido, foram preparadas amostras com diferentes teores deste elemento durante a fusão. Assim, gerando quatro padrões de amostras:

- Amostra 1: sem adição de antimônio, utilizada como amostra de referência;
- Amostra 2: com 0,010% de antimônio,
- Amostra 3: com 0,025% de antimônio,
- Amostra 4: com 0,040% de antimônio.

As composições químicas foram determinadas via espectrometria de emissão óptica (Spectromax).

O antimônio foi adicionado ao ferro base no forno após o vazamento das amostras de referência de maneira a se obter os percentuais especificados. Foi utilizado antimônio com pureza de 99% e o rendimento na adição é de 95%. Os moldes utilizados foram fabricados em areia aglomerada com resina - processo *cold box*. O processo recebe o nome de *cold box* – caixa fria – devido as reação de cura da resina acontecer a temperatura ambiente.

Foram produzidos além das peças, corpos de prova para ensaio de resistência à tração – de acordo com a ASTM A48 / A48M e corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e alturas de 6, 12 e 25 mm para ensaio de desgaste pino sobre disco.

As amostras produzidas tiveram suas microestruturas avaliadas via metalografia, onde foram lixadas e polidas com suspensão de alumina de 1 μ m. Estas amostras foram então caracterizadas via microscopia óptica (Olympus BX50). Para a caracterização da grafita (tamanho, distribuição, forma) as amostras foram observadas sem ataque metalográfico. Para a identificação das fases presentes, as amostras foram então atacadas com Nital 2%.

As micrografias foram avaliadas com um software de análise de imagens (MicroLab), a partir de três imagens de referência para cada condição observada.

Para avaliação da resistência mecânica, as amostras foram ensaiadas em tração, segundo a norma ASTM A370 (velocidade de 10 mm por minuto), e também por medidas de dureza por microindentação (Futuretech HVM), sendo os resultados indicados a média de três medições.

Para a caracterização do comportamento de desgaste, as amostras com diâmetro igual a 50mm e com espessuras de 12mm foram avaliadas em um ensaio de desgaste adesivo, do tipo pino sobre disco, onde foram aplicadas: rotação igual a 500 rpm, 50N de carga normal e 350m de pista de desgaste. Os ensaios foram executados em temperatura ambiente e com um pino de metal duro com diâmetro de 6 mm e ponta esférica com raio 5 mm. Neste ensaio foram avaliadas as variações de massa no final do teste, bem como as características das pistas de desgaste obtidas.

Ainda, para avaliar as características funcionais do desgaste, foram executados nos discos de freio produzidos, um teste funcional na empresa Fras-Le SA, localizada em Caxias do Sul. O dinamômetro simula a aplicação real do disco. O teste se divide em seis etapas: na primeira à temperatura de 80°C são realizadas 60 frenagens com pressão de 6 MPa para ajuste entre a pastilha e o disco. São então realizadas 500

frenagens em cada etapa de 2 a 6 com desaceleração de 2 m/s^2 nas temperaturas de 100°C , 200°C , 300°C , 400°C e 100°C . O aquecimento é obtido pelo contato das pastilhas com o disco de freio. As pastilhas são medidas em cada etapa do teste.

Para a caracterização da rugosidade, foi utilizado um rugosímetro de contato (Mitutoyo, SJ301), sendo que para cada amostra foram avaliadas a rugosidade antes e após os ensaios de desgaste. Os resultados indicados são a média de 03 medições.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 3 apresenta os resultados de composição química obtidos nas amostras e corpos de prova. Uma amostra do metal em cada composição química, foi retirada da mesma panela de vazamento das peças e posteriormente analisada. O ferro base se refere a composição química do metal no forno de fusão, antes do vazamento mais silício é incorporado ao metal através do processo de inoculação que visa a obtenção da grafita lamelar. Isto explica o menor teor de silício no ferro base em relação às amostras.

Tabela 3 - Composições químicas utilizadas

	C	Si	Mn	P [máximo]	S [máximo]	Sb	Carbono Equivalente
ASTM A159 – 83 Classe G2500	3,20 - 3,50	2,00 – 2,40	0,60 – 0,90	0,20	0,15	N.E	3,9 – 4,4
Ferro Base (Forno)	3,48	1,75	0,74	0,05	0,03	0,0058	4,08
Amostra 1 (0% Sb)	3,45	1,94	0,73	0,05	0,041	0,0053	4,11
Amostra 2 (0,010% Sb)	3,40	1,94	0,73	0,05	0,037	0,012	4,06
Amostra 3 (0,025% Sb)	3,41	1,93	0,73	0,05	0,044	0,021	4,07
Amostra 4 (0,040% Sb)	3,38	1,93	0,73	0,049	0,041	0,043	4,04

Fonte: Elaborado pelo autor (2015). NE – Não especificado na Norma.

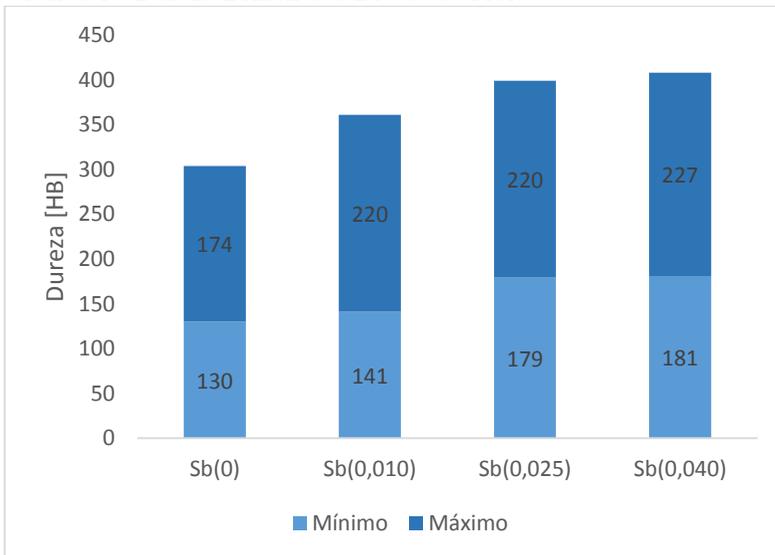
De acordo com a Classe G2500, o silício encontra-se fora da faixa, entretanto isto é proposital, uma vez que este material é também utilizado para atender a classe G3000, onde a especificação é de 1,90 % a 2,3% de Si. Isto se deve a necessidade de se produzir peças de dimensões diferentes na mesma fornada. A diferença entre o silício mínimo especificado na norma e o encontrado nas amostras não é significativo do ponto de vista de composição química.

No restante da composição química, todos os elementos estão dentro da especificação da classe G2500 segundo a norma ASTM A159 – 83.

4.1 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Foram realizadas 5 medições de dureza Brinell em cada disco de freio produzido. O gráfico 1 apresenta a dureza máxima e mínima encontrada para cada adição de antimônio. As peças foram ensaiadas com carga de 3000kg e esfera de 10mm de diâmetro.

Gráfico 1 - Dureza Brinell dos Discos de Freio



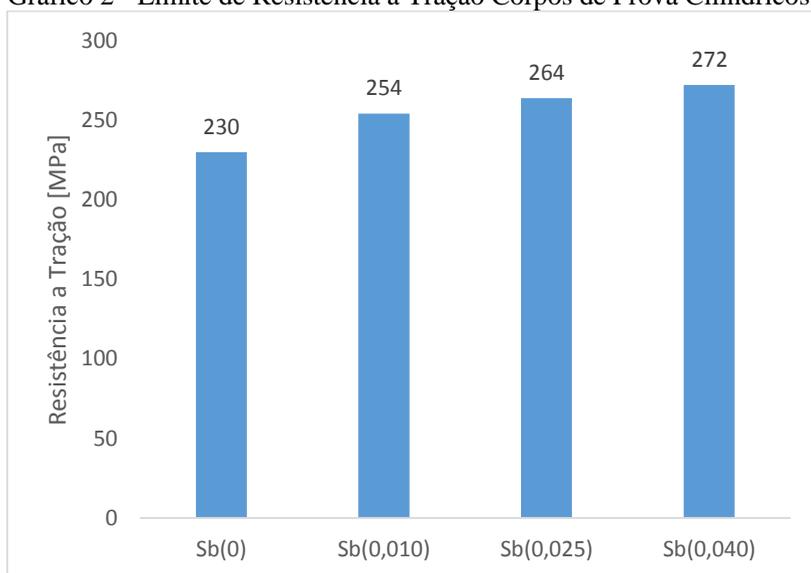
Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

O gráfico 1 apresenta as durezas – mínima e máxima – encontradas em cada amostra. A faixa de dureza especificada na norma ASTM A159-83 é de 170 HB a 229 HB. As menores durezas foram encontradas nas amostras Sb(0) e Sb(0,010) que apresentaram ferrita na

matriz. As medições foram realizadas na pista de frenagem, devido a ser a área de estudo do desgaste, entretanto, o local de medição especificado está localizado no espelho (região de fixação do disco de freio no cubo de roda) que por sua vez possui espessura menor que as pistas de frenagem e apresenta dureza dentro da faixa especificada pela norma para todas os teores de antimônio.

Os corpos de prova cilíndricos vazados com o mesmo metal das peças foram usinados e ensaiados em tração, segundo a norma ASTM A370. Os valores de resistência encontrados estão plotados no gráfico 2.

Gráfico 2 - Limite de Resistência a Tração Corpos de Prova Cilíndricos



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

O Gráfico 2 mostra que o aumento da resistência mecânica está associado ao aumento do percentual de perlita na matriz provocado pelo aumento do teor de antimônio.

Os resultados obtidos na caracterização mecânica atendem ao especificado para a Classe G2500 – mínimo 175Mpa – de acordo com a norma ASTM A159 – 83 (2011).

4.2 CARACTERIZAÇÃO METALOGRAFICA

4.2.1 Avaliação das microestruturas

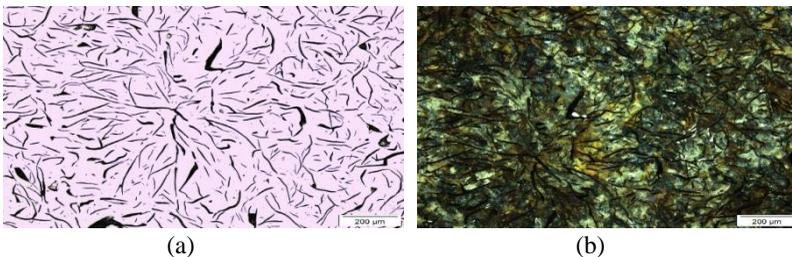
Na caracterização da grafita (tamanho, distribuição e forma) as amostras foram observadas via microscopia ótica, sem ataque químico. Para a identificação das fases presentes, as amostras foram então atacadas com Nital 2%.

As micrografias foram avaliadas com o software de análise de imagens (MicroLab), a partir de três imagens de referência para cada condição observada.

4.2.2 Análise metalográfica dos discos de freio

As figuras de 24 a 27 apresentam as micrografias das amostras retiradas dos discos de freio, nas condições: (a) sem ataque para visualização da grafita e (b) com ataque (Nital 2%) para visualização da matriz metálica.

Figura 24 - Micrografia da amostra Sb(0)



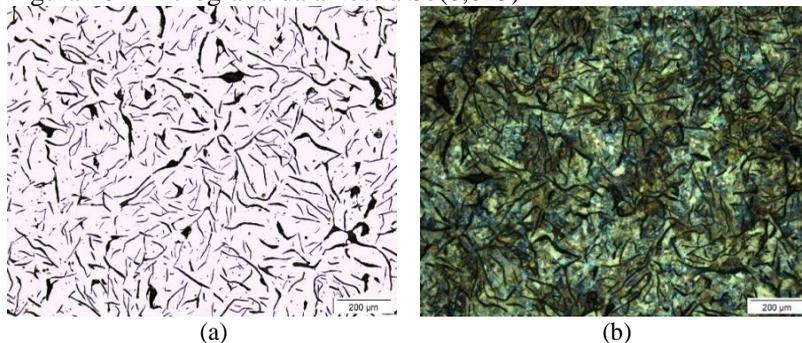
Fonte: acervo do autor (2015).

Figura 25 - Micrografia da amostra Sb(0,010)



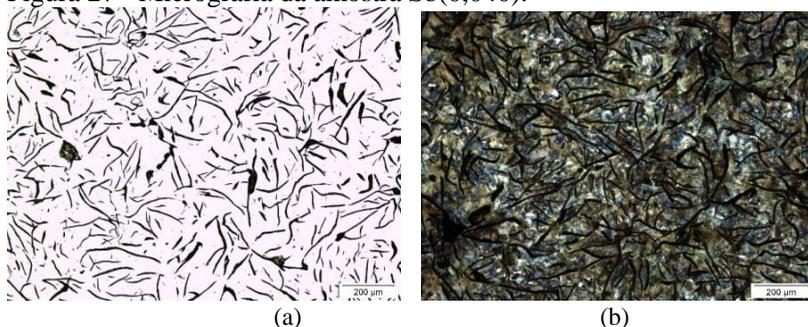
Fonte: acervo do autor (2015).

Figura 26 - Micrografia da amostra Sb(0,025)



Fonte: acervo do autor (2015).

Figura 27 - Micrografia da amostra Sb(0,040):



Fonte: acervo do autor (2015).

Observa-se para as 4 composições químicas homogeneidade do tamanho, forma e distribuição da grafita. A matriz predominante é perlítica com residuais de ferrita nas amostras Sb(0) e Sb(0,10). Na amostra Sb(0,040) é possível observar a presença da cementita. A tabela 4 apresenta o resumo das observações metalográficas realizadas em amostras retiradas dos discos de freio.

Tabela 4 - Caracterização da Grafita e da Matriz Metálica das Amostras dos Discos de Freio.

Amostra	Aumento	Grafita Tipo	Tamanho da Grafita	Volume Grafita Tipo IV	Volume Grafita Tipo V	Comprimento Médio da Grafita [μm]	Grafita + Perlita	Ferrita ou Cementita	Perlita	Volume de Grafita [%]
Sb(0)	100X	A	IV	53%	40%	140,67	84%	16%	64%	20
Sb(0,010)	100X	A	V	45%	47%	145,85	90%	10%	67%	23
Sb(0,020)	100 X	A	V	46%	49%	127,16	92%	8%	71%	21
Sb(0,040)	100 X	A	IV	50%	38%	160,52	92%	8%	72%	20

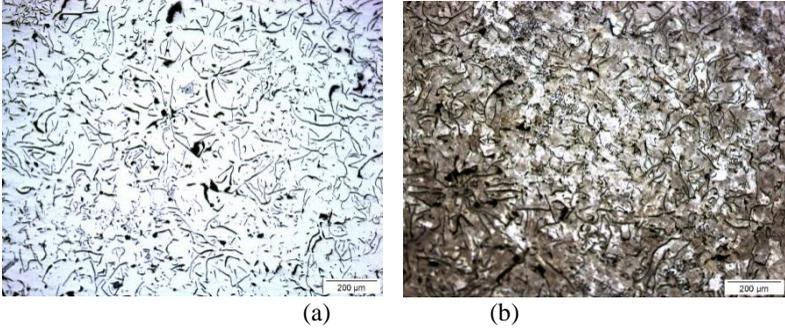
Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

A tabela 4 apresenta o resumo das análises metalográficas dos corpos de prova retirados dos discos de freio.

4.2.3 Análise metalográfica dos discos de desgaste

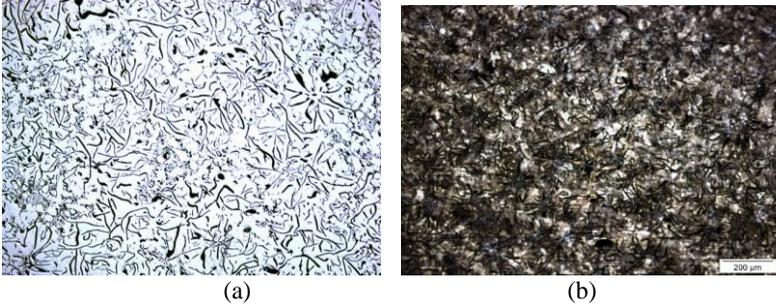
As figuras de 28 a 31 apresentam as micrografias das amostras retiradas dos discos de desgaste, nas condições: (a) sem ataque para visualização da grafita e (b) com ataque (Nital 2%) para visualização da matriz metálica.

Figura 28 - Micrografia da amostra Sb(0)



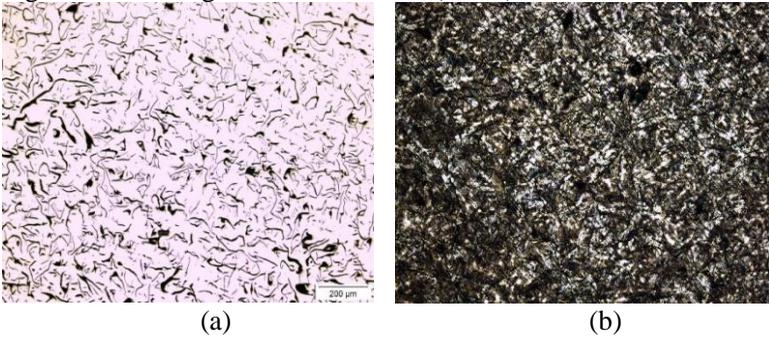
Fonte: acervo do autor (2015).

Figura 29 - Micrografia da amostra Sb(0,010)



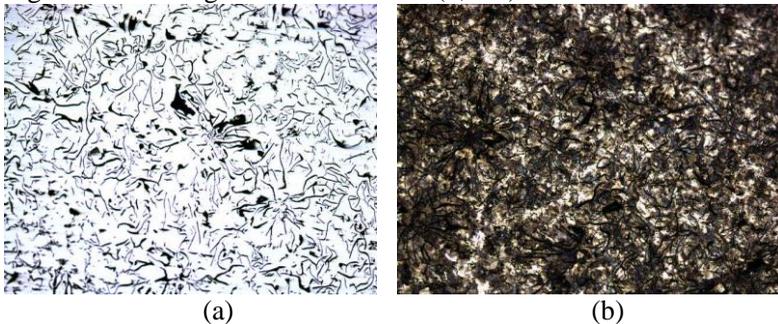
Fonte: acervo do autor (2015).

Figura 30 - Micrografia da amostra Sb(0,025)



Fonte: acervo do autor (2015).

Figura 31 - Micrografia da amostra Sb(0,040)



Fonte: acervo do autor (2015).

As amostras dos discos de desgaste apresentam homogeneidade entre si referente as características de tamanho, forma e distribuição da grafita. Comparadas as amostras dos discos de freio observa-se a redução no tamanho médio das lamelas. A tabela 5 apresenta o resumo das observações metalográficas nas amostras dos discos de desgaste.

Tabela 5 - Caracterização da Grafita e da Matriz Metálica das Amostras dos Discos de Desgaste.

Amostra	Aumento	Grafita Tipo	Tamanho da Grafita	Volume Grafita Tipo IV	Volume Grafita Tipo V	Comprimento Médio da Grafita [μm]	Grafita + Perlita	Ferrita ou Cementita	Perlita	Volume de Grafita [%]
Sb(0)	100 X	A	V	28%	64%	118,5	80%	20%	59%	21
Sb(0,010)	100 X	A	V	41%	45%	139,39	83%	17%	60%	23
Sb(0,020)	100 X	A	IV	62%	37%	129,33	86%	14%	63%	23
Sb(0,040)	100 X	A	V	37%	54%	128,94	91%	9%	73%	18

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

A tabela 5 apresenta o resumo da caracterização metalográfica realizada nas amostras retiradas dos discos de desgaste.

Comparando se os resultados obtidos na avaliação metalográfica das amostras retiradas nos discos de freio e nos discos de desgaste, observa-se:

Todas as amostras apresentam grafita do tipo A, com variação de tamanho entre IV e V de acordo com a norma ASTM A247. Nos discos de freio os percentuais encontrados de grafita IV e V são próximos, enquanto nas amostras dos discos de desgaste observa-se maior diferença exceto na amostra Sb(0,010).

Na solidificação da liga hipoeutética a austenita nucleia e cresce no meio do metal líquido e a grafita é formada somente na reação eutética. Isto favorece a obtenção de grafitas com tamanhos homogêneos – como as apresentadas, ao contrário de uma liga hipereutética onde a grafita nucleia antes da reação eutética e também é gerada nesta mesma reação pela transformação da austenita, acarretando tamanhos diferentes de grafita na microestrutura. A solidificação do ferro fundido hipoeutético é descrito no item 2.1.3.4.

Não houve variação do volume de grafita quando se variou o percentual de adição de antimônio e nem entre as amostras retiradas dos discos de freio e dos discos de desgaste.

O percentual de ferrita livre foi reduzido e com o aumento da adição nas amostras Sb(0,025) e Sb(0,040) é possível observar a presença de cementita.

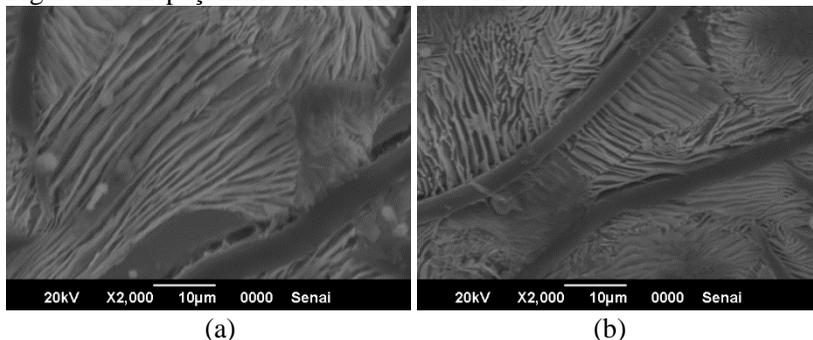
Não houve alteração significativa no volume de grafita, o que confirma que o antimônio é um estabilizador na perlita e não age como estabilizador da cementita. Conclusão compartilhada por (ELLIOT – 1988). Isto permite afirmar que o antimônio cria uma barreira à difusão do carbono da austenita permitindo a formação de mais perlita na reação eutetóide do ferro fundido.

O aumento do teor de antimônio foi acompanhado do aumento do percentual de perlita que exerce influência direta na dureza das amostras. De acordo com ASM – Volume 1 (2010), a matriz é influenciada pela composição química e pela velocidade de resfriamento do metal. No caso deste trabalho, a variação no volume de perlita é atribuído a variação no percentual de antimônio, uma vez que: 1) todos os moldes foram fabricados em areia aglomerada com resina mantendo constante a taxa de resfriamento para todas as condições. 2) As composições químicas das amostras não apresentam diferenças significativas entre si, com exceção do percentual de antimônio.

O aumento da resistência ao desgaste nos ferros fundidos está associada a duas variáveis: 1) volume de grafita, visto que o carbono funciona como um lubrificante sólido formando um filme sobre a superfície – que reduz o coeficiente de atrito; b) a presença de uma matriz totalmente perlítica que confere resistência mecânica ao material. O volume de grafita é limitado pela resistência mecânica que decresce com o aumento do volume de grafita. A obtenção da matriz 100% perlítica é garantida pelo uso de elementos de liga. Estas afirmações também são encontradas em GUESSER et al, (2003).

Além do percentual de perlita na matriz, as propriedades mecânicas e de desgaste também são afetadas pela distância interlamelar da perlita (espaçamento existente entre uma lamela e outra). A medida que o espaçamento diminui, o livre caminho médio da matriz para o deslocamento de discordâncias é reduzido aumentando a dureza, o limite de resistência à tração e a resistência ao desgaste. É possível observar a redução do espaçamento interlamelar da perlita da amostra Sb(0) figura 32 (a) para Sb(0,040), (figura 32(b)).

Figura 32 - Espaçamento Interlamelar da Perlita



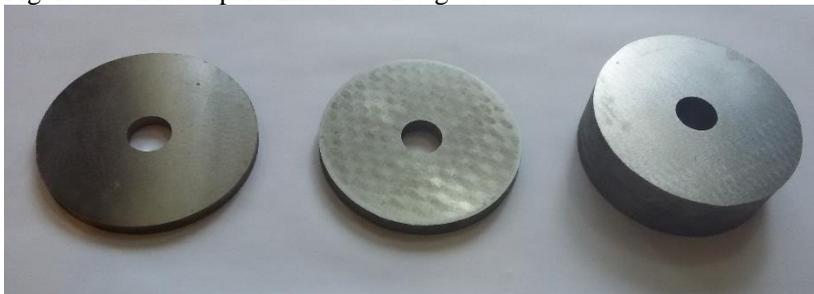
Fonte: acervo do autor (2015)

A figura 32 apresenta as fotomicrografias obtidas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do espaçamento interlamelar da perlita. É possível observar que a adição de antimônio tem influência sobre o espaçamento entre as lamelas reduzindo a distância entre as lamelas.

4.3 ENSAIO DE DESGASTE

A figura 33 apresenta o discos utilizados no ensaio. Foram avaliadas as variações de massa no final do teste e as características das pistas de desgaste obtidas.

Figura 33 - Discos para Ensaio de Desgaste:



Fonte: Arquivo do autor (2015).

A figura 33 apresenta os discos de espessuras 6, 12 e 25 mm preparados para o ensaio de desgaste.

4.3.1 Caracterização da rugosidade

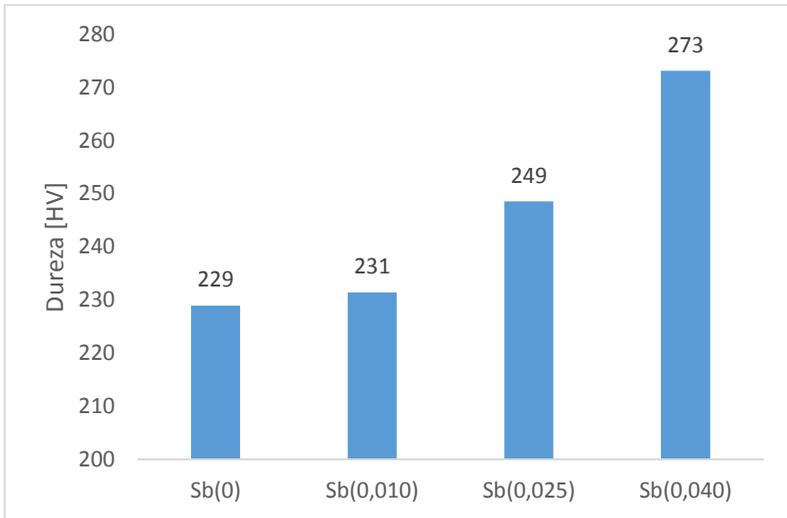
Os corpos de prova em forma de discos tiveram sua rugosidade avaliada antes do ensaio de desgaste com o uso de um rugosímetro de contato (Mitutoyo, SJ301).

A ASTM G99-05 (2010) especifica uma rugosidade Ra máxima de $0,8 \mu\text{m}$ de modo a não interferir no resultado do teste. A rugosidade média encontrada nos discos de desgaste foi de $0,1 \pm 0,01 \mu\text{m}$, o que atende a especificação da norma.

4.3.2 Microindentação

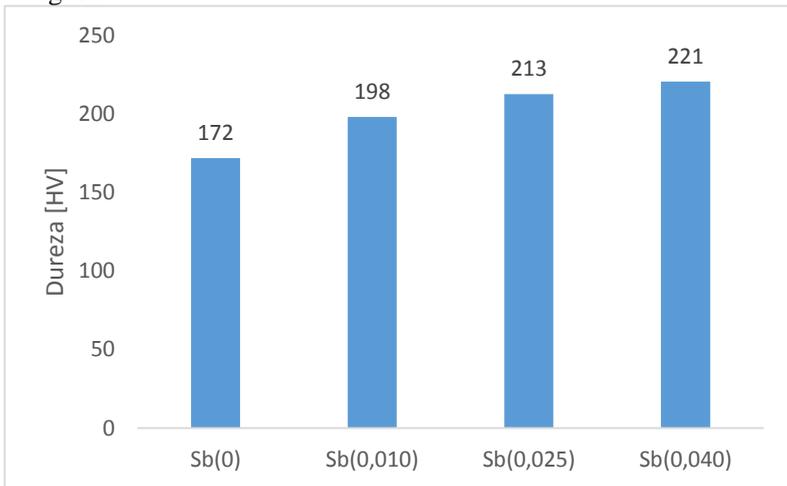
Os resultados dos testes de microindentação estão plotados no gráfico 3 (discos de freio) e no gráfico 4 (discos de desgaste).

Gráfico 3 -Microindentação das Amostras Metalográficas dos Discos de Freio



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Gráfico 4 -Microindentação das Amostras Metalográficas dos Discos de Desgaste



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

A dureza representa importante fator na resistência ao desgaste, conforme ASM Volume 1 (2010), quanto maior a dureza maior a

resistência ao desgaste. Conforme já exposto, a dureza está relacionada ao percentual de perlita na matriz, que por sua vez está associada a composição química, elementos de liga e taxa de resfriamento do metal. Neste trabalho, as variáveis citadas foram mantidas constantes, com exceção do percentual de antimônio propositalmente adicionado.

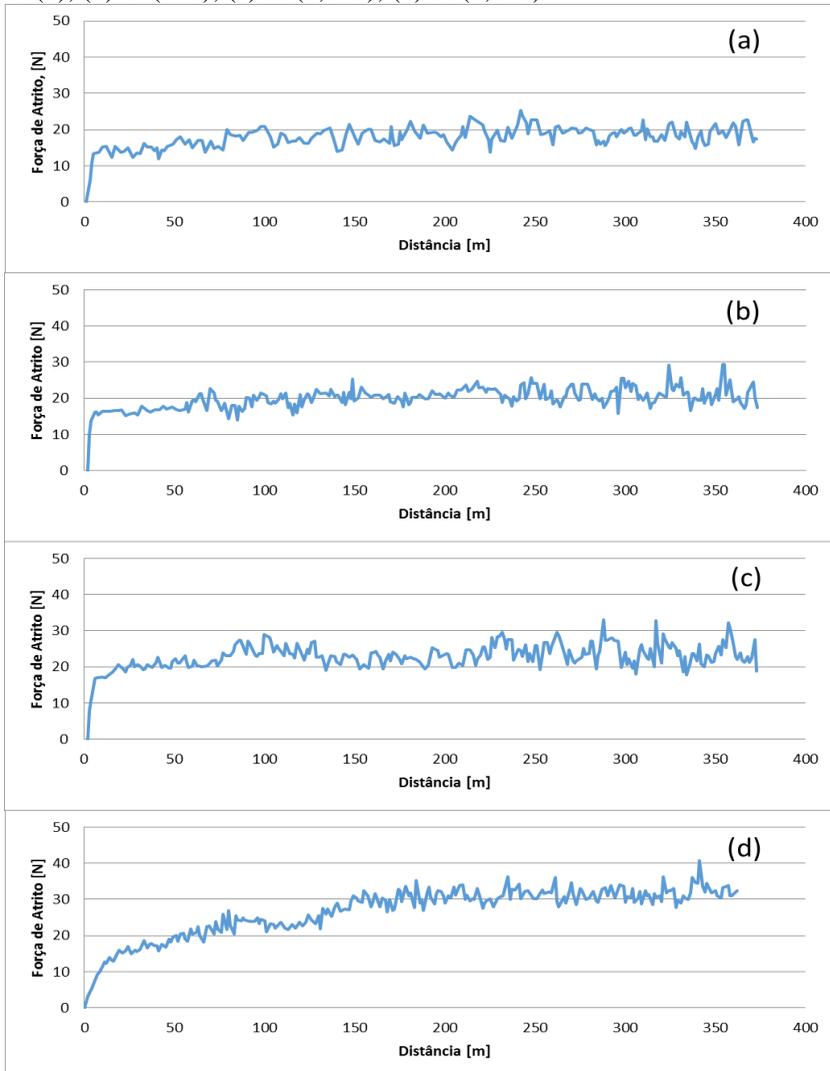
As microindentações efetuadas nos discos de desgaste apresentam valores superiores aos encontrados nas amostras retiradas dos discos de freio. Este comportamento é atribuído a diferença de espessura entre as pistas do disco de freio (15mm) e a espessura do disco de desgaste ensaiado (10 mm). Os discos de freio e os discos de desgaste foram ensaiados em testes específicos e a interpretação dos resultados realizada comparativamente entre as amostras submetidas ao mesmo teste. Desta forma a diferença de dureza em amostras com o mesmo teor de antimônio não interfere nos ensaios.

É esperado que com o aumento da dureza, as amostras apresentem também aumento a resistência ao desgaste nos 2 tipos de teste – dinamômetro e pino sobre disco.

4.3.3 Caracterização do comportamento de desgaste

O Gráfico 5 apresenta os o comportamento das amostras durante o ensaio de desgaste.

Gráfico 5 - Comportamento do ensaio de desgaste pino sobre disco (a) Sb(0); (b) Sb(010); (c) Sb(0,025); (d) Sb(0,040).



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

No gráfico 5 a força de atrito aumenta de acordo com o acréscimo no teor de antimônio. Entretanto, os comportamento da força em relação a distância percorrida é diferente para cada situação. Para Sb (0) a força de atrito cresce de maneira contínua atingindo 20N em aproximadamente 80m e então oscila ligeiramente abaixo deste valor até os final do teste. Para Sb(0,010) após 60m a força de atrito atinge 20N e oscila ligeiramente acima deste valor. Para Sb(0,025) em 20m se atinge os 20N, entre 90m e 120m a força de atrito tende a 30N, e após 200m oscila ao redor de 25N. Para a amostra Sb(0,040) há um aumento crescente da força de atrito entre 20m e 150m atingindo 30N, a partir deste ponto a força de atrito oscila em torno de 35N.

Como evidenciado pelo perfil de esforços durante o ensaio de desgaste pino sobre disco, o desgaste das pistas se deu de forma homogênea, conforme apresentado na figura 33.

Figura 34 – Pista de Desgaste do Ensaio Pino sobre Disco.

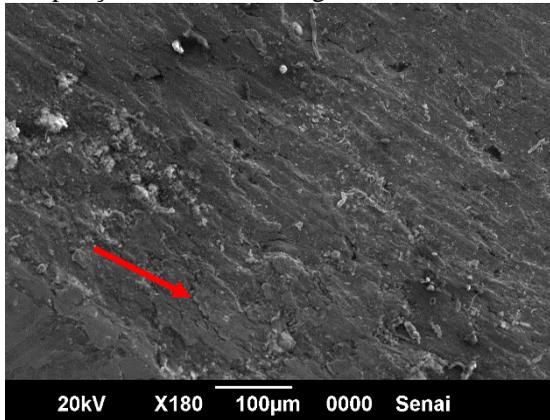


Fonte: Acervo do autor (2015)

Na figura 34 é possível observar o perfil homogêneo de desgaste da pista gerada pelo ensaio de pino sobre disco.

A figura 34 apresenta maior ampliação da pista de desgaste, onde é possível observar a presença de material laminado – típico do desgaste adesivo – transferido de uma região a outra devido ao esforço compressivo do ensaio.

Figura 35 – Ampliação da Pista de Desgaste

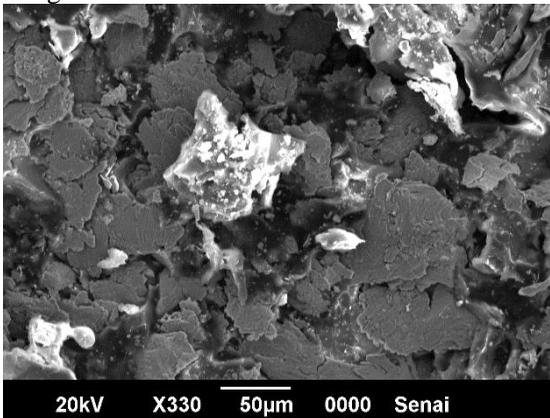


Fonte: Acervo do autor (2015).

Figura 35, é possível observar a tribografia gerada pelo ensaio de pino sobre disco. A seta indica a borda de um fragmento em forma de placa aderido à superfície da pista de ensaio.

A matriz perlítica associada ao intenso esforço compressivo do pino sobre o disco gera debris (fragmentos) em forma de placas, inclusive a própria grafita. A figura 35 apresenta os debris coletados durante o ensaio de desgaste.

Figura 36 – Fragmentos do Ensaio Pino sobre Disco



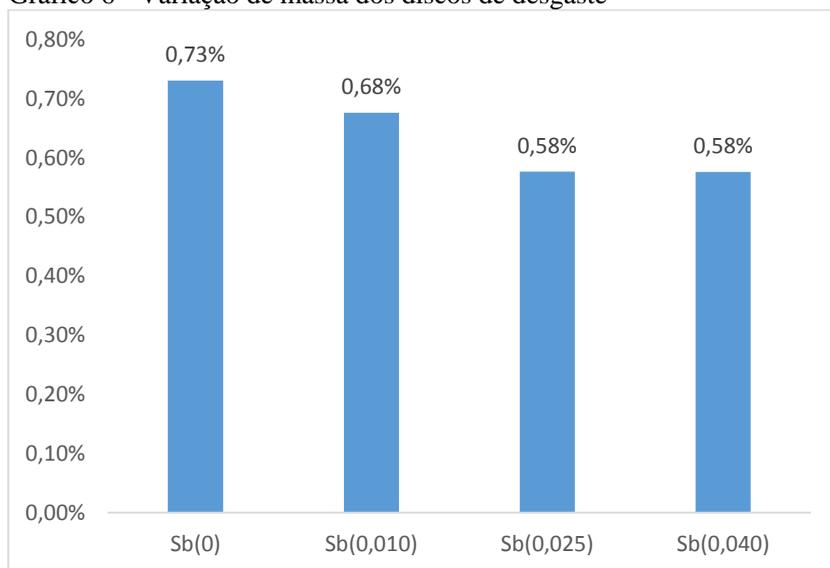
Fonte: Acervo do autor (2015).

Na figura 36 é possível observar os debris em forma de placas. O comportamento de desgaste observado o teste é comparável aos estudos de OSTERMEYER et al, (2006) apresentados na figura 17, onde as partículas são reduzidas devido ao esforço de compressão até atingir dimensões reduzidas e serem expulsas da pista de ensaio. Os debris apresentados foram coletados ao redor dos discos durante o ensaio. O material de coloração mais clara observado na figura, se refere a resina utilizada para fixação dos debris para análise no MEV.

4.3.4 Variação de Massa

Os discos de desgaste foram pesados antes e após o ensaio de desgaste. A variação percentual em relação a massa original é mostrada no gráfico 6.

Gráfico 6 - Variação de massa dos discos de desgaste



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

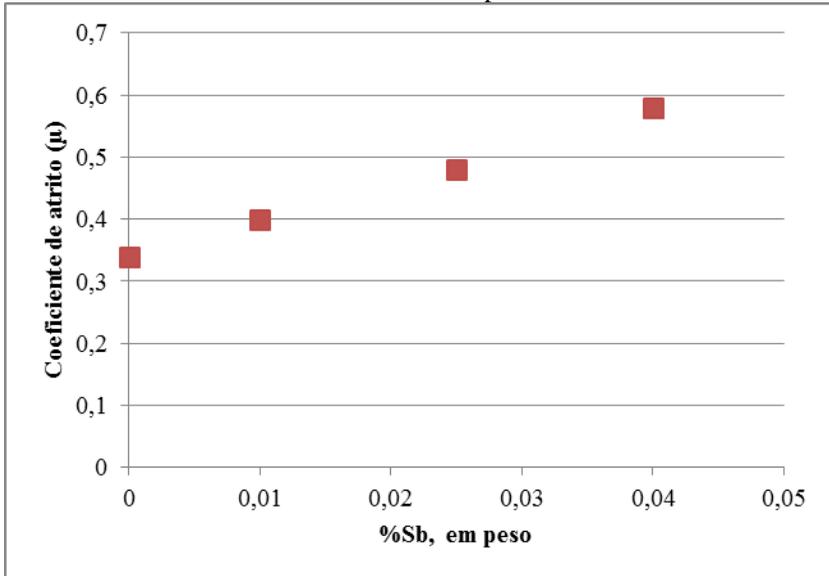
No gráfico 6 está representada a variação percentual de massa dos discos de desgaste ensaiados. As amostras com ferrita na matriz – Sb(0) e Sb(0,010) – apresentaram maior perda de massa que as amostras perlíticas – Sb(0,025) e Sb(0,040). Mesmo com aumento do percentual de cementita entre as amostras Sb(0,025) e Sb(0,040) a

perda de massa se mostrou constante, indicando que a perlita tem forte influência sobre a resistência ao desgaste dos ferros fundidos.

4.3.5 Coeficiente de Atrito

O gráfico 7 apresenta o coeficiente de atrito das amostras de acordo com a variação do percentual de antimônio.

Gráfico 7 - Coeficiente de atrito do ensaio pino sobre disco



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

O gráfico 7 apresenta o coeficiente de atrito determinado através do ensaio de desgaste. O aumento do coeficiente de atrito está relacionado ao aumento da dureza. No início do processo de desgaste o contato se dá entre as asperezas das superfícies. No decorrer do ensaio, as asperezas vão sendo reduzidas e o contato passa a ocorrer em uma maior superfície.

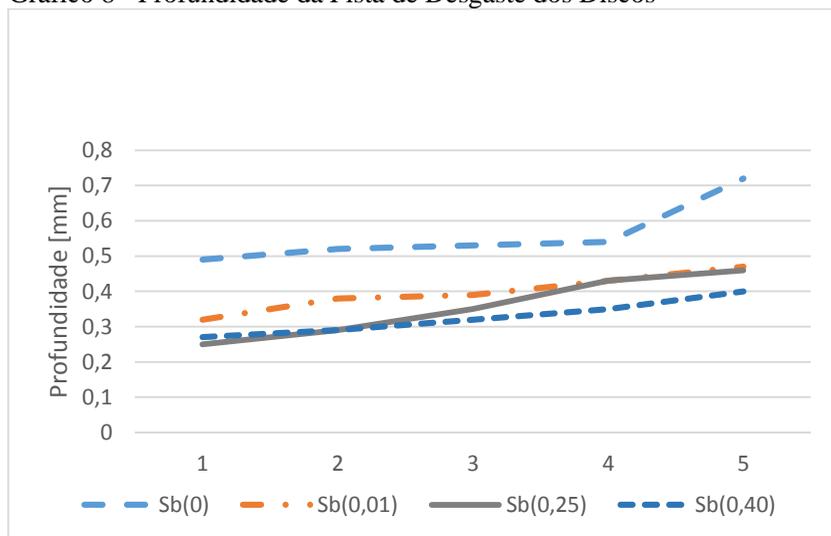
A ferrita devido à baixa resistência mecânica e baixa dureza é mais facilmente arrancada da superfície dos corpos de prova, deixando vazios que facilitam a evolução do desgaste. Na perlita, a ferrita está ancorada pela cementita, oferecendo maior resistência a remoção de material e à medida que esta remoção ocorre, a área de contato e a

resistência ao deslizamento aumentam, elevando o coeficiente de atrito entre o pino e o disco.

4.3.6 Profundidade da Pista de Desgaste

A profundidade da pista de desgaste foi medida após o ensaio. Os valores encontrados foram plotados em ordem crescente e são apresentados no gráfico 8.

Gráfico 8 - Profundidade da Pista de Desgaste dos Discos



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

O gráfico 8 apresenta a variação de profundidade nas pistas de desgaste. Observa-se que quanto maior a adição de antimônio, menor é a profundidade de desgaste, o que está também de acordo com o comportamento de perda de massa apresentado no gráfico 6, onde com a adição de antimônio houve redução da perda de massa.

4.3.7 Ensaio Funcional em Dinamômetro

Para avaliar as características funcionais de desgaste, os discos de freio produzidos foram submetidos a um teste funcional em dinamômetro, na empresa Fras-Le SA, localizada em Caxias do Sul / RS. O equipamento de teste é apresentado na figura 36.

Figura 37 - Equipamento de Ensaio de Discos e Pastilhas de freio.



Fonte: Cortesia da empresa Fras-Le AS

Dinamômetro para teste de pastilhas e discos de freio instalado no laboratório da empresa.

Os parâmetros utilizados no teste estão indicados na tabela 6.

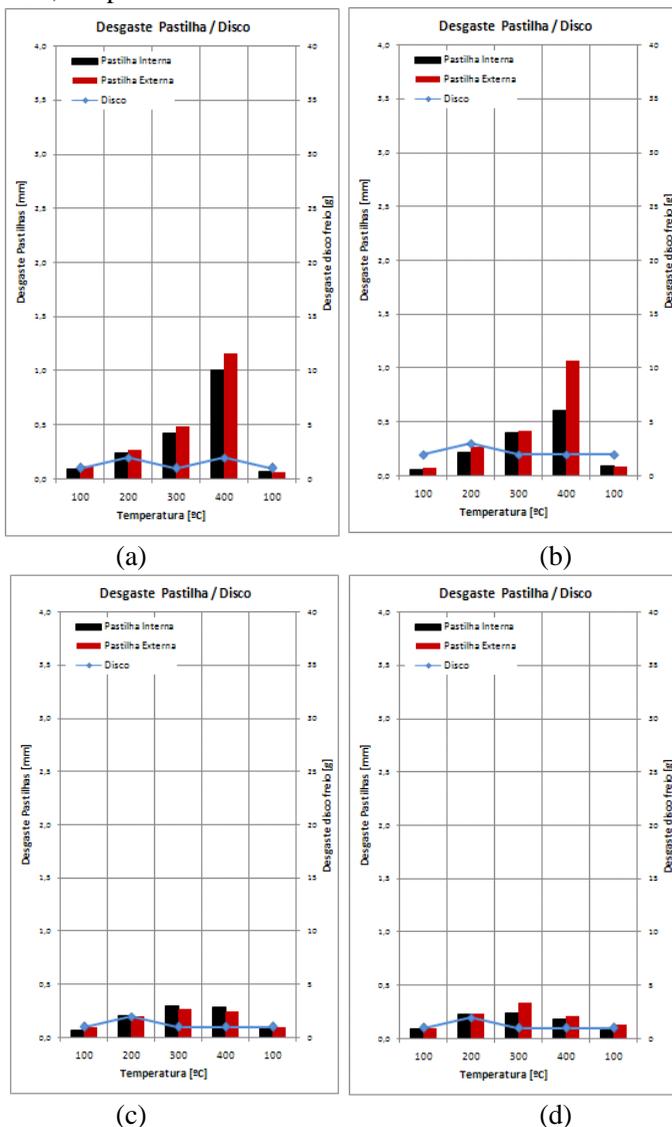
Tabela 6 - Parâmetros do equipamento de teste:

Informações do dinamômetro	Valor
Raio de rolamento	0,308 m
Carga necessária	685 kg
Carga atual	685 Kg
Peso bruto do eixo	1370 Kg
Inercia especificada	65 Kg·m ²
Diâmetro do Pistão	54 mm
Raio Efetivo	0,104 m
Nº de Pistões	1 unidade
Área do Pistão	22,902 cm ²

Fonte: Laudos de ensaio realizados na Fras-Le.

No gráfico 9 estão plotados os resultados do ensaio de desgaste obtidos no dinamômetro para cada uma das adições de antimônio.

Gráfico 9 - Ensaio funcional de atrito dos discos de freios com pastilhas sinterizadas na Fras-Le. (a) 0%Sb; (b) 0,010%Sb; (c) 0,025%Sb e (d) 0,040%Sb, em peso.

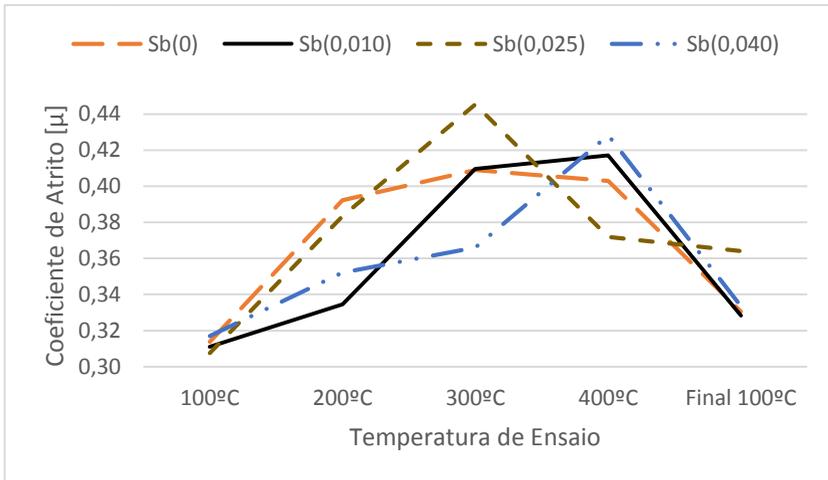


Fonte: Fras-Le, 2014.

Os parâmetros de ensaio aplicados no teste foram definidos para análise do desgaste das pastilhas. Na condição em que foram ensaiados, os discos apresentaram desgaste desprezível. Entretanto, é possível observar que com o aumento do teor de antimônio houve redução do desgaste da pastilha. As amostras Sb(0,025) e Sb(0,040) apresentaram desgaste inferior a 50% do desgaste apresentado pela amostra Sb(0).

As pastilhas utilizadas nos ensaios foram produzidas em um mesmo lote, portanto apresentam propriedades homogêneas. Os ensaios foram realizados no mesmo equipamento e nas mesmas condições, o que permite concluir que os discos com maior adição de antimônio foram mais eficientes no sistema de frenagem composto pelo par disco e pastilha.

Gráfico 10 – Coeficiente de Atrito dos Discos de Freio



Fonte: Fras-Le, 2014.

O gráfico 10 apresenta o comportamento do coeficiente de atrito dos discos de freio ensaiados em várias temperaturas. Observa-se que o coeficiente de atrito cresce com o aumento da temperatura do ensaio. O material de atrito é projetado para aplicação em faixas de temperaturas de acordo com a finalidade do veículo (passeio, esportivo, carga). O desgaste do material de atrito é necessário para que haja renovação da superfície de atrito da pastilha, caso contrário ocorreria o processo de espelhamento onde o freio perderia sua eficiência. Após o resfriamento, o coeficiente de atrito do material da pastilha deve retornar ao seu valor original, comportamento este denominado “Recuperação”.

4.3.8 Análise Econômica

O estanho (Sn) é o elemento perlitizante mais utilizado para a produção de ferros fundidos cinzentos perlíticos. Sua adição é da ordem de 0,10% a 0,15%. Em Santa Catarina são produzidos mensalmente aproximadamente 900.000 discos e tambores pelos 3 maiores fornecedores destas peças para o mercado de reposição.

O preço do estanho (99%Sn) é de R\$63,00/kg e o do antimônio (95%Sb) é de R\$42,00/kg. Se considerarmos o peso médio dos tambores e discos como 5kg/peça e o rendimento metálico (relação entre o peso das peças produzidas e o total de metal fundido) igual a 80% e ainda a substituição do uso de 0,10%Sn por 0,025%Sb, seria possível obter uma redução de custo da ordem de 3,5 milhões de reais por ano. Isto representa uma redução de R\$52,58 por tonelada de metal produzida.

Considerando a aplicação do antimônio para produção de outros tipos de peças em ferro fundido cinzento perlítico, este valor potencializado.

4.3.9 Segurança do Trabalhado no Uso de Antimônio

O Ministério do Trabalho e Emprego [MTE] através da NR15 – Anexo 11, fixa a exposição máxima ao Hidreto de Antimônio (estibina) a 0,08 ppm (parte por milhão) ou a 0,4 mg/m³ para jornadas máximas de 48 horas semanais. Caso estes valores sejam ultrapassados, o trabalhador fará jus ao pagamento de insalubridade grau máximo, correspondente a 40% do salário mínimo nacional. Na aplicação do antimônio como perlitizante no ferro fundido, as adições são pequenas e os valores encontrados são da ordem de 50% dos limites máximos especificados pelo MTE.

5 CONCLUSÃO

A adição de antimônio entre 0,01% à 0,04% em peso no ferro fundido cinzento FC25, contribuiu para o aumento de sua resistência à tração e da dureza. Este incremento nas propriedades mecânicas se deve ao aumento do volume e refinamento da perlita na microestrutura do FC25 devido a adições crescentes do perlítizante.

O endurecimento da matriz provocado por adições crescentes de antimônio, evidenciou que houve aumento da resistência ao desgaste adesivo no ensaio de pino sobre disco. Observou-se ainda que este endurecimento provocou aumento do coeficiente de atrito, resultando em maiores esforços de deslocamento sob atrito e promovendo ganho na condição de frenagem.

No teste funcional o aumento do teor de antimônio provocou a redução do desgaste das pastilhas, condição desejável para aumento da vida útil do par disco de freio e pastilha. Houve ainda redução do coeficiente de atrito nas amostras com 0,040% de antimônio.

A presença de carbonetos nos discos de freio, apresentada pelas amostras com 0,025% e 0,040% de antimônio, é indesejável porque dificulta a usinagem e eleva seu custo. A resistência à tração alcançada nestas amostras foi muito superior ao mínimo especificado pela norma (175MPa). Isto permite especificar a adição de 0,010% Sb a 0,020% Sb, para obtenção de uma matriz 100% perlítica e livre de carbonetos na produção de discos de freio.

Do ponto de vista econômico, há enorme vantagem na substituição do estanho pelo antimônio como elemento perlítizante, na produção dos ferros fundidos cinzentos perlíticos.

REFERÊNCIAS

ALLUYN, F; DAMS, R; HOSTE, J. The Determination of Antimony in Nodular Cast Iron by Wavelength-Dispersive X-Ray Fluorescence – Elsevier Science Publishers B.V. – 1985.

ANDERSON, A. Friction and Wear of Automotive Brakes. Metals Handbook, Volume 18 – Friction, Lubrication and Wear Technology – 1992.

ANGUS, Harold T. Cast Iron: Physical and Engineering Properties – Butterworth and Co Ltd Second Edition – 1976.

ASM, Handbook. Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys. Volume 1 – 2010.

ASM, Handbook. Alloy Phases Diagrams. Volume 3 – 2010.

ASM, Handbook. Metallography and Microstructures. Volume 9 – 2010.

ASM, Handbook. Casting. Volume 15 – 2010.

ASM, Handbook. Materials Selection and Design. Volume 20 – 2010.

ASM, International. Alloying: Understanding the Basics – Hardcover 2001.

ASTM A48 / A48M – Standard Specification for Gray Iron Castings – 2012.

ASTM. A159 – 83 (2011) Standard Specification for Automotive Gray Iron Castings – 2011.

ASTM A247 – 10. Standard Test Method for evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings – 2010.

ASTM A370 – 14. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products – 2014.

ASTM G40 Standard Terminology Relating to Wear and Erosion – 2013.

ASTM G99 – 05. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin – on – Disc Apparatus – 2010.

ATKINS, P.W; PAULA, J. Físico - Químico – 9º Edição – LTC – 2012.

BCIRA. Uses of Antimony in Cast Iron – BCIRA Broadsheet 284 – 1988.

BREMBO – Consulta on line em:

<http://www.brembo.com/en/car/formula-1/f1-infographics>. Acesso em: 10 abr. 2015.

CALLISTER Jr, William D; RETHWISCH, David G. – Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução – 8ª edição – LTC – 2013.

CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos – 7ª edição 2012.

COLPAERT, H. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns – Revisão Técnica André Luiz V. da Costa e Silva – 4ª edição – São Paulo Edgard Blucher – 2008.

CUEVA, G; TSCHIPTSCHIN, A.P; SINATORA, A; GUESSER, W. L. Desgaste de Ferros Fundidos Usados em Discos de Freio de Veículos Automotores – Wear 255, 2003.

DIN 50320 – 1979. Wear, Terms, Systematic Analysis of Wear Processes, Classification of Wear Phenomena – 1979.

ELLIOTT, R. Cast Iron Technology – Butterworth – 1988.

GUESSER, W.L; BAUMER, I; TSCHIPTSCHIN, A. P; CUEVA, G; SINATORA, A. Ferros Fundidos Empregados para Discos e Tambores de Freio – SAE Brazil – 2003.

GWIDON W. S; ANDREW W. B; Engineering Tribology (Third Edition) – 2006.

KANNO, T; KIKUCHI, T; KANG, I; NAKAE, H. – Effect of Elements on the Eutectic Temperatures in Cast Iron. Paper 05-203 (05) AFS Transaction – 2005.

Kowandy, C; Richard C; Chen, Y.M; Tessier J.J. Correlation Between the Tribological Behaviour and Wear Particle Morphology – Case of Grey Cast Iron 250 versus Graphite and PTFE – 2007.

MECKLENBURG, K. R; BENZING, R. J. Testing for Adhesive Wear – 1976.

OSTERMEYER, G.P; MÜLLER, M. Dynamic Interaction of Friction and Surface Topography in Brake Systems - Tribology International 39 – 2006.

PIQUET PNEUS. Consulta on line em <http://piquetpneus.com.br/freios> - Acesso em 10/07/2015.

SANTOS, A.B.S.; Branco, C. H. C.; Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares – IPT – 1991.

SANTOS, A.B.S.; Costa, P.H.C.; Tavares, M.T; Efeitos do Antimônio em Ferros Fundidos Nodulares – Metalurgia – ABM – Volume 37 – 1981.

SHRIVER, D.F; ATKINS P.W – Química Inorgânica 4ª Edição – LTC – 2012.

SILVA, F.A.P; Tribologia – Editora Lisboa – 2000.

SY, Albert - Influence of Lead and Antimony on Gray Iron Casting – Foundry – 1963.

TEC TOR. Disponível em: <<http://www.tector.com.br/produto/freios-industriais/freios-eletohidraulicos-a-disco/>>. Acesso em: 07 maio 2015.