

Nesta edição:
Noticiário completo sobre
o 50º Congresso da ABM

Metalurgia & Materiais



Vol. 21, No. 2
Ago/Out/95

ISSN 0104-6444

10

Ciência e Materiais

Desempenho de ferros fundidos resistentes à abrasão conforme os tipos de carbonetos presentes

Luiz Carlos Casteletti
Marcelo Martins
Marcelo A. P. da Silva

CONTRIBUIÇÃO TÉCNICA Nº 2.449

Simpósio de Metalurgia Física/
Congresso Internacional de
Tecnologia Metalúrgica e de
Materiais/ABM, outubro 1994,
São Paulo.

Foram produzidas quatro ligas resistentes à abrasão, de acordo com a norma ASTM A532, dos tipos IA, ID, IIB e IIIA. Realizaram-se análises metalográficas, ensaios de abrasão do tipo pino sobre lixa e de impacto, após tratamentos térmicos, para verificar seus desempenhos relativos. As ligas com alto Cr apresentaram, com relação à abrasão, desempenho altamente superior às Ni-Hard. A liga IIB apresentou uma resistência ao impacto quatro vezes superior à das ligas ID e IIIA.

I - INTRODUÇÃO

A crescente demanda de minerais, a movimentação de terra e o saneamento básico, levaram a uma intensificação da mecanização e do uso de grandes unidades de potência, enfatizando a necessidade da disponibilidade de peças resistentes à abrasão, característica esta fundamental na maioria dos processos citados anteriormente.[1]

Muitos tipos de ligas ferrosas fundidas são utilizadas para essas aplicações e o problema básico, encontrado pelos produtores e usuários, é a obtenção da tenacidade adequada em materiais inerentemente duros e frágeis. [2] Este problema é particularmente relevante nos campos de aplicação que são intermediários entre os mecanismos característicos de sulcamento, associados com a movimentação de terra, equipamentos de mineração, onde a tenacidade é vital, e aquelas aplicações envolvendo desgaste puramente abrasivo, com pouco ou nenhum impacto.

Aços austeníticos com 12%Mn são usados satisfatoriamente em componentes que são submetidos às mais severas condições de impacto, embora o seu potencial completo de resistência ao desgaste seja desenvolvido apenas sob condições em que ocorram efeitos de encruamento. No outro extremo, frágil, situam-se os ferros fundidos brancos hipereutéticos que são usados onde a tenacidade não é importante e a resistência ao desgaste, com baixos custos, é necessária.

O extenso campo de aplicações, entre estes dois extremos, apresenta os maiores problemas de seleção de materiais. Neste caso, são usados os ferros fundidos brancos do tipo Ni-Hard ou do tipo alto-cromo-molibdênio. [3]

Os diferentes tipos de Ni-Hard são usados em situações onde alta resistência à abrasão é requerida em peças que são utilizadas diretamente no estado fundido ou apenas submeti-

das a tratamentos térmicos a temperaturas sub-críticas. Suas microestruturas consistem de aproximadamente 45% de carbonetos eutéticos formados com placas contínuas, do tipo M_3C (onde $M = Fe, Cr, etc.$), com uma dureza Knoop de 1035 $Kg.mm^{-2}$, em uma matriz que consiste em martensita maclada de alto carbono e austenita residual. [3,4]

Os ferros fundidos brancos de alto cromo com 1,5 - 3%C e 10 - 30% Cr apresentam carbonetos descontínuos do tipo M_7C_3 ($M = Fe, Cr, Mo, etc.$) com dureza Knoop de 1.735 $Kg.mm^{-2}$, em uma matriz que, por meio de tratamentos térmicos, pode tornar-se austenítica, martensítica, bainítica ou perlítica. A melhor combinação de resistência à abrasão, resistência mecânica e tenacidade é obtida com a matriz martensítica. O mesmo ocorre com a resistência ao lascamento e a fraturas sob condições severas de impactos repetidos. [1,5]

Como consequência das maiores durezas de seus carbonetos, os ferros com alto cromo apresentam resistências à abrasão superiores às dos Ni-Hard. Medidas de tenacidade à fratura e de desgaste por impactos repetidos mostraram que seus carbonetos não contínuos apresentam desempenhos superiores aos do tipo M_3C , contínuo, dos Ni-Hard. [4,6]

A alta resistência à abrasão destes ferros fundidos é resultado direto de suas microestruturas. Em escala microscópica, a maioria dos processos de abrasão pode ser descrita como uma ação de corte similar a uma operação de usinagem, na qual o grão do abrasivo penetra na superfície do metal produzindo pequenos cavacos. É, obviamente, necessário que o grão do abrasivo seja mais duro do que o do material em uso. [1]

A tabela I [1] indica os valores médios de dureza para alguns minerais, carbonetos e os constituintes das matrizes de ligas ferrosas.

Luiz Carlos Casteletti, Sócio da ABM, Professor do Depto. de Materiais - EESC-USP.

Marcelo Martins, Sup. de Prod. da KSB Bombas Hidráulicas S/A, Engenheiro de Materiais e Mestre em Engª Metalúrgica.

Marcelo A. P. da Silva, Técnico do Instituto de Física de São Carlos - USP.

0891498
27 1295

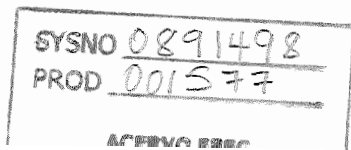


Tabela I - Durezas de minerais, fases ferrosas e carbonetos. (1)

Mineral	Dureza		Material ou Fase	Dureza	
	Knoop	HV		Knoop	HV
Talco	20		Ferrita	235	70 a 200
Gesso	40	36	Perlita não ligada		250 a 320
Fluorita	175	190	Perlita ligada		300 a 460
Feldspato	550	600-750	Austenita, 12%Mn	305	170 a 230
Magnetita	575		Martensita	500 a 800	500 a 1010
Ortoclácio	620		Cementita	1025	840 a 1100
Quartzo	840	900-1280	Carbeto de Cr (Fe,Cr) ₇ C ₃	1735	1200 a 1600
Topázio	1330	1430	Carbeto de Mo Mo ₂ C	1800	1500
Granada	1360				
Corundum	2020	1800	Carbeto de V VC	2660	2800
Carbeto de Silício	2585	2600	Carbeto de Ti TiC	2470	3200
Diamante	7575	10000	Carbeto de B B ₄ C	2800	3700

A tabela mostra que o quartzo, que é o constituinte majoritário nos minerais abrasivos, é mais duro que a maioria das matrizes de ligas ferrosas, podendo desgastá-las facilmente. Os carbonetos de cromo, presentes nos ferros fundidos brancos com alto cromo, são mais duros que o quartzo e, conseqüentemente, resistirão à abrasão. Os carbonetos mais duros que os de cromo têm o seu uso limitado pelos custos mais elevados.[1]

No presente trabalho foram verificados os desempenhos, em termos de resistência à abrasão e ao impacto, de ferros fundidos brancos dos tipos Ni-Hard e de alto cromo, com acompanhamento metalográfico.

II - MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizadas, em forno de indução, quatro corridas de ferros fundidos brancos, de acordo com as composições químicas constantes na norma ASTM A532, que foram:

Classe I, tipos A e D

Classe II, tipo B

Classe III, tipo A.

As composições químicas nominais estão apresentadas na tabela II.

Tabela II - Composições químicas nominais das ligas produzidas.

Classe	Tipo	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
I	A	3,0-3,6	1,3 máx	0,8 máx	3,3-5,0	1,4-4,0	1,0 máx
I	D	2,5-3,6	1,3 máx	1,0-2,2	5,0-7,0	7,0-11,0	1,0 máx
II	B	2,4-2,8	0,5-1,5	1,0 máx	0,5 máx	14-18	1,0-3,0
III	A	2,3-3,0	0,5-1,5	1,0 máx	1,5 máx	23-28	1,5 máx

Foram obtidas barras com 270 mm de comprimento e 35 mm de diâmetro e, a partir das mesmas, foram usinados os corpos para ensaios de abrasão, de impacto e metalográficos.

Os ensaios de abrasão foram do tipo pino-sobre-disco rotativo, constituído de uma lixa com grana 120. Após um

número especificado de giros do disco, a amostra era pesada em uma balança analítica, para verificação da perda de massa. Os corpos de prova eram cilíndricos, com 10 mm de comprimento e 10 mm de diâmetro.

Nos ensaios de impacto, utilizaram-se corpos de prova cilíndricos, sem entalhe, com 60 mm de comprimento e diâmetro de 15 mm.

Para as observações metalográficas, as amostras foram preparadas convencionalmente e atacadas com o reagente: 5% de HNO₃ em metanol.

Foram realizadas também análises químicas dos carbonetos por meio de microsonda eletrônica.

III - RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados na tabela III os resultados das análises químicas das ligas.

Tabela III - Composições químicas (% em peso) das ligas produzidas

Liga	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
IA	2,78	0,14	0,59	4,07	2,57	0,48
ID	2,72	0,68	1,20	6,23	9,09	0,66
IIB	2,64	0,68	0,68	0,11	16,58	2,50
IIIA	2,52	0,75	0,69	0,18	26,21	1,28

Na tabela IV são descritos os tratamentos térmicos a que as ligas foram submetidas.

Tabela IV: Tratamentos térmicos realizados

Liga	Tratamento Térmico
IA	4 horas a 200°C
ID	4 horas a 200°C
IIB	4 horas a 1020°C - Resfriamento ao ar + 2 horas a 200°C ou + 3 horas a 500°C
IIIA	4 horas a 1020°C - Resfriamento ao ar + 2 horas a 200°C ou + 3 horas a 500°C

Os tratamentos das ligas IA e ID visaram a um alívio de tensões.

No caso das ligas IIB e IIIA, estas visaram à obtenção de uma matriz predominantemente martensítica, com carbonetos eutéticos secundários precipitados, uma vez que a mesma oferece a melhor combinação de resistência à abrasão e tenacidade.

São mostrados na tabela V os resultados dos ensaios de durezas realizados nas ligas tratadas.

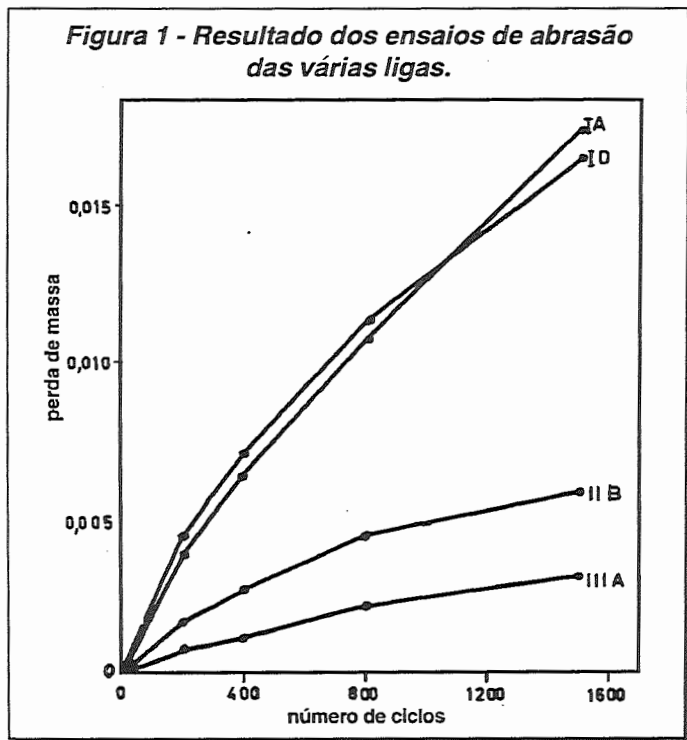
Tabela V: Resultado dos ensaios de dureza		
Liga	Tratamento térmico	Dureza (HB)
IA	4 horas a 200°C	484
ID	4 horas a 200°C	372
IIB	4 horas a 1020°C	560
	2 horas a 200°C	
	4 horas a 1020°C 3 horas a 500°C	614
IIIA	4 horas a 1020°C	560
	2 horas a 200°C	
	4 horas a 1020°C 3 horas a 500°C	614

Na Figura 1 são mostradas as curvas representativas dos ensaios de desgaste efetuados. Nas ordenadas estão os valores referentes às seguintes operações:

$$\frac{M_i - M_f}{M_i}, \text{ onde}$$

M_i = massa inicial

M_f = massa após o desgaste pelo disco abrasivo após um número de ciclos especificado.



As ligas IA e ID foram ensaiadas após tratamentos térmicos de 4 horas a 200°C e as ligas IIB e IIIA após têmpera ao ar, de 1020° e reaquecimento por 2 horas a 200°C.

Verifica-se nitidamente o desempenho superior das ligas com alto cromo em comparação com as ligas Ni-Hard.

Na tabela VI estão mostrados os resultados dos ensaios de impacto.

Tabela VI: Resultados dos ensaios de impacto.		
Liga	Tratamento Térmico	Energia absorvida (J)
IA	Bruta de fusão	14
ID	4h a 200°C	11
IIB	4h a 1020°C + 2h 200°C	75
IIB	4h a 1020°C + 3h 500°C	60
IIIA	4 horas a 1020°C + 2h 200°C	16
IIIA	4 horas a 1020°C + 3h 500°C	14

Nota-se o desempenho superior ao impacto da liga IIB em relação às demais, o que pode permitir o seu uso em situações nas quais aquelas são inviáveis.

São apresentados na tabela VII os resultados das análises de microsonda eletrônica realizadas nos carbonetos eutéticos.

Tabela VII: Resultados dos ensaios de microsonda eletrônica relativos aos carbonetos eutéticos presentes				
Liga	Elementos			
	Fe	Cr	Mo	Ni
IA	87,8	10,3	0,2	1,8
ID	55,7	42,9	0,6	0,8
IIB	41,2	56,7	2,1	—
IIB (carboneto secundário)	60,0	38,4	1,5	—
IIIA	30,1	68,6	1,3	—

Verifica-se que as análises foram realizadas com respeito aos elementos metálicos dos carbonetos, não sendo possível a análise do carbono.

São apresentados, em seguida, os cálculos relativos à estequiometria das partes metálicas dos carbonetos.

Pela literatura, sabe-se que os carbonetos eutéticos das ligas ID, IIB e IIIA são do tipo M_7C_3 . Com base neste fator, são calculadas as várias fórmulas possíveis destes carbonetos:



$$Cr_2Fe_5 \rightarrow \% Cr = \frac{(52 \times 2) \times 100}{(52 \times 2) \times (56 \times 5)} = 27,1\%$$

$$\% Fe = 72,9\%$$

$$Cr_3Fe_4 \rightarrow \% Cr = \frac{(52 \times 3) \times 100}{(52 \times 3) \times (56 \times 4)} = 41\%$$

$$\% Fe = 59\%$$

$$\text{Cr}_4\text{Fe}_3 \rightarrow \% \text{Cr} = \frac{(52 \times 4) \times 100}{(52 \times 4) \times (56 \times 3)} = 55,3\%$$

$$\% \text{Fe} = 44,7\%$$

$$\text{Cr}_5\text{Fe}_2 \rightarrow \% \text{Cr} = \frac{(52 \times 5) \times 100}{(52 \times 5) \times (56 \times 2)} = 69,9\%$$

$$\% \text{Fe} = 30,1\%$$

Com base nos cálculos anteriores, os carbonetos que mais se aproximam das estequiometrias para as diversas ligas são apresentados na tabela VIII.

Tabela VIII: Carbonetos presentes nos ferros fundidos

Liga	% de Cromo	Carboneto Esteq.
ID	9,09	$(\text{Cr}_3\text{Fe}_4)\text{C}_3$
IIB	16,58	$(\text{Cr}_4\text{Fe}_3)\text{C}_3$
IIIA	26,21	$(\text{Cr}_5\text{Fe}_2)\text{C}_3$

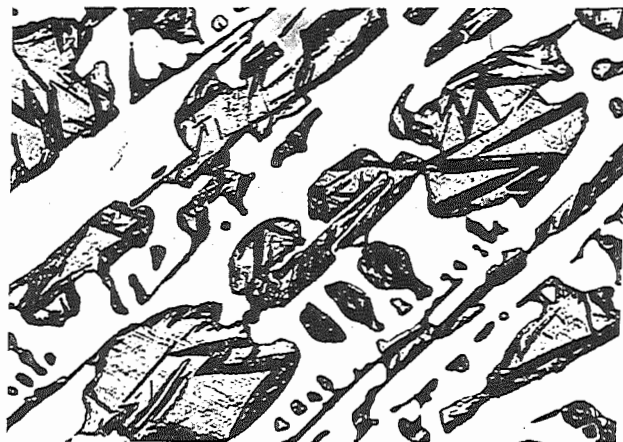
Os carbonetos secundários, relativos à liga IIB, aproximam-se da estequiometria $(\text{Fe}_2\text{Cr})\text{C}$.

Os resultados obtidos para a liga IA não estiveram de acordo com as estequiometrias M_3C ou M_7C_3 .

Verifica-se pela tabela VIII que, à medida que se aumenta o teor de cromo na liga, altera-se a estequiometria dos carbonetos.

São apresentadas, nas figuras seguintes, as fotomicrografias correspondentes às ligas em estudo.

Figura 2 - Liga IA tratada 4h a 200°C. Carbonetos eutéticos do tipo M_3C (claros) e martensita-austenita. Ataque: 5% HNO_3 em metanol. Aumento: 900x.



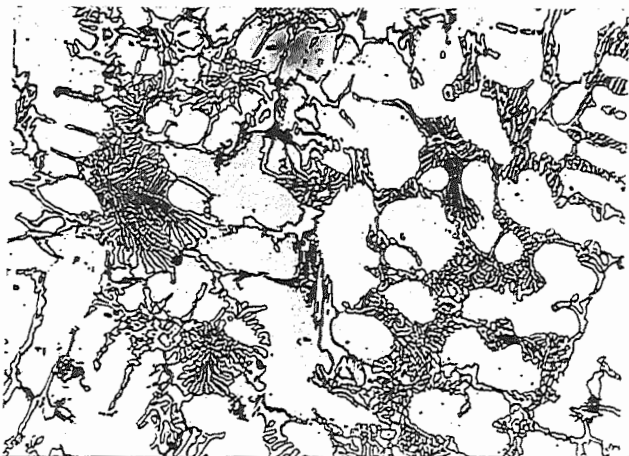
ANAIIS DO 49º CONGRESSO

O Centro de Informação em Metalurgia e Materiais informa a todos os interessados que os Anais do 49º Congresso de Metalurgia e Materiais encontram-se à disposição dos interessados na sede da ABM, Rua Antonio Comparato, 218 Campo Belo - SP.

Informações podem ser obtidas através do tel. (011)536-4333 ou pelo fax. (011) 240-4273

Figura 3 - Liga ID tratada 4h a 200°C. Carbonetos eutéticos do tipo M_7C_3 dispostos em rede contínua em matriz austenítica.

Ataque: 5% HNO_3 em metanol. Aumento: 450x.



Os carbonetos dispostos em rede contínua contribuíram para a baixa resistência ao impacto apresentada pela liga ID.

Figura 4 - Liga IIB tratada termicamente. Carbonetos eutéticos do tipo M_7C_3 em matriz predominantemente martensítica com carbonetos secundários precipitados.

Ataque: 5% HNO_3 em metanol. Aumento: 450x.



Figura 5 - Liga IIB tratada termicamente.

Detalhe de carboneto Mo_2C .

Ataque: 5% HNO_3 em metanol. Aumento: 900x.



Figura 6 - Liga IIIA tratada termicamente. Carbonetos eutéticos do tipo M_7C_3 em matriz predominantemente martensítica com carbonetos secundários precipitados.

Ataque: 5% HNO_3 em metanol. Aumento: 450x.



IV - CONCLUSÕES

- As resistências à abrasão das ligas com alto cromo (IIB e IIIA) foram muito superiores às das demais (IA e ID).

- A resistência ao impacto da liga IIB foi quatro vezes superior à das ligas ID e IIIA, o que, combinado com sua resistência à abrasão, torna-as adequadas em situações de uso em que as demais não atendem aos requisitos como, por exemplo, em moinhos para clínquer.

- A resistência à abrasão aumentou com o teor de Cr nos carbonetos do tipo M_7C_3 .

- Os carbonetos presentes nas ligas ID, IIB e IIIA apresentam as seguintes fórmulas, respectivamente: $(Cr_3Fe_4)C_3$, $(Cr_4Fe_3)C$ e $(Cr_5Fe_2)C_3$.

Nota: Amostras foram preparadas pelos técnicos Eliezer D. Francisco, Alcides Robles e Pedro Luiz Di Lorenzo.