

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

Setembro/Oct/95

# Metallurgia & Materiais

n. 51 m. 444

10

CIENT

MATERIAIS

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

*526 835*  
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 às 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 inherentemente 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]

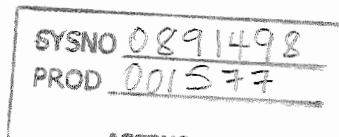
Os ferros fundidos brancos de alto cromo com 1,5 - 3% Ce 10 - 30% Cr apresentam carbonetos descontínuos do tipo  $M_7C_3$  (M = Fe, Cr, Mo, etc.) com dureza Knoop de 1.735  $Kg.mm^{-2}$ , em uma matriz que, por meio de tratamentos térmicos, pode tornar-se austenítica, martensítica, bainítica ou perlítica. 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 Eng<sup>a</sup> Metalúrgica.  
Marcelo A. P. da Silva, Técnico do Instituto de Física de São Carlos - USP.



**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	Perlite não ligada		250 a 320
Fluorita	175	190	Perlite ligada		300 a 460
Feldspato	550	600-750	Austenita, 12%Mn	305	170 a 230
Magnetita	575		Martensita	500 a 800	500 a 1010
Ortoclásio	620		Cementita	1025	840 a 1100
Quartzo	840	900-1280	Carbeto de Cr $(Fe,Cr)_7C_3$	1735	1200 a 1600
Topázio	1330	1430	Carbeto de Mo $Mo_2C$	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 $B_4C$	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, consequentemente, 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  $HNO_3$  em metanol.

Foram realizadas também análises químicas dos carbonetos por meio de microssonda 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	
IIB	4 horas a 1020°C	614
	3 horas a 500°C	
IIIA	4 horas a 1020°C	560
	2 horas a 200°C	
IIIA	4 horas a 1020°C	614
	3 horas a 500°C	

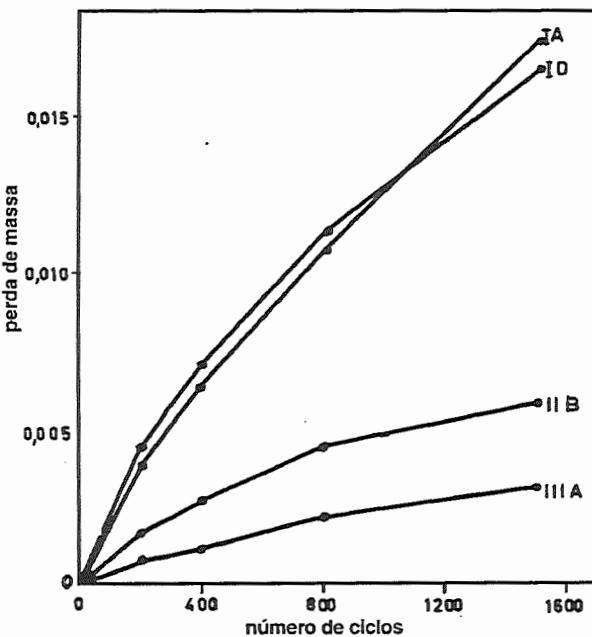
Na Figura 1 são mostradas as curvas representativas dos ensaios de desgaste efetuados. Nas ordenadas estão os valores referentes às seguintes operações:

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

$M_i$  = massa inicial

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

**Figura 1 - Resultado dos ensaios de abrasão das várias ligas.**



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 microssonda eletrônica realizadas nos carbonetos eutéticos.

**Tabela VII: Resultados dos ensaios de microssonda 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	(Cr <sub>3</sub> Fe <sub>4</sub> )C <sub>3</sub>
IIB	16,58	(Cr <sub>4</sub> Fe <sub>3</sub> )C <sub>3</sub>
IIIA	26,21	(Cr <sub>5</sub> Fe <sub>2</sub> )C <sub>3</sub>

Os carbonetos secundários, relativos à liga IIB, aproximam-se da estequiometria (Fe<sub>2</sub>Cr)C.

Os resultados obtidos para a liga IA não estiveram de acordo com as estequiometrias M<sub>3</sub>C ou M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>.

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<sub>3</sub>C (claros) e martensita-austenita. Ataque: 5% HNO<sub>3</sub> em metanol. Aumento: 900x.**



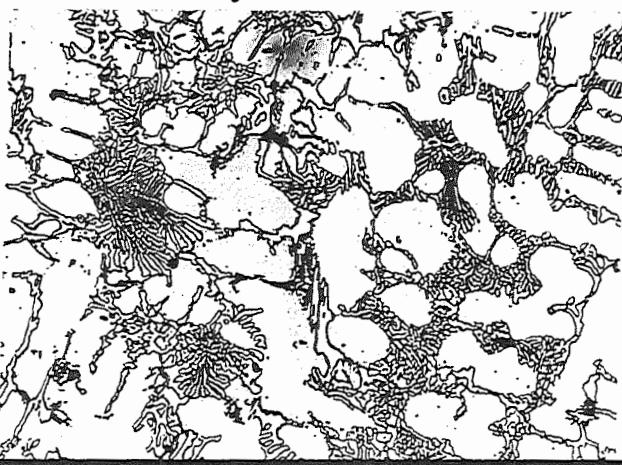
# ANAIS DO 49º CONGRESSO

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.**

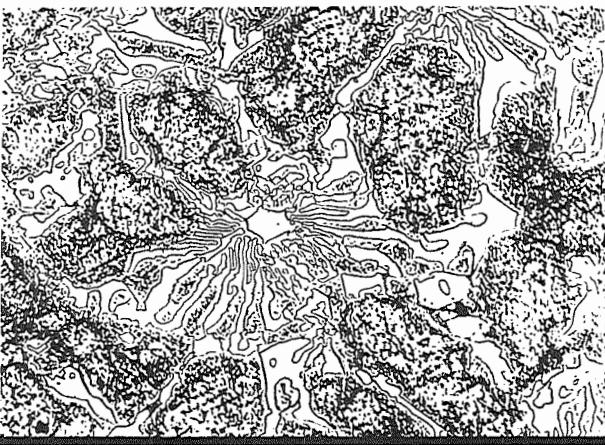
Ataque: 5%  $HNO_3$  em metanol. Aumento: 450x.



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.



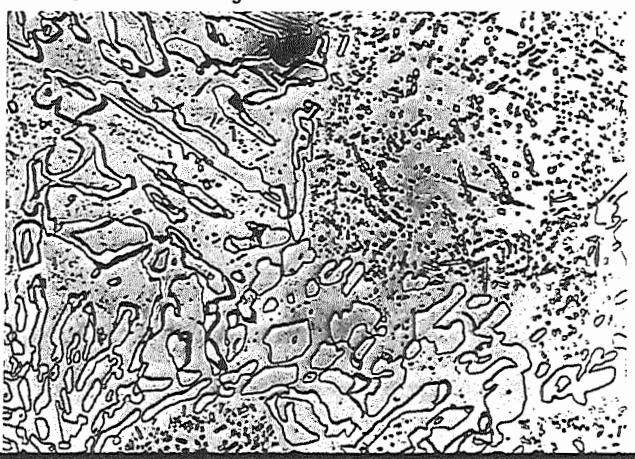
**Figura 5 - Liga IIB tratada termicamente. Detalhe de carboneto  $Mo_2C$ .**

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.*