

# **SOBRE A CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS FERROS FUNDIDOS BRANCOS ALTO CROMO E MOLIBDÊNIO<sup>1</sup>**

*Sandro Mauro de Carvalho<sup>2</sup>  
Marcelo Camargo Severo de Macedo<sup>3</sup>  
José Daniel Biasoli de Mello<sup>4</sup>  
Cherlio Scandian<sup>5</sup>*

## **Resumo**

Foram estudadas cinco famílias de ligas com relação Cr/C=10 e teores de molibdênio iguais a 0, 3, 6 e 9 % em peso, sendo que para cada família de liga foram elaboradas três composições hipoeutéticas (16, 20 e 24% Cr), uma eutética (28% Cr) e uma hipereutética (32% Cr). Com o objetivo de avaliar o efeito do Cr e do Mo nas ligas, foram realizados ensaios de dureza, difração de raios-X, metalografia quantitativa e qualitativa (microscopia óptica e eletrônica de varredura). As fases encontradas nas ligas isentas de Mo foram ferrita e/ou martensita mais  $M_7C_3$  para as hipoeutéticas e ferrita mais carboneto  $M_7C_3$  nas ligas eutéticas e hipereutéticas. A adição de Mo nas composições hipoeutéticas favorece a formação das fases  $M_6C$  e austenita. Já as ligas de composição eutética, hipereutética e a liga com 24% Cr e 9 % Mo apresentaram a formação dos dois tipos de carboneto em matriz de ferrita.

**Palavras-chave:** Ferro fundido branco ao cromo; Molibdênio; Microestrutura.

---

<sup>1</sup> Trabalho a ser apresentado no 60º Congresso Anual da ABM – Internacional – 25 a 28 de Julho – Belo Horizonte – MG – Brasil

<sup>2</sup> MSc - PPGEM, UFES – ES

<sup>3</sup> Professor Dr. PPGEM/UFES - ES - membro da ABM

<sup>4</sup> Professor Dr. LTM/FEM/UFU- MG - membro da ABM

<sup>5</sup> Professor Dr. PPGEM/UFES – ES - membro da ABM

## 1 INTRODUÇÃO

A seleção de materiais resistentes à abrasão é baseada, principalmente, em suas características mecânicas. A dureza é geralmente considerada uma propriedade importante para aplicações que requeiram elevada resistência à abrasão. No entanto, apenas para materiais monofásicos e alguns tipos de aço essa correlação entre dureza e resistência à abrasão é verificada. Para estruturas polifásicas, tais como os aços e ferros fundidos ligados, os fatores determinantes são o teor de carbono, a tenacidade e a microestrutura associada. A adição de carbono e elementos de liga induz a formação de carbonetos especiais como carbonetos de cromo, vanádio, molibdênio, nióbio e ferro. A formação de grandes quantidades de carbonetos durante a solidificação é uma maneira bastante eficaz de aumentar a resistência à abrasão destas ligas. A otimização destes efeitos é, no entanto, função do estado estrutural da matriz que o suporta. Normalmente, a melhor combinação de custos e resistência à abrasão é obtida com ligas constituídas de carbonetos duros e de uma matriz austeno–martensítica [1]

Certas propriedades influenciadas pelos elementos de liga nos ferros fundidos branco alto cromo (FFBAC) são de interesse em aplicações de desgaste abrasivo de alta severidade. O Mo, em particular, além de aumentar a temperabilidade da matriz, apresenta indícios de melhorar o desempenho em temperaturas importantes [2]. O desempenho dos FFBAC em uma dada aplicação é função, não somente da microestrutura e propriedades do material, mas, também, de parâmetros do tribosistema.

Este trabalho foi idealizado com base em um estudo realizado anteriormente onde foi feita a caracterização destas ligas para até 3% de Mo [3]. Porém, no presente estudo, as ligas contendo 6 e 9 % de Mo, também, são avaliadas.

Na seção 2, deste trabalho, será apresentada a metodologia empregada.

Os resultados e as discussões serão apresentados, respectivamente, na seção 3. Finalmente, as conclusões serão apresentadas na seção 4.

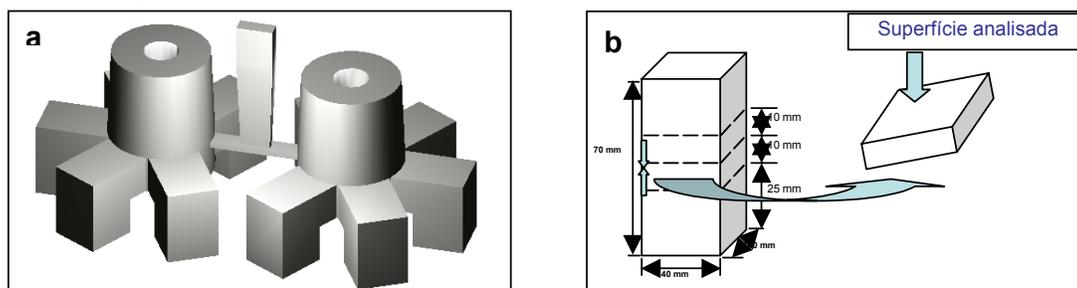
## 2 METODOLOGIA

A composição química com os principais elementos de liga das amostras estudadas se encontra na Tabela 1.

As ligas estudadas foram obtidas através de processo convencional de fundição em areia, no Instituto de Pesquisas Tecnológicas - SP, gerando blocos de dimensão 40x40x70 mm<sup>3</sup> (Figura 1a). Os blocos foram cortados em serra circular a base de CBN (MEYER & BURGER S.A., Suíça. Modelo T53) com pequena velocidade de avanço (0,006 mm/s), alta rotação e bem refrigerado, a região escolhida para retirada das amostras está ilustrada na Figura 1b.

As amostras foram preparadas para metalografia quantitativa e qualitativa com o reagente Villela e Murakami modificado aquecido até o início de ebulição [4], que foi o reagente que apresentou melhor contraste para o carboneto do tipo M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> e para o

eutético de  $M_6C$  (Figura 4). A contagem foi feita utilizando o software de domínio público Image J e o GSA desenvolvido na UFES.



**Figura 1.** a) Peça bruta de fundição com os canais e massalotes; b) Posicionamento dos cortes no bloco bruto de fusão.

**Tabela 1.** Composição química dos principais elementos das ligas no estado bruto de fusão.

Ligas	Análise Química (% em peso)					
	Cr	C	Mo	Si	Mn	Ni
16-0	17,16	1,82	0,0588	0,808	0,307	0,0836
16-3	16,09	1,52	3,05	0,862	0,298	0,0951
16-6	16,07	1,73	6,05	0,847	0,281	0,108
16-9	15,79	1,65	8,64	0,827	0,281	0,14
20-0	21,39	2,1	0,0282	1,06	0,317	0,0986
20-3	19,62	1,97	3,44	0,928	0,268	0,108
20-6	19,44	2	6,5	0,992	0,288	0,118
20-9	19,68	2,13	8,69	1,04	0,269	0,148
24-0	24,86	2,2	0,0276	1,21	0,312	0,113
24-3	23,44	2,36	3,2	1,21	0,306	0,118
24-6	23,36	2,24	6,22	1,22	0,285	0,139
24-9	23,56	2,46	9,54	1,28	0,317	0,111
28-0	28,71	2,52	0,089	1,45	0,311	0,127
28-3	27,46	2,61	3,31	1,41	0,296	0,116
28-6	27,77	2,74	6,38	1,47	0,305	0,106
28-9	27,74	2,75	9,73	1,5	0,283	0,112
32-0	32,59	3,08	0,0484	2,02	0,328	0,142
32-3	31,94	3,34	3,93	1,65	0,297	0,122
32-6	32,59	3,38	7,11	1,69	0,301	0,0917
32-9	31,81	3,34	9,01	1,62	0,276	0,0998

Foi realizada difração de raios-X, com radiação de  $Cu K\alpha$ , para investigar as fases presentes.

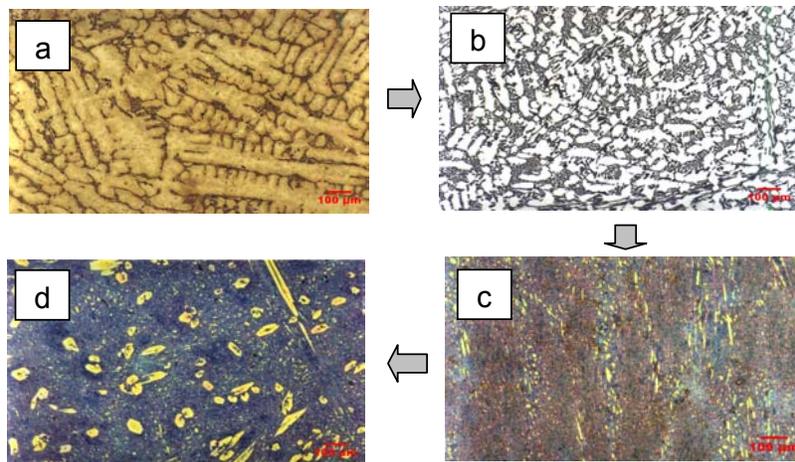
Os valores das durezas foram obtidos a partir de sete medições por amostra, em durômetro Vickers com carga de 10 Kgf, que são apresentadas na Figura 4.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observando em microscópio óptico as ligas atacadas com murakami modificado, foi verificado conforme Maratray e Usseglio-Nanot [5] que a quantidade da fase  $\gamma$ , formada durante a solidificação, influencia na morfologia do eutético. O carboneto

$M_7C_3$  tende a formar-se na região intergranular como uma rede de carbonetos eutéticos bem finos quando o volume residual, após a solidificação da fase  $\gamma$  é pequeno [5]. Estes carbonetos intergranulares (figura 2a) associados ao agregado eutético não apresentam uma distribuição contínua nos contornos de grão e desaparecem quando a taxa de carbonetos ultrapassa 20% em média. Lembrando que esta não continuidade é contestada por Powell e Heard [7].

Entre 20 e 30% de carbonetos, em média, o agregado eutético é constituído de lamelas radiais de carbonetos, cujos centros destes raios são os “corações” dos espaçamentos interdendríticos sobre uma matriz austenítica ou algum produto de transformação desta (figura 2b). O agregado deixa de formar esta estrutura radial, para assumir um aspecto lamelar (figura 2c), quando a fase  $\gamma$  não entrava mais a formação do eutético. Logo que a fração de carbonetos atinge entre 35 e 40% os carbonetos primários aparecem sob a forma de grandes cristais hexagonais (Figuras 2d e 4) [5, 6].



**Figura 2.** Evolução da morfologia dos carbonetos tipo  $M_7C_3$  à medida que a fração volumétrica destes aumenta. a) Liga hipoeutética com 9,9% de  $M_7C_3$ ; b) Liga hipoeutética com 26,2% de  $M_7C_3$ ; c) liga eutética com 33,3% de  $M_7C_3$ ; d) liga hipereutética com 38,4% de  $M_7C_3$  (ataque químico com reagente Murakami modificado).

**Tabela 2.** Frações volumétricas dos carbonetos tipo  $M_7C_3$ , do eutético  $M_6C$ +matriz e da Matriz ( - não foi medido).

% Cr	% Volumétrica										
	M7C3				Matriz				Eutético $M_6C$ + Matriz		
	% Mo				% Mo				%Mo		
	0	3	6	9	0	3	6	9	3	6	9
16	9,9	13,3	14,5	-	90,1	85,7	75,9	-	0,1	9,6	-
20	19,1	19,4	19,5	14,1	80,9	77,23	70,5	59,1	3,4	10,0	26,8
24	26,2	27,1	26,7	15,9	73,8	67,5	58,8	38,3	5,34	14,5	45,8
28	33,3	34,4	35,8	22,1	66,7	-	53	33,1	-	11,2	44,8
32	38,4	43,5	35,8	32,1	61,6	-	40,6	27,7	-	23,6	40,2

Para a mesma quantidade de Mo, a fração volumétrica total de carbonetos aumenta proporcionalmente com os teores de C e Cr. A relação abaixo fornece, com um desvio padrão de 2.13%, a percentagem de carbonetos K, em relação ao C e ao Cr [5, 6]:

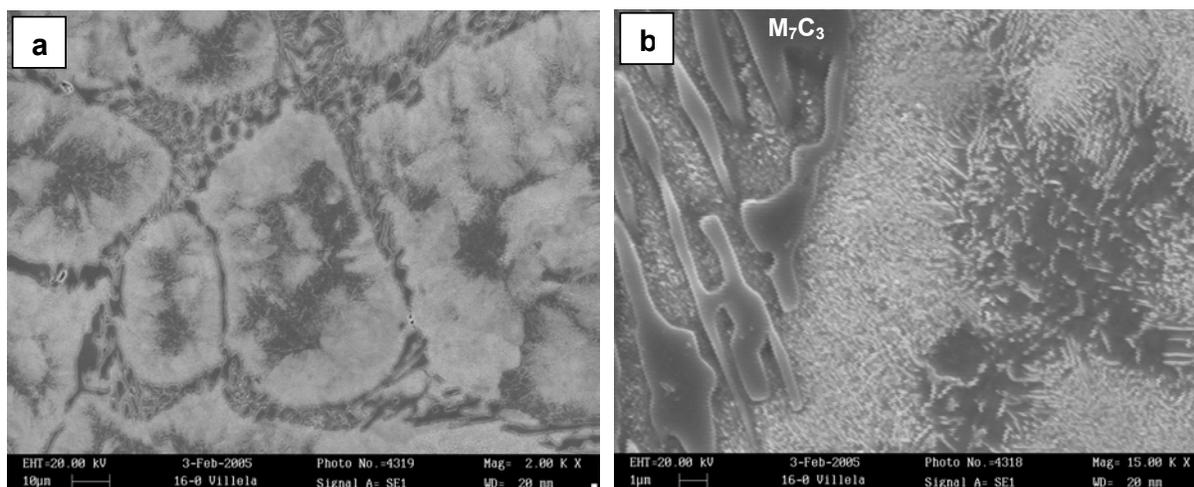
$$\%K = 12.33 (\%C) + 0.55 (\%Cr) - 15.2$$

As ligas com 9% em peso de Mo não seguem mais a relação acima citada proposta por Maratray [5] (Tabela 2).

As fases detectadas através de difração de raios-X se encontram na Tabela 3. Nas ligas 16-0 e 20-0, somente duas fases foram identificadas na difração de raios-X, carbonetos do tipo  $M_7C_3$  e ferrita. No MEV (Figura 3) foi observada uma estrutura consistindo de dendrita e carboneto eutético do tipo  $M_7C_3$  no espaço interdendrítico. No interior das dendritas, o centro é ferrita e pode ser notado que existe uma estrutura na borda, a qual revelada em aumentos maiores apresenta um aspecto lamelar tipo perlítico de  $M_7C_3$  e ferrita, semelhante ao encontrado por Maratray [5]. Já a liga hipoeutética 24-0 apresentou uma dureza maior (Figura 4) sugerindo matriz martensítica, provavelmente, com alguma perlita.

**Tabela 3.** Fases observadas na difração de raios-X.

%Cr	Fases Presentes			
	0% Mo	3% Mo	6% Mo	9% Mo
16	$M_7C_3$ e $\alpha$	$\gamma + \alpha$ ou $\alpha'$ ; $M_7C_3$ e $M_6C$	$\gamma + \alpha$ ou $\alpha'$ ; $M_7C_3$ e $M_6C$	$\gamma + \alpha$ ou $\alpha'$ ; $M_7C_3$ e $M_6C$
20	$M_7C_3$ e $\alpha$	$\gamma + \alpha$ ou $\alpha'$ ; $M_7C_3$ e $M_6C$	$\gamma + \alpha$ ou $\alpha'$ ; $M_7C_3$ e $M_6C$	$\gamma + \alpha$ ou $\alpha'$ ; $M_7C_3$ e $M_6C$
24	$\alpha$ ; $\alpha'$ e $M_7C_3$	$\gamma + \alpha$ ou $\alpha'$ ; $M_7C_3$ e $M_6C$	$\gamma + \alpha$ ou $\alpha'$ ; $M_7C_3$ e $M_6C$	$\alpha$ ; $M_7C_3$ e $M_6C$
28	$\alpha$ e $M_7C_3$	$\alpha$ ; $M_7C_3$ e $M_6C$	$\alpha$ ; $M_7C_3$ e $M_6C$	$\alpha$ ; $M_7C_3$ e $M_6C$
32	$\alpha$ e $M_7C_3$	$\alpha$ ; $M_7C_3$ e $M_6C$	$\alpha$ ; $M_7C_3$ e $M_6C$	$\alpha$ ; $M_7C_3$ e $M_6C$

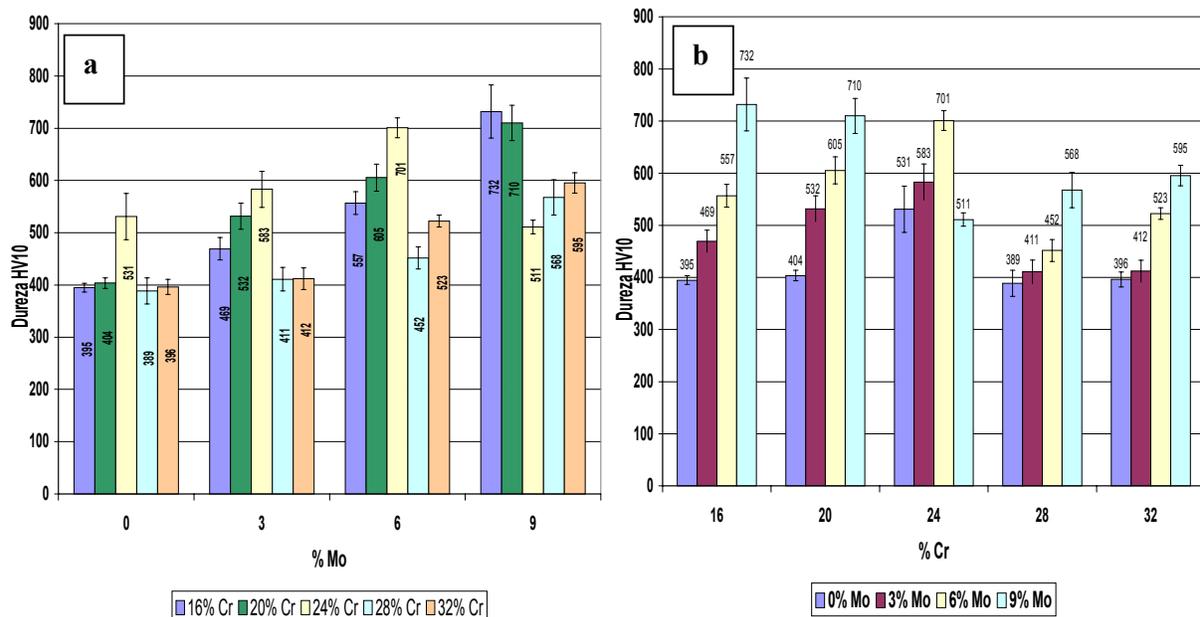


**Figura 3.** Imagem no MEV da liga 16-0, (a) ampliada 2000x; (b) Estrutura lamelar na borda da dendrita e entre os carbonetos eutéticos  $M_7C_3$ .

As ligas eutéticas e hipereutéticas sem Mo apresentaram na difração de raios-X picos de ferrita e de carbonetos do tipo  $M_7C_3$ . Analisando os resultados de dureza dessas ligas (Figura 4), os mesmos são similares aos das ligas 16-0 e 20-0, apesar de terem uma maior quantidade de carbonetos do tipo  $M_7C_3$ .

Este trabalho mostra, também, que a adição de Mo acarreta na formação do carboneto  $M_6C$  para a razão  $Cr/C = 10$  e não a do carboneto  $M_2C$  contrariando, assim, a literatura clássica [5] e confirmando de Mello [3].

Para as ligas hipoeutéticas, o Mo favorece ao surgimento de carbonetos eutéticos  $M_6C$  e de fase  $\gamma$ , como mostram as micrografias (Figura 5) e difratogramas de raios-X, o que acarreta num aumento de dureza (Figura 4). O carboneto  $M_6C$  apresenta uma morfologia do tipo lamelar que pode ser chamada de celular, uma vez que esta é formada por células descontínuas de lamelas alternadas (Figura 6), localizando-se nos espaços interdendríticos. À medida que aumenta a percentagem em peso de Mo, a fração volumétrica do eutético deste carboneto aumenta e a média da fração volumétrica de  $M_7C_3$  e a quantidade de matriz diminui. Nas ligas hipoeutéticas, a quantidade de fase  $\gamma$  aumenta até 6% de Mo, para 9% é observado uma queda desta fase chegando até ao desaparecimento da mesma no caso da liga 24-9 (Figura7); o que é confirmado pela queda da dureza da liga em questão (figura 4).



**Figura 4.** a) Influência do Mo na dureza HV<sub>10</sub>; b) Influência do Cr na dureza HV<sub>10</sub>.

Para as ligas eutéticas e hipereutéticas a adição de Mo, também, favoreceu ao surgimento de carbonetos eutéticos do tipo  $M_6C$ , porém não estimulou a presença da fase  $\gamma$ . Aumentando a quantidade de Mo, é observado um aumento na dureza, possivelmente pelo endurecimento por solução sólida da matriz, causada pelo Mo na ferrita e/ou pelo aumento da fração volumétrica de carbonetos.

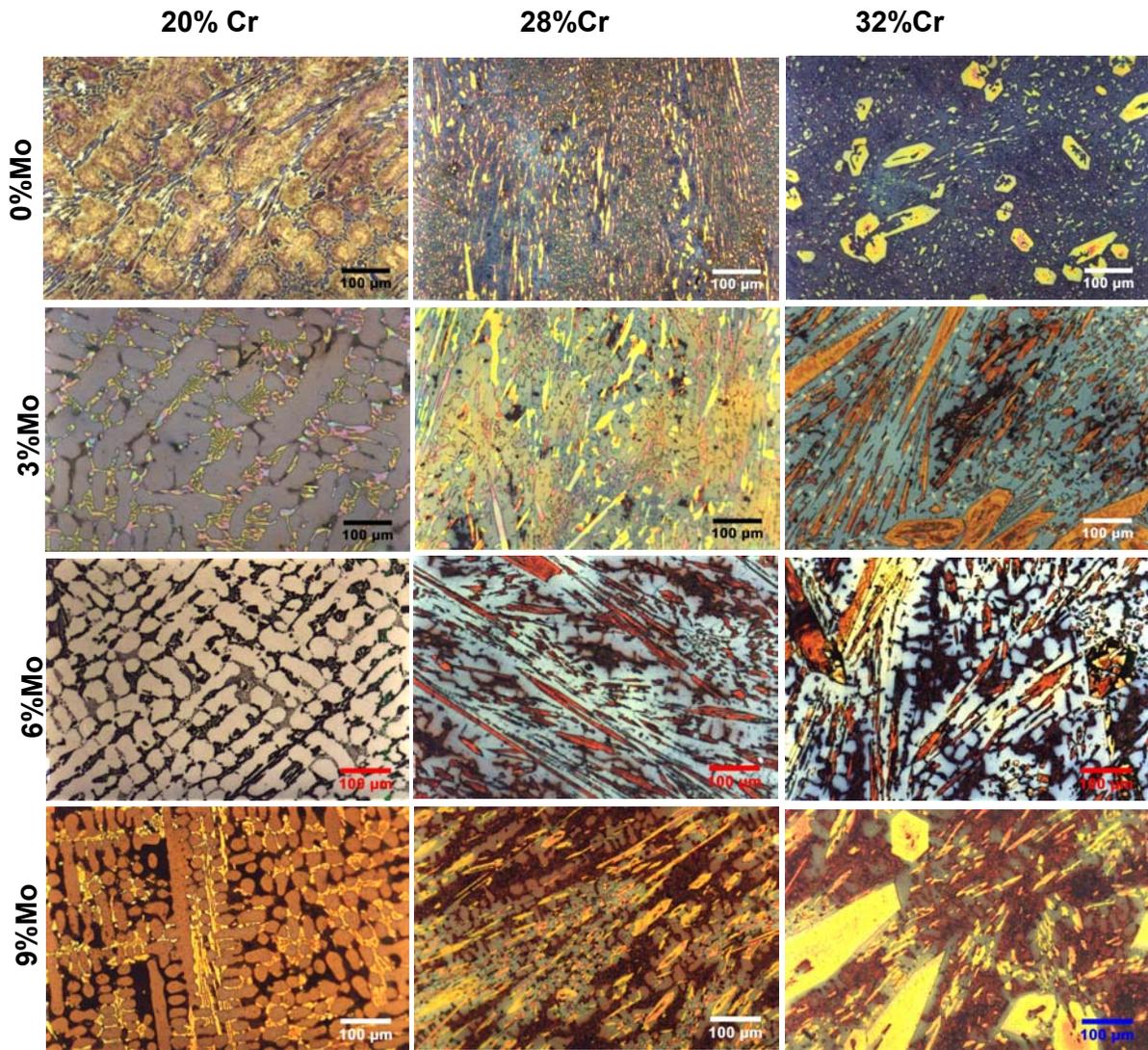


Figura 5. Micrografias das ligas com 20, 28 e 32%Cr, com teores 0, 3, 6 e 9%Mo (aumento 200x).

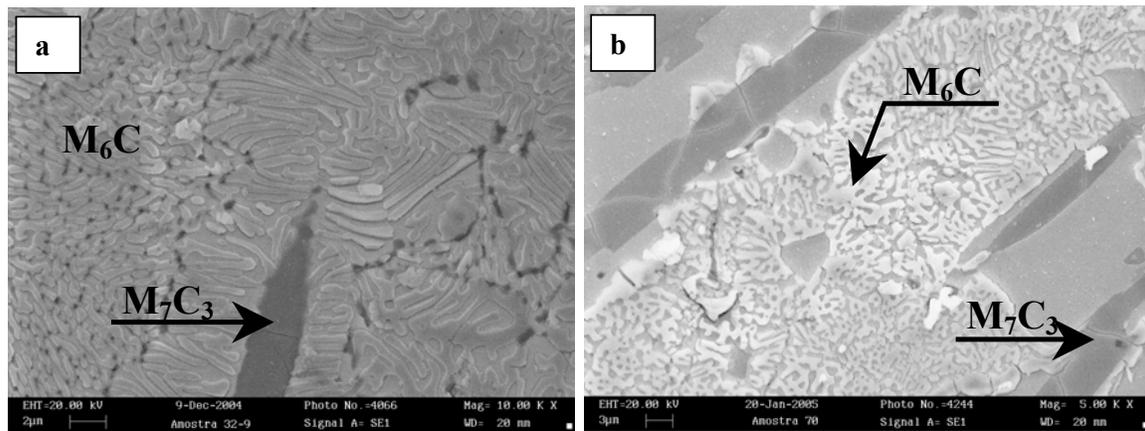


Figura 6. a) Liga 32-9; b) Liga 32-6.

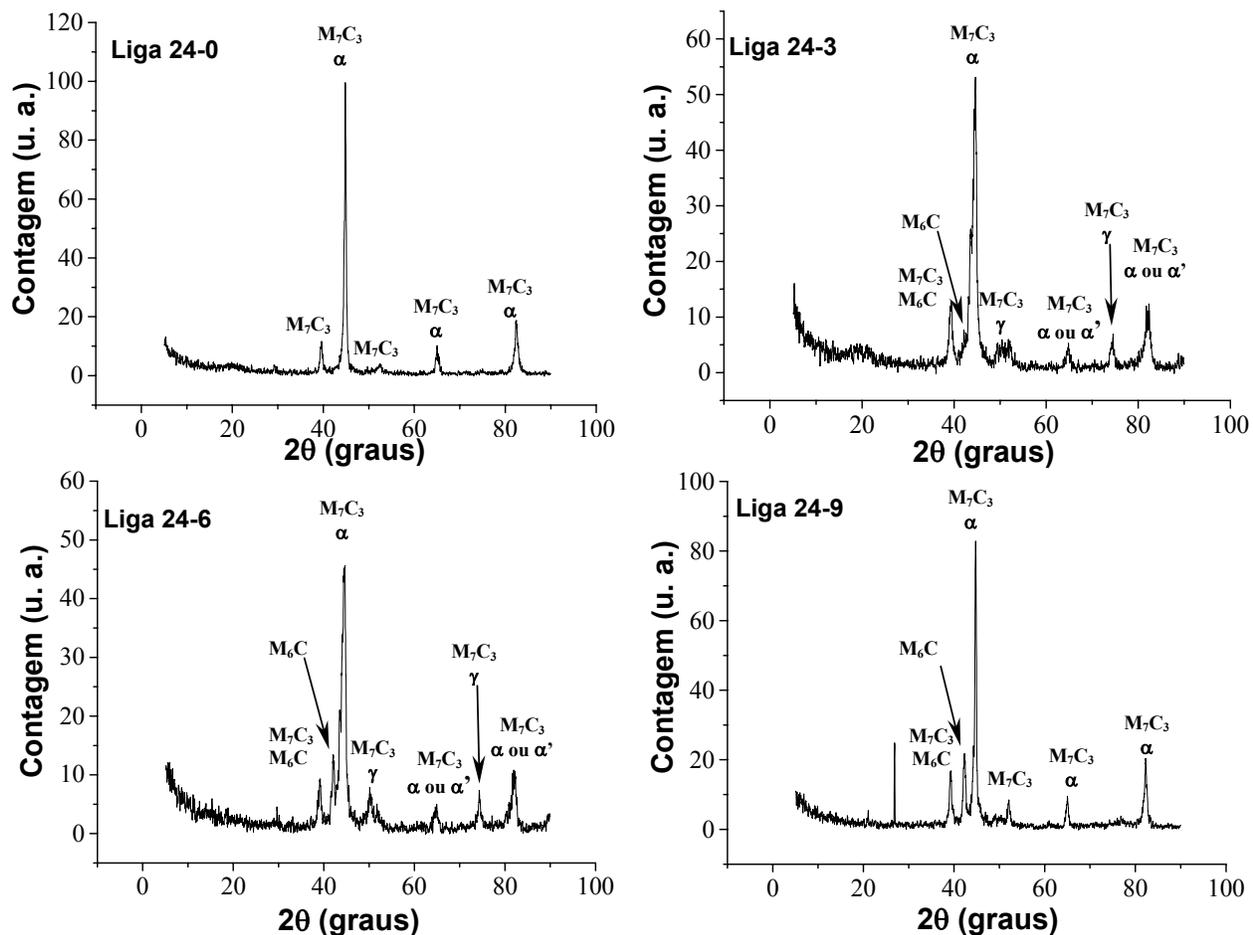


Figura 7. Difratogramas de raios-X para as ligas com 24%Cr e teores de 0, 3, 6 e 9% Mo.

#### 4 CONCLUSÕES

As ligas hipoeutéticas 16-0 e 20-0 apresentaram uma estrutura de dendritas com ferrita no centro e uma estrutura tipo lamelar bem refinada nas bordas constituídas de carbonetos  $M_7C_3$  + ferrita e carbonetos eutéticos  $M_7C_3$  no espaçamento interdendrítico.

A liga 24-0, como as duas hipoeutéticas citadas acima, também, apresentou duas fases na difração de raios-X, porém sua dureza sugere uma matriz martensítica com alguma ferrita.

A adição de 3, 6 e 9 %Mo para relação Cr/C=10 acarreta na formação de carbonetos eutéticos do tipo  $M_6C$ , contrariando Maratray [5] e confirmando de Mello [3]. Aumentando o teor de Mo nas ligas hipoeutéticas temos um aumento crescente da dureza destas ligas devido a presença de fase  $\gamma$  e de carbonetos eutéticos  $M_6C$ , exceto para a liga 24-9. Os difratogramas de raios-X mostram que a quantidade

desta fase atinge um máximo com 6% de Mo reduzindo em seguida para 9% de Mo, chegando a desaparecer no caso da liga 24-9. Foi observado nesta liga uma queda na dureza, sugerindo uma transformação da matriz para ferrita.

A fração volumétrica de carbonetos do tipo  $M_7C_3$  para as ligas com 9 % de Mo não segue a relação proposta por Maratray [5].

As ligas Hipereutéticas e eutéticas são ferríticas para todos os teores de Mo, mas a medida que aumentamos a quantidade de Mo a dureza aumenta de 396 HV<sub>10</sub> (0%Mo) para 595 HV<sub>10</sub>, possivelmente pelo endurecimento por solução sólida da matriz, por difusão do Mo na ferrita, ou pela diminuição da matriz presente, ou ambos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 J.B. de Mello, ABM, 41 (1985) 563-568.
- 2 M. Ikeda, T. Umeda, C. P. Tong, T. Suzuki, N. Niwa and O. Kato, ISIJ International, 32 (1992) 1157-1162.
- 3 J.D. de Mello, M. Durand-Charre and Hamar-Thibault, Metallurgical Transactions A, 14A (1983) 1793-1801.
- 4 W.K.Collins and J.C.Watson, Materials Characterization, 24 (1990) 379-386.
- 5 Maratray et R. Usseglio-Nanot, Facteurs affectant la structure des fontes blanches au chrome-molybdène. 1<sup>o</sup> ed. Paris, France; Climax Molybdenum (1972) 5-32.
- 6 C. P. Tabrett, I. R. Sare, and M. R. Ghomashchi, International materials Reviews, 41 (1996) 59-82.
- 7 G. L. F. Powell and L. S. Heard, Proceedings 34<sup>th</sup> Conference Australasian Institute of Metals (1981),58-62.
- 8 W. R. Thorpe and B. Chicco, Metallurgical Transactions A, 16A (1985) 1541-1549.

# ON THE MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF HIGH CHROMIUM-MOLYBDENUM WHITE CAST IRON<sup>1</sup>

*Sandro Mauro de Carvalho<sup>2</sup>  
Marcelo Camargo Severo de Macedo<sup>3</sup>  
José Daniel Biasoli de Mello<sup>4</sup>  
Cherlio Scandian<sup>5</sup>*

## **Abstract**

Five kind of alloys were studied with different molybdenum contents (0, 3, 6 and 9 wt%) and a fixed Cr/C ratio (=10). For each molybdenum content 3 hypoeutectic (16, 20 and 24 wt% Cr), 1 eutectic (28 wt% Cr) and 1 hypereutectic (32 %wt Cr) alloys were elaborated. The effect of Cr and Mo contents were evaluated with different techniques (hardness, X rays diffraction, optical microscopy and SEM). Only two phases were found in the Mo free alloys, the matrix and  $M_7C_3$  carbide. The matrix of two hypoeutectic compositions (16 and 20 wt% Cr) is ferrite and for 24 wt% Cr is martensite. For the eutectic and hypereutectic alloys, the matrix is ferrite. Besides the presence of  $M_7C_3$  carbide and ferrite, the Mo addition to the hypoeutectic alloys favors the formation of  $M_6C$  and austenite phases. On the other hand, the 24 wt% Cr (with 9 wt% Mo) alloy, the eutectic and hypereutectic compositions show the presence of the two carbides and ferrite matrix.

**Key-words:** High chromium white cast iron; Molybdenum; Microstructure.

---

<sup>1</sup> 60th ABM Congress – International – 25-28 July 2005 – Belo Horizonte – MG – Brazil

<sup>2</sup> MSc, PPGEM, UFES – ES – Brazil

<sup>3</sup> Dr., PPGEM/UFES – ES – Brazil – Member of ABM

<sup>4</sup> Dr., LTM/FEM/UFU – MG – Brazil – Member of ABM

<sup>5</sup> Dr., PPGEM/UFES – ES – Brazil – Member of ABM