



EFETO DO CARBONO E DO MOLIBDÊNIO NA MICROESTRUTURA DOS FERROS FUNDIDOS BRANCOS DE ALTO CROMO



AMILTON SINÁTORA (UNICAMP/FINEP, EPUSP)
FRANCISCO AMBRÓSIO FILHO (IPEN, EPUSP)
HÉLIO GOLDENSTEIN (EPUSP)
RICARDO FUOCO, EDUARDO ALBERTIN (IPT/SP)
& PAULO ROBERTO MEI (UNICAMP)

Estudaram-se os efeitos de três teores de carbono e da adição de 1,5% de molibdênio na estrutura de solidificação de ferros fundidos brancos com 15% de cromo.

Determinaram-se as variações das frações volumétricas de austenita primária e de carbonetos eutéticos, o número de partículas de carbonetos por unidade de comprimento de linha e o espaçamento médio entre braços secundários de dendritas.

Realizou-se análise térmica, determinando-se temperaturas de patamares de formação da austenita primária e do eutético.

A elevação do teor de C e a adição de Mo provocaram diminuição da temperatura do patamar de formação do eutético e engrossamento das partículas de carbonetos.

INTRODUÇÃO

Os ferros fundidos brancos com alto teor de cromo são empregados nas indústrias de mineração, cimento, cerâmica etc., devido à sua alta resistência ao desgaste abrasivo e relativa tenacidade [1], [2]. Estas propriedades são determinadas em grande parte pela microestrutura e pela composição química.

Os teores de cromo e carbono determinam o tipo e quantidade de carbonetos formados. Maiores quantidades destes elementos levam à formação de maiores frações volumétricas de carbonetos. Teores de cromo superiores a 10% levam à formação de carbonetos do tipo M_7C_3 , com melhorias significativas na tenacidade e dureza do material, em relação aos ferros fundidos de baixos teores de cromo, que apresentam carbonetos do tipo Mg_3C .

A fração volumétrica de carbonetos formados na solidificação influencia a resistência ao desgaste abrasivo. Segundo Zan-Guhr [3] o aumento da fração volumétrica de carbonetos leva a uma progressiva melhoria da resistência ao desgaste com um máximo próximo de 30% em volume de carbonetos. Esses resultados foram obtidos em ensaios de "roda de borracha" e do "pino", tanto para matrizes martensíticas como para matrizes austeníticas. Esse efeito seria devido à crescente proteção da matriz metálica, pelos carbonetos, até cerca de 30% em volume; a partir deste ponto passaria a predominar a fragilidade intrínseca dos carbonetos, levando a diminuição da resistência ao desgaste [1].

Frequentemente especificam-se para esses materiais matrizes martensíticas. Para se obter a necessária temperabilidade nas seções espessas usualmente encontradas nas suas aplicações típicas requerem-se elevados teores de cromo dissolvido na matriz, bem como adições de elementos de liga, sendo o molibdênio o de mais amplo emprego.

A importância do molibdênio na temperabilidade fez com que a maior parte dos trabalhos encontrados na literatura técnica se voltasse ao estudo desse efeito, chegando para segundo plano seu efeito na solidificação.

Este trabalho visa estudar o efeito do carbono e do molibdênio na estrutura de solidificação de ferros fundidos com 15% de cromo, bem como medir estes efeitos através de metalografia quantitativa.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foi elaborada uma liga base contendo 15% Cr e 2,5% C, a partir da qual foram feitas refusões para ajustes de composição química, de acordo com a Tabela 1.

Para preparação das ligas utilizou-se sucata de aço para estampagem, ferro cromo baixo carbono, cromo metálico, ferro molibdênio e grafite.

A liga base foi elaborada em forno de indução de

1000Hz, utilizando cadinho de 250kg com revestimento refratário a base de magnésia.

As refusões foram feitas em forno de indução de 3000Hz em cadinho de carbeto de silício com capacidade de 2kg, superaquecendo-se a 1500°C.

Tabela 1. Composições Químicas Visadas

Ligas	% Cr	% C	% Mo
15 - 2,5 - 0	15	2,5	0
15 - 2,5 - 1,5	15	2,5	1,5
15 - 3,0 - 0	15	3,0	0
15 - 3,0 - 1,5	15	3,0	1,5
15 - 3,6 - 0	15	3,6	0
15 - 3,6 - 1,5	15	3,6	1,5

Utilizaram-se como corpos-de-prova copos para análise térmica fornecidos pela ECIL SA, feitos pelo processo "shell molding", com 30mm de diâmetro interno e aproximadamente 50mm de altura, com um tempo de resfriamento-diapêse disposto verticalmente.

Os vazamentos foram feitos diretamente do cadinho de carbeto de silício, de maneira a permitir um bom controle da temperatura do vazamento mantida sempre entre 1450-1460°C.

As curvas de resfriamento foram obtidas em registrador do tipo Leeds Northrup com escala entre 1100 e 1400°C.

Para análise metalográfica foram empregadas amostras obtidas da seção transversal dos copos logo acima da ponta do termopar, de modo a obter a melhor correlação entre microestrutura e análise térmica.

A determinação das frações volumétricas de microconstituintes foi feita através de contagens em grade de 25 pontos, efetuando-se 30 contagens por amostra, segundo a norma ASTM-E-562-76 [4]. A contagem do número de carbonetos por comprimento de linha foi efetuada utilizando-se um círculo de 0,31mm de perímetro. O espaçamento de braços de dendrita foi medido alinhando-se sua escala com o eixo principal das dendritas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises químicas de carbono são apresentados conjuntamente aos resultados de análises térmica e metalografia quantitativa (Tabelas 2 a 5). Os teores dos demais elementos situam-se nas seguintes faixas: cromo 15 a 16%; molibdênio 1,5 a 1,6% (<0,001 nas ligas sem adição); manganês 0,2 a 0,3%; silício 0,1 a 0,3%.

Ligas sem Molibdênio

Análise Térmica. A Tabela 2 e Figura 1 mostram o efeito da porcentagem de carbono na temperatura do patamar correspondente à formação da austenita primária (T_p) e na temperatura da reação eutética (T_e). Observa-se um nítido decréscimo da temperatura do primeiro patamar à medida que a composição se aproxima do eutético. Esta maior proximidade do eutético pode ser verificada na Figura 2, obtida por Jackson [5].

Estes resultados mostram ainda que ocorreu um decréscimo na temperatura da reação eutética com o aumento da porcentagem de carbono. Isto se deve aos diferentes caminhos de solidificação, como se vê na Figura 2, pois a calha eutética monovariante é atingida em temperaturas cada vez menores à medida que se aumenta a porcentagem de carbono.

Com os valores determinados para as temperaturas dos patamares eutéticos, pode-se traçar, esquematicamente, os caminhos de solidificação, apresentados na Figura 2 como linhas pontilhadas.

Tabela 2. Porcentagem de Carbono Analisado e Temperatura de Patamar de Formação da Austenita (T_p) e do Eutético (T_e), para as Ligas sem Molibdênio

Ligas	%C Analisado	T_p (°C)	T_e (°C)
15 - 2,3 - 0	2,25	1321	1253
15 - 3,0 - 0	2,94	1281	1238
15 - 3,6 - 0	3,52	-	1229

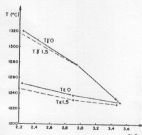


Figura 1. Temperatura de Patamar de Formação da Austenita (T_p) e do Eutético (T_e) em Função do Teor de Carbono; Ligas sem Molibdênio e com 1,54 Mn.

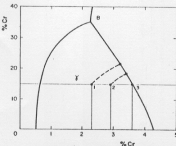


Figura 2. Superfície Líquida do Sistema Fe-Cr-C Mostrando Esquematicamente o Caminho de Solidificação das Ligas Contendo 15,4 de Cromo e 2,24(C), 2,94(C) e 3,54(C)

No caso da liga eutética (3,54C) observou-se recalcência na curva de resfriamento. A temperatura atingida durante a recalcência.

Metalografia Quantitativa - Fração Volumétrica de Austenita (V_V) e Fração Volumétrica de Carbonetos Eutéticos (V_{VK}). A Tabela 3 e a Figura 3 mostram que a fração volumétrica de austenita diminuiu com o aumento do teor de carbono. Este fato também é consequência da recalcência próxima da calha eutética monovariante para teores crescentes de carbono. A diminuição da fração volumétrica de austenita primária foi muito mais intensa quando se variou o teor de carbono de 2,9 para 3,52 do que de 2,2 para 2,93. Quantitativamente, entre 2,2 e 2,93 de carbono a taxa média de diminuição da quantidade de austenita foi de 245 por 1% de carbono, passando para 683 por 1% de carbono no intervalo compreendido entre 2,9 e 3,52. Isto se deve aos diferentes caminhos de solidificação e também à maior inclinação da superfície líquida à medida que a composição da liga fica mais próxima do eutético.

Tabela 3. Resultados de Metalografia Quantitativa para as Ligas sem Molibdênio

Ligas	V_V	V_{VK}	N_{LT}	N_{LE}	E_{BD} (mm)
15 - 2,3 - 0	58,7	16,1	75,1	181,7	23,5
15 - 3,0 - 0	41,7	25,2	82,2	141,3	15,4
15 - 3,6 - 0	0	28,6	84,6	84,6	-

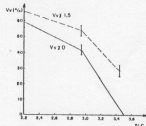


Figura 3. Fração Volumétrica de Austenita Primária (V_V) em Função do Teor de Carbono; Ligas sem Molibdênio e com 1,54 Mn.

A Tabela 3 e a Figura 4 mostram que o aumento da porcentagem de carbono leva ao aumento da fração volumétrica de carbonetos eutéticos, resultado semelhante ao obtido por diversos autores [3], [6] e [8].

O efeito da fração volumétrica de carbonetos na resistência no desgaste dos ferros fundidos brancos com altos teores de cromo levou a que se buscassem relações empíricas entre a composição química e a fração volumétrica de carbonetos. Maratray [6], [7], obteve as seguintes equações utilizando metalografia quantitativa automática e por contagens visuais, respectivamente:

$$V_{VK} = 12,33 (\%C) + 0,55 (\%Cr) - 15,2 \quad (1)$$

$$V_{VK} = 11,3 (\%C) + 0,5 (\%Cr) - 13,4 \quad (2)$$

Os valores de frações volumétricas de carbonetos medidos no presente trabalho são todos menores do que os valores previstos pelas equações de Maratray. Entretanto o mesmo acontece com os resultados dos trabalhos de Bartel [8] e Zam-Gahr [3], sendo que, dos resultados apresentados por este último autor, é possível se obter por

regressão linear a equação:

$$V_{VK} = 9,6 (4C) + 0,9 (4Cr) - 16,7 \quad (5)$$

com um erro padrão de 2,2. Com esta equação pode-se calcular as frações volumétricas de 18,4; 25,0 e 30,4% para as composições de 2,2; 2,9 e 3,5% de carbono utiliza das neste trabalho, para as quais se mediram experimentalmente 16,1; 25,2 e 28,0% de carbonetos, respectivamente, valores bem próximos dos previstos pela equação 3.

As diferenças nas frações volumétricas de carbonetos medidos pelos diversos autores neste trabalho em relação às previstas por Maratray, podem ser devidas às diferentes técnicas de medida empregadas e principalmente ao fato de este autor ter empregado, para obtenção das equações 1 e 2, ligas dentro de um campo muito vasto de composições.

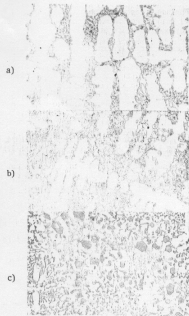


Figura 4. Micrografias das Ligas com 15% de Cromo, Isentas de Molibidênio: a) 2,2% C; b) 2,9% C; e, c) 3,5% C

Metagrafia Quantitativa - Número de Carbonetos Eutéticos (N_{E}). Os resultados relativos aos números de carbonetos eutéticos encontram-se na Tabela 3 e Figura 5. Nota-se que aumenta o número de carbonetos por centímetro de linha no volume total da amostra (N_{E}), medida que aumenta a porcentagem de carbono. Este resultado é consequência direta da diminuição da fração volumétrica de austenita primária à medida que a composição se aproxima da alça eutética.

Com o objetivo de verificar o efeito do carbono na estrutura de solidificação do eutético, independentemente da fração volumétrica de austenita primária, calculou-se o número de carbonetos por unidade de linha no volume eutético (N_{E}), ou seja, descontou-se do comprimento total de linha a parcela correspondente à fração volumétrica de austenita primária. Desta maneira o valor N_{E} corresponde a: $N_{E} / (1 - V_{p1})$.

Verifica-se na Tabela 3 que o aumento da porcentagem de carbono levou a um pronunciado decréscimo no número de partículas por unidade de linha no volume eutético (N_{E}), ou seja, causou um engrossamento dos carbonetos eutéticos. Este efeito é evidenciado nas micrografias da Figura 4. Fenômeno análogo ocorre nos ferros fundidos carentes onde, em ligas bastante hipoeutéticas, ocorre formação de grafita muito ramificada (tipos D e E), e o aumento do carbono equivalente leva à formação de grafita tipo A, mais grossiera, mantidas constantes as condições do banho e de resfriamento.

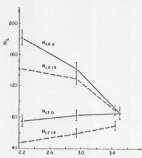


Figura 5. Número de Partículas de Carboneto no Volume Total N_{E} e no Volume Eutético N_{E} em Função do Teor de Carbono; Ligas sem Molibidênio e com 1,5% Mn

A análise microestrutural das ligas mostra três fatores que contribuem para a diminuição de N_{E} com o aumento do teor de carbono: a) Os carbonetos ficam mais longos quando se passa da liga com 2,2 para a liga com 2,9% de carbono; b) Os carbonetos ficam mais espessos à medida que aumenta a distância em relação ao centro de uma mesma célula eutética; este engrossamento é maior para a liga com 2,9% de carbono do que para a liga com 2,2%. c) Aparecem com muito mais frequência carbonetos hexagonais e grossieiros na periferia das células eutéticas, para os teores de carbono mais elevados; estes carbonetos são bem maiores na liga eutética.

Os esquemas da Figura 6 e as micrografias da Figura 4 ilustram as observações acima.



Figura 6. Evolução da Morfologia do Eutético com o Aumento do Teor de Carbono (1) 2,2%; (2) 2,9%; (3) 3,5%

O maior comprimento dos carbonetos eutéticos na liga com 2,9% de carbono, em relação à liga com 2,2%, pode dever-se simplesmente a uma menor restrição ao crescimento devido à diminuição da fração volumétrica de austenita, conforme sugerido por Bartel [8].

O engrossamento dos carbonetos à medida que aumenta a distância em relação ao centro das células eutéticas, bem como a formação de carbonetos hexagonais na periferia destas, pode se dever à mudança da composição do carboneto formado, uma vez que a solidificação do líquido

do eutético se dá com progressivo espessamento em croo e enriquecimento em carbono, com pode servir-se como parâmetro a calha eutética na Figura 2.

Uma outra explicação para o espessamento dos carbonetos é que o aumento da reação eutética na temperatura do patamar obtido na curva de resfriamento implica em diminuição do superresfriamento em relação à temperatura de equilíbrio, uma vez que esta temperatura diminui à medida que a solidificação progride.

Na liga eutética, o engrossamento da estrutura (diminuição do M_{21}) em relação às ligas hipoeutéticas deve-se principalmente à alteração de morfologia do eutético, verificando-se predominância dos carbonetos com seção hexagonal.

Metalografia Quantitativa - Espessamento dos Braços Secundários de Dendritas (\bar{L}_{D2}). O espessamento entre braços secundários de dendritas (\bar{L}_{D2}) diminuiu com o aumento do teor de carbono de 2,2 para 2,9% (Tabela 3).

Monólio [9], estudando ligas Al-Cu verificou também o refinamento das dendritas com a aproximação da composição eutética.

Uma possível causa para este comportamento seria o coalescimento de braços de dendritas devido ao maior intervalo de solidificação, no caso da liga de menor teor de carbono [10].

Ligas com 1,5% de Molibdênio

De modo geral todos os resultados obtidos nas ligas com 1,5% Mo foram afetados pela adição de carbono da mesma forma que nas ligas sem molibdênio. À medida que o teor de carbono aumentou, ocorreu progressiva diminuição das temperaturas dos patamares de formação da austenita e do eutético, bem como da quantidade de austenita formada, enquanto ocorria aumento na fração volumétrica de carbonetos e diminuição do número de partículas de carbonetos no volume eutético.

Análise Térmica. A Tabela 4 mostra as temperaturas de patamares de formação da austenita e eutéticos para as ligas com 1,5% Mo, em função da porcentagem de carbono, resultados evidenciados na Figura 1.

Tabela 4. Resultados das Análises Térmicas - Ligas com 1,5% Mo

Ligas	% Análizado	T_{A1} (°C)	T_{E1} (°C)
15-2,3-1,5	2,2	1317	1246
15-3,0-1,5	2,9	1281	1232
15-3,6-1,5	3,4	1231	1224

A adição de 1,5% Mo levou apenas as pequenas abaxamentos na temperatura do patamar de formação de austenita na liga com 2,2% de carbono e não se verificou nenhum efeito na liga com 2,9%. Entretanto, observou-se diminuição desta temperatura em ligas com 15% de cromo e 2,2% de carbono, com adição de 2,5% de molibdênio mesmo no caso de ligas com 20% de cromo e 3,0% de carbono, para adições de 1,0; 1,5; e 2,5% de molibdênio [12]. Jellinghaus [11] também verificou diminuição dessa temperatura.

Na Figura 1 nota-se que o aumento do teor de molibdênio levou a uma diminuição da temperatura do patamar eutético, em ligas com mesmo teor de carbono. Resultado semelhante foi obtido por Matsubara [13] que verificou o abaxamento nas temperaturas de início e fim da solidificação do eutético, com a adição de Mo a ligas com 15 e 30% de cromo.

A alteração das temperaturas de patamares eutético e de formação da austenita indica alteração nos caminhos de solidificação da liga com 1,5% de molibdênio em relação às ligas sem molibdênio, conforme sugerido por De Mele [14].

Metalografia Quantitativa - Fração Volumétrica de Austenita (V_{A1}) e Fração Volumétrica de Carbonetos Eutéticos (V_{EK}). Comparando-se os resultados das Tabelas 3 e 5, verifica-se que a adição de 1,5% de molibdênio provoca variações dos valores de M_{21} , M_{E2} e V_{EK} . Estas variações são evidenciadas nas Figuras 3 e 5.

Tabela 5. Resultados de Metalografia Quantitativa para as Ligas com 1,5% Mo

Ligas	V_{A1}	V_{EK}	N_{A1}	N_{E2}	\bar{L}_{D2} (μ m)
15-2,3-1,5	65,6	17,0	48,8	141,7	23,5
15-3,0-1,5	54,4	25,4	59,6	130,8	14,3
15-3,6-1,5	27,4	29,3	69,1	95,1	-

A semelhança dos resultados de Zim-Gahr [3] e Martray [15], não se constatou variação da fração volumétrica de carbonetos eutéticos.

Nota-se na Figura 3 que a adição de 1,5% de molibdênio provocou aumento da quantidade de austenita primária.

Este efeito pode ser explicado pelas alterações nos caminhos de solidificação provocadas por este elemento, como mencionado anteriormente.

A Figura 5 evidencia a diminuição do número de partículas de carbonetos no volume total e no volume eutético provocada pela adição de 1,5% de molibdênio, verificando-se, portanto, que este elemento promove o engrossamento dos carbonetos.

Resultado semelhante foi obtido por Matsubara [13] para ligas com 15 e 30% de cromo com a adição de 2,5% de molibdênio.

Estes resultados podem ter sido causados por efeitos cinéticos, de tipo envenenamento de interface de crescimento, provocados pelo molibdênio.

CONCLUSÕES

O aumento do teor de carbono nas ligas com 15% de cromo levou a:

- Decréscimo das temperaturas dos patamares de formação da austenita e do eutético.
- Diminuição da fração volumétrica de austenita primária.
- Aumento da fração volumétrica de carbonetos eutéticos.
- Engrossamento dos carbonetos eutéticos.
- Diminuição da distância média entre braços secundários de dendritas de austenita.

A adição de 1,5% de molibdênio levou a:

- Diminuição das temperaturas dos patamares de formação da austenita e do eutético.
- Aumento da fração volumétrica de austenita primária.
- Engrossamento dos carbonetos eutéticos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito dos Convênios ERUSP-FINEP número 37-85-0321-00 e IPT-FINEP número 37-85-0320-00.

Um dos autores (H.G.) agradece ao CNPq pela bolsa de Pesquisa número 30.0288/80M.

Os autores agradecem a colaboração dos técnicos Claudio G. Sên (ERUSP), José Ademir Francisco (IPT), Gilberto Marcelino dos Santos (IPT), Rubens F. Marton (IPT), e ainda à Marita Veris Oliveira pela cuidadosa atendimento de alterações não sempre legíveis.

do eutético se dá com progressivo espessamento em croo e enriquecimento em carbono, com pode servir-se como parâmetro a calha eutética na Figura 2.

Uma outra explicação para o espessamento dos carbonetos é que o aumento da reação eutética na temperatura do patamar obtido na curva de resfriamento implica em diminuição do superresfriamento em relação à temperatura de equilíbrio, uma vez que esta temperatura diminui à medida que a solidificação progride.

Na liga eutética, o engrossamento da estrutura (diminuição do M_{21}) em relação às ligas hipoeutéticas deve-se principalmente à alteração de morfologia do eutético, verificando-se predominância dos carbonetos com seção hexagonal.

Metalografia Quantitativa - Espessamento dos Braços Secundários de Dendritas (\bar{L}_{D2}). O espessamento entre braços secundários de dendritas (\bar{L}_{D2}) diminuiu com o aumento do teor de carbono de 2,2 para 2,9% (Tabela 3).

Monólio [9], estudando ligas Al-Cu verificou também o refinamento das dendritas com a aproximação da composição eutética.

Uma possível causa para este comportamento seria o coalescimento de braços de dendritas devido ao maior intervalo de solidificação, no caso da liga de menor teor de carbono [10].

Ligas com 1,5% de Molibdênio

De modo geral todos os resultados obtidos nas ligas com 1,5% Mo foram afetados pela adição de carbono da mesma forma que nas ligas sem molibdênio. À medida que o teor de carbono aumentou, ocorreu progressiva diminuição das temperaturas dos patamares de formação da austenita e do eutético, bem como da quantidade de austenita formada, enquanto ocorria aumento na fração volumétrica de carbonetos e diminuição do número de partículas de carbonetos no volume eutético.

Análise Térmica. A Tabela 4 mostra as temperaturas de patamares de formação da austenita e eutéticos para as ligas com 1,5% Mo, em função da porcentagem de carbono, resultados evidenciados na Figura 1.

Tabela 4. Resultados das Análises Térmicas - Ligas com 1,5% Mo

Ligas	% Análizado	T_{γ} (°C)	T_{E} (°C)
15 - 2,3 - 1,5	2,2	1317	1246
15 - 3,0 - 1,5	2,9	1281	1232
15 - 3,6 - 1,5	3,4	1231	1224

A adição de 1,5% Mo levou apenas as pequenas abaximentas na temperatura do patamar de formação de austenita na liga com 2,2% de carbono e não se verificou nenhum efeito na liga com 2,9%. Entretanto, observou-se diminuição desta temperatura em ligas com 15% de cromo e 2,2% de carbono, com adição de 2,5% de molibdênio mesmo no caso de ligas com 20% de cromo e 3,0% de carbono, para adições de 1,0; 1,5; e 2,5% de molibdênio [12]. Jellinghaus [11] também verificou diminuição dessa temperatura.

Na Figura 1 nota-se que o aumento do teor de molibdênio levou a uma diminuição da temperatura do patamar eutético, em ligas com mesmo teor de carbono. Resultado semelhante foi obtido por Matsubara [13] que verificou o abaximento nas temperaturas de início e fim da solidificação do eutético, com a adição de Mo a ligas com 15 e 30% de cromo.

A alteração das temperaturas de patamares eutético e de formação da austenita indica alteração nos caminhos de solidificação da liga com 1,5% de molibdênio em relação às ligas sem molibdênio, conforme sugerido por De Meilo [14].

Metalografia Quantitativa - Fração Volumétrica de Austenita (V_{γ}) e Fração Volumétrica de Carbonetos Eutéticos (V_{EK}). Comparando-se os resultados das Tabelas 3 e 5, verifica-se que a adição de 1,5% de molibdênio provoca variações dos valores de M_{21} , M_{E} e V_{γ} . Estas variações são evidenciadas nas Figuras 3 e 5.

Tabela 5. Resultados de Metalografia Quantitativa para as Ligas com 1,5% Mo

Ligas	V_{γ}	V_{EK}	$N_{E,T}$	N_{E}	\bar{L}_{D2} (μ m)
15 - 2,3 - 1,5	65,6	17,0	48,8	141,7	23,5
15 - 3,0 - 1,5	54,4	25,4	59,6	130,8	14,3
15 - 3,6 - 1,5	27,4	29,3	69,1	95,1	-

A semelhança dos resultados de Zim-Gahr [3] e Martray [15], não se constatou variação da fração volumétrica de carbonetos eutéticos.

Nota-se na Figura 3 que a adição de 1,5% de molibdênio provocou aumento da quantidade de austenita primária.

Este efeito pode ser explicado pelas alterações nos caminhos de solidificação provocadas por este elemento, como mencionado anteriormente.

A Figura 5 evidencia a diminuição do número de partículas de carbonetos no volume total e no volume eutético provocada pela adição de 1,5% de molibdênio, verificando-se, portanto, que este elemento promove o engrossamento dos carbonetos.

Resultado semelhante foi obtido por Matsubara [13] para ligas com 15 e 30% de cromo com a adição de 2,5% de molibdênio.

Estes resultados podem ter sido causados por efeitos cinéticos, de tipo envenenamento de interface de crescimento, provocados pelo molibdênio.

CONCLUSÕES

O aumento do teor de carbono nas ligas com 15% de cromo levou a:

- Decréscimo das temperaturas dos patamares de formação da austenita e do eutético.
- Diminuição da fração volumétrica de austenita primária.
- Aumento da fração volumétrica de carbonetos eutéticos.
- Engrossamento dos carbonetos eutéticos.
- Diminuição da distância média entre braços secundários de dendritas de austenita.

A adição de 1,5% de molibdênio levou a:

- Diminuição das temperaturas dos patamares de formação da austenita e do eutético.
- Aumento da fração volumétrica de austenita primária.
- Engrossamento dos carbonetos eutéticos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito dos Convênios ERUSP-FINEP número 37-85-0321-00 e IPT-FINEP número 37-85-0320-00.

Um dos autores (H.G.) agradece ao CNPq pela bolsa de Pesquisa número 30.0288/80M.

Os autores agradecem a colaboração dos técnicos Claudio G. Söhn (ERUSP), José Ademir Francisco (IPT), Gilberto Marcelino dos Santos (IPT), Rubens F. Marton (IPT), e ainda à Marita Veris Oliveira pela cuidadosa da tipografia de nuscrtos nem sempre legíveis.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Albertin, E.; Ambrósio F^o, F.; Fuoco, R.; Goldens-stein, H. e Sinatoro, A., "Ferros Fundidos Brancos Resistentes ao Desgaste Abrasivo", Trabalho apresentado no III CONBRAIND, Outubro 1985, São Paulo.
- [2] De Long, K.A. e Humeicut, H.A., "Aspectos Práticos e Metalúrgicos de Ferro Fundido Branco Martensítico com Referência a sua Aplicação contra a Abrasão", *ABM - Boletim*, 30, 1953, p. 21-46.
- [3] Zum-Gahr, K.H., "Abrasive Wear of White Cast Irons", *Wear*, 64, 1980, p. 175-194.
- [4] Norma ASTM-E-562-72.
- [5] Jackson, R.S., "The Austenite Liquidus Surface and Constitutional Diagram for the Fe-Cr-C Meta-stable System", *Journal of the Iron and Steel Institute*, Janeiro 1970, p. 163-167.
- [6] Muratray, F., "Choice of Appropriate Compositions for Chromium-Molybdenum White Irons", *Transactions of the American Foundrymen's Society*, 79, 1972, p. 121-124.
- [7] Muratray, F.; Paulatin, A. e Rabbe, P., "Contribution a l'Étude des Alliages Fe-Cr-Mo-C", *Bulletin du Cercle d'Études des Métaux*, Saint Etienne, 1973, p. 11-54.
- [8] Bartel, A.; Hoffmeister, H. e Shlrnann, E., "Einfluss des Gefüges auf die Mechanischen Eigenschaften von Gusseisen Mit rd. 3% und 14% Cr für Walzen", *Archiv für das Eisenhüttenwesen*, 46, 1975, 10, p. 601-606.
- [9] Mondolfo, L.F., Ibravath, J.A., "Dendritic Growth", *Acta Metallurgica*, 10, 1962, p. 1037-1042.
- [10] Flemings, M.C., *Solidification Processing*, MacGraw-Hill, 1972.
- [11] Jellinghaus, W., "Zur Kinetik des Vierstoff Systems Eisen-Chrom-Molybdän-Kohlenstoff", *Archiv für das Eisenhüttenwesen*, 42, 1972, 2, p. 133-142.
- [12] 3^o Relatório Convênio FINEP/PADCT-EPUSP/IPT, Convênios n^{os} 37-85-0320-00 e 37-85-0321-00.
- [13] Matsubara, Y.; Ogi, K. e Matsuda, K., "Influence of Alloying Elements on the Intectic Structures of High Chromium Cast Irons", *Tetsuo to Hagan*, 1983.
- [14] De Melo, J.D.B., "Structures Metalurgiques et Caractérisation de L'abrasion des Fontes Blanches au Chrome", Thèse - Institute National Polytechnique, Grenoble, 1983.
- [15] Muratray, F. e Usseglio Namot, R., "Atlas of Transformations Characteristics of Chromium and Chromium-Molybdenum White Irons", *Climax Molybdenum Co.*, 1970.

SUMMARY

The effects of 3 levels of carbon and of 1.5% Mo addition on the solidification structures of a 15% Chromium white cast iron were studied.

The volume fraction of primary austenite and of eutectic carbides, as well as the number of carbide particles per unit length and the mean secondary dendrite arm spacing were measured.

By means of thermal analysis, thermal arrests corresponding to the formation of the primary austenite and of the eutectic were determined.

The increase in the carbon content and the addition of Mo led to lowering of the thermal arrests and to coarsening of the particles.