

SEQUÊNCIA DE SOLIDIFICAÇÃO E METALOGRAFIA QUANTITATIVA DE
FERROS FUNDIDOS BRANCOS COM 1% DE CRÔMO

AMILTON SINATORA(1)
FRANCISCO AMBRÓSIO FILHO(2)
HÉLIO GOLDENSTEIN(3)
RICARDO FROCO(4)
EDUARDO ALBERTIN(5)
PAULO ROBERTO NETI(6)

RESUMO

Estudaram-se os efeitos de três teores de carbono na estrutura de solidificação de ferros fundidos brancos com 1% de cromo.

Determinaram-se as variações das frações volumétricas de austenita primária e de carbonetos eutéticos e o número de partículas de carbonetos por unidade de comprimento de linha.

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

A elevação do teor de carbono provocou diminuição da temperatura do palmar de formação do eutético e engrossamento das partículas de carbonetos.

Trabalho a ser apresentado no Seminário sobre Processos de Fundição e Controle de Qualidade de Produtos Fundidos, COPUN/ANM, a ser realizado em abril de 1967 em Joinville, SC.

- (1) Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia, Pesquisador do Convênio FINEP/EPUSP.
(2) Engenheiro Metalurgista, Doutor em Engenharia, Divisão de Metalurgia do IPEN.
(3) Engenheiro Metalurgista, Doutor em Engenharia, Professor Assistente do Departamento de Engenharia Metalúrgica da EPUSP.
(4) Engenheiro Metalurgista, Agrupamento de Fundição, Divisão de Metalurgia do IPT.
(5) Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia, Chefe do Agrupamento de Fundição, Divisão de Metalurgia do IPT.
(6) Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia, Professor Assistente do Departamento de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

1. INTRODUÇÃO

A resistência ao desgaste e a tenacidade dos ferros fundidos brancos de alto cromo são determinadas em grande parte pela microestrutura de solidificação. Entretanto, o número de artigos dedicados à compreensão dessa microestrutura é relativamente pequeno, destacando-se os trabalhos de Maratray (1,2,3) e, mais recentemente, os de Dupin (4), de Mello (5) e Matsubara (6).

No presente trabalho, que é parte de um programa mais abrangente (7,8), estuda-se o efeito da variação do teor de carbono sobre parâmetros quantitativos da microestrutura. Em etapa posterior estes parâmetros serão correlacionados com propriedades mecânicas visando construir o quadro:

composição química ↔ parâmetros de microestrutura ↔ propriedades mecânicas

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi elaborada uma liga base contendo 15% Cr e 2,31 C, a partir da qual foram feitas refusões para ajustes de composição química. Para preparação das ligas utilizou-se sucata de aço para estagnagem, ferro cromo baixo carbono, cromo metálico e grafite.

A liga base foi elaborada em forno de indução de 1000Hz, utilizando cadinho de 250 kg com revestimento refratário a base de magnésia.

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

Utilizaram-se como corpos de prova copos para análise térmica fornecidos pela ECIL S/A., feitos pelo processo "shell molding", com 30mm de diâmetro interno e aproximadamente 50mm de altura, com um termopar de cronel-alumel disposto verticalmente.

Os vazamentos foram feitos diretamente do cadinho de carbetto de silício, de maneira a permitir um bom controle da temperatura de 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

de 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 (7). A contagem do número de carbonetos por comprimento de linha foi efetuada utilizando-se um círculo de 0,314mm de perímetro.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 1 apresenta-se a posição das ligas estudadas em relação à superfície líquida do diagrama de equilíbrio Fe-Cr-C. Para a liga A1 indicada na figura 1 (2,31C) a solidificação inicia-se com a formação de austenita. O líquido se enriquece em carbono e cromo até atingir a linha $U_1 - U_2$, quando começa a ocorrer a reação eutética monovariante $L \rightarrow \gamma + \text{M}_7\text{C}_3$. Esta reação prossegue, com a composição do líquido seguindo a calha em direção a U_2 , até o líquido se esgotar.

Na solidificação da liga A2 verifica-se, em relação a liga A1, que as temperaturas de formação da austenita (T_f) e do eutético (T_E) são menores, e que a fração volumétrica de austenita primária (V_{V_f}) é menor em função da maior proximidade da calha eutética. Nota-se ainda na figura 1, que a liga A3 solidifica-se apenas com a formação do eutético, à temperaturas inferiores às das outras ligas. Os resultados experimentais correspondentes são apresentados nas tabelas I e II e nas figuras 2 e 3.

TABELA I - Porcentagem de Carbono Analisado, e Temperatura de Pátamar de Formação da Austenita (T_f) e do Eutético (T_E)

LIGAS	IC ANALISADO	T_f (°C)	T_E (°C)
15 - 2,3	2,25	1.521	1.253
15 - 3,0	2,94	1.281	1.238
15 - 3,6	3,52	-	1.229

TABELA II - Fração Volumétrica de Austenita (V_{V_A}) e de Carbonetos (V_{V_C})

LIGAS	% C ANALISADO	V_{V_A} (%)
15 - 2,3	2,25	58,7 ± 3,1
15 - 3,0	2,94	41,7 ± 3,3
15 - 3,6	3,52	0

Constata-se que estes resultados correspondem ao esperado em função da posição das ligas no diagrama Fe-Cr-C (fig. 1). Deve-se chamar a atenção para o fato de que a solidificação da austenita e do eutético em equilíbrio ocorreria ao longo de faixas de temperatura, enquanto que na prática, por efeitos cinéticos e devido ao equilíbrio térmico com o meio externo, verificam-se patamares de temperatura associados a essas transformações (tabela I).

Tendo em vista o seu efeito potencial nas propriedades que influenciam diretamente a resistência ao desgaste, são particularmente importantes os parâmetros metalográficos relativos à quantidade, morfologia e distribuição dos carbonetos. A tabela III mostra os resultados das medidas de fração volumétrica de carbonetos, número de partículas de carboneto por unidade de comprimento no volume eutético e no volume total. As medidas de números de partículas são apresentadas graficamente na figura 4.

TABELA III - Número de Partículas de Carbonetos no Volume Total (N_{LT}) e no Volume Eutético (N_{LE}) em Função do Teor de Carbono.

LIGAS	% C ANALISADO	V_{V_C} (%)	N_{LT}	N_{LE}
15-2,3	2,25	16,1 ± 2,7	75,1 ± 7,5	181,7 ± 11,1
15-3,0	2,94	25,2 ± 3,4	82,2 ± 6,9	141,3 ± 9,4
15-3,6	3,52	28,6 ± 3,5	84,6 ± 6,5	84,6 ± 6,5

Nota-se o aumento do número de carbonetos por comprimento de linha no volume total da amostra (N_{LT}), a 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 linha 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_{LE}), ou seja, descontou-se do comprimento total de linha a parcela correspondente à fração volumétrica de austenita primária. Desta maneira o valor N_{LE} corresponde a: $N_{LE} / (1 - V_{V_A})$.

Verifica-se na tabela III que o aumento da porcentagem de carbono levou a um pronunciado decréscimo no número de partículas por unidade de linha no volume eutético (N_{LE}). Este efeito é evidenciado no gráfico da figura 4. Fenômeno análogo ocorre nos ferros fundidos cinentos 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 grosseira, mantidas constantes as condições do banho e de resfriamento.

Este resultado pode ser explicado considerando dois fatores que atuam no sentido de refinar os carbonetos eutéticos. Um fator relacionado à partição do espaço entre as dendritas de austenita e o eutético. Quanto mais hipoeutética for a liga menor será o volume restante para a solidificação do eutético e a célula eutética terá menor diâmetro.

Outro fator está relacionado à influência da composição química. Quanto mais hipoeutética a liga, mais elevada a temperatura e maior o teor de cromo na solidificação do líquido eutético, como mostram os caminhos de solidificação da figura 1. Isto poderia causar refino dos carbonetos, pois, de acordo com Matsubara (9), quanto maior o teor de cromo de ligas eutéticas menor o intervalo de solidificação.

A análise microestrutural das ligas revela que: 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 2,94 de carbono do que para a liga com 2,21. c) Aparecem com muito mais frequência carbonetos hexagonais e grosseiros na periferia das células eutéticas, para os teores de carbono mais elevados; estes carbonetos são maiores na liga eutética, como mostram as micrografias da figura 5.

Algumas dessas observações também são válidas quando se considera o crescimento de uma célula eutética de uma liga em particular. Comparando-se o centro com o contorno de uma célula eutética verifica-se que neste último os carbonetos ficam mais espessos, mais espaçados e com morfologia hexagonal, como ilustra a micrografia da figura 6.

O aumento da distância entre carbonetos do centro para o contorno da célula eutética pode ser explicado através da sequência de solidificação de uma liga eutética. A solidificação se inicia com a nucleação das colônias; à medida que estas crescem a composição e a temperatura do líquido seguem a linha eutética de U_1 para e_1 como mostra a figura 1, ou seja, a linha U_1e_1 indica as temperaturas e composições de equilíbrio da solidificação do eutético. Nas experiências, a solidificação do eutético ocorreu, ao menos em parte, a uma temperatura constante ("patamar"). Isto acarreta superresfriamentos cada vez menores em relação a linha U_1e_1 , à medida que prossegue a reação eutética, como mostra a figura 7.

Superresfriamentos menores levam a menores frequências de ramificação dos carbonetos aumentando a distância entre as partículas observadas metalograficamente. Outra explicação para a menor ramificação dos carbonetos à medida que se aumenta a distância em relação ao centro da célula eutética pode ser o acúmulo de impurezas junto a interface sólido/líquido, causando alteração do superresfriamento constitucional.

O espessamento de carboneto à medida que se aproxima da borda da célula eutética pode ser atribuído à mudança da forma de crescimento desta fase. No início da solidificação da célula eutética, com superresfriamentos maiores, há um excedente de potencial termodinâmico que pode ser gasto criando interfaces. Os carbonetos e a austenita tendem a adotar a forma que possibilita crescer em maior velocidade. Posteriormente, com superresfriamentos menores, há me-

nores potenciais termodinâmicos para a transformação e os carbonetos adotam formas que dispõem menor energia de superfície por unidade de volume. Uma evidência neste sentido é que no contorno das células eutéticas nota-se com maior frequência carbonetos com seção nitidamente hexagonal, forma de equilíbrio desta fase.

4. CONCLUSÕES

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

- A) Decréscimo das temperaturas dos patamares de formação da austenita e do eutético.
- B) Diminuição da fração volumétrica de austenita primária.
- C) Aumento da fração volumétrica de carbonetos eutéticos.
- D) Engrossamento dos carbonetos eutéticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MARATRAY, F. & USSEGLIO-NANOT, R. - "Factors affecting the structure of chromium and chromium-molybdenum white irons". *Chrom Molybdenum Co.*, 1970, 32 p.
2. MARATRAY, F. & RECHET, S. - "Fundaciones blancas de alto contenido en cromo resistentes a la abrasion" - Colada, vol. 12, nº 9 1970, pp. 183-192.
3. MARATRAY, F. & USSEGLIO-NANOT, R. - Atlas - Courbes de Transferections de Fontes Blanches au Chrome et au Chrome-Molybdene. *Chrom Molybdenum S.A.*, Paris, 1970, 136 p.
4. DUPIN P., SAVENA, J. & SCHISSLER, J.M. "A structural study of chromium white cast irons". *Transactions AFS*, vol. 154, 1982, pp. 711-718.
5. DE MELLO, J.D.R. - "Structures Metalurgiques et Caracterisation de l'abrasion des Fontes Blanches au Chrome". Tese Doutorado - Grenoble, França, 1983, 141 p.
6. MATSUBARA, Y., KEISAKU, O. & MATSUDA, K. - "Influence of alloying elements on the eutectic structures of high chromium cast irons" *IMONO*, 51, vol. 8, pp. 545-550.

7. Relatórios dos Convênios FINEP/IPT (nº 37-85.0320.00) e FINEP/EPUSP (nº 37-85.0321.00). "Desenvolvimento de Materiais Resistentes ao Desgaste Abrasivo para a Indústria de Mineração".
8. SINATORA, A. - Dissertação de Mestrado - "Efeito do Carbono, Cromo e Molibdênio na Solidificação de Ferros Fundidos Brancos com Alto Teor de Cromo". UNICAMP, 1986.
9. MATSUBARA, Y., OGI, K. & MATSUDA, K. - "Eutectic solidification of high-chromium cast iron-eutectic structures and their quantitative analysis". - Transactions AFS, vol. 72, 1981, pp.183-196

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito dos Convênios EPUSP-FINEP número 37-85.0321.00 e IPT-FINEP número 37-85.0320.00.

Os autores agradecem a colaboração dos técnicos Cláudio C. Shm (EPUSP), José Ademar Francisco (IPT), Gilberto Marcellino dos Santos (IPT), Rubens F. Marton (IPT), e ainda à Maria Crude pela cuidadosa destilografia de manuscritos nem sempre legíveis.

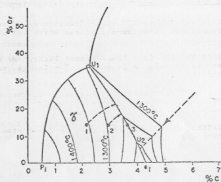


Figura 1 - Superfície líquidas do Sistema Fe-Cr-C. Mostrando Esquemáticamente o Caminho de Solidificação das Ligas Contendo 15% de Cromo e 2,2%C(1), 2,9%C(2) e 3,5%C(3).

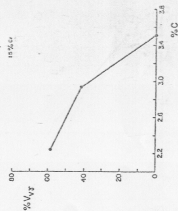


Figura 3 - Perfil Micrográfico de Abstração Eutectica (10x) em Função do Teor de Carbono em Ligas com Molibdênio.

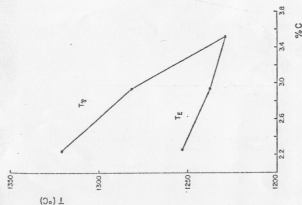


Figura 2 - Temperatura de Eutectico em Função do Teor de Carbono em Ligas com 15% de Cromo e 2,2% de Mo.

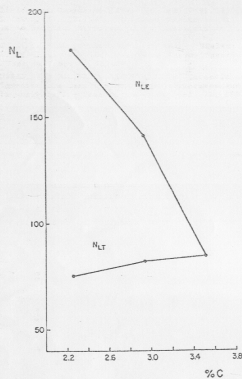


Figura 4 - Número de Partículas de Carbonetos no Volume Total (N_{LT}) e no Volume Eutético (N_{LK}) em Função do Teor de Carbono para as Ligas com 15% de Cromo e 5% de Molibdênio.

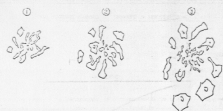


Figura 5 - Evolução da Morfologia do Eutético com o Aumento do Teor de Carbono (1) 2,25C; (2) 2,92C; (3) 3,52C.



Figura 6 - Micrografia da amostra com 15%Cr e 3,05C, com 500 X de aumento. Ataque eletrolítico com ácido crômico.

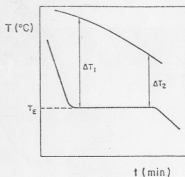


Figura 7 - Esquema da Variação dos Superresfriamentos em Reação a Linha U_1 e U_2 , em Função do Tempo de Solidificação no Patamar Eutético.

EFEITO DA MORFOLOGIA DE CRESCIMENTO DA GRAFITA SOBRE O COMPORTAMENTO DIMENSIONAL DOS FERROS FUNDIDOS DURANTE A SOLIDIFICAÇÃO (1)

André D'Alb Neto (2)

RESUMO

Estudou-se o efeito do mecanismo de crescimento da grafita sobre o comportamento dimensional de alguns tipos de ferros fundidos durante a solidificação.

Utilizou-se a técnica de análise dilatométrica medindo-se o deslocamento das paredes do corpo de prova, variando-se a quantidade de magnésio residual.

Constatou-se que a intensidade da expansão aumenta quando a grafita passa do crescimento de forma lamelar para vermicular e nodular, continuando a aumentar com o incremento do magnésio, associada principalmente a mudança da morfologia de crescimento. Também observou-se que os maiores valores nos alongamentos estão associados com as maiores expansões das arestas, mostrando a interação entre a contração líquida e a expansão da grafita.

ABSTRACT

The effect of the graphite growth mechanism was studied under the dimensional behavior of some types of cast irons during the solidification.

The dilatometrical analysis technique was used by measuring the test specimen wall displacement with the amount variation of residual magnesium.

It was verified that when the graphite growth was altered successively from lamellar to vermicular and nodular form the expansion intensity increased. The expansion intensity continued to increase with the increase of residual magnesium, associated principally with the change of growth morphology. It was also observed that the largest shrinkage cavities fissures were associated with the largest wall expansions, showing the interaction of liquid shrinkage with graphite expansion.

1 - Trabalho a ser apresentado no seminário "Processos de Fundição e Controle de Qualidade de Produtos Fundidos" - Joinville - SC - Abril de 1987.

2 - Membro da ABM - Engenheiro Metalúrgico e Pós-Engenheiro de Desenvolvimento de Materiais da Empresa Brasileira de Compressores S/A. - EMBRACO