

ABSTRACT

It was verified the viabilities of production and utilization of frozen sand moulds, to be used for non-ferrous metals (Al and Pb).

It was analysed freezing times, yield strenght and heating time in air during solidification of metal in moulds achieved in different conditions of water amount and freezing temperatures. Results were favourable in every aspects: easy production and operation of moulds, mechanical characteristics higher than those of conventional sand moulds, high in-air heating time and compatibility between heating time of mould and solidification time of ingot in it.

Ingots obtained in frozen moulds showed superficial roughosity and macrostructure similar to those got in conventional sand moulds cast ingots, and a substantial decrease in internal microporosity.

It can be concluded that frozen moulds are suitable for easy utilization in cast houses, even presenting advantages when compared to conventional sand moulds.

EFEITO DO CARBONO, CROMO E MOLIBDÊNIO NA SOLIDIFICAÇÃO E MICROESTRUTURA DE FERROS FUNDIDOS BRANCOS COM 15 OU 20% DE CROMO

- AMILTON SIMATORA(1)
- FRANCISCO ANTONÍO FILHO(2)
- RÉLIO GULBERSTEIN(3)
- RICARDO FUGO(4)
- EDUARDO ALBERTIN(5)
- PAULO ROBERTO MEI(6)

RESUMO

Efetuaram-se experimentos de solidificação em amostras de 10mm de diâmetro, em ligas com 15% ou 20% de cromo com teores de carbono 2,3; 3,0 e 3,61. Para cada teor de carbono estudado adicionou-se 1,5 e 2,5% de molibidênio.

Verificou-se que a elevação do teor de carbono levou a diminuição das temperaturas dos patamares de formação da austenita e do eutético, ao abaixamento do número de partículas no volume eutético, à elevação do número de partículas no volume total, bem como a diminuição da fração volumétrica da austenita primária e do espaçamento entre braços de dendritas.

A adição de molibidênio provocou a diminuição das temperaturas dos patamares de formação da austenita e do eutético, a diminuição do número de partículas no volume total e no volume eutético e o aumento da fração volumétrica da austenita primária.

Quando se comparou as ligas com 15% e as ligas com 20% de cromo verificou-se a elevação das temperaturas dos patamares de formação do eutético, a elevação do número de partículas no volume total e no volume eutético e a diminuição da fração volumétrica da austenita primária nas ligas com 20% de cromo.

Trabalho a ser apresentado no XIII Congresso Anual da ANM e ser realizado em outubro de 1.987, em Salvador, Bahia.

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

## 1. INTRODUÇÃO

A sequência de solidificação e a microestrutura dos ferros fundidos brancos com alto cromo dependem da composição química. Os teores de cromo e carbono irão determinar a quantidade de austenita primária na solidificação bem como a natureza ( $M_3C$  ou  $M_7C_3$ ) do carbeto eutético formado.

Segundo Maratray e Nanot (1) a quantidade de austenita primária formada na solidificação determina a microestrutura do eutético. Segundo estes autores, quando a fração volumétrica de austenita primária é elevada, o carbeto tende a "segregar" ao longo dos contornos de grão. Se a fração volumétrica de carbonetos atinge 30 a 30%, a morfologia do eutético poderia ser descrita como células ou colônias eutéticas. Uma terceira morfologia descrita por Maratray ocorre em ligas nas quais a austenita não condiciona a formação do eutético, como em ligas próximas da composição eutética. Maratray (1) descreve estas estruturas como lamelares.

Entretanto, a resolução da austenita por ataque profundo permitiu (2) a observação direta da estrutura de carbonetos eutéticos com microscópio eletrônico de varredura. Verificou-se que o carbeto é interconectado dentro de cada célula eutética e interpenetra-se com a austenita de forma muito semelhante ao silício do eutético em ligas Al-Si modificadas.

Matsubara (3) verificou que o aumento do teor de cromo de 15 para 30% levou a uma diminuição do diâmetro da célula eutética e simultaneamente à diminuição do espaçamento entre carbonetos na borda da célula eutética. Estes dois efeitos ocorrem devido à diminuição do intervalo de solidificação eutética.

Embora Matsubara não tenha discutido o efeito do carbono, as suas medidas experimentais permitem concluir que a elevação do teor de carbono aumenta o diâmetro da célula eutética, bem como a distância entre carbonetos no contorno da célula.

Outros autores verificaram que a morfologia do eutético era tanto mais refinada quanto maior a velocidade de resfriamento (4).

Nota-se, na análise da literatura, que existem três abordagens distintas, todas refletindo uma parcela dos fenômenos que condicionam a morfologia do eutético. Uma abordagem, devida a Maratray (1), baseia-se na partição do espaço durante a solidificação. Deste ponto de vista, o volume de austenita permite um maior ou menor cresci-

mento do agregado eutético. Outra abordagem atribui mudanças de forma do eutético a diferenças de composição química das ligas, em particular ao efeito do teor de cromo refinando o eutético  $M_7C_3$  (3). Por fim, atribui-se a maiores velocidades de resfriamento o efeito de refino da estrutura eutética (4).

O molibdênio tem sido muito empregado como elemento de liga nos ferros fundidos brancos com alto cromo principalmente para aumentar a temperabilidade sem elevar substancialmente a temperatura de início de formação da martensita, não levando portanto ao aumento da quantidade de austenita retida após a têmpera. Por esta razão grande número de trabalhos têm sido realizados sobre o efeito do molibdênio nos tratamentos térmicos, ao passo que são escassos os estudos do efeito do molibdênio na microestrutura de solidificação das ligas Fe-Cr-C.

Jellinghaus (5), em um dos poucos trabalhos sobre o efeito de cromo e molibdênio na estrutura de solidificação verificou que a adição conjunta destes elementos e ligas Fe-Cr-C provocava o abasamento da temperatura da superfície líquidas. Concluiu também que os carbonetos poderiam ser  $M_6C$  dependendo da relação  $1Cr/1C$  e do teor de molibdênio da liga.

Nos teores de molibdênio usualmente empregados nos ferros fundidos brancos de alto cromo ocorreria, segundo Maratray (1), partição do molibdênio entre a austenita e os carbonetos ( $M_7C_3$  e  $M_6C$ ).

De Mello (6) utilizando análise térmica diferencial e difração de raios X verificou em ligas com relação  $1Cr/1C = 5$ , que o líquido remanescente após a solidificação do eutético  $\gamma-M_7C_3$  dava origem ao carbeto  $M_6C$ . Já em ligas com relação  $1Cr/1C \geq 10$ , o líquido residual dava origem a carbonetos  $M_6C$ . Com estes resultados ficou evidenciado que a relação  $1Cr/1C$  pode condicionar os teores de molibdênio do carbeto de fim de solidificação. Em outro trabalho (7) verificou-se não haver  $M_6C$  em uma liga com relação  $1Cr/1C = 41$  e 3%Mo.

Sinner (8) estudou ligas 15% Cr, com carbono entre 2,6 e 2,8% e molibdênio entre 0 e 4%, verificou que o molibdênio não alterava a fração volumétrica de carbonetos na estrutura bruta de fundição. Esta conclusão é corroborada pela análise estatística dos dados de fração volumétrica de carbonetos publicados por Maratray e Nanot (1).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi elaborada uma liga base contendo 15% ou 20% de cromo e 2,3%

de carbono, a partir da qual foram feitas refusões para ajustes de composição química. Os teores obtidos de Cr e Mo foram próximos aos pretendidos e os teores de carbono são mostrados na tabela 1.

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

Os vazamentos foram feitos diretamente do cadinho de carvão de silício, de maneira a permitir um bom controle da temperatura de vazamento mantida entre 1430-1450°C (155Cr) e 1480-1500 (205Cr).

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. 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

As ligas com os menores teores de carbono são hipoeutéticas enquanto que a com teor mais elevado é eutética, tanto nas ligas com 15 ou 20% de cromo, como mostra a micro da figura 1.

Análise Térmica - A tabela I mostra o efeito da porcentagem de carbono na temperatura dos patamares correspondentes à formação da austenita primária (T<sub>v</sub>) e na temperatura da reação eutética (T<sub>e</sub>).

Observa-se um nítido decréscimo da temperatura do patamar da austenita a medida que a composição se aproxima do eutético. Esta maior proximidade do eutético pode ser verificada na figura 2.

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 casinhos 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.

A adição de 1,5% de molibdênio levou apenas a um pequeno abaixamento na temperatura do patamar de formação da austenita na liga com

2,3% de carbono e não se verificou nenhum efeito na liga com 3,0%.

A dificuldade de se detectar variações na temperatura do patamar de formação de austenita devidas ao molibdênio deve-se à sensibilidade da medida em relação a pequenas variações do teor de carbono e da velocidade de resfriamento. Desta forma, não foi possível verificar para todas as ligas os efeitos da adição de molibdênio no abaixamento da T<sub>v</sub>.

Na figura 3 nota-se que o aumento do teor de molibdênio levou a uma diminuição progressiva da temperatura do patamar do eutético, em ligas com mesmo teor de carbono.

O abaixamento dos patamares de formação da austenita e do eutético indicam que o molibdênio, nos teores empregados, produz alterações no diagrama ternário Fe-Cr-C, o que não impede, entretanto, o uso deste diagrama para a interpretação da solidificação de ligas comerciais, desde que observadas estas pequenas variações.

Verifica-se, comparando-se as temperaturas dos patamares para as ligas com 15 e 20% de cromo, que as temperaturas dos patamares de formação dos eutéticos são menores para as ligas com 15% de cromo. Não se compararam as temperaturas dos patamares de formação da austenita uma vez que houve diferença na temperatura de vazamento entre as duas séries de experiências.

As posições relativas das ligas no diagrama explicam as menores temperaturas dos patamares de formação do eutético para as ligas com 15% de cromo em relação às ligas com 20%.

Por outro lado, as temperaturas registradas dos patamares de formação da austenita para as ligas com 20% de cromo foram mais elevadas do que as obtidas para as ligas com 15% de cromo, devido a diferença nas temperaturas de vazamento.

A adição de 1,5 ou 2,5% de molibdênio nas ligas com 20% de cromo provocou efeito semelhante nas temperaturas dos patamares de formação da austenita e do eutético aos observados nas ligas com 15% de cromo.

Metafotografia Quantitativa - Fração Volumétrica de Austenita (V<sub>v</sub>) e Fração Volumétrica de Carbonetos Eutéticos (V<sub>ce</sub>) - A fração volumétrica de austenita diminui com o aumento do teor de carbono. Este fato também é consequência da crescente proximidade da calha eutética monovariante para teores crescentes de carbono. Verifica-se que a adição de 1,5 e 2,5% do molibdênio provocou aumento dos valores de (V<sub>v</sub>)

nas ligas com 15% de cromo.

Quando o teor de molibdênio foi elevado de 1,5 para 2,5% não se correu diminuição estatisticamente significativa da fração volumétrica de austenita, parecendo indicar um limite do efeito do molibdênio em promover a formação da austenita.

Os efeitos descritos podem ser explicados por alterações nos caminhos de solidificação que ocorreriam de forma que a calha eutética fosse atingida quando restasse menos líquido para a solidificação do eutético.

As ligas com 20% de cromo tem menor fração volumétrica de austenita primária que as ligas com 15% de cromo, para um mesmo nível de teor de carbono. Isto se deve à maior proximidade da linha eutética para as ligas com 20% de cromo mantendo-se constante o teor de carbono.

Nota-se que a adição de 1,5 ou 2,5% de molibdênio provocou aumento da fração volumétrica de austenita pró-eutética. Para as ligas com 20% de cromo este aumento é semelhante para os dois teores de molibdênio e o aumento da fração volumétrica de austenita é maior para 3,0% de carbono do que para 2,5%, de forma semelhante ao que ocorre nas ligas com 15% de cromo.

Metáforas Quantitativas - Número de Carbonetos no Volume Total ( $N_{LT}$ ) e no Volume Eutético ( $N_{LE}$ ). Os resultados relativos aos números de carbonetos eutéticos encontram-se na tabela II. Nota-se que aumenta o número de carbonetos por comprimento de linha no volume total da amostra ( $N_{LT}$ ), à 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 calha eutética.

Com o objetivo de verificar o efeito do carbono na estrutura de solidificação do microconstituente eutético, independentemente da fração volumétrica de austenita primária, calculou-se o número de carbonetos por unidade de linha no volume do microconstituente 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:  $N_{LT}/(1 - V_{V_1})$ .

Verifica-se na tabela II 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 aumento e a eleva-

ção de  $V_{V_1}$  indicam engrossamento dos carbonetos eutéticos.

A tabela II evidencia a diminuição do número de partículas de carbonetos no volume total e no volume eutético provocada pela adição de 1,5 ou 2,5% de molibdênio. Verifica-se que este elemento promoveu o engrossamento dos carbonetos em relação às ligas sem molibdênio, tanto com 15 como com 20% de cromo.

Nota-se que quando o teor de molibdênio foi elevado de 1,5 para 2,5% não ocorreu variação significativa de  $N_{LE}$  e  $N_{LT}$  parecendo indicar um limite do efeito do molibdênio na diminuição do número de partículas de carboneto, à semelhança do que se observou em relação à fração volumétrica de austenita. O limite do efeito do molibdênio entre 1,5 e 2,5% nas variáveis  $V_{V_1}$ ,  $N_{LE}$  e  $N_{LT}$  irá se repetir nas ligas com 20% de cromo e significa que as variáveis acima só serão discerníveis quando se compara as ligas sem molibdênio com as ligas com este elemento (1,5 ou 2,5%).

Na solidificação do eutético  $\gamma/\text{M}_2\text{C}_3$  o molibdênio é rejeitado para o líquido (4). Isto leva à diminuição da temperatura de equilíbrio para a solidificação do eutético à medida que a solidificação deste prossegue. Em outras palavras, o molibdênio tem efeito semelhante ao cromo na curvatura da linha  $U_1 - w_1$ , contribuindo para accentuar a declividade desta curva. Nas experiências, como a solidificação do eutético deu-se com temperatura constante, as adições de molibdênio podem ter acelerado a diminuição do superresfriamento em relação à liga sem molibdênio, como indicado esquematicamente na figura 4.

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 2,9% de carbono do que para a liga com 2,2%; 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.

Essas observações também são válidas quando se considera o crescimento de uma célula eutética de uma liga em particular.

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 calha eutética de  $U_1$  para  $e_1$  como mostra a figura 2, 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 superresfriamento a cada vez menores em relação a linha  $U_1e_1$ . À medida que prossegue a reação eutética, como mostra a figura 3.

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 do 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 superresfriamento 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 menores potenciais termodinâmicos para a transformação e os carbonetos adotam formas que dispõem maior 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.

Verifica-se na tabela III que o número de carbonetos por comprimento de linha no volume total da amostra é maior para as ligas com 20% de cromo do que para as ligas com 15%. Este aumento é consequência direta da diminuição da fração volumétrica de austenita primária à medida que a composição se aproxima da calha eutética com a elevação do teor de cromo, mantido constante o teor de carbono.

A elevação da porcentagem de cromo de 15 para 20% levou ao aumento do número de partículas de carbonetos no volume eutético, como pode-se ver na tabela II. Este aumento foi maior nas ligas com menor teor de carbono. Resultados semelhantes foram obtidos por Matsubara (3) em ligas eutéticas e o autor atribui este efeito ao menor intervalo de solidificação eutética medida nas ligas com teores

de cromo mais elevados. Esta diminuição do intervalo de solidificação pode levar a que nas ligas com 20% de cromo o superresfriamento varie menos entre o início e o fim da solidificação do que nas ligas com 15% de cromo.

A figura 5 mostra, para as ligas sem molibdênio e com 1,5% deste elemento, o efeito do carbono e do cromo no número de partículas no volume total e no volume eutético.

4. CONCLUSÕES

Apresentam-se a seguir as conclusões decorrentes do trabalho experimental das ligas ferro 2,25 a 3,65%Cr; 15 a 20%Cr; 0 a 2,5%Mo.

- a) O aumento dos teores de carbono e a adição de 1,5% de molibdênio levou a:
  - . Diminuição das temperaturas dos patamares de formação da austenita e do eutético;
  - . Diminuição da fração volumétrica de austenita primária;
  - . Diminuição do número de partículas de carbonetos no volume eutético;

Estas conclusões se verificam nas ligas com 15 e 20% de Cr.

- b) O aumento do teor de cromo de 15 para 20%, mantido constante o teor de carbono, levou ao aumento do número de partículas de carbonetos no volume total e no volume eutético;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MARATRAY, F. & USSEGLIO-NANOT, R. - "Factors affecting the structure of chromium and chromium-molybdenum white irons". Climax Molybdenum Co.: 1970, 31 p.
- (2) POWELL, G.L.F. - "Morphology of eutectic M<sub>2</sub>C and M<sub>3</sub>C<sub>2</sub> in white iron castings". Metals Forum, vol. 9, nº 1, 1960, pp.37-42.
- (3) 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. 183-190
- (4) GOOSSENS, L.J.M., CARPINETTI COSTA, P.N., SOUZA SANTOS, A.B. - "Observações relativas às influências do teor de carbono em ferros fundidos brancos com 15Cr e 20Mo". Congresso Anual da ABM, Julho de 1978, São Paulo.
- (5) JELINGHAUS, W. - "Zur Kenntnis des Vierstoff-Systems Eisen-Chrom-Molybden-Kohlenstoff". Archiv für das Eisenhüttenwesen, vol.42, 1971, nº 2, pp. 133-143.
- (6) DE MELLO, J.D.B. & DURAND CHARRE, M. - "Estrutura metalúrgica, sequências de solidificação e transformações em fase sólida de ferros fundidos brancos ao cromo". Metalurgia ABM, vol. 42, nº 339, 1985, pp. 79-84.
- (7) DE MELLO, J.D.B. - "Structure metalurgiques et caracterisation de L'abrasion des Fontes Blanches au chrom". Tese de Doutorado Grenoble, França, 1985, 141 p.
- (8) BINNER, S.B. - "The role of eutectic carbide morphology on the fracture behaviour of high-chromium cast irons - I. Austenitic Alloys". Canadian Metallurgical Quarterly, vol. 24, nº 2, 1985 pp. 155-162.

ABSTRACTS

Solidification experiments were performed on 30 mm diameter samples. The austenite and eutectic arrest temperatures, the number of eutectic carbide particles on the total and eutectic volume, the fraction of primary austenite and the number of secondary dendrite arms were measured. These measurements were performed on alloys containing 15 and 20% chromium, with 2,3; 3,0 and 3,6% carbon. For each carbon content 1,5 or 2,6% molybdenum were added.

It was observed that the increase of the carbon content resulted in a lower austenitic and eutectic formation arrest temperatures, in a reduced number of carbide particles in eutectic volume as well as in a lower volumetric fraction of primary austenite and dendrite arm spacing.

The molybdenum addition led to a lower austenite and eutectic formation arrest temperatures, a lower number of the carbide particles in total and in eutectic volume, and a higher primary austenite volumetric fraction.

When alloys containing 15 and 20% chromium were compared, was observed the elevation of the eutectic arrest temperatures as well as the elevation of the number of particles in the total volume and in the eutectic volume and the lowering of the primary austenite volumetric fraction in the 20% Cr alloy.

TABELA I - Temperaturas dos Pontos de Formação do Eutético ( $T_E$ ) e da Austenita ( $T_A$ ) em Função do Teor de Carbono e Molibdeno para as Ligas com 15% e 20% de Cromo.

LIGAS (Cr-C-Mo)	% C Analisado	$T_A$ (°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
15 - 2,3 - 1,5	2,21	1246	1317
15 - 2,3 - 2,5	2,24	1240	1308
15 - 3,0 - 1,5	2,94	1232	1281
15 - 3,0 - 2,5	2,99	1227	1281
15 - 3,6 - 1,5	3,43	1224	1224
15 - 3,6 - 2,5	3,65	1217	1217
20 - 2,5 - 0	2,24	1351	1263
20 - 3,0 - 0	2,95	1285	1254
20 - 3,6 - 0	3,44	-	1244
20 - 2,5 - 1,5	2,20	1250	ND
20 - 2,5 - 2,5	2,20	1243	1321
20 - 3,0 - 1,5	3,01	1242	1266
20 - 3,0 - 2,5	3,09	1238	1263
20 - 3,6 - 1,5	3,44	1235	1235
20 - 3,6 - 2,5	3,55	1230	1230

TABELA II - Número de Partículas de Carbonetos no Volume Total (%T) e no Volume Eutético (%E) em Função do Teor de Carbono para as Ligas com 15% de Cromo.

LIGAS (Cr - C - Mo)	$N_{T\%}$	$N_{E\%}$
15 - 2,3 - 0	75,1 ± 7,5	281,7 ± 11,1
15 - 3,0 - 0	82,2 ± 6,9	141,3 ± 9,4
15 - 3,6 - 0	84,6 ± 6,5	84,6 ± 6,5
15 - 2,3 - 1,5	48,8 ± 4,6	141,7 ± 9,6
15 - 2,3 - 2,5	50,6 ± 7,2	140,0 ± 9,4
15 - 3,0 - 1,5	59,8 ± 5,5	130,8 ± 8,9
15 - 3,0 - 2,5	64,3 ± 5,3	137,7 ± 8,3
15 - 3,6 - 1,5	67,4 ± 4,7	67,4 ± 4,7
15 - 3,6 - 2,5	80,1 ± 7,9	80,1 ± 7,9
20 - 2,5 - 0	90,0 ± 8,9	195,7 ± 12,3
20 - 3,0 - 0	97,8 ± 7,1	146,1 ± 9,4
20 - 3,6 - 0	92,5 ± 6,8	92,5 ± 6,8
20 - 2,5 - 1,5	63,8 ± 6,9	165,0 ± 9,5
20 - 2,5 - 2,5	64,5 ± 5,5	157,0 ± 9,7
20 - 3,0 - 1,5	77,8 ± 5,3	131,4 ± 6,6
20 - 3,0 - 2,5	71,6 ± 6,0	115,9 ± 8,3
20 - 3,6 - 1,5	74,5 ± 5,5	74,5 ± 5,5
20 - 3,6 - 2,5	79,3 ± 5,6	79,3 ± 5,6



Figura 1 - Micrografia das amostras 15-3,0-0 e 15-3,6-0. Ataque eletrolítico. 500 X.

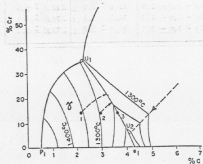


Figura 2 - Superfície Líquida do Sistema Fe-Cr-C Mostrando Esquemáticamente o Caminho de Solidificação das Ligas Contendo - 15% Cr e 2,21C (1); 2,91C (2) e 3,51C (3)

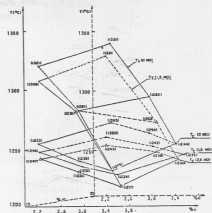


Figura 3 - Temperaturas dos Padrões de Formação da Austenita ( $T_A$ ) em Função dos Teores de Cr, C e No.

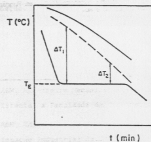


Figura 4 - Esquema da Variação dos Superesfriamentos em Relação a Linha  $T_E$  em Função do Tempo de Solidificação no Padrão Eutético para Ligas sem e com No.

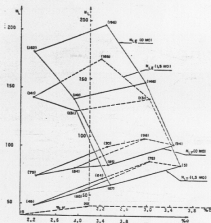


Figura 5 - Número de Partículas no Volume Total (NLT) e no Volume Líquido (NLE), em Função dos Teores de Cr, C e Ni.

MODELAGEM NUMÉRICA APLICADA A SOLIDIFICAÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO.

Rubens Caran<sup>(1)</sup>  
 Maria Clara Ierardi<sup>(2)</sup>  
 Amauri Garcia<sup>(3)</sup>

RESUMO

Este trabalho apresenta aplicações da modelagem numérica na análise da solidificação de peças metálicas conformadas pelo processo de fundição. Inicialmente são tecidas considerações sobre os aspectos básicos a serem abordados numa investigação dessa natureza e a seguir implementa-se a simulação da fundição de uma palheta de turbina a gás. Os resultados obtidos demonstram que esse tipo de abordagem é uma ferramenta poderosa no estudo dessa técnica de produção.

(1) Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia, Professor Assistente da Faculdade de Engenharia da UNICAMP.

(2) Membro da ABM, Engenheira de Materiais, Pesquisadora do Núcleo de Automação Industrial da UNICAMP.

(3) Membro da ABM, Doutor em Engenharia, Professor Titular da Faculdade de Engenharia da UNICAMP.