



ESTUDO DAS VARIÁVEIS TÉRMICAS DA LIGA UNS C90200

STUDY OF THERMAL PARAMETERS OF THE UNS C90200 ALLOY

Jose L. M. Marturano^{1*}, Givanildo A. dos Santos^{1,2}, Rogério Teram^{1,2}, Maurício S. Nascimento^{1,3}, Vinícius T. dos Santos^{2,4}, Marcio R. da Silva⁴, Antônio A. Couto^{2,3}

1 - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), São Paulo, SP, Brasil.

2 – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, Brasil

3 – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, SP, Brasil

4 - Termomecanica São Paulo S.A, São Bernardo do Campo, SP, Brasil

jlmtv@hotmail.com

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de analisar as variáveis térmicas da liga UNS C90200 em um processo de solidificação unidirecional ascendente. A liga foi obtida em uma lingoteira de aço inoxidável AISI 304, com base de grafite montada em um dispositivo de resfriamento unidirecional ascendente. As variáveis térmicas de solidificação velocidade de deslocamento da isoterma liquidus (V_L), taxa de resfriamento (T_R) e gradiente térmico (G_L) foram avaliadas em função da distância da superfície de extração de calor. A microestrutura foi analisada por meio de microscopia óptica (MO). Como resultado observou-se que maiores taxas de resfriamento e velocidades de deslocamento da isoterma liquidus são obtidas nas posições mais próximas da base de extração de calor.

Palavras-chave: Liga UNS C90200, Microestrutura, Variáveis térmicas de solidificação.

ABSTRACT

This work has the objective to analyze the thermal parameters of the UNS C90200 alloy in an upward unidirectional solidification process. The alloy was obtained in an AISI 304 stainless steel ingot mold, with a graphite base mounted on a unidirectional upward cooling device. The solidification thermal parameters tip growth rate (V_L), cooling rate (T_R) and thermal gradient (G_L) were evaluated as a function of the distance from the heat extraction surface. The microstructure was analyzed using optical microscopy (OM). As a result, it was observed that higher cooling rates and tip growth rate are obtained in positions closer to the heat extraction base.

Keywords: C90200 alloy. Microstructure. Solidification thermal parameters.

INTRODUÇÃO

O cobre, devido ao fato de ser encontrado na superfície da terra, foi o primeiro metal usado pelo homem. Inicialmente utilizado para produção de ferramentas, armas e objetos de decoração, tornou-se fundamental pela facilidade de manuseio. O cobre destaca-se por sua ductilidade, resistência à corrosão e elevadas condutividades térmica e elétrica. Hoje, mais da metade do

cobre produzido é utilizada em aplicações elétricas e eletrônicas. Isso porque o cobre forma ligas metálicas com mais facilidade que a maioria dos metais. Existe uma grande quantidade de ligas de cobre, cada uma com uma combinação única de propriedades que se adaptam às mais variadas aplicações, processos de fabricação e exigências técnicas.

Como em todas as ligas metálicas, elementos de liga são adicionados ao cobre para promover alterações nas propriedades deste metal. Defeitos cristalinos, como átomos solutos, impactam a condutividade, sob o conceito de resistividade. A prata é uma exceção nas ligas de cobre, aumentando a condutividade. O cobre é mecanicamente conformado com facilidade e não se fragiliza a baixas temperaturas. Também detém considerável resistência à fadiga, o que o torna um material ideal para submissão a tensões cíclicas sem o perigo de fragilização (perda de ductilidade) e ruptura.

Este trabalho tem o objetivo de analisar as variáveis térmicas da liga UNS C90200 em um processo de solidificação unidirecional ascendente. A liga UNS C90200 costuma ser usada em mancais de rolamento devido à presença de chumbo que tem capacidade de provocar um efeito lubrificante na liga sem perder sua capacidade de aguentar grandes esforços mecânicos exigidos por este tipo de dispositivo mecânico [1].

MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto de pesquisa experimental ocorreu a partir de etapas pré-definidas da seguinte maneira: escolha e preparação da liga, preparação da lingoteira, escolha do método de análise, definição do sistema de coleta de dados, preparação do forno de fusão e do forno de vazamento, conforme figura 1, processo de vazamento e realização da análise metalográfica: macrografia e análise de microestrutura.

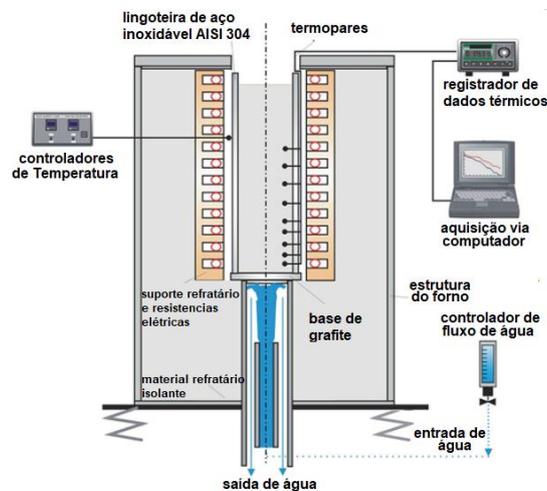


Fig. 1 - Dispositivo de solidificação unidirecional vertical ascendente [2].

Observando a tabela 1, por meio da composição química da liga UNS C90200 podemos concluir que o cobre é a base e que o estanho é o elemento de liga, o que propicia uma liga metálica resistente mecanicamente, com alto teor de cobre, apresentando alta dureza e ótima resistência à corrosão.

Tabela 1: Composição química e limites percentuais.

Liga	Norma	Elementos (% em massa)			
		Cu	Pb	Sn	Zn
UNS C90200	SAE	73,0	15,0	4,0	8,0

A tabela 2 apresenta as propriedades físicas e mecânicas da liga UNS C90200.

Tabela 2: Propriedades físicas e mecânicas da liga UNS C90200

Propriedades	Valores
Dureza	75 HB
Temperatura <i>Liquidus</i>	940 °C (1724 ° F)
Calor específico	380 J / kg K (0,09 Btu / lb ° F) a 20 ° C (68 ° F)
Condutividade térmica	0,17 cal/cms ^o
Massa específica	9,03 g/cm ³

A lingoteira foi fabricada em aço de aço inoxidável AISI 304, com diâmetro externo de 65 mm e diâmetro interno de 60 mm e comprimento de 150 mm. A sua base é uma chapa de grafite de 6 mm de espessura, bipartida que foi montada e fixada com braçadeiras com os termopares devidamente posicionados para o levantamento dos coeficientes de temperatura, sendo revestido internamente com alumina, para isolamento térmico do molde, que impedirá o crescimento e a formação de núcleos de cristais na frente de solidificação e nas paredes do molde [2].

Na etapa de fusão da liga UNS C90200, foi necessário inserir o cadinho dentro do forno e fundir a uma temperatura acima da temperatura *liquidus* ($T_L = 940^\circ\text{C}$), aproximadamente 10%, a fim de assegurar que o material permaneça no estado líquido durante a operação. Ao atingir uma temperatura de aproximadamente 15% acima da T_L , o material foi vazado no cadinho no interior do forno já pré-aquecido para a temperatura de vazamento, a bomba d'água foi ligada, direcionando a água na parte inferior da lingoteira e o forno de solidificação foi simultaneamente desligado. Desta forma, a solidificação teve início no sentido ascendente. Concomitantemente o sistema de aquisição de dados foi ligado e as temperaturas foram monitoradas e registradas durante a solidificação em condições transientes de extração de calor.

As variáveis térmicas de solidificação (V_L , T_R e G_L) foram determinadas experimentalmente após a obtenção das curvas de resfriamento. Todo o experimento foi realizado em ambiente controlado, livre de contaminações principalmente química, pois a liga UNS C90200 é suscetível à corrosão em ambientes sobre a presença de elementos químicos como o cloro, por exemplo, em função da grande concentração de chumbo, que atua como elemento lubrificante na liga [3]. Elementos corrosivos costumam ser usados na limpeza da liga, mas atacam a liga provocando corrosão na mesma, para isso tem sido buscado alternativas para executar este processo de limpeza, sem ser tão agressivo, sendo que o ditiocarbamato parabânico (DTC) tem sido mais eficiente do que o DTC glicoril [3].

Após o processo de resfriamento lento o lingote foi cortado longitudinalmente, e perpendicularmente aos termopares, obtendo-se em três corpos um central para obtenção de amostras para análise metalográfica, conforme figura 2b, sendo as duas centrais para micrografia e outra maior para macrografia. A superfície plana destinada para a macrografia passou por um processo de lixamento, e em seguida submersa em uma solução composta por 50% de ácido nítrico (HNO_3) e 50% de água (H_2O).

As barras centrais do lingote destinadas a micrografia, foram traçadas e cortadas, sendo que uma barra sofreu cortes no sentido longitudinal do lingote, conforme figura 2a, e a outra barra no sentido transversal do lingote nas alturas de 4, 8, 12, 16, 35, 53, 73 e 98 mm para análise microestrutural em microscópio óptico (MO).

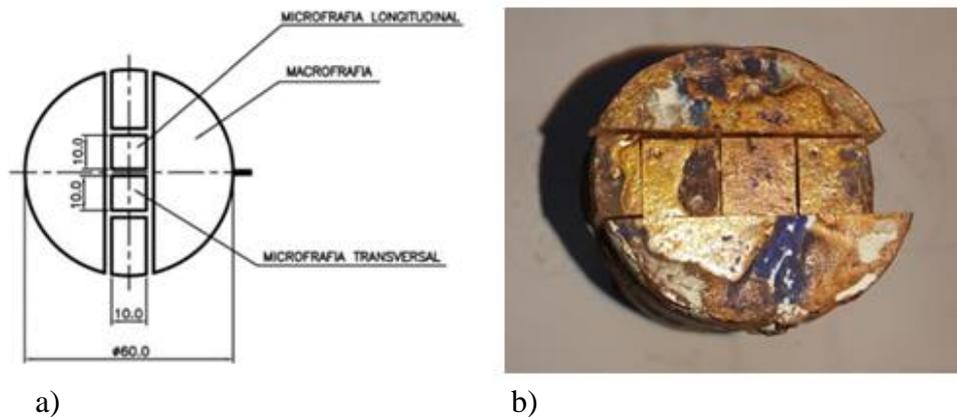


Fig. 2a e 2b - Desenho dos cortes realizados no lingote para confecção das amostras para análises macro e microestruturais.

As curvas de resfriamento obtidas por meio dos termopares durante o período de resfriamento e estabilização são mostradas no gráfico da figura 3, e nota-se diminuição gradativa zonal da liga na formação da microestrutura e macroestrutura quanto as temperaturas de *liquidus* e *solidus*. A caracterização da macroestrutura e da microestrutura, ocorreu a partir do seccionamento longitudinal e transversal do lingote

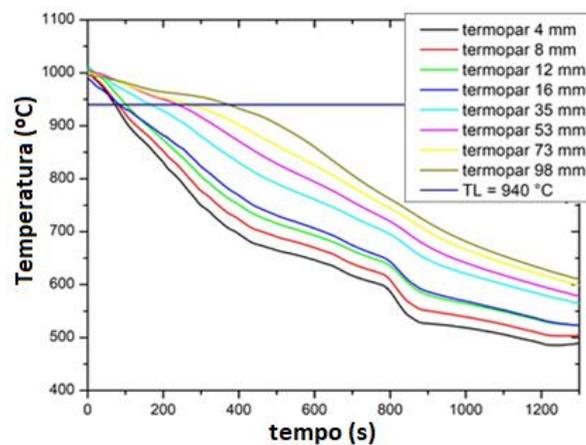


Fig. 3 - Curva de resfriamento obtidas por meio dos termopares

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a obtenção dos dados das curvas de resfriamento foi possível determinar os tempos de passagem da isoterma *liquidus* (t_L) em função das posições dos termopares. Com isso, foi possível obter equações experimentais que permitem a sua estimativa nos demais pontos do lingote e que pode ser representada pela equação 1:

$$P = C. (t_L)^n \quad (\text{Equação 1})$$

Sabendo que P é a posição em relação ao ponto de resfriamento (mm), C é a constante para a liga em estudo, resultante de coeficientes da equação, t é o tempo de passagem da isoterma *liquidus* na posição em relação ao ponto de resfriamento (s) e n é o expoente com valor sempre menor que uma unidade.

Por meio dos dados obtidos durante a solidificação do lingote e tendo como referência a temperatura *liquidus* da liga de 940°C, obteve-se o gráfico e a equação mostrados na Figura 4a. A velocidade experimental de deslocamento da isoterma *liquidus* (V_L) pode ser determinada derivando-se a função $P = f(t)$ obtida experimentalmente e mostrada na Figura 4, ou seja, $V_L = dP/dt$. Relacionando-se a função $V_L = f(t)$ com $P = f(t)$, pode-se obter a velocidade em função da posição, $V_L = f(P)$.

A curva da Figura 4b mostra que nas posições iniciais houve uma velocidade maior de extração de calor.

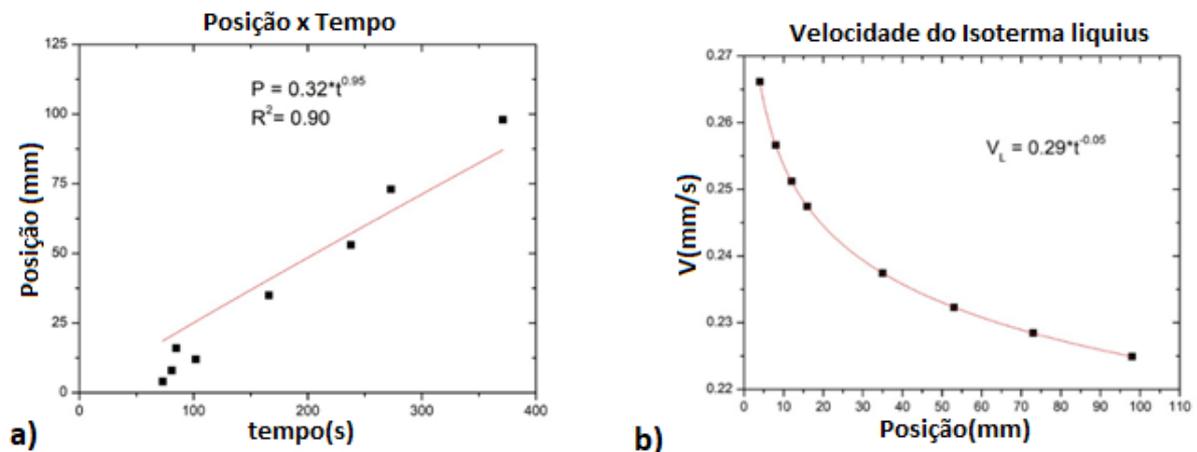


Fig. 4 - (a) Posição em função do tempo de passagem da isoterma *liquidus*.
(b) Velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus* em função da Posição.

A taxa de resfriamento (T_R) pode ser obtida por meio do quociente das temperaturas e tempos inferiores e superiores ao ponto da temperatura *liquidus*, ou seja, $T_R = dT/dt$. Resultando na Equação 2:

$$T_R = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1} \quad \text{(Equação 2)}$$

A Figura 5a mostra uma diminuição progressiva da taxa de resfriamento para as posições mais afastadas da interface metal/molde.

O gradiente térmico (G_L) pode ser obtido por meio dos valores de velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus* (V_L) e da taxa de resfriamento experimental (T_R), conforme a equação experimental $G_L = T_R/V_L$, conforme figura 5b.

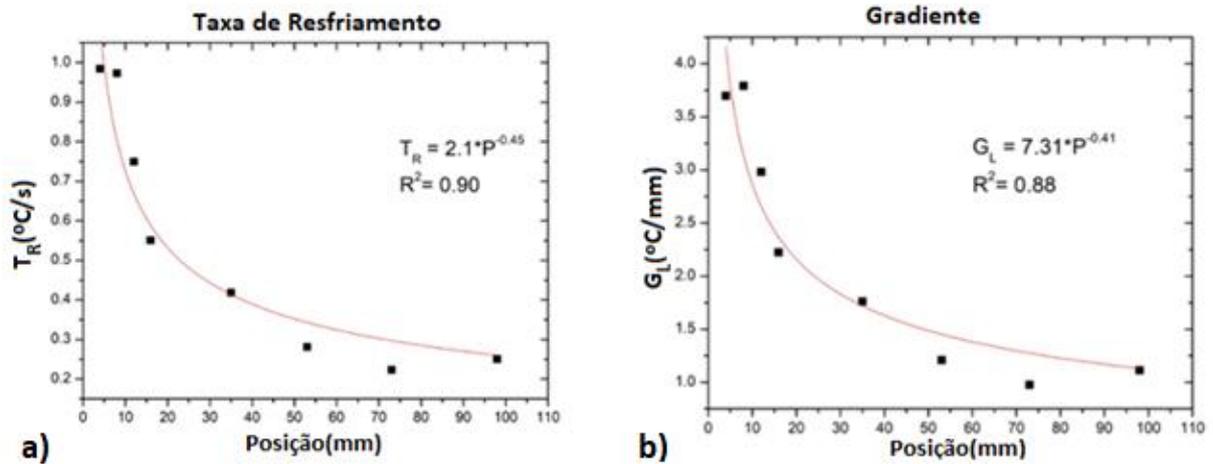


Fig. 5 - (a)Taxa de resfriamento em função da Posição - (b) Gradiente térmico em função da Posição

A solidificação unidirecional ascendente produz no lingote a formação de diferentes microestruturas. No caso específico da liga UNS C90200, produziu no topo uma estrutura mais grosseira com a presença de intermetálicos dispersos, conforme as figuras 6 e 7. No entanto, próximo a base, produziu uma estrutura mais refinada com a presença de intermetálicos, conforme figuras 8 e 9. Tal fenômeno nos remete a clara influência das variáveis térmicas de solidificação na formação da microestrutura, evidenciando o refinamento dos grãos para ligas que sofram bruscas taxas de resfriamento [2].

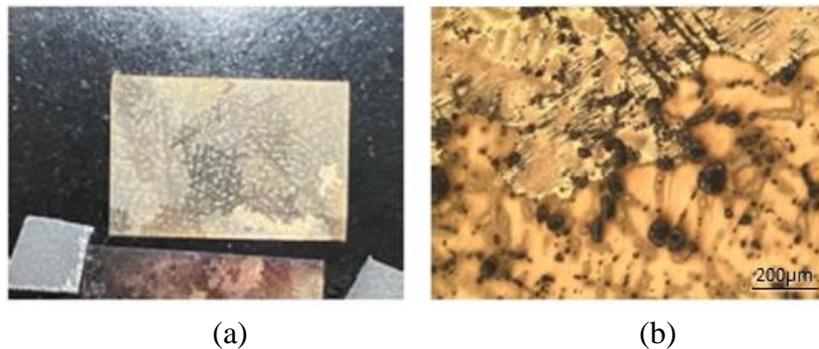


Fig. 6 - (a) e (b) Microestrutura bruta de fusão com dendritas em grãos equiaxiais, presença de 15,54% de intermetálicos e aumento de 100X.

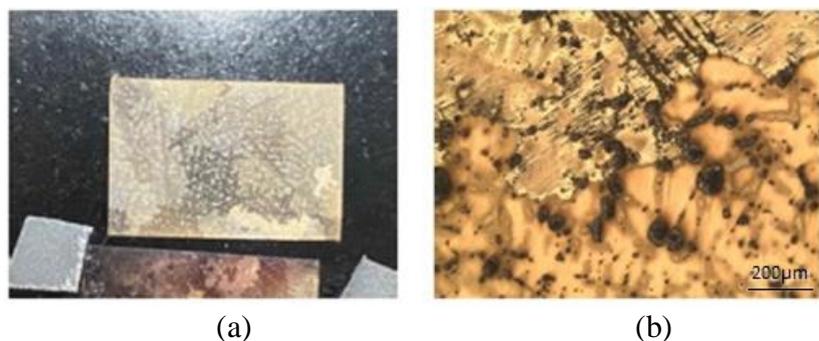


Fig. 7 - (a) e (b) Microestrutura bruta de fusão com dendritas em grãos equiaxiais, presença de 10,95% de intermetálicos e aumento de 100X.

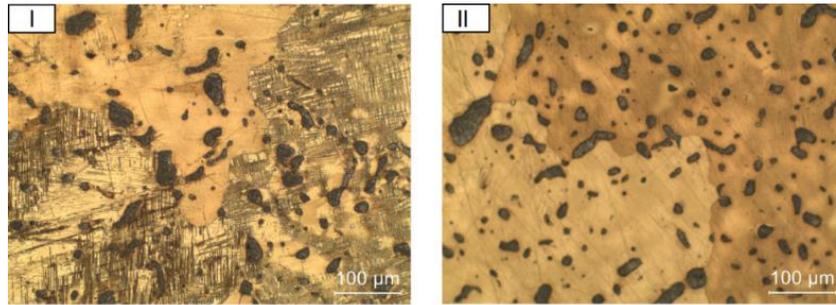


Fig. 8 - Estrutura bruta de fusão com dendritas em grãos equiaxiais, ampliação 200x: (I) Amostra 1 - posição 4 mm; (II) Amostra 2 - posição 8 mm.

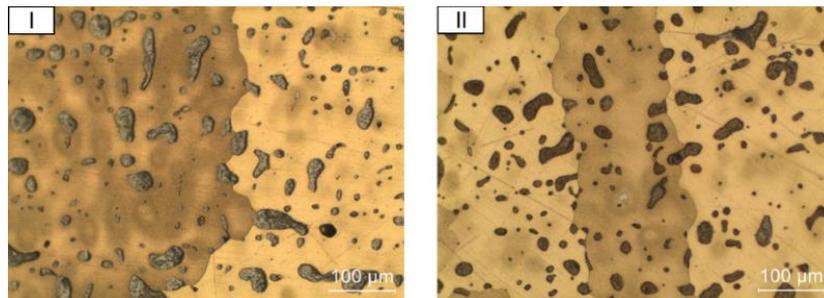


Fig. 9 - Estrutura bruta de fusão com dendritas em grãos equiaxiais, ampliação 200x: (I) Amostra 3 - posição 12 mm; (II) Amostra 4 - posição 16 mm.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que o mecanismo de solidificação unidirecional ascendente associado a altas taxas de resfriamento provenientes do mecanismo de resfriamento com água bombeada de forma contínua desde o início do processo de solidificação, provocam uma mudança na microestrutura do lingote fundido próximo a região de extração de calor, diferente daquela mais afastada desta superfície, gerando na região mais próxima uma estrutura mais refinada em oposição a região mais distante que apresenta estrutura mais grosseira.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, Termomecanica São Paulo S.A., Universidade Presbiteriana Mackenzie e Instituto Federal de São Paulo (IFSP) pelo apoio às atividades de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] **Artigo:** BENTO, R. T. et al. Análise do comportamento estático de mancais hidrodinâmicos pelo método de elementos finitos. CREEM, 2012.
- [2] **Dissertações e teses:** SANTOS, G. A. – Correlação entre Variáveis Térmicas de Solidificação, Microestrutura e Comportamento Mecânico de Ligas Al-Zn e Al-Cu-Li, *Tese de Doutorado*, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, São José dos Campos (SP), 2009.
- [3] **Artigo:** D'ARS DE FIGUEIREDO, JC; DE FC LINS, V .; DE BELLIS, VM Efeito inibidor do ditiocarbamato na corrosão da liga de bronze UNS C90200 em meio ácido. Engenharia de corrosão, ciência e tecnologia, v. 48, n. 4, pág. 288-293, 2013).