



International Conference for
Academia and Industry Co-operation

08/11/2021 – 12/11/2021

São Luís - Maranhão - Brasil



2nd International Meeting in Materials
Science and Engineering of Maranhão

OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS TÉRMICAS DE SOLIDIFICAÇÃO DA LIGA ALPACA 2 C/ PB

OBTAINING THE SOLIDIFICATION THERMAL PARAMETERS OF ALPACA 2 C/PB ALLOY

Márcio V. R. de Mattos^{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, Antonio A. Couto^{2,3}

1 - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM, 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 - Termomecânica São Paulo S.A, São Bernardo do Campo, SP, Brasil

marcio.mattos@ifsp.edu.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é determinar experimentalmente as variáveis térmicas de solidificação da liga Alpaca 2 c/ Pb obtidas após a solidificação unidirecional ascendente do lingote. A liga foi solidificada em uma lingoteira de aço inoxidável AISI 304 montada em um dispositivo de resfriamento unidirecional ascendente. O calor foi extraído direcionalmente através de refrigeração por água na chapa base fabricada em grafite. A microestrutura foi analisada por meio de microscopia óptica (MO). 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. 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: Alpaca 2 c/ Pb. Solidificação. Variáveis térmicas de solidificação.

ABSTRACT

The objective of this work is to experimentally determine the thermal variables of solidification of the Alpaca 2 w/Pb alloy obtained after the upward unidirectional solidification of the ingot. The alloy was solidified in an AISI 304 stainless steel ingot mold mounted on a unidirectional upward cooling device. The heat was extracted directionally through water cooling on the base plate made of graphite. The microstructure was analyzed using optical microscopy (OM). The thermal variables of solidification displacement velocity of the liquidus isotherm (V_L), cooling rate (T_R) and thermal gradient (G_L) were evaluated as a function of the distance from the heat extraction surface. As a result, it was observed that higher cooling rates and displacement velocities of the liquidus isotherm are obtained in positions closer to the heat extraction base.

Keywords: Alpaca 2 w/ Pb. Solidification. Solidification thermal variables.

INTRODUÇÃO

A fundição de metais é um importante processo na obtenção dos mais variados itens do nosso dia a dia. Porém, controlar somente o processo de fusão dos metais não garante o resultado esperado ao produto final. Há que se ter também um controle durante o processo de solidificação desses metais. O estudo do processo de fusão aliado ao de solidificação assegura ao produto final melhores propriedades mecânicas em função de microestruturas resultantes.

O cobre e as ligas à base de cobre, que apresentam uma combinação desejável de propriedades físicas têm sido utilizados em uma grande variedade de aplicações desde a antiguidade. O cobre, sem elementos de liga, é tão macio e dúctil que é muito difícil de ser usinado; além disso, ele tem capacidade quase ilimitada de ser trabalhado a frio. Adicionalmente, ele é altamente resistente à corrosão em diversos ambientes, que incluem a atmosfera ambiente, a água do mar e alguns produtos químicos industriais. As propriedades mecânicas e de resistência à corrosão do cobre podem ser melhoradas pela formação de ligas [1]. Os sistemas de ligas são classificados ou de acordo com seu metal básico ou de acordo com alguma característica específica que seja compartilhada por um grupo de ligas [1].

Alpacas são ligas ternárias cobre-níquel-zinco, que eventualmente podem conter teores significativos de outros elementos, como o chumbo, por exemplo. Estas ligas contêm de 10 a 30% de níquel, em massa, porém comercialmente em geral contem até 18% de níquel, 45 a 70% de cobre e o restante de zinco. As Alpacas são soluções sólidas homogêneas que podem ser deformadas a frio e a quente, além de serem resistentes à corrosão. A adição de chumbo, além de aumentar a usinabilidade, permite o uso das Alpacas para a fabricação de materiais para gravação com fins decorativos. Além de serem trabalhadas na forma de produtos planos, arames e barras, as placas podem ser fundidas para outras aplicações, como válvulas hidráulicas. As Alpacas com chumbo fundidas em areia podem ser usadas na fabricação de equipamentos para a indústria de laticínios e de soda, válvulas e assentos de válvulas para temperaturas elevadas, instrumentos musicais, chaves, acessórios de construção naval, peças ornamentais e outros tipos de aplicações; outras aplicações importantes das Alpacas estão na fabricação de zíper e de contatos de equipamentos elétricos e telefônicos, componentes de aparelhos óticos e fotográficos, assim como arames de resistores elétricos [2].

Devido a trabalhos e estudos já desenvolvidos, sabe-se que o controle das variáveis térmicas de solidificação definirá as características do produto final através da microestrutura obtida após a solidificação [3]. As microestruturas que se formam a volta de núcleos de solidificação podem apresentar morfologias e dimensões diferentes que variam em função da taxa de resfriamento influenciando diretamente nas propriedades mecânicas do material [4].

Este trabalho tem como foco determinar experimentalmente variáveis térmicas de solidificação da liga Alpaca 2 c/ Pb. A referida liga tem como elementos de liga Cu-Ni-Zn, sendo classificada segundo o sistema de numeração unificada UNS como C7XXXX.

MATERIAIS E MÉTODOS

O planejamento da pesquisa experimental implica o desenvolvimento de uma série de passos (etapas), sendo que nesta etapa do projeto de pesquisa serão desenvolvidos os seguintes procedimentos: preparação da lingoteira e demais componentes do experimento; preparação da liga em estudo; processo de vazamento e realização da análise metalográfica: macrografia e análise de microestrutura.

O desenho esquemático do aparato experimental é mostrado na fig. 1.

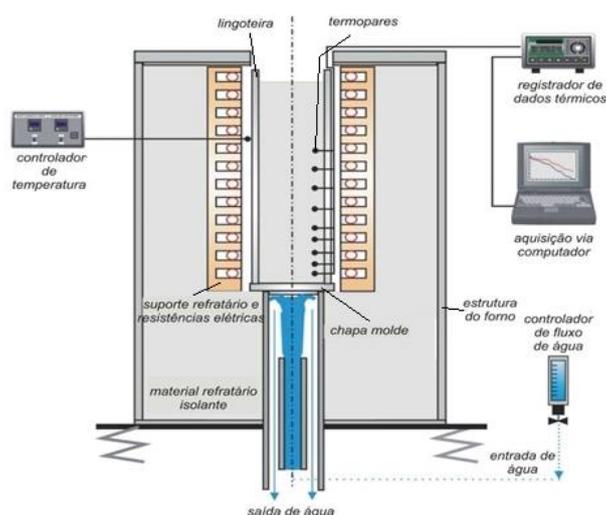


Fig. 1 - Esquemática do dispositivo de solidificação unidirecional ascendente [5].

A tabela 1 apresenta a composição química e limites percentuais da liga Alpaca 2 c/ Pb.

Tabela 1: Composição química e limites percentuais [6].

Liga	Norma	Elementos (% em massa)					
		Cu	Pb	Fe	Zn	Ni	Mn
Alpaca 2 c/ Pb	ASM	63,0 a 67,0	1,5 a 2,5	0,35 máx.	restante	7,0 a 9,0	0,5 máx.

A tabela 2 apresenta as propriedades físicas e mecânicas da liga Alpaca 2 c/ Pb.

Tabela 2: Propriedades físicas e mecânicas da liga Alpaca 2 c/ Pb [6]

Propriedades	Valores
Temperatura <i>liquidus</i>	1.000 °C (1830 ° F)
Temperatura <i>solidus</i>	970 °C (1780 ° F)
Temperatura de recozimento	500 a 620 °C (930 a 1150 ° F)
Coeficiente de expansão térmica linear	18,5 m / m K (10,3 pol./in. ° F) a 20 a 100 ° C (68 a 212 ° F)
Calor específico	380 J / kg K (0,09 Btu / lb ° F) a 20 ° C (68 ° F)
Condutividade térmica	48 W / m K (28 Btu / ft h ° F) a 20 ° C (68 ° F)
Massa específica	8,69 g/cm ³ (0,314 lb / in. ³) a 20 ° C (68 ° F)

O lingote resultante do processo de solidificação sofreu dois cortes longitudinais, conforme Fig. 2a, e perpendiculares aos termopares, resultando em três corpos um central para obtenção de amostras para micrografia e mais duas outras peças, sendo que a peça do lado dos termopares foi utilizada para a macrografia. A superfície plana do lingote destinada para a macrografia foi lixada com lixas d'água até 600 *mesh* e posteriormente atacada quimicamente por aproximadamente 12 segundos com uma solução composta por 50% de ácido nítrico (HNO₃) e 50% de água (H₂O). Após o ataque químico foi feita a lavagem em água corrente e secagem da superfície com auxílio de um soprador térmico. As barras centrais do lingote destinadas a micrografia (Fig. 2b) foram traçadas e cortadas, sendo que uma barra sofreu

cortes no sentido longitudinal do lingote nas alturas de 5, 10, 15, 20, 25, 32, 38, 70, 75, 95 e 100 mm e a outra barra no sentido transversal do lingote nas alturas de 4, 8, 12, 16, 35, 53, 73 e 98 mm para análise em microscópio óptico (MO) para análise de microestrutura.

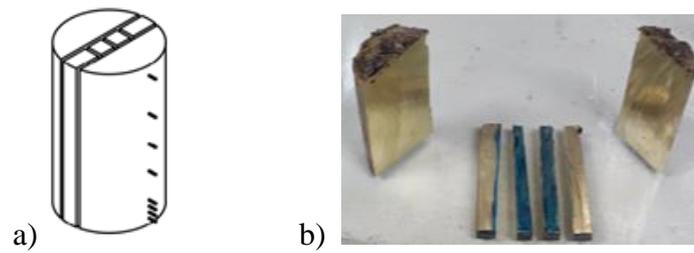


Fig. 2 – a) Esquema dos cortes no lingote para confecção das amostras para análises de macrografia e micrografia e b) cortes realizados no lingote.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do arquivo gerado pelo sistema de aquisição de dados durante o processo de solidificação da liga, pode-se obter a curva de resfriamento por termopar, mostrada na Fig. 3.

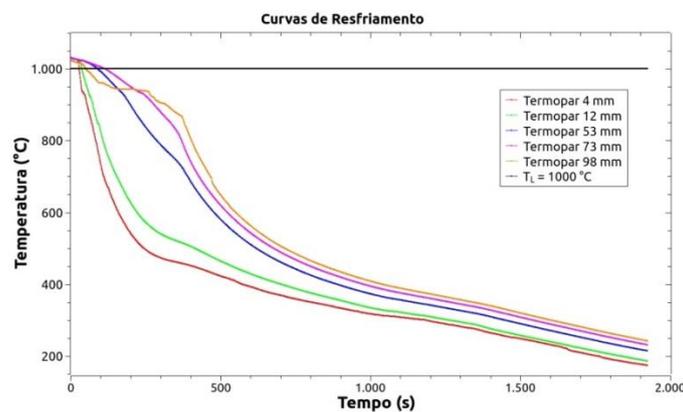


Fig 3 - Curvas de resfriamento por termopar: Temperatura em função do Tempo.

Os valores apresentados nos gráficos a seguir foram obtidos pelo método dos mínimos quadrados usando o *software SCIDAVIS*. Os termopares das posições 8 mm, 16 mm e 35 mm apresentaram dados anormais e não puderam ser analisados. O termopar da posição 98 mm também apresentou uma curva atípica e não foi considerado nas análises das Curvas de resfriamento, além dos termopares acima citados, contudo, não comprometendo a análise dos resultados.

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

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

em 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_L 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 1.000 °C obteve-se o gráfico e a equação mostrados na Fig. 4.

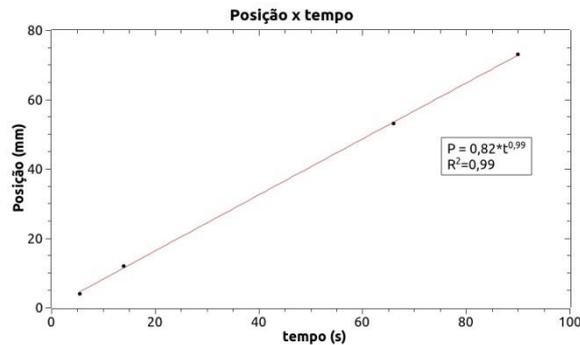


Fig. 4 – Posição em função do tempo de passagem da isoterma *liquidus*.

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 Fig. 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 Fig. 5 mostra que nas posições iniciais houve uma velocidade maior de extração de calor.

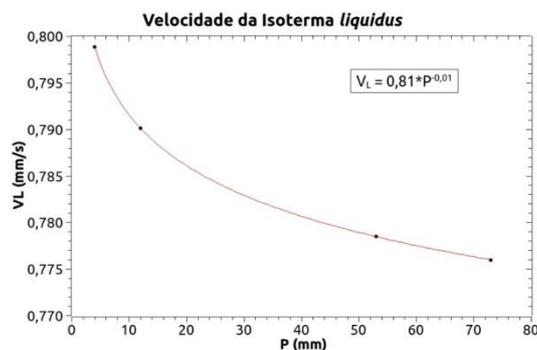


Fig. 5 – Velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus* em função da Posição.

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, $T_R = dT/dt$. Portanto, obtém-se:

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

A Fig. 6 mostra uma diminuição progressiva da taxa de resfriamento para as posições mais afastadas da interface metal/molde.

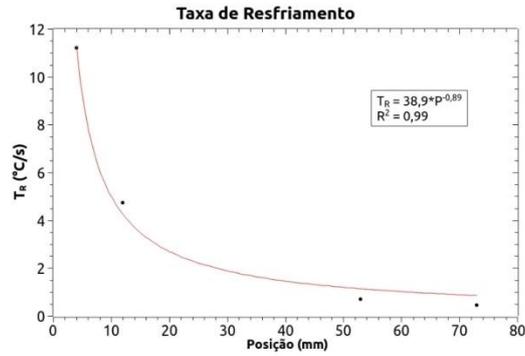


Fig. 6 – Taxa de resfriamento em função da Posição.

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 $G_L = T_R/V_L$ (Fig. 7)

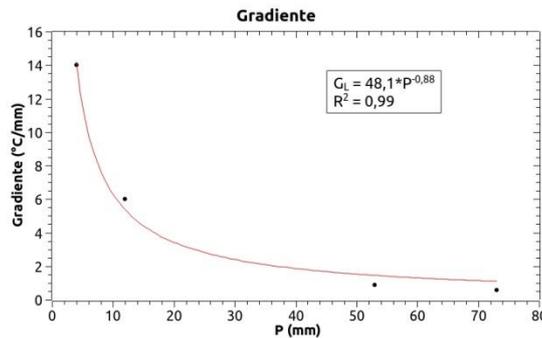


Fig. 7 – Gradiente térmico em função da Posição.

Com o avanço do processo de solidificação e o aumento da camada solidificada aumenta também a resistência térmica nos pontos mais distantes da interface metal/molde. A Fig. 7 ratifica essa relação, observando-se a redução dos valores de gradiente térmico em função do distanciamento do ponto de resfriamento.

Em relação à macroestrutura, a análise a olho nu, pode-se observar a formação de uma estrutura colunar ao longo do lingote conforme mostrado na Fig. 8.



Fig. 8 - Macrografia do corpo de prova.

Com auxílio do microscópio óptico foram obtidas as micrografias transversais, as quais são mostradas na Fig. 9. A posição utilizada adota a base de resfriamento do lingote como referência. Pode-se observar que estruturas são mais refinadas para as posições mais próximas da base de resfriamento, além da presença de intermetálicos (chumbo) dispersos na estrutura.

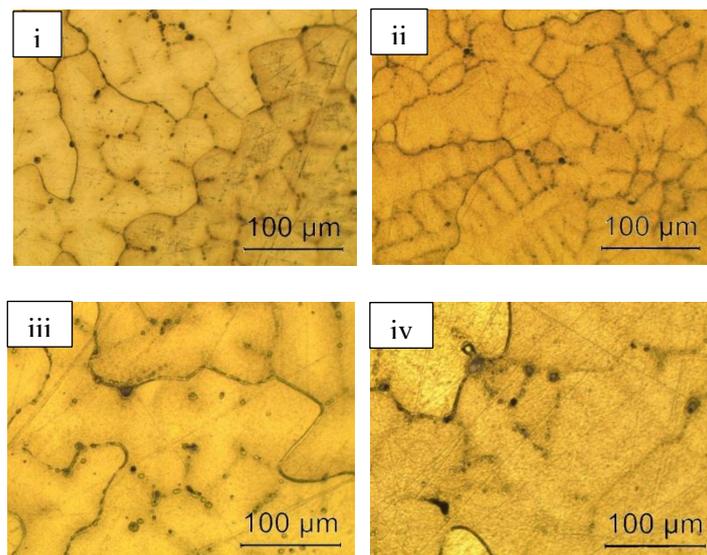


Fig. 9 - Microestrutura transversal, ampliação 200x: (i) Amostra 1 - posição 4 mm; (ii) Amostra 3 - posição 12 mm; (iii) Amostra 6 - posição 53 mm e (iv) Amostra 7 - posição 73 mm.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos na solidificação unidirecional da liga estudada, notamos que a taxa de resfriamento e a velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus* são maiores para as posições mais próximas da superfície de troca de calor, o que gera um refinamento da microestrutura em posições mais próximas da base da lingoteira.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP; à Universidade Presbiteriana Mackenzie; e à Termomecânica São Paulo S.A. pelo apoio às atividades de pesquisa desenvolvidas.

REFERÊNCIAS

- [1] **Livro:** CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 912 p
- [2] **INFOMET.** Metais e Ligas – Cuproníquel e Alpaca. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=66> Acessado em: 13/07/2021.
- [3] **Dissertações e teses:** GOULART, P. R. Variáveis térmicas de solidificação, microestrutura e propriedades mecânicas de ligas hipoeutética Al-Si. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP-FEM-DEMA, Campinas, 2005.
- [4] **Dissertações e teses:** MOREIRA, P. S. Efeito da taxa de resfriamento e dos tratamentos térmicos sobre as propriedades mecânicas da liga Al-Si-Mg (A356.0) fundida. Dissertação (Mestrado) – REDEMAT, Ouro Preto, 2011.
- [5] **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 (Doutorado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, São José dos Campos, 2009.
- [6] **Livro:** ASM METALS HANDBOOK. Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials. Vol. 2. ASM International: Novelt, OH, USA, 1992.