

CAPÍTULO 1

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL NO COMPORTAMENTO ELÉTRICO DA LIGA CU-8,5%SN

Data de aceite: 01/12/2020

Data de submissão: 04/10/2020

Ariovaldo Merlin Cipriano

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP
São Paulo – SP
<http://lattes.cnpq.br/9110582286235684>

Ricardo Aparecido da Cruz

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP
São Paulo – SP
<http://lattes.cnpq.br/7755838081954163>

Rogério Teram

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP
São Paulo – SP
<http://lattes.cnpq.br/4022090335939212>

Maurício Silva Nascimento

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP
São Paulo – SP
<http://lattes.cnpq.br/0654610769101785>

Vinícius Torres dos Santos

Termomecanica São Paulo S.A. – TM
Centro Educacional da Fundação Salvador
Arena – CEFSA
São Bernardo do Campo – SP
<http://lattes.cnpq.br/5999855342195422>

Márcio Rodrigues da Silva

Termomecanica São Paulo S.A. – TM
Centro Educacional da Fundação Salvador
Arena – CEFSA
São Bernardo do Campo – SP
<http://lattes.cnpq.br/8275374225297308>

Antonio Augusto Couto

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN
Universidade Presbiteriana Mackenzie – UPM
São Paulo – SP
<http://lattes.cnpq.br/2893737202813850>

Givanildo Alves dos Santos

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP
São Paulo – SP
<http://lattes.cnpq.br/0046237693009702>

RESUMO: O objetivo deste trabalho é analisar se as variáveis térmicas de solidificação influenciam ou não no comportamento elétrico da liga Cu-8,5%Sn. A liga foi solidificada em uma lingoteira de aço inoxidável AISI 304, montada em um dispositivo de resfriamento unidirecional ascendente. O ensaio de condutividade elétrica foi realizado pelo equipamento ponte de Wheatstone, que mede a resistividade elétrica, e com o medidor de condutividade obteve-se os valores em %IACS, conforme norma ASTM B193-02. Como resultados, notou-se que a condutividade elétrica não foi influenciada pelas variáveis térmicas de solidificação, obtendo-se valores de IACS praticamente constantes para a liga de cobre estudada.

PALAVRAS-CHAVE: Solidificação unidirecional, Liga Cu-8,5%Sn, Condutividade elétrica.

ANALYSIS OF INFLUENCE OF THE UNIDIRECTIONAL SOLIDIFICATION PROCESS ON THE ELECTRICAL BEHAVIOR OF THE CU-8.5WT.%SN ALLOY

ABSTRACT: The objective of this work is to analyze whether the thermal solidification variables influence or not the electrical behavior of the Cu-8.5wt.% Sn alloy. The copper alloy was solidified in an AISI 304 stainless steel ingot, mounted in an unidirectional ascending cooling device. The electrical conductivity test was performed by the Wheatstone bridge equipment that measures the electrical resistivity and with the conductivity meter the values in IACS are obtained, according to ASTM B193-02. As a result, it was noticed that the electrical conductivity was not influenced by the thermal solidification variables, obtaining practically constant IACS values for the studied copper alloy.

KEYWORDS: Unidirectional solidification, Cu-8.5wt.%Sn alloy, Electrical conductivity.

1 | INTRODUÇÃO

A fundição de metais é um importante processo na obtenção dos mais variados itens do nosso dia a dia. Entretanto, 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.

A estabilidade de propriedades tanto em altas como em baixas temperaturas, a grande resistência à corrosão, a alta condutividade térmica e elétrica, as boas propriedades tribológicas, resistência à incrustação, a boa fundibilidade e a excelente usabilidade, fazem com que o cobre e suas ligas sejam sistematicamente empregados em diversos setores da indústria (COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION, 1992).

Tendo em vista o campo de aplicação industrial da liga Cu-8,5%Sn, torna-se indispensável à realização de estudos que busquem o aprimoramento de suas propriedades mecânicas, microestruturais e condutividade elétrica.

Devido a trabalhos e estudos já desenvolvidos, sabe-se que o controle das variáveis térmicas de solidificação definirá as características do produto final, tais como resistência mecânica. (Nascimento et al., 2017; Nascimento et al., 2018; Nascimento et al., 2019; Santos et al., 2017)

A segurança das propriedades elétricas dos materiais e em especial do Cu-8,5%Sn (bronze fosforoso), neste trabalho se faz importante por tratar de um material utilizado em diversos produtos de uso comercial, e sua aplicação poderá ser favorável ou desfavorável, dependendo do comportamento elétrico desejado.

O cobre em 1913 tornou-se o padrão de condutividade, definindo-se a condutividade em 100% de cobre recozido, que em inglês é denominado "International Annealed Copper

Standard” (I.A.C.S.), Padrão Internacional do Cobre Recozido. A resistividade do cobre adotada como padrão vale $0,01723 \cdot 10^{-8} \Omega/m$ e sua condutividade $58,1 \Omega \cdot m/mm^2$. Na tabela 1 são mostrados alguns metais e suas respectivas resistividades.

Metal	Resistividade (Ωm)
Prata	$1,58 \times 10^{-8}$
Cobre	$1,67 \times 10^{-8}$
Alumínio	$2,65 \times 10^{-8}$
Tungstênio	$5,60 \times 10^{-8}$

Tabela 1 Metais e suas respectivas resistividades. (Adaptado de ASM Handbook, 1990)

2 | MATERIAIS E METÓDOS

O dispositivo utilizado no processo de solidificação unidirecional ascendente está representado na figura 1, possuindo formato cilíndrico e revestido internamente com material refratário e externamente com chapa de aço. O calor para manter o metal líquido aquecido antes do processo de resfriamento é gerado por resistências elétricas. Dois tubos servem de suporte para a placa de troca de calor e a lingoteira, sendo o externo de aço SAE 1020 e o interno de aço inoxidável AISI 304. Entre estes dois tubos foi colocado cimento refratário para aumentar o isolamento no espaço interno do forno. Um tubo dentro dos dois tubos de suporte direciona o jato de água para uma placa de 5 mm de espessura, que é responsável pela extração do calor da liga $Cu_{8,5\%}Sn$. A superfície superior da placa, que estará em contato com o metal fundido, foi lixada com lixas de até 600 *mesh*. A lingoteira, construída de aço inoxidável AISI 304, tem altura de 160 mm, diâmetro interno de 60 mm e externo de 76 mm.

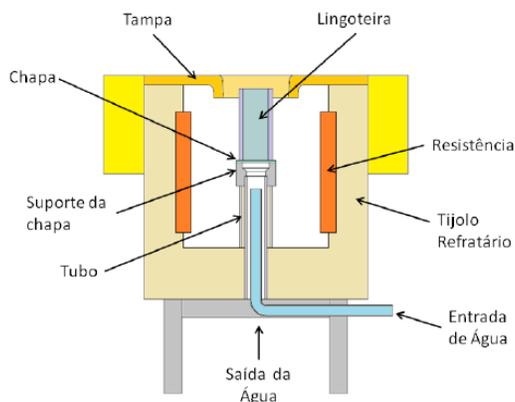


Figura 1 – Ilustração esquemática do forno de solidificação unidirecional ascendente.

Fonte: NASCIMENTO et al., 2017.

A liga foi aquecida à temperatura acima da temperatura *liquidus* em um forno elétrico tipo mufla, da marca Fortelab, utilizando um cadinho de carbetto de silício, da marca Corona, revestido internamente com cimento refratário tipo QF-180, da marca Unifrax. Após a fusão, o cadinho foi removido do forno e o metal líquido foi vazado na lingoteira revestida internamente com cimento refratário posicionada no dispositivo de solidificação direcional ascendente. O resfriamento do metal líquido dentro da lingoteira deu-se por meio de jato d'água na placa de troca de calor a uma vazão de 18 L/min.

O material utilizado no experimento foi quantificado e fornecido pela empresa Termomecanica São Paulo S.A. O lingote foi solidificado no laboratório de solidificação do IFSP- Campus São Paulo, no equipamento mostrado na figura 1. O lingote utilizado no ensaio de condutividade elétrica é mostrado na figura 2.



Figura 2- Amostra de Cu-8,5%Sn.

2.1 Ponte de Wheatstone

Utilizada para medir a resistividade elétrica, para amostras de até um metro de comprimento. A medição foi realizada no corpo de prova (figura 2) no laboratório da Termomecanica São Paulo S.A., conforme norma ASTM B193 – 02 (2014): *Standard Test Method for Resistivity of Electrical Conductor Materials*.

A Ponte WHEATSTONE mede a resistividade da amostra pela equação:

$$R_{amostra} = S \cdot \Omega \cdot f / L \text{ (mm}^2 \cdot \Omega / \text{m)} \quad (1)$$

Em que S = área da amostra em mm²; Ω = resistência medida em ohms; f = fator de temperatura 1 a 20°C; e L = comprimento da amostra a ser medida em m.

2.2 Medidor de Condutividade Elétrica DC10

Utilizado para medir a condutividade elétrica em % IACS, conforme padrão de referência. O medidor é da marca DC10, seguindo a norma ASTM B193, adotada para a medir a % em IACS (International Annealed Copper Standard). O ensaio foi realizado na Termomecanica São Paulo S.A. e o aparelho de medição é mostrado figura 3.



Figura 3 – Medidor de Condutividade elétrica DC10.

O processo de medição no aparelho DC10 utiliza uma amostra padrão de cobre, que define o resultado em % da relação entre a resistividade da amostra (corpo de prova) e a resistividade do padrão de cobre, conforme a seguinte equação:

$$IACS \% = R_{amostra} / R_{cobre} \quad (2)$$

Em que $R_{amostra}$ = Resistividade da amostra ($\text{mm}^2 \cdot \Omega / \text{m}$); R_{cobre} = Resistividade do cobre ($\text{mm}^2 \cdot \Omega / \text{m}$); e IACS % = condutividade elétrica a 20°C (%).

Na figura 4 é mostrada uma ilustração da amostra com as respectivas posições onde foram efetuadas as medições de condutividade elétrica.

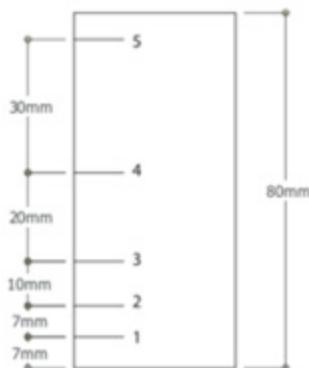


Figura 4. Ilustração da amostra com as posições para a medição de condutividade elétrica.
(Adaptado de Cruz, 2018)

2.3 Composição química da liga

A técnica de análise química empregada foi a espectroscopia de emissão óptica, a qual necessita de uma amostra padrão para fazer a quantificação da composição química de outras amostras. Por meio dessa técnica foram obtidas as composições químicas de cada amostra em função de sua altura, medida a partir da base do lingote. Os resultados são apresentados na tabela 2, a qual inclui a composição da amostra padrão, evidenciando que se trata da liga Cu-8,5%Sn.

Amostra	Pos. (mm)	Zn	Pb	Sn	Fe	Ni	As	Sb	S	Cu	Al	Si, Mg, Bi, Co, Be, P
Padrão	-	0,004	0,009	8,571	0,02	0,014	0,003	0,012	0,005	91,357	0,004	0,001 (cada)
1	10	0,004	0,009	8,515	0,011	0,014	0,003	0,012	0,005	91,422	0,004	0,001 (cada)
2	20	0,004	0,009	8,556	0,012	0,014	0,003	0,012	0,005	91,381	0,004	0,001 (cada)
3	30	0,004	0,009	8,546	0,013	0,014	0,003	0,012	0,005	91,388	0,004	0,001 (cada)
4	40	0,004	0,009	8,556	0,012	0,014	0,003	0,012	0,005	91,380	0,004	0,001 (cada)
5	55	0,004	0,009	8,648	0,013	0,014	0,003	0,012	0,005	91,287	0,004	0,001 (cada)
6	70	0,003	0,009	8,517	0,012	0,014	0,003	0,011	0,005	91,420	0,004	0,001 (cada)

Tabela 2 - Composição química (% em massa) para a amostra padrão e para 6 amostras retiradas de diferentes posições (medidas a partir da base do lingote).

3 I RESULTADOS E DISCUSSÕES

O gráfico apresentado na Figura 5 mostra os dados experimentais e a curva que correlaciona o tempo de passagem da isoterma *liquidus* (t_L) com a posição (P) em relação ao início da extração de calor para a liga Cu-8,5%Sn.

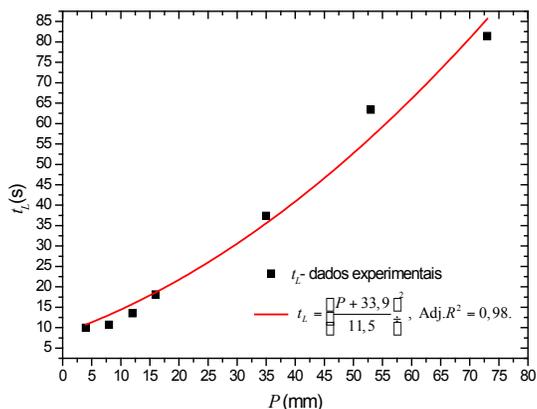


Figura 5 – Gráfico tempo de passagem de isoterma liquidus x posição. (Cruz, 2018)

Por meio deste gráfico, nota-se que t_L apresenta valores menores para as posições mais próximas do início da extração de calor no processo de solidificação unidirecional ascendente. Em termos de variáveis térmicas de solidificação, isso resultará em maiores velocidades de deslocamento da isoterma *liquidus* e taxas de resfriamento nas posições iniciais e, conseqüentemente, em diminuição desses valores para posições mais afastadas.

O gráfico apresentado na figura 6 mostra a relação entre os resultados das medições de condutividade elétrica obtidos na liga Cu-8,5%Sn com as respectivas posições onde foram executadas. Pode-se observar que o valor mínimo é apresentado na posição 1, que é de 14 %IACS; e o maior é apresentado na posição 5, que é de 14,8 %IACS. A média resultante foi de 14,46 %IACS. Em termos práticos, nota-se que a variação de condutividade elétrica é mínima em função da posição considerada.

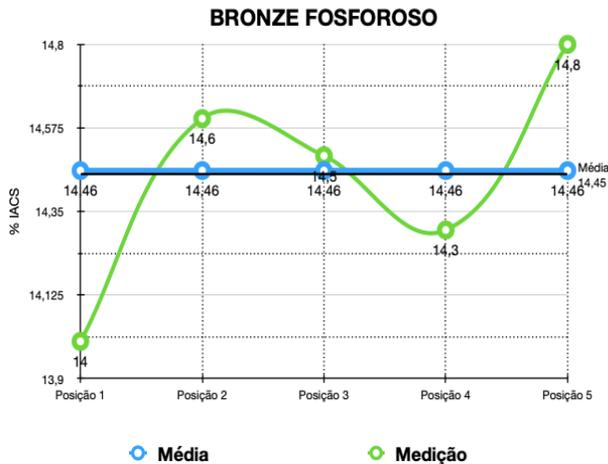


Figura 6. Relação entre %IACS e posição onde foi realizada a medição.

Após as cinco leituras realizadas na amostra de liga Cu-8,5%Sn, representadas na figura 6, notamos que a condutividade elétrica do material após o processo de solidificação, se mantém, porém em valores inferiores em relação ao padrão para o cobre e para o estanho da norma ASTM B 193-02, conforme mostrado na Tabela 3.

Descrição da amostra	Resultado
Cu-8,5%Sn	14,46 % I.A.C.S
Padrões	%IACS
Cobre	93,15 a 100
Bronze	23,6

Tabela 3 – Valores de condutividade elétrica da liga Cu-8,5%Sn e dos padrões de cobre e bronze.

4 | CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos, nota-se que o tempo de obtenção da isoterma *liquidus* apresenta valores menores para as posições mais próximas do início da extração de calor no processo de solidificação unidirecional ascendente. Em termos de variáveis térmicas de solidificação, isso resultará em maiores velocidades de deslocamento da isoterma *liquidus* e taxas de resfriamento nas posições iniciais, e diminuição desses valores para as posições mais afastadas.

Comparando os valores %IACS com a posição onde foram medidos, observou-se que a variação de condutividade elétrica é mínima (praticamente constante), porém em

valores inferiores em relação ao padrão para o cobre e para o estanho da norma ASTM B193-02.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Termomecânica São Paulo S. A. e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) pela parceria no desenvolvimento de pesquisas em solidificações de materiais, e ao apoio fornecido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

ASM. **ASM Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. ASM International, vol. 2, 1990.

ASTM B193 – 02. **Standard Test Method for Resistivity of Electrical Conductor Materials**; West Conshohocken, PA, USA, 2014.

ASTM E10. **Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials**; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2012.

CRUZ, R. A. **Estudo sobre a influência das variáveis térmicas de solidificação na microestrutura e nas propriedades mecânicas da liga Cu-8,5%Sn**. 2018. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2018.

GARCIA, A. **Solidificação: Fundamentos e Aplicações**. 2. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2007.

NASCIMENTO, M. S. *et al.* Correlação entre variáveis térmicas de solidificação, microestrutura e resistência mecânica da liga Al-10%Si-2%Cu. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, e11774, 2017. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762017000100403&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 07 maio 2020. Epub 06-Abr-2017. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0106>.

NASCIMENTO, M. S. *et al.* An Experimental Study of the Solidification Thermal Parameters Influence upon Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si-Cu Alloys. **Materials Research**, São Carlos, v. 21, n. 5, e20170864, 2018. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2017-0864>.

NASCIMENTO, M. S.; SANTOS, G. A.; TERAM, R.; SANTOS, V. T.; SILVA, M. R.; COUTO, A. A. Effects of Thermal Variables of Solidification on the Microstructure, Hardness, and Microhardness of Cu-Al-Ni-Fe Alloys. **Materials**, 2019, 12 (8), 1267. <https://doi.org/10.3390/ma12081267>.

TERAM, R. *et al.* Influência das variáveis térmicas de solidificação na microestrutura e dureza da liga Cu-14Al-5Ni-5Fe. *In*: 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2019, São Carlos. **Anais eletrônicos...** Disponível em <<https://doi.org/10.26678/ABCM.COBEP2019.COF2019-0542>>. Acesso em 07 maio 2020.

SANTOS, G. A. **Tecnologia dos materiais metálicos: propriedades, estruturas e processos de obtenção**. São Paulo: Editora Érica, 2015.

SANTOS, G. A.; GOULART, P. R.; COUTO, A. A.; GARCIA, A. Primary Dendrite Arm Spacing Effects upon Mechanical Properties of an Al 3wt%Cu 1wt%Li Alloy. In: Andreas Ochsner; Holm Altenbach. (Org.). **Advanced Structured Materials**. 1 ed. Singapore: Springer Singapore, v. 33, p. 215-229, 2017. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1602-8_19

SANTOS, V. T. **Correlação entre as variáveis térmicas de solidificação, microestrutura, microdureza e dureza da liga bronze alumínio níquel – CuAl10Ni5Fe5**. 2017. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2017.