

# CAPÍTULO 2

## ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ELÉTRICO DE LIGAS DE ALUMÍNIO OBTIDAS POR SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL

Data de aceite: 01/12/2020

Data de submissão: 05/10/2020

### **Jorge Athanasios Pimenidis**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP  
São Paulo – SP  
<http://lattes.cnpq.br/2971135823415601>

### **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**

Termomecânica 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**

Termomecânica 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 a macroestrutura resultante de solidificação unidirecional influencia no comportamento elétrico da liga Al-6%Zn. O comportamento mecânico e elétrico de produtos industrializados, em muitas vezes significa dar garantias de durabilidade e solidez nas mais variadas aplicações de esforços e robustez de composição química. O ensaio de condutividade normalizado, norma técnica ASTM B193 – 02 (2014), utilizado neste trabalho é adotado industrialmente. O método de comparação dos resultados com a tabela de resistividade dos materiais foi adotado para análise dos resultados. Os resultados mostram que a macroestrutura resultante da solidificação praticamente não influencia na condutividade e resistividade elétrica da liga estudada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Solidificação, liga de alumínio, macroestrutura, condutividade e resistividade elétrica.

## ANALYSIS OF THE ELECTRICAL BEHAVIOR OF AN AL-6WT.%ZN ALLOY OBTAINED BY UNIDIRECTIONAL SOLIDIFICATION

**ABSTRACT:** The objective of this work is to analyze whether the macrostructure resulting from unidirectional solidification influences the electrical behavior of the Al-6% Zn alloy. The mechanical and electrical behavior of industrialized products often means giving guarantees of durability and strength in the most varied applications of efforts and robustness of chemical composition. Electrical behavior is crucial for certain technological applications of aluminum and its alloys. The standardized conductivity test, technical standard ASTM B193 - 02 (2014), used in this work is adopted industrially. The method of comparing the results with the table of resistivity of the materials was adopted to analyze the results. The results show that the macrostructure resulting from solidification do not influence the conductivity and electrical resistivity of the studied alloy.

**KEYWORDS:** Solidification, aluminum alloy, macrostructure, conductivity and electrical resistivity.

### 1 | INTRODUÇÃO

Aplicações específicas forçam o desenvolvimento de ligas de alumínio, assim novas ligas são desenvolvidas constantemente, cada uma combinada com um material diferente, combinação apropriada de propriedades na busca de características desejadas, um dos principais objetivos é mexer com a resistência mecânica e tentar manter todas as outras propriedades.

A indústria se utiliza de diversos processos e associa o alumínio a outros metais de engenharia, como o cobre, o silício, o ferro, o zinco e o manganês, para gerar as chamadas ligas. De acordo com os elementos associados, as ligas possuem vantagens e desvantagens sobre o alumínio puro, como maior resistência mecânica, menor resistência à corrosão, maior fluidez no preenchimento de moldes etc. (HATCH, 1993; ASM Handbook, 1990) apud (SILVA, 2017)

O processo de fundição, por exemplo, desde o aquecimento dos materiais, assim como a temperatura a ser atingida e sua manutenção para a associação com outros metais e o seu resfriamento direcionado pode interferir em diversas propriedades mecânicas do produto e inclusive na condutividade elétrica do material de liga produzido.

Dentre as várias possibilidades de processamento para a obtenção dessas ligas, o processo de solidificação é mais uma etapa na busca do controle da composição química das ligas e a estrutura de grãos, sendo a solidificação unidirecional o processo utilizado na aquisição do lingote produzido para este trabalho. A etapa de resfriamento da homogeneização também é de grande importância, pois a taxa de resfriamento controla a precipitação dos elementos de liga que estão em solução sólida (SILVA, 2017).

Em função de 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 etapa de manutenção da temperatura e resfriamento também são de grande importância, pois controlam a possibilidade de solução do material adicionado, e também podem ajudar na difusão e na precipitação dos elementos de liga que estão em solução.

Dentre as ligas de fundição as ligas fundidas de alumínio são as mais versáteis (ASM HANDBOOK, 1992) apud (NASCIMENTO, 2017). O alumínio tem massa específica de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, fator que contribui com sua popularidade entre os metais não ferrosos (SHACKELFORD, 2008) apud (NASCIMENTO, 2017). O alumínio e todas as suas propriedades mecânicas, com tal massa específica, resultam em produtos que podem ser considerados leves em comparação com os mais diversos produtos metálicos apud (SILVA, 2017).

Dentre as muitas propriedades físicas da matéria, suas propriedades elétricas são estritamente importantes tanto do ponto de vista acadêmico, para o entendimento do comportamento fundamental da matéria, quanto do ponto de vista tecnológico, para o desenvolvimento destinado a obtenção e caracterização de novos materiais (GIROTTO e SANTOS, 2001) apud (SILVA, 2017).

A condutividade, resistência e potencial elétrico de produtos que na indústria ainda podem ser considerados matéria prima, tem grande importância nas aplicações comerciais de produtos finais, fabricados com diversos materiais metálicos, aí se incluem o alumínio e suas ligas, que no uso final podem ter contato com ácidos, água potável, água salgada, alimentos, líquidos refrigerantes, outras soluções aquosas eletrolíticas etc., que podem ter ou adquirir potencial elétrico diferente, e assim trocar elétrons espontaneamente, processo de oxirredução ou de corrosão galvânica, com estes materiais, depositando material contaminante ou retirando dele partes específicas de sua composição química final. Corrosão Galvânica consiste no o mecanismo geral da corrosão, que é conduzido pela formação de pilhas eletroquímicas. Um quadro geral da corrosão que tem como mecanismo o contato elétrico entre dois metais de potenciais eletroquímicos diferentes imersos em um mesmo eletrólito, metais de igual potencial imersos em eletrólitos diferentes ou ainda de metais diferentes em eletrólitos diferentes. A corrosão galvânica é um processo eletroquímico em que um metal sofre corrosão preferencialmente em relação a outro quando os dois metais estão em contato elétrico e imersos em um eletrólito. Esta mesma reação galvânica é explorada em baterias primárias (como as vulgarmente chamadas de pilhas) para gerar uma tensão. A corrosão galvânica e seus processos podem ser uma das formas mais comuns e frequentes de corrosão na natureza, bem como um dos mais destrutivas. (SCIETIA, 2019)

Silva (2017) afirma que há uma boa relação linear entre a condutividade elétrica e as propriedades mecânicas, para situações específicas.

Santos (2017) produziu em laboratório apropriado, onde se pode controlar as taxas de resfriamento, a liga Al-6,0Zn (% em massa) que foi solidificada em um sistema ascendente sob condições não-estacionárias de fluxo de calor, e afirma: Constata-se que o espaçamento dendrítico primário diminui com o aumento da velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus* e da taxa de resfriamento. Em ambos casos o arranjo dendrítico mais refinado apresenta maior resistência mecânica. O resultado desse trabalho demonstra que, para espaçamentos dendríticos menores, há o aumento da resistência mecânica.

O cobre em 1913 tornou-se o padrão de condutibilidade, definindo-se a condutibilidade 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  $58,1 \text{ S.m/mm}^2$ . (NDE, 2019)

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

A liga de alumínio Al-6%Zn, com percentuais em massa, ensaiada foi assim produzida: A solidificação unidirecional ascendente consiste em solidificar um metal fundido com resfriamento da superfície inferior do molde, promovendo uma solidificação da base para o topo do molde, sendo necessário um bom isolamento térmico nas laterais e parte superior, de modo a evitar a extração de calor pelas paredes do molde e, assim, impedir a nucleação de cristais nessa região. Essa forma de solidificação permite minimizar os efeitos de convecção no metal líquido (SIQUEIRA *et al.*, 2002) apud Teram, 2019.

Na figura 1 é mostrada uma esquematização do dispositivo de solidificação unidirecional ascendente. (SANTOS, 2009)

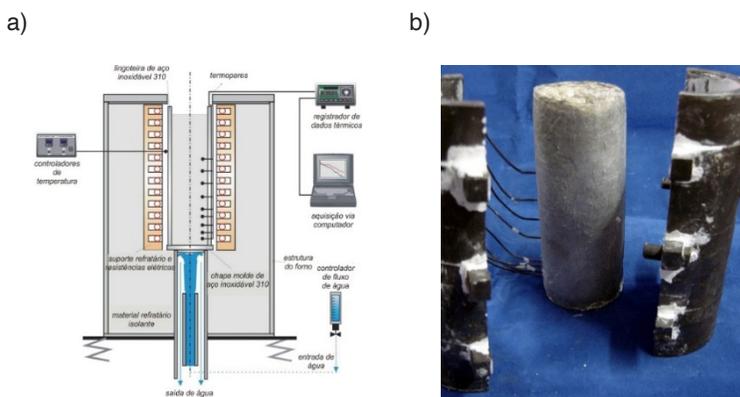


Figura 1 – Em a) esquema do dispositivo de solidificação unidirecional ascendente, controle do resfriamento e aquisição de dados; e em b) o material obtido experimentalmente deste dispositivo.

Na figura 2 é mostrado o material produzido experimentalmente. Esse material foi solidificado unidirecionalmente na forma vertical ascendente em molde como já descrito neste trabalho, e vazado com superaquecimento de 10°C. Observa-se a ocorrência de estrutura predominantemente colunar e o surgimento de uma estrutura equiaxial no fim do lingote da liga Al-6%Zn.



Figura 2 – Macroestrutura da liga Al-6%Zn (aumento de 1x).

Durante o processo de solidificação, o calor foi direcionalmente extraído através de um molde refrigerado a água feito de aço (SAE 1020). Para poder observar correlações entre a microestrutura, variáveis térmicas de solidificação e propriedades mecânicas da liga fundidas. Os resultados mostraram que taxa de resfriamento determina espaçamentos dendríticos primários que melhoram o limite de resistência à tração ( $\sigma_{m\acute{a}x.}$ ) e limite de escoamento ( $\sigma_e$ ) em função das condições de solidificação impostas pelo sistema metal/molde. Constata-se que o espaçamento dendrítico primário diminui com o aumento da velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus* e da taxa de resfriamento. O sistema de resfriamento provocou um arranjo dendrítico mais refinado que apresenta maior resistência mecânica (SANTOS, 2009).

A resistência elétrica de um material é uma grandeza física que expressa o impedimento sofrido pelos portadores de carga, de se desligarem do núcleo do átomo de um determinado material, e partirem para o movimento ordenado, sujeitos a uma pressão elétrica, ao percorrerem de um ponto a outro de um corpo, a resistência pode ser encontrada sendo ela dependente das dimensões deste corpo e do material de que é constituído. A resistividade, por outro lado, também é uma grandeza dependente de impedimento sofrido por portadores de carga, porém é uma propriedade intrínseca da matéria, sendo independente das dimensões do corpo estudado.

Podemos definir a resistência elétrica entre dois pontos quaisquer de um material aplicando uma tensão entre estes dois pontos e medindo a corrente elétrica que flui no interior dele. A resistência do material será dada pela equação 1 – Lei de Ohm.

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

Em que  $R$  = resistência elétrica, em Ohm;  $U$  = tensão elétrica, em Volt; e  $I$  = intensidade da corrente elétrica, em Ampére.

Na figura 3 é mostrado um esquema de um material condutor de dimensões  $W$ ,  $L$  e  $t$ .

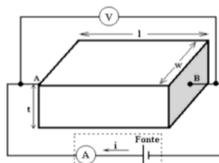


Figura 3 -  $V$  = Voltímetro e  $A$  = Amperímetro, instrumentos em atuação, medindo tensão elétrica e corrente elétrica, Fonte = Fonte ideal de Tensão e Corrente elétrica.

Podemos definir a condutividade elétrica como sendo o inverso da resistividade, conforme Equação 2.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

Em que  $\sigma$  = Condutividade elétrica, em Siemens; e  $\rho$  = Resistividade elétrica, em Ohm.metro.

De forma respectiva, a definição matemática da resistividade e a da resistência podem ser:

$$\rho = \frac{R A}{l} \quad (3)$$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (4)$$

Em que:

R = Resistência elétrica, em  $\Omega$ .

$\rho$  = Resistividade elétrica do material, em ohm.m.

A = Área da seção transversal do condutor, em  $m^2$ .

l = Comprimento do condutor, em m.

A unidade no Sistema Internacional para a resistência elétrica R, é o V/A ou ohm ( $\Omega$ ), e para a resistividade elétrica, é o ohm.m ou ( $\Omega$ .m), a Tensão elétrica U é o Volt (V) e para a corrente elétrica i o ampère (A).

As medições foram realizadas nos corpos de prova apresentados no laboratório da Termomecânica São Paulo S.A., conforme norma ASTM B193 – 02 (2014) Standard Test Method for Resistivity of Electrical Conductor Materials.

Na Equação 5 está representada a formulação para a medição da resistência elétrica.

$$R_{\text{amostra}} = S \cdot \Omega \cdot f / L \text{ (mm}^2 \cdot \Omega / \text{m)} \quad (5)$$

Em que:

S = área da amostra, em  $mm^2$ .

$\Omega$  = resistência medida em ohms.

f = fator de temperatura, 1 a 20 °C.

L = comprimento da amostra a ser medida, em m.

O corpo de prova de Al-6%Zn foi submetido ao teste por um um condutivímetro apresentado na Figura 4.



Figura 4 – Equipamento de laboratório da Termomecânica e corpos de prova. A amostra de Al-6%Zn foi ensaiada pelo equipamento eletrônico cujos dados de saída são os valores da condutividade em I.A.C.S. Fonte: autor, 2019.

Na Figura 5 é destacado o condutivímetro e sua placa de calibragem padrão para a temperatura do local do ensaio. O equipamento que realmente produziu os resultados apresentados neste trabalho foi o equipamento digital, o instrumento e sua placa padrão de calibragem para uma determinada temperatura e o material examinado, as leituras de condutividade em porcentagem da condutividade do cobre I.A.C.S, foram realizadas da base da peça para a parte superior da mesma, a extremidade debaixo corresponde ao aparelho de pé.



Figura 5 – O Condutivímetro, corpo de prova e sua placa padrão de calibragem. Fonte: autor, 2019.

Para a medir a % em IACS (International Annealed Copper Standard), utilizamos o aparelho de medição de condutividade elétrica DC 10 da Termomecanica São Paulo S.A.

O ensaio de condutividade elétrica ocorreu no laboratório da empresa Termomecanica, regido segundo a norma técnica ASTM B193 – 02 (2014) Standard Test Method For Resistivity Of Electrical Conductor Materials, onde o ambiente controlado, em acesso, em temperatura e segurança próprios para ensaios e contando ainda com a expertise de laboratoristas em materiais comerciais produzidos pela empresa, promoveu o ensaio e a coleta dos dados. A temperatura ambiente registrada pelo equipamento que realizou o ensaio é de 22° Celsius que foi calibrada pelo padrão visto ao lado do instrumento (Figura 5).

O processo de medição define o resultado em % da relação entre a resistividade da amostra (corpo de prova) e a resistividade do padrão de cobre, resultando a seguinte formulação:

$$\text{IACS \%} = R_{\text{amostra}} / R_{\text{cobre}} \quad (6)$$

Em que  $R_{\text{amostra}}$  = Resistividade da amostra, em  $\Omega \cdot \text{M}$ ;  $R_{\text{cobre}}$  = Resistividade do cobre, em  $\Omega \cdot \text{m}$ ; e IACS % = condutividade elétrica a 20 °C.

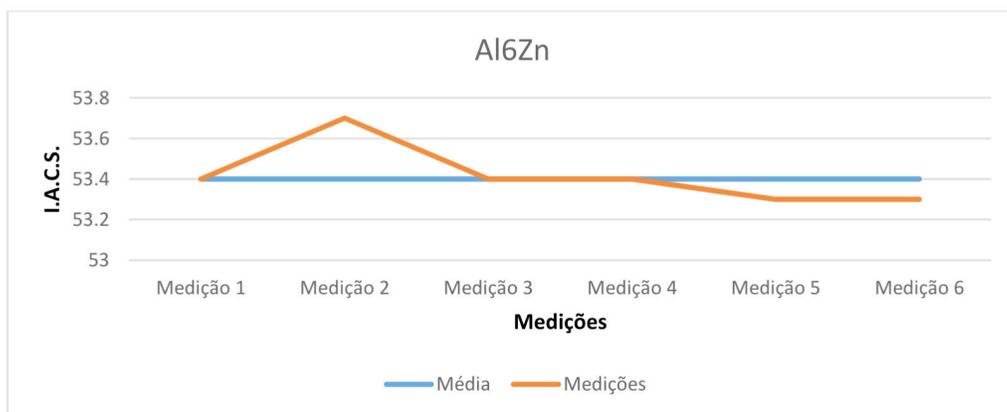
### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na tabela 1 são mostrados os resultados das medições de condutividade elétrica realizadas na liga Al-6%Zn, desde a região mais próxima à extração de calor (medição 1) até a parte final (próxima ao rechupe), em que a macroestrutura já não é mais colunar e sim equiaxial.

Amostra	Resultados	Observações
Al6Zn	53,4 % I.A.C.S.	O resultado reportado é a média de 7 medições Medição 1 (interface de resfriamento) = 53,4 % IACS Medição 2 = 53,7 % IACS Medição 3 = 53,4 % IACS Medição 4 = 53,4 % IACS Medição 5 = 53,3 % IACS Medição 6 (próximo ao rechupe) = 53,3 % IACS

Tabela 1 – Resultados de condutividade elétrica da liga Al6Zn em diferentes posições no lingote.

Na Figura 6 está representado o gráfico que correlaciona as medições em diferentes posições com as respectivas condutividades elétricas em %IACS, em porcentagem da condução do cobre recozido.



Por meio de análise dos resultados apresentados na tabela 1 e na Figura 6, nota-se que a variação da condutividade elétrica da liga Al-6%Zn é mínima, variando de 53,3%IACS (região do rechupe, que é equiaxial) a 53,7%IACS (região mais próxima da base de extração de calor, que é colunar). Ou seja, a macroestrutura resultante do processo de solidificação, seja ela colunar ou equiaxial, praticamente não interfere na condutividade elétrica da liga Al-6%Zn.

Nos metais a adição de impurezas, em geral aumenta a resistividade elétrica destes materiais, exceto a prata em alguns casos, como o cobre quando ligado com alguma porcentagem de prata a condutância é melhorada. (FERNANDES, 2010). Na liga estudada, a resistividade do alumínio foi alterada para um aumento da resistência elétrica, a condutividade diminuiu, quando comparada com a do alumínio puro que fica em 62% da condutividade do cobre em IACS.

Em geral, o teor de elementos de liga altera os valores de condutividade e de resistividade, pois alteram a rede cristalina com tamanhos diferentes de átomos. Desta maneira, os átomos estranhos ao metal puro alteram a resistividade do metal (SILVA, 2006). O espalhamento dos elétrons pelos átomos dos materiais citados parece que contribuíram para a alteração da condutividade elétrica.

Um ponto positivo em termos de aplicações tecnológicas é que a inserção de zinco no alumínio possibilita ganho de resistência mecânica após o processo de solidificação e, além disso, faz com que o material entre no seletivo grupo das ligas de alumínio que podem ter incremento de resistência mecânica e dureza por meio de tratamentos térmicos.

## 4 | CONCLUSÕES

Os estudos em literatura específica GARCIA (2007) e ensaio realizado em corpo de prova produzido por SANTOS (2009), indicam que o controle da fundição de ligas de alumínio e solidificadas em um sistema ascendente de fluxo de calor, sob condições não estacionárias com o calor extraído unidirecionalmente através de uma base de aço refrigerada a água, proporcionam estruturas que favorecem e melhoram as propriedades mecânicas. É observado na amostra ensaiada a zona colunar na base do lingote e predominando no material, e a estrutura equiaxial na parte superior, próximo ao rechupe. Os ensaios com o condutivímetro abrangeram estas duas regiões e os resultados das medições foram bem próximos, dos quais concluímos que não há diferença significativa de condutividade entre as regiões colunar e equiaxial.

As propriedades elétricas, por sua vez, são alteradas sim, mas pela nova formação da composição química dos produtos acabados. A influência na resistividade elétrica será modificada de acordo com a concentração que a nova liga terá em sua composição final. A observação aos resultados obtidos de forma experimental, também mostra que a composição química do material agregado ao alumínio influencia de maneira direta na resistividade do material resultante.

Na liga Al-6%Zn ocorreu uma mudança em relação ao alumínio puro, o aumento da resistividade aparece na análise: houve a diminuição da condutividade elétrica do material produzido com o alumínio ligado ao zinco.

O aparente prejuízo em relação a condutividade elétrica, pode ser compensado, em alguns casos pode ser interessante se analisado sob outros aspectos e aplicações, e

devido a melhora das características mecânicas, os materiais ligados podem ter um custo final menor que o alumínio puro e com isso beneficiar algumas aplicações de produtos no mercado industrial, e inclusive diminuir os custos na obtenção de produto final e preços ao consumidor.

## 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

Garcia, Amauri. *Solidificação: Fundamentos e Aplicações* / Amauri Garcia. - 2ª edição - Campinas, SP: 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](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>.

NDT Resource Center. The International Annealed Copper Standard, acessado em 22/01/2020, disponível em: <https://www.nde-ed.org/GeneralResources/IACS/IACS.htm>

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](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.

Santos, Givanildo Alves dos. Correlação entre Variáveis Térmicas de Solidificação, Microestrutura e Comportamento Mecânico de Ligas Al-Zn e Al-Cu-Li / Givanildo Alves dos Santos - São José dos Campos, SP ,2009.

Santos, Givanildo Alves dos. Correlação entre as Variáveis Térmicas de Solidificação, Microestrutura, Microdureza e Dureza da Liga Bronze Alumínio Níquel – CU-10AL-5NI-5FE / Givanildo Alves dos Santos - São José dos Campos, SP ,2017.

Scientia, Corrosão Galvânica, acessado em 22/01/2020, disponível em: <https://sites.google.com/site/scientiaestpotentiaplus/corrosao/corrosao-galvanica>

Silva, Aline da. Efeito das Taxas de Resfriamento nas Propriedades Mecânicas e Elétricas da Liga AA2024 / Aline da Silva. Itajubá, 2017.

Silva, Luis carlos Elias da. Estudos do Desenvolvimento e Caracterização das Ligas CuNiPt e CuNiSn para Fins Eléctro - Eletrônicos, São Paulo, 2006, acessado em 16/04/2020, disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-31052007-153314/publico/LuisCEdaSilva.pdf>

Teram, Rogério. Influência das variáveis térmicas de solidificação na microestrutura e dureza da liga Cu-14Al-5Ni-5Fe / Rogério Teram. São Paulo: [s.n.], 2019.