

## CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA E MECÂNICA DA LIGA AL-CU-FE-SI-ZR SUBMETIDA A TRATAMENTO TÉRMICO

Carlos Alexandre Cavalcante Sousa, carlosmec21@gmail.com<sup>1</sup>  
Marcos Felipe Macêdo Cardoso, mecanica.marcos@gmail.com<sup>1</sup>  
Gustavo Neves Rebelo, guga1365@gmail.com<sup>1</sup>  
Victor Lima Melo, victormelo.eng@gmail.com<sup>1</sup>  
Natália Cristina Araújo Costa, natalia.araujoc@hotmail.com<sup>1</sup>  
José Maria do Vale Quaresma, quaresma@fem.unicamp.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá, CP 479, CEP 66075-110, Belém - Pará

**Resumo:** O contínuo processo de industrialização dos países traz um incremento significativo na demanda de eletricidade. A fim de atender ao crescimento dessa demanda de energia, novas fontes geradoras estão sendo construídas. No entanto, a atenção para novos estudos das redes de transmissão são essenciais para manter o controle sobre a perda de energia ao longo das linhas de transmissão. Portanto, foram realizados estudos sobre o efeito do tratamento térmico sobre a liga base Al-0.05%Cu-[0,30-0,35]%Fe-0,3%Si modificada com teores de %Zr para avaliação das características elétrica e mecânica do material. A amostra foi obtida em um molde de solidificação com extração de calor unidirecional, cortados em forma retangulares [15x15x110] mm e usinados para o diâmetro de 9,5 mm. As amostras foram divididas em dois conjuntos: um foi submetido a um tratamento térmico de 500°C por 3 horas, e o segundo não foi submetido ao tratamento térmico. As amostras foram laminadas para o diâmetro de 3,0 mm e submetidas ao teste de resistividade elétrica e ao teste de tração para a avaliação das propriedades eletromecânicas do material. Foi observado que a liga submetida ao tratamento térmico mostrou aumento na condutividade elétrica e redução dos valores de limite de resistência a tração, alongamento e do expoente de encruamento.

**Palavras-chave:** Alumínio; Zircônio; Solidificação; Propriedades Eletromecânicas.

### 1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, o desenvolvimento e industrialização do país segue a passos largos mesmo em períodos de crise como a atual. Segundo dados do IBGE, em abril o avanço da produção industrial cresceu cerca de 0,6%. Isso mostra o avanço mesmo em períodos de crise.

Com a crescente industrialização, a solicitação por novas fontes geradoras de energia elétrica cresce exponencialmente. Com isso necessita-se recapacitar o sistema de transmissão e distribuição nacional de energia elétrica já existente, a fim de distribuir essa nova energia de forma eficiente, com menos perdas por efeito Joule.

Com esse intuito, o alumínio se mostra com grande potencial de utilização nas linhas de transmissão e distribuição. As ligas de alumínio podem apresentar elevadas propriedades elétrica e mecânica além de baixo peso específico associado ao seu preço relativamente baixo quando comparado com os demais elementos.

Nesse contexto, o Grupo de Pesquisas em Engenharia de Materiais – GPEMAT vem estudando novas ligas capazes de atuar de forma superior, fornecendo propriedades eletromecânicas melhores para maximizar a eficiência do material. O presente trabalho visa o estudo de da liga de alumínio Al-0.05%Cu-[0,30-0,35]%Fe-0,3%Si modificada com teores de 0,15%Zr para a fabricação de cabos de transmissão e distribuição.

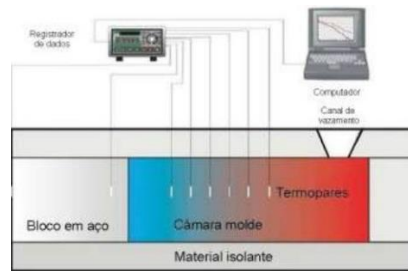
### 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A liga foi obtida a partir do lingote de alumínio com pureza comercial, conhecido como alumínio eletrocondutor (Al-EC). Junto com os demais elementos de liga, o lingote de alumínio foi seccionado com a utilização de serra de fita, pesado utilizando uma balança de precisão e após ser fundido no forno mufla em cadinho de carvão de silício de 3,5l.

Primeiramente, o cadinho de carvão de silício foi pintado internamente com solução de caulim para evitar a aderência com o metal líquido, aquecido a uma temperatura de 150°C para a retirada de umidade e após a inserção dos elementos de liga e levado novamente ao forno a uma temperatura de 900°C.

Antes de ser efetuado o vazamento do metal líquido nas cavidades dos moldes foi realizada a homogeneização do metal fundido através de agitação manual vigorosa, utilizando-se uma espátula de aço já previamente pintada com a solução de caulim e aquecida para a retirada de umidade. Logo após a homogeneização, faz-se a injeção de gás inerte

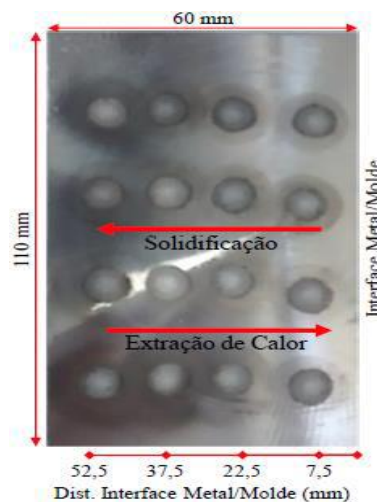
(argônio) na vazão entre 0,2 e 0,4 l/s através de um tubo de aço inoxidável ligado a um cilindro de 10 m<sup>3</sup>. O metal líquido foi vazado com um superaquecimento de 10% acima da temperatura líquida e o modelo esquemático do molde de solidificação pode ser observado na figura 01, o mesmo foi utilizado nos trabalhos de Quaresma, 1999; Monteiro, 2013; Sousa 2017.



**Figura 01 – Modelo esquemático da câmara de solidificação com o posicionamento dos termopares, indicando a captura da história térmica do processo em tempo real. Fonte: Quaresma, 1999.**

As dimensões do molde utilizado basearam-se no trabalho de Quaresma (1999) utilizando-se um bloco com dimensões de [63x60x110] mm de aço SAE 1010 e nas dimensões da câmara de vazamento [60x60x110] mm.

A composição química foi realizada nos blocos solidificados como pode ser visualizado na figura 02. Foram realizadas quatro leituras para as posições de [7,5; 22,5; 37,5 e 52,5] mm de distância da interface Metal-Molde.



**Figura 02 – Lingote após análise química para a obtenção do perfil de rejeição de soluto. Fonte: Lobato, 2016.**

Os corpos de prova foram seccionados nas dimensões de [15x15x110] mm e usinados para o diâmetro de 9,5 mm. Posteriormente foram divididos em dois grupos: i. Sem tratamento térmico; ii. Com tratamento térmico utilizando um forno do tipo Mufla da marca GREFORTEC.

Após o tratamento, as amostras foram laminadas para o diâmetro de 3,0 mm e submetidas ao teste de resistividade elétrica utilizando um micro-ohmímetro (ponte de Kelvin) da marca MEGABRÁS, modelo MPK-2000, seguindo a norma NBR 5118 à uma temperatura de 20°C. Em seguida utilizou-se as equações presentes na norma NBR 6814 para obter a condutividade elétrica em %IACS.

Os ensaios de tração foram realizados com a utilização de uma máquina da marca KRATOS. Os corpos de prova foram confeccionados nas dimensões especificadas pelo padrão normativo presente nas normas NBR 6810 e NBR ISO 6892. Os resultados foram obtidos após executada uma média na quantidade de amostras ensaiadas.

### 3. RESULTADOS E DISCURSÕES

A liga foi obtida a partir do lingote de alumínio com pureza comercial, conhecido como alumínio eletrocondutor (Al-EC). Junto com os demais elementos de liga, o lingote de alumínio foi seccionado com a utilização de serra de fita, pesado utilizando uma balança de precisão e após ser fundido no forno mufla em cadinho de carvão de silício de 3,5l.

#### 3.1. Composição Química

Nota-se na Tabela 01 que a composição da liga experimental está em conformidade com a composição química desejada no escopo do trabalho.

**Tabela 01 – Composição química da liga de alumínio.**

| Liga                | Elementos de Liga [%] |          |       |       |
|---------------------|-----------------------|----------|-------|-------|
|                     | Cu                    | Fe       | Si    | Zr    |
| Composição Esperada | 0,05                  | 0,3-0,35 | 0,3   | 0,15  |
| Liga Experimental   | 0,049                 | 0,298    | 0,319 | 0,152 |

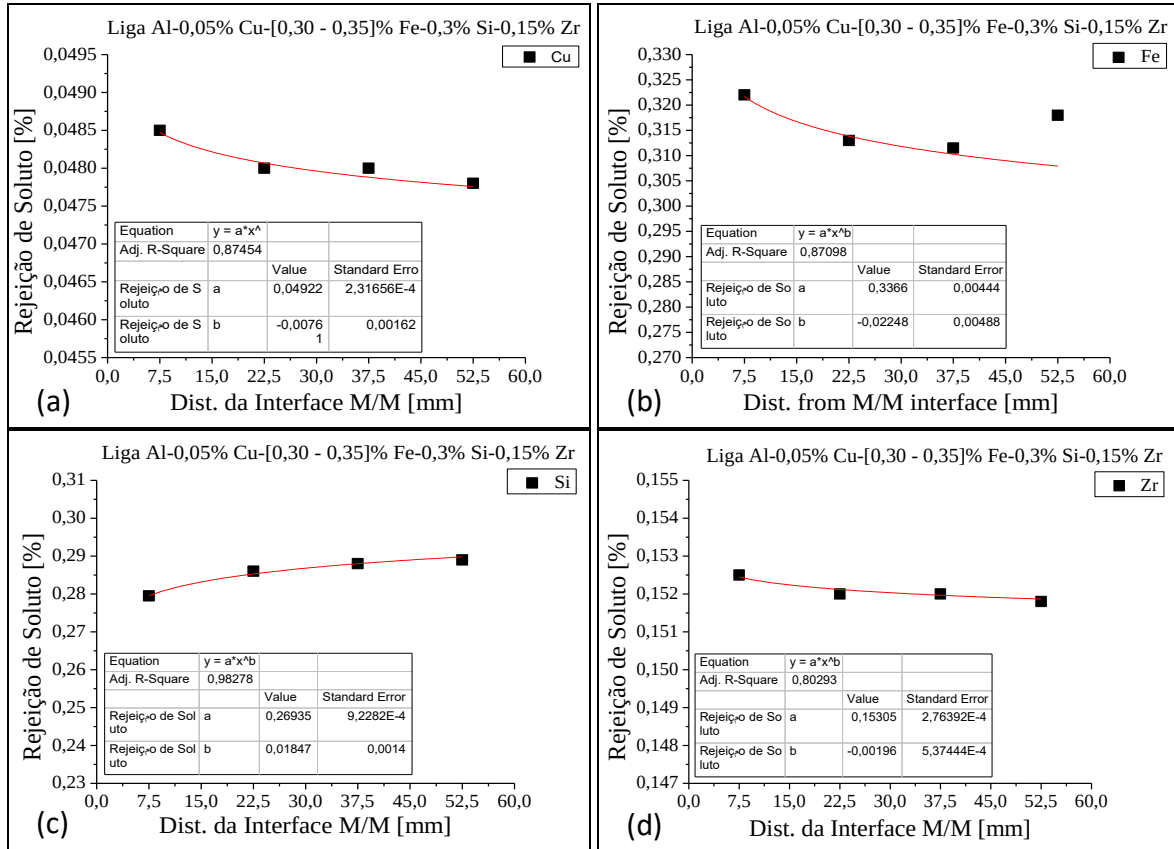
(1)

### 3.2. Rejeição de Soluto

A Tabela 02 permite constatar baixa variação para todos os elementos, da mesma forma quando se avalia a inclinação dos perfis contidos na Figura 03. Esta constatação possibilita que se comente que: i. A taxa de extração de calor unidirecional se coloca razoavelmente ágil, chegando a inibir o movimento de difusão dos elementos – Cu; Fe; Si e Zr- na Matriz de Al ou ii. Estes elementos possuem baixa mobilidade na matriz de Al; os dois aspectos analisados permitem que se conclua iii. A taxa de extração de calor se caracteriza como o processo da Tempera de Fusão e, neste caso, as estruturas obtidas se apresentam na forma de Solução Solida Saturada, daí a baixa variação da concentração ao longo do perfil de solidificação.

**Tabela 02 – Variação dos elementos de ligas utilizados ao longo dos lingotes.**

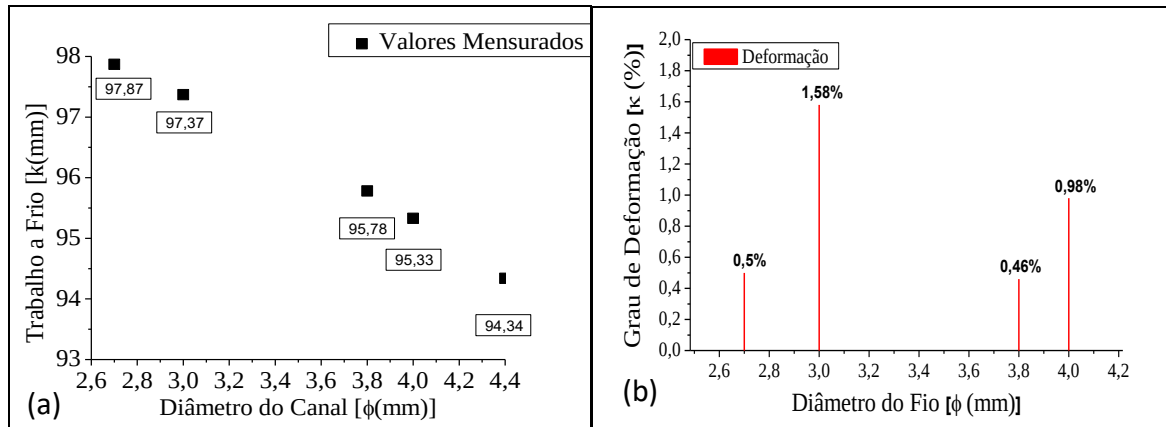
| Dist. Da Interface M/M [mm] | Elementos de Liga [%] |          |          |          |
|-----------------------------|-----------------------|----------|----------|----------|
|                             | Cu                    | Fe       | Si       | Zr       |
| 7,5                         | 0,0485                | 0,322    | 0,2795   | 0,1525   |
| 22,5                        | 0,048                 | 0,313    | 0,286    | 0,152    |
| 37,5                        | 0,048                 | 0,3115   | 0,288    | 0,152    |
| 52,5                        | 0,0478                | 0,318    | 0,289    | 0,1518   |
| Média                       | 0,048075              | 0,316125 | 0,285625 | 0,152013 |



**Figura 03—Gráficos de rejeição de soluto para Cu, Fe, Si e Zr a partir da interface metal molde. (a) Cu, (b) Fe, (c) Si e (d) Zr.**

### 3.3. Conformação Mecânica

A figura 04 (a) e (b) indica respectivamente os valores para o trabalho a frio acumulado juntamente com grau de deformação desenvolvidos durante a laminação. Percebe-se que o diâmetro de 2,7 mm possui a maior percentagem de trabalho a frio sofrido, contudo, o diâmetro de 3,0 mm, utilizado para o trabalho, possui o maior acúmulo de deformação conforme a figura 04 (b).



**Figura 04 – Trabalho a frio alcançado durante a laminação. (a) Trabalho a frio acumulado a cada passe pelos diâmetros dos canais; (b) Grau de deformação para algumas cadeias de laminação. Fonte: Cavalcante, 2015.**

### 3.4. Caracterização Elétrica

Na Tabela 03 e no arranjo esquemático da figura 05 nota-se que os valores de condutividade elétrica para a liga submetida ao tratamento térmico de 500°C/3h são maiores em todas as posições estudadas nos lingotes fabricados. Isto pode ser explicado a partir da consideração de solidificação rápida (têmpera de fusão), que inibe a difusão atômica. Então, os elementos acabaram aprisionados na matriz de alumínio [Al] a deixando em estado altamente contrita; sob dois aspectos a supersaturação pela têmpera de fusão associada ao elevado índice de deformação a frio. Por outro lado, a liga CTT passa pelo processo de alívio de tensões associado à leve condição de precipitação e acomodação, que pode ser avaliada no diagrama da figura 05, deixando a matriz menos tensionada que a da liga STT sendo possível que os elétrons passassem a ter maior facilidade para se locomover ao longo da matriz resultando nos maiores valores de %IACS. Como a temperatura utilizada no presente trabalho foi superior a utilizada nos trabalhos de Knipling, 2007 a probabilidade de ter ocorrido a precipitação é relativamente alta.

Além disso nota-se que os valores de condutividade elétrica sofrem variação ao longo dos lingotes de modo que os maiores valores são relativos a posição mais próxima a interface metal/molde, 7,5 mm, decrescendo suavemente com o menor valor na posição de 52,5 mm, (Figura 05b). Associando esses resultados aos resultados obtidos para a rejeição do Zr que pode ser observada na Figura 05 (c) é possível concluir que a presença do Al<sub>3</sub>Zr seja capaz de melhorar a condutividade elétrica da liga estudada.

**Tabela 03–Valores de condutividade elétrica sem e com aplicação do tratamento térmico.**

| Dist. da Interface M/M [mm] | Condutividade Elétrica [%IACS] |                               |
|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
|                             | Sem Tratamento Térmico         | Tratamento Térmico a 500°C/3h |
| 7,5                         | 55,2                           | 58,7                          |
| 22,5                        | 54,7                           | 57,5                          |
| 37,5                        | 54,4                           | 57,4                          |
| 52,5                        | 53,8                           | 57,0                          |

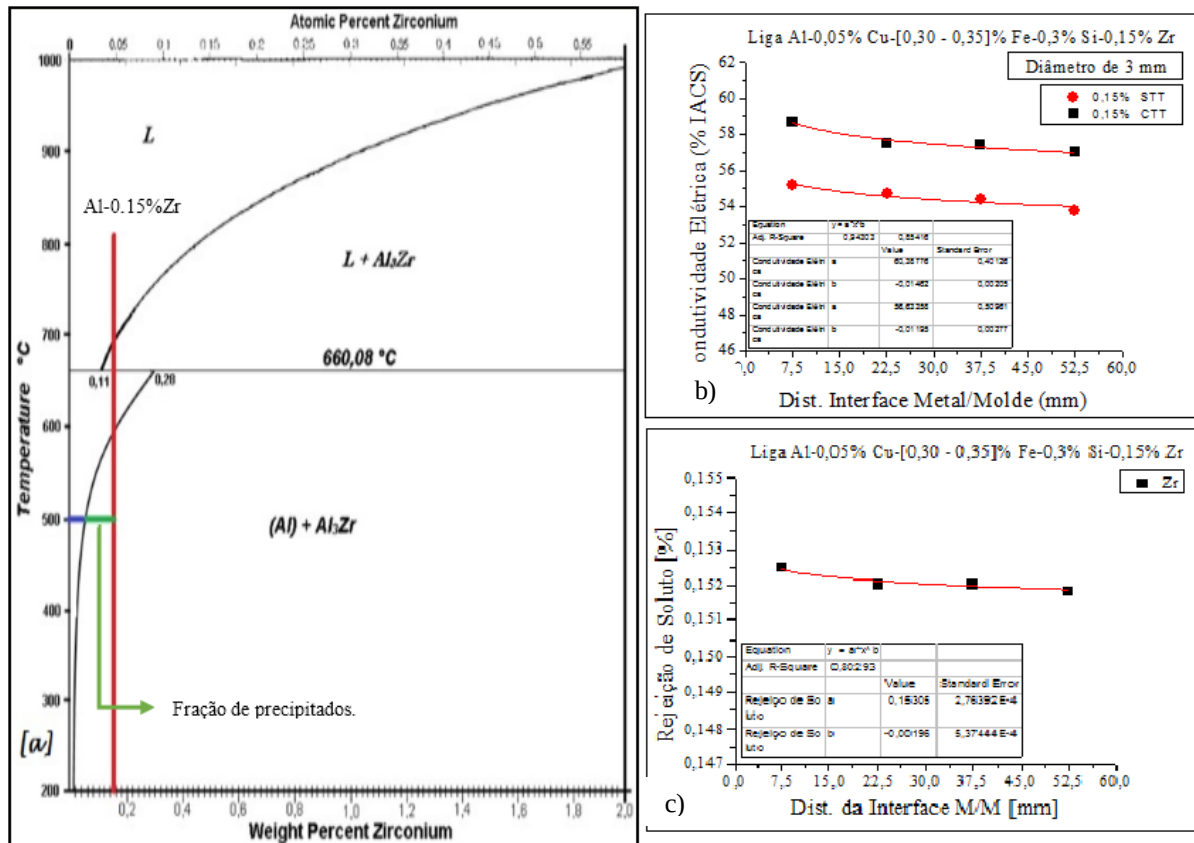


Figura 05 – Arranjo esquemático associando o Diagrama de fases Al-Zr [a] com a variação da Condutividade Elétrica STT e CTT [b] e com a Rejeição do Zr [c]. Fonte: Adaptado de Handbook ASM metals.

### 3.5 Caracterização Mecânica

Com o auxílio da tabela 04 e do arranjo esquemático associando o Diagrama de fases Al-Zr, com a variação do LRT STT e CTT e com a Rejeição do Zr presentes na figura 06 pode se ter noção do comportamento mecânico da liga em questão. Primeiramente, com relação aos valores de LRT para a liga STT e CTT vistos na figura 06b, os maiores valores de LRT foram obtidos para a liga STT.

Tabela 04 – Valores de LRT, Alongamento e Coeficiente de Encruamento para a liga STT e CTT.

| Dist. da Interface M/M [mm] | Sem Tratamento Térmico |              |        | Tratamento Térmico de 500°C/3h |              |         |
|-----------------------------|------------------------|--------------|--------|--------------------------------|--------------|---------|
|                             | LRT [MPa]              | $\delta$ [%] | [n]    | LRT [MPa]                      | $\delta$ [%] | [n]     |
| 7,5                         | 183,2                  | 3,49         | 0,1703 | 178,14                         | 3,14         | 0,13218 |
| 22,5                        | 184,2                  | 3,88         | 0,1954 | 179,19                         | 3,36         | 0,17365 |
| 37,5                        | 186,0                  | 4,01         | 0,1989 | 179,39                         | 3,50         | 0,17451 |
| 52,5                        | 187,02                 | 4,53         | 0,223  | 180,44                         | 3,47         | 0,19711 |

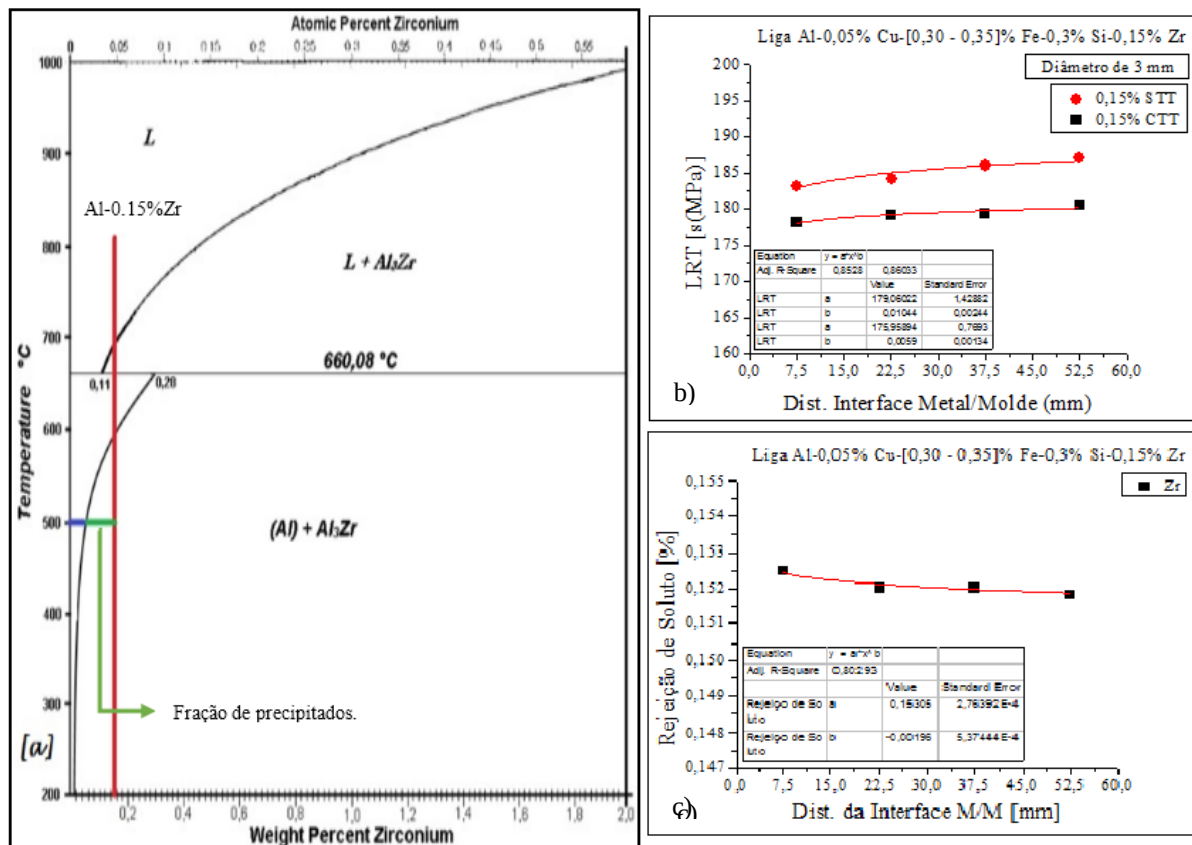


Figura 06 – Arranjo esquemático associando o Diagrama de fases Al-Zr [a] com a variação do LRT STT e CTT [b] e com a Rejeição do Zr [c]. Fonte: Adaptado de Handbook ASM metals.

O fato de a liga STT possuir os maiores valores de LRT está diretamente relacionado com a condição da solidificação rápida ou têmpera de fusão que ao inibir processo de difusão atômica apresenta o sistema como solução sólida fortemente saturada. Nesta condição o sistema ao ser deformado com elevado grau de trabalho a frio fica ainda mais contrito dificultando a livre caminhar das discordâncias apresentando maiores valores para o LRT se comparado com o sistema tratado a 500°C/3h que passou pelo processo de alívio de tensões deixando a matriz de alumínio menos tensionada.

Por outro lado, na avaliação do LRT ocorreram resultados interessantes e que se encontram plotados no conjunto de gráficos que compõem a Figura 07.

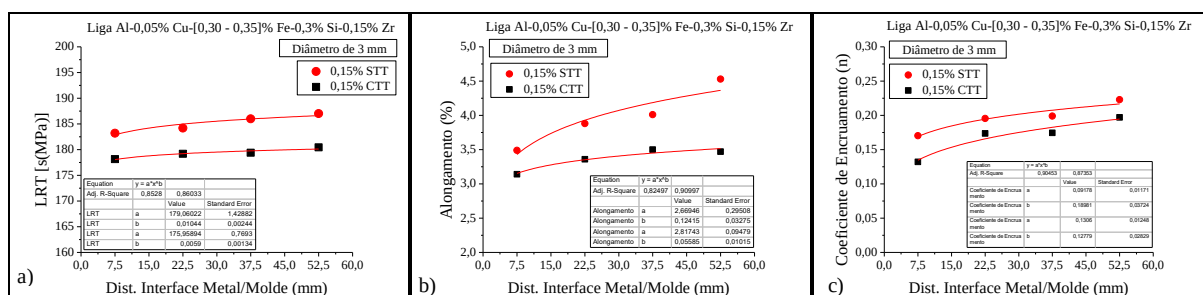
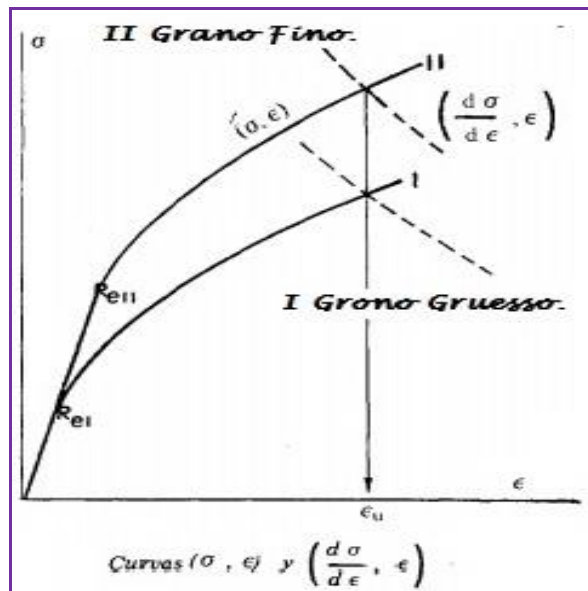


Figura 07 – Gráficos de LRT (a); Alongamento (b) e Coeficiente de Encruamento (c).

Observando os gráficos da Figura 07, tem-se que todos os valores relativos ao sistema STT são maiores que CTT. Nota-se a associação dos maiores LRT aos maiores Alongamentos e Coeficientes de Encruamento conduzindo a hipótese da Superplasticidade.

Segundo Considère (1885), o alto endurecimento por deformação se consegue com pequenos tamanhos de grão como pode ser observado na Figura 08.





**Figura 08 – Diagrama tensão x deformação: Hipotese de Considère 1885.**

A capacidade de refino de grão do Zr é conhecida na literatura e a presença deste elemento na liga pode contribuir com a performance observada.

#### 4. CONCLUSÕES

Com relação à composição química, a liga produzida está de acordo com a liga proposta e valida os resultados obtidos para caracterização eletromecânica.

Na rejeição de soluto todos os elementos apresentaram a baixa variação da concentração ao longo do perfil de solidificação.

Na caracterização elétrica, a liga CTT possui os maiores valores de %IACS que a liga CTT.

Os resultados de LRT, alongamento % e “n” se mostram superiores para a liga STT em todas as posições concordando com a teoria estudada da superplasticidade.

#### 5. REFERÊNCIAS

- A. Considère, Ann. PontsChaussées 9 (1885) 574-575.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR 6815), 1981, “Fios e cabos elétricos – Ensaio de determinação da resistividade em componentes metálicos”, Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR 6810), 1981, “Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos”, Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR 5118), 2007, “Fios de alumínio 1350 nus, de seção circular, para fins elétricos”, Rio de Janeiro.
- CARDOSO, M. F. M. Estudo do efeito da adição de magnésio sobre propriedades mecânicas, elétricas e estruturais de fios para transmissão e distribuição de energia elétrica da liga al-0,05%p cu-[0,24-0,28]%p fe. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.
- CAVALCANTE, D. C. Estudo do efeito do tratamento térmico sobre uma liga al-cu-fe-si modificada com zr, destinada a tx e dx de energia elétrica. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.
- GARCIA, A. Solidificação: Fundamentos e aplicações. Campinas: UNICAMP, 2001.
- KNIPLING, K. E.; DUNAND, D. C.; SEIDMAN, D. N. Nucleation and precipitation strengthening in dilute Al-Ti and Al-Zr alloys. Metallurgical and materials transactions A, v. 38A, n. 10, p. 2552-2563, 2007.
- LOBATO, M. Q. Avaliação da influência da adição de teores de zr na termoresistividade da liga al-0,05%cu-[0,35-0,45]%fe-0,3%si, solidificada em molde unidirecional horizontal. 2016. Dissertação de Mestrado – PPGEM/UFPA, Belém, 2016.
- QUARESMA, J. M. V. Correlação entre condições de solidificação, microestrutura e resistência mecânica. 1999. Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, 1999.
- Sousa, C. A. CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA E MECÂNICA DA LIGA Al-Cu-Fe-Si MODIFICADA COM TEORES DE ZIRCÔNIO, PARA FINS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

## 6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

# ELECTRICAL AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF AL-CU-FE-SI-ZR ALLOY SUBJECTED TO HEAT TREATMENT

Carlos Alexandre Cavalcante Sousa, carlosmec21@gmail.com<sup>1</sup>  
Marcos Felipe Macêdo Cardoso, mecanica.marcos@gmail.com<sup>1</sup>  
Gustavo Neves Rebelo, guga1365@gmail.com<sup>1</sup>  
Victor Lima Melo, victormelo.eng@gmail.com<sup>1</sup>  
Natália Cristina Araújo Costa, natalia.araujoc@hotmail.com  
José Maria do Vale Quaresma, quaresma@fem.unicamp.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá, CP 479, CEP 66075-110, Belém – Pará

**Abstract:** The continuous process of industrialization of the countries brings a significant increase in the demand of electricity. In order to meet the growth of this energy demand, new generating sources are being built. However, attention to new studies of transmission networks is essential to maintain control over the loss of energy along the transmission lines. Therefore, studies on the effect of the heat treatment on Al-0.05% Cu- [0.30-0.35]% Fe-0.3% Si alloy modified with% Zr contents were performed to evaluate the electrical and mechanical properties of the material. The sample was obtained in a solidification mold with unidirectional heat extraction, cut into rectangular shapes [15x15x110] mm and machined to the diameter of 9,5 mm. The samples were divided into two sets: one was subjected to a heat treatment of 500 ° C for 3 hours, and the second was not subjected to heat treatment. The samples were laminated to the 3.0 mm diameter and subjected to the electrical resistivity test and the tensile test to evaluate the electromechanical properties of the material. It was observed that the alloy submitted to the heat treatment showed an increase in the electrical conductivity and reduction of the limit values of tensile strength, elongation and hardening exponent.

**Keywords:** Aluminum, Zirconium, Solidification, Electromechanical properties.