

# CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE UMA LIGA Al-Mg-Fe-Cu SOLIDIFICADA UNIDIRECIONALMENTE PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO<sup>1</sup>

Pedro Henrique Lamarão Souza<sup>2</sup>  
Jandson Martins da Silva<sup>3</sup>  
Clóvis Iarlande Oliveira Santana<sup>3</sup>  
Isabella Cristina da Silva Jorge<sup>2</sup>  
Jessiana Avelar de Lima<sup>2</sup>  
José Maria do Vale Quaresma<sup>4</sup>

## Resumo

Este trabalho objetiva estudar as propriedades elétricas, mecânicas e microestruturais de uma liga Al-0,60%pMg-0,25%pFe-0,05%pCu para aplicação como condutor elétrico. Os lingotes foram obtidos por solidificação unidirecional horizontal, e foram seccionados em posições específicas para a produção de corpos de prova destinados aos ensaios mecânicos, elétricos e caracterização microestrutural. Como resultados observaram-se elevados níveis de condutividade elétrica e foi possível obter modelos experimentais de correlação entre as microcavidades de fratura e as variáveis térmicas, demonstrando uma tendência de formação de menores microcavidades de fratura onde o resfriamento foi mais intenso. Sua aplicação ficaria associada à priorização da condutividade elétrica. Contudo, há perspectivas de uso em futuros estudos envolvendo elementos formadores de trialuminetos, o que elevaria suas propriedades.

**Palavras-chave:** Ligas de alumínio; Propriedades mecânicas; Condutividade elétrica; Microestrutura.

## PROPERTIES CORRELATION OF AN Al-Mg-Fe-Cu ALLOY SOLIDIFIED UNIDIRECTIONALLY FOR OVERHEAD TRANSMISSION LINES

### Abstract

This work aims to study the thermal, electrical, mechanical and microstructural properties of an Al-0.60wt%Mg-0.25wt%Fe-0.05wt%Cu alloy for application as an electrical conductor. The ingots were obtained by unidirectional horizontal casting, and were sectioned in specific positions to the production of test specimens destined to mechanical, electrical tests and microstructural characterization. As results, one can observe high levels of electrical conductivity and it was possible to obtain experimental models of correlation between fracture dimples and thermal variables, demonstrating a trend on the formation of smaller fracture dimples were the cooling was more intense. Its application would be associated with the prioritization of the electrical conductivity. However, there are prospects for use in future studies involving trialuminide-forming elements, which would improve its properties.

**Key words:** Aluminum alloys; Mechanical properties; Electrical conductivity; Microstructure.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 68<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Graduados em Engenharia de Produção. Mestrandos em Engenharia Mecânica, PPGEM, ITEC, UFPA, Belém, PA, Brasil.

<sup>3</sup> Graduandos em Engenharia Mecânica, FEM, ITEC, UFPA, Belém, PA, Brasil.

<sup>4</sup> Engenharia Mecânica. Dr. Professor. Engenharia Mecânica, PPGEM, FEM, ITEC, UFPA, Belém, PA, Brasil.

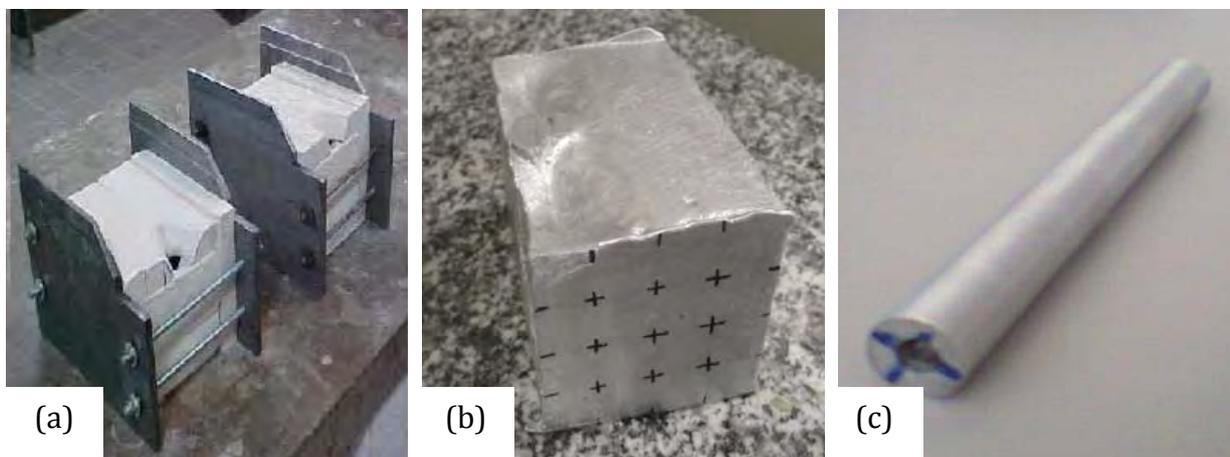
## 1 INTRODUÇÃO

A eletricidade é transmitida das unidades geradoras até as unidades de medição, utilizando quase que exclusivamente condutores de alumínio. Estes condutores são utilizados em linhas de transmissão, cabos isolados ou nus, para uso em redes de alta tensão, linhas de transmissão secundária e aplicações residenciais ou comerciais.<sup>(1)</sup> Tais condutores são utilizados por quase 100 anos e apenas uma libra de alumínio iguala a capacidade de condução de corrente de duas libras de cobre, o que permite linhas de transmissão com a metade de estruturas de apoio para estes condutores leves.<sup>(2)</sup> Em aplicações elétricas, o alumínio comercialmente puro possui a mais alta condutividade elétrica entre os condutores de alumínio. Sua aplicação é restrita apenas devido à sua baixa resistência.<sup>(3)</sup> Uma solução para este problema é o uso de condutores de alumínio com alma de aço (CAA), os quais têm fios centrais de alta resistência (aço), envolvidos por fios de alta condutividade (alumínio). Variando o número de fios de aço para um condutor de uma certa seção transversal, pode-se obter elevada resistência à tração ou elevada condutividade elétrica, mas não ambos ao mesmo tempo.<sup>(4)</sup> Isto levou à aplicação das ligas de Al-Mg-Si, leves e endurecíveis por precipitação, as quais apresentam melhor resistência mecânica que fios de alumínio (aproximadamente 300 MPa), mas uma condutividade elétrica mais baixa que fios convencionais. As ligas de alumínio baseadas neste sistema ganharam significativo interesse durante as últimas décadas e ainda são objeto de estudo para muitos autores.<sup>(3-7)</sup> Ainda, tem sido desenvolvidos estudos com materiais termorresistentes para condutores elétricos, os quais usam os elementos do grupo 4 (Zr, Ti, Hf)<sup>(8)</sup> ou terras raras (Sc),<sup>(9)</sup> pesquisadores também têm desenvolvido condutores de alumínio com almas de materiais compósitos.<sup>(10)</sup> O trabalho de Mercês<sup>(11)</sup> estudou as propriedades de uma liga de Al-Mg-Si com teores de Fe na faixa de 0,15-0,30%p, o autor indica que enquanto o teor de Fe aumenta, a condutividade elétrica sofre uma perda significativa, apesar de seu limite de resistência à tração aumentar. O trabalho de Santos et al.<sup>(12)</sup> estudou o sistema Al-Fe-Cu e ele nos indica que a presença de um teor de 0,05%p Cu eleva sua resistência em 25MPa, decrescendo levemente sua condutividade elétrica. Este trabalho estudou as propriedades de uma liga de Al-Mg-Fe-Cu, utilizando os teores de Fe e Cu encontrados nos trabalhos de Mercês<sup>(11)</sup> e Santos et al.<sup>(12)</sup> que mais influenciaram sua resistência mecânica, com a presença de um teor de 0,60%p Mg. Os objetivos deste trabalho são, portanto: (i) estudar de que forma a transferência de calor (para a liga estudada) em um sistema de solidificação unidirecional horizontal influencia, ao longo do comprimento dos lingotes fabricados, as propriedades: limite de resistência à tração, condutividade elétrica e diâmetros das microcavidades de fratura; (ii) Avaliar seu potencial uso como um condutor elétrico para linhas aéreas de transmissão a partir de suas propriedades mecânicas e elétricas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A liga metálica estudada foi fundida em um forno do tipo mufla a 850°C, seguido de homogeneização e desgaseificação com argônio por 40 segundos na vazão de 0,2l/s conforme descrito na literatura,<sup>(13,14)</sup> após este procedimento, o metal líquido foi monitorado até o vazamento com superaquecimento de 10% em um aparato de solidificação horizontal unidirecional (vide Figura 1a) composto por uma câmara de vazamento de 60x60x110mm, um molde de aço SAE 1010, paredes de material

refratário e termopares nas posições relativas da interface metal/molde de 7,5; 15,0; 22,5; 30,0; 37,5 e 45,0. Os termopares foram conectados a um dispositivo de armazenagem de dados do tipo Ahlborn Almemo, com medições efetuadas a cada segundo. A composição química da liga fabricada foi analisada em um espectrômetro óptico de massa Spectrolab. Os lingotes fabricados foram marcados de forma que fosse possível gerar corpos de prova que representassem as distâncias relativas da interface metal/molde de 7,5, 22,5, 37,5 e 52,5mm (Figura 1b) e cortados em uma máquina de serra do tipo fita, produzindo peças com as dimensões de 13x13x110mm, as quais foram usinadas em torno mecânico para o diâmetro de 9,5mm conforme Figura 1c. A etapa seguinte consistiu em laminação a frio para obtenção de um fio com seção circular apresentando o diâmetro de 3,0mm. Selecionou-se este processo de conformação devido a sua aplicação por outros autores<sup>(7,9)</sup> como método de conferir deformação plástica aos materiais em trabalhos que estudam as propriedades de ligas de alumínio para condutores elétricos. As etapas de laminação são apresentadas na Tabela 1.



**Figura 1.** (a) Dispositivo de solidificação,<sup>(15)</sup> (b) Lingote fabricado com marcações de corte e (c) Peça usinada para o diâmetro de 9,5mm.

**Tabela 1.** Etapas de laminação para fabricação do fio 3,0mm, ago/2012

-	Graus de redução						
	Redução 1	Redução 2	Redução 3	Redução 4	Redução 5	Redução 6	Redução Total
Diâmetro de entrada (mm)	9,5	7,6	6,3	5,2	4,4	3,8	9,5
Diâmetro de saída (mm)	7,6	6,3	5,2	4,4	3,8	3,0	3,0
Trabalho a Frio (%)	20%	17%	17%	15%	14%	21%	68%

Após a laminação, o próximo passo foi a caracterização elétrica do material, a qual ocorreu em conformidade com os padrões normativos NBR 6814,<sup>(16)</sup> ASTM B193<sup>(17)</sup> e NBR 5118,<sup>(18)</sup> com a utilização de um microhmímetro Megabrás 2000-e. Os corpos de prova ensaiados apresentavam o comprimento mínimo de 300 mm. Em seguida foi realizada a caracterização mecânica com ensaios de tração uniaxial em uma máquina Kratos KLC1, de acordo com a norma NBR 6810,<sup>(19)</sup> com os corpos de prova apresentando um comprimento de 150 mm entre garras e 25 mm dentro de

cada garra. A análise microestrutural ocorreu a partir da avaliação das fraturas obtidas nos ensaios de tração. As amostras fraturadas foram imersas em solução de acetona e álcool etílico e submetidas a vibração em um ultrassom modelo Metasom 15 por 10 minutos. Em seguida as amostras foram analisadas em um microscópio eletrônico de varredura, modelo LEO 1430, com 20kV e 90 $\mu$ A de feixe de elétrons, com o sinal de Elétrons Retro-espalhados (ERE). Estudou-se no MEV cada posição relativa à interface metal/molde, sendo que para cada posição, foram analisados os corpos de prova fraturados nos ensaios mecânicos e em cada fratura foram realizadas ao menos 5 fractografias em diferentes regiões da fratura, utilizando ampliações de 500x e 1600x. Em seguida, as fractografias tiveram os diâmetros de suas microcavidades medidos no software livre ImageJ de acordo com o método descrito por Sharma et al.<sup>(20)</sup> Os resultados obtidos foram analisados na suíte matemática R statistical, que também é livre. Os dados considerados válidos para utilização foram os contidos dentro dos limites superior e inferior de um diagrama de Box-Whisker. Tais dados passaram por testes como o de normalidade de Shapiro-Wilks e o teste t de comparação entre médias de Welch. Ambos foram selecionados devido a sua indicação e uso na literatura.<sup>(21-24)</sup>

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Caracterização Térmica

As variáveis térmicas foram obtidas experimentalmente, determinando-se os tempos de passagem da isoterma *liquidus* nas diferentes posições onde encontravam-se os termopares. Com isso, foi possível estabelecer relações do tipo posição x tempo, de onde aplicou-se um método de regressão não-linear do tipo potência, onde a derivada da função gerada representa a velocidade de solidificação em relação ao tempo. Isto, com manipulação algébrica, pôde deixar em evidência a função de velocidade em relação à distância relativa da interface metal/molde (Figura 2a). A taxa de resfriamento também foi obtida experimentalmente, através do método de diferenças finitas descrito por Okamoto e Kishitake<sup>(25)</sup> e seus resultados são apresentados na Figura 2b. Pode-se observar o perfil de resfriamento do lingote devido à transferência de calor que, com a evolução da solidificação, perde eficiência com o aumento progressivo da camada solidificada.

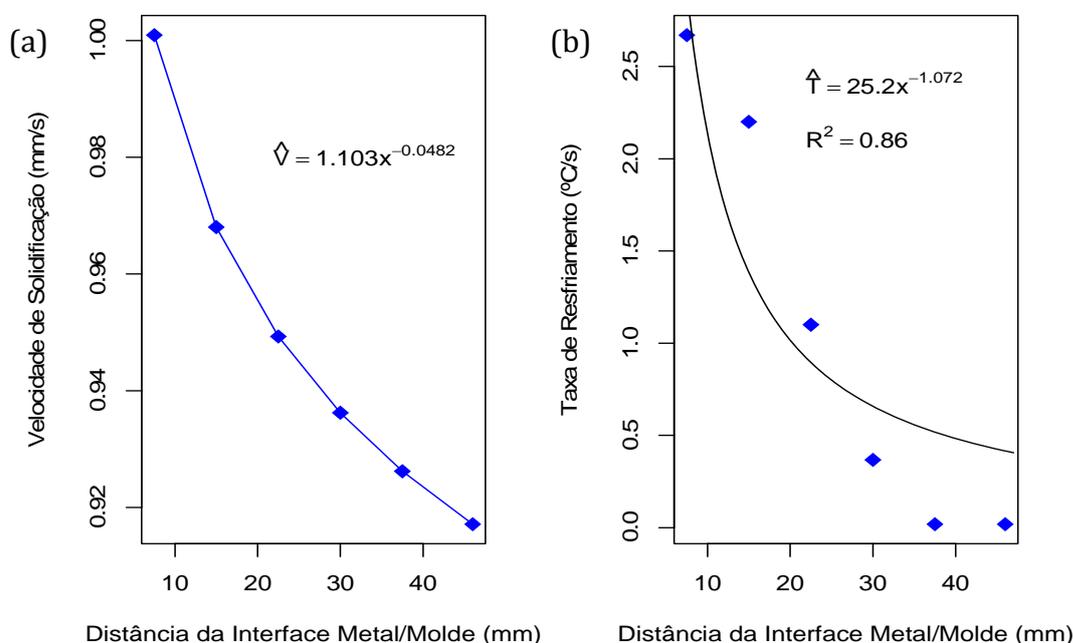


Figura 2. (a) Velocidade de solidificação, (b) taxa de resfriamento.

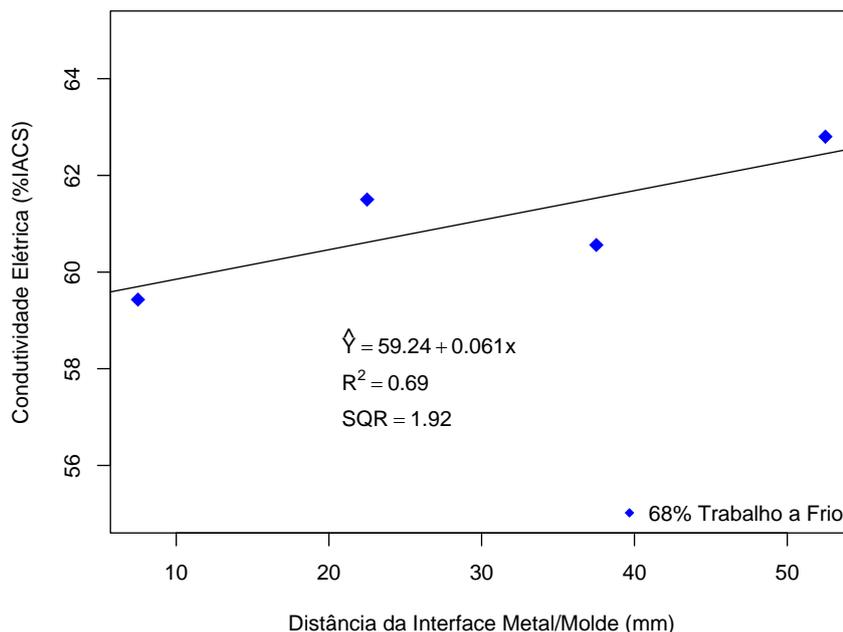
### 3.2 Ensaios Elétricos

Os resultados dos ensaios elétricos são apresentados na Tabela 2. O item posição é a distância relativa à interface metal/molde. As medias foram calculadas de ensaios de três amostras diferentes para cada posição.

Tabela 2. Resultados dos ensaios elétricos para as amostras, out/2012

Posição (mm)	Condutividade Elétrica			
	7,5	22,5	37,5	52,5
Média (%IACS)	59,43	61,50	60,56	62,80
Desvio-padrão (%IACS)	1,39	1,10	0,98	0,27

A Figura 3 apresenta as médias das condutividades elétricas para as posições estudadas. Fica evidente a tendência de acréscimo de condutividade com o aumento da distância da interface metal/molde. Contudo, o modelo de regressão que melhor descreveu a evolução da série de dados, um modelo linear, apresentou os indicadores  $R^2$  (coeficiente de correlação ao quadrado) e SQR (soma dos quadrados dos resíduos) com indicativos de baixa aderência do modelo à série de dados, 0,69 e 1,92 respectivamente.



**Figura 3.** Ensaios de Condutividade Elétrica para as posições estudadas.

A partir destes valores, pode-se interpretar que 69% da evolução da condutividade elétrica está sendo explicada por uma diferente posição na câmara de vazamento e que existe uma variação acumulada de 1,92 %IACS entre os valores experimentais e o modelo. Como os desvios-padrões calculados mostram uma variação dentro de limites aceitáveis, podemos concluir que outro efeito está presente na variação da condutividade elétrica.

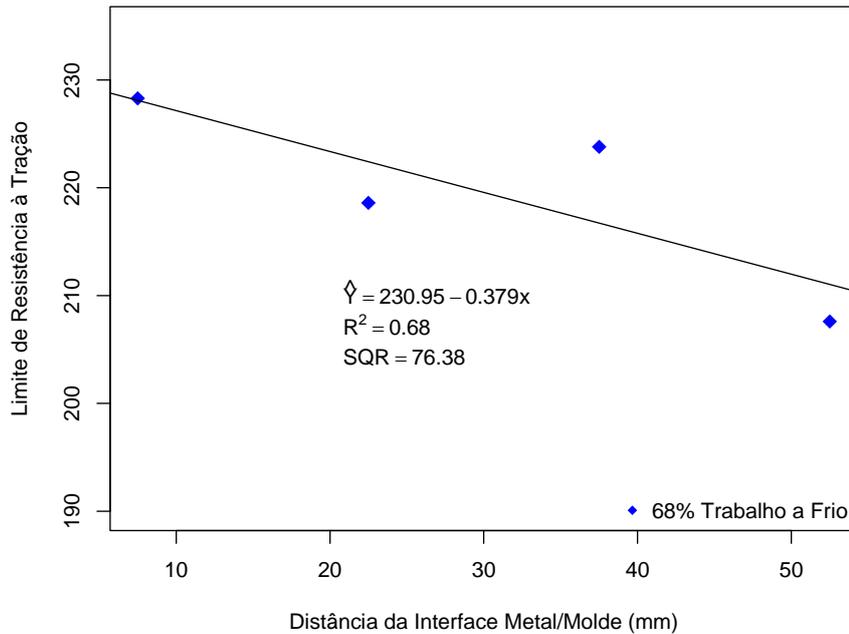
### 3.3 Ensaios Mecânicos

Para os ensaios mecânicos, cada posição estudada obteve uma média calculada a partir da ruptura de três corpos de prova. A Tabela 3 apresenta as médias obtidas e os desvios-padrões calculados.

**Tabela 3.** Resultados dos ensaios de tração, out/2012

Posição (mm)	Limite de Resistência à Tração			
	7,5	22,5	37,5	52,5
Média (MPa)	228,3	218,6	223,8	207,6
Desvio-padrão (MPa)	2,30	3,71	2,23	0,72

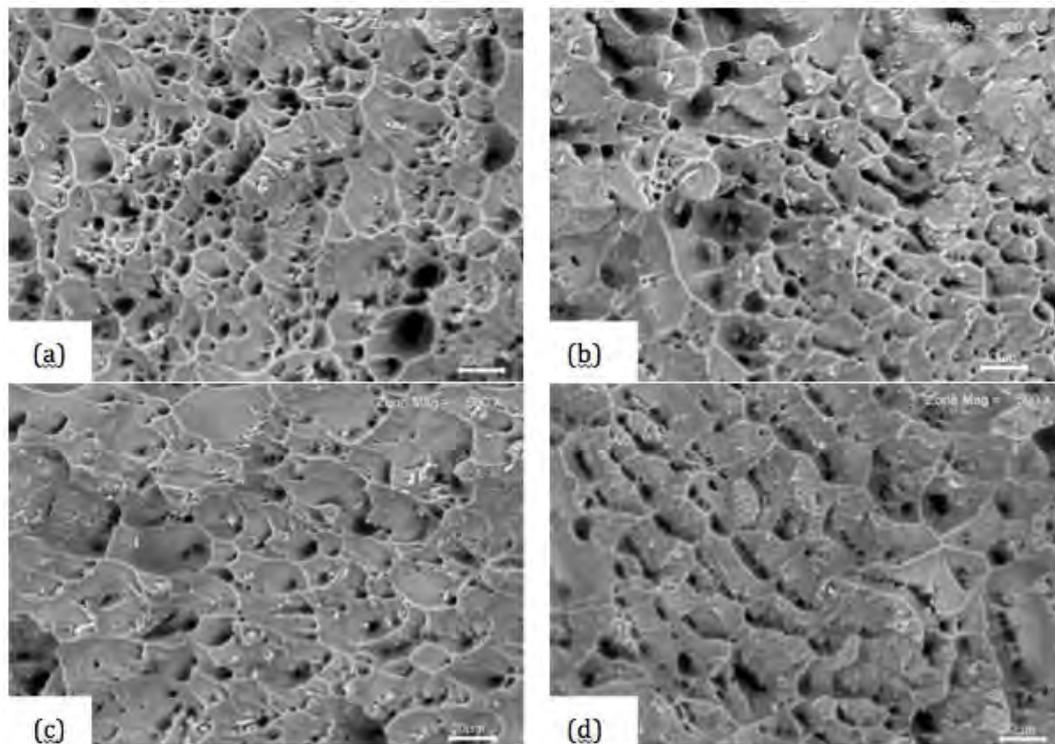
A Figura 4 apresenta as médias dos ensaios, observa-se que a resistência mecânica decai ao longo do comprimento do lingote. Analogamente à seção 3.2, o modelo de regressão que melhor expressa a evolução da série de dados é linear, também com indicativos de que a variação do limite de resistência à tração é em 68% devido à distância da interface metal/molde.



**Figura 4.** Ensaios de Tração para as posições estudadas.

### 3.4 Caracterização Microestrutural

A Figura 5 apresenta fractografias em MEV das amostras fraturadas nos ensaios e tração, de onde estudou-se as quatro diferentes posições relativas à interface metal/molde. Percebe-se claramente que o aspecto deste material dúctil é de fratura com presença de microcavidades. As medições realizadas no software ImageJ foram exportadas para o software R, onde realizou-se a análise destes dados. Os dados descritivos dos diâmetros de tais medições estão resumidos na Tabela 4.

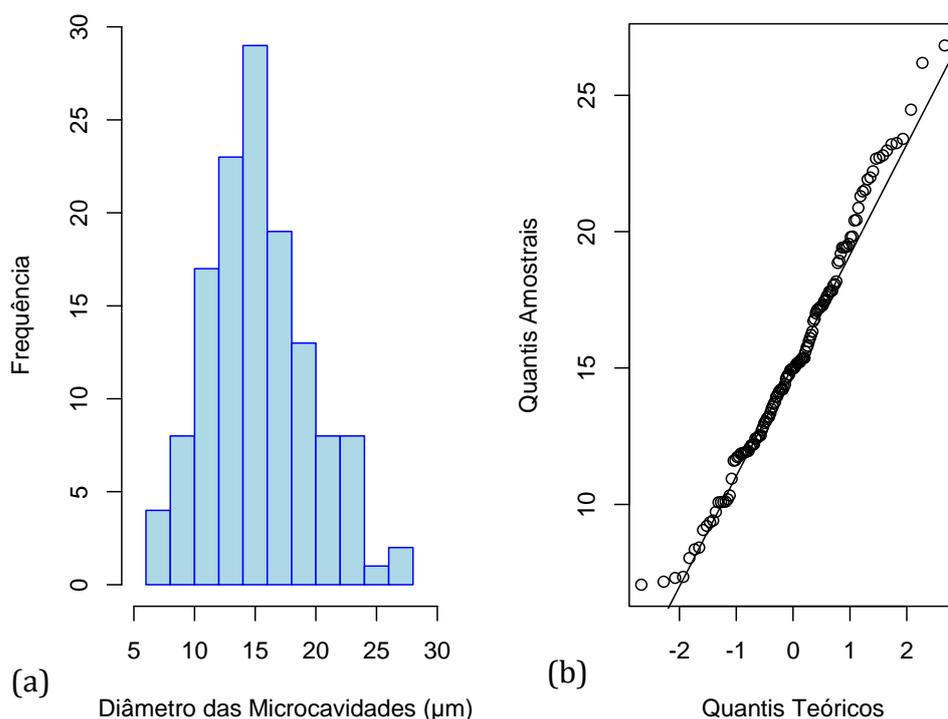


**Figura 5.** Fractografias em MEV das amostras tracionadas para as posições de: (a) 7,5;(b) 22,5; (c) 37,5 e (d) 52,5mm.

**Tabela 4.** Medições das microcavidades das fraturas, dez/2012

Estatística descritiva das medições das microcavidades				
Posição (mm)	7,5	22,5	37,5	52,5
Média 1 ( $\mu\text{m}$ )	15,89	16,81	21,50	20,35
Média 2 ( $\mu\text{m}$ )	14,82	16,60	21,34	19,66
Média das Médias ( $\mu\text{m}$ )	15,36	16,74	21,41	20,00
Desvio-padrão ( $\mu\text{m}$ )	4,26	5,10	7,65	7,30
Amplitude ( $\mu\text{m}$ )	19,76	19,06	22,92	31,64

Figura 6a é um histograma de frequência para todas as amostras medidas no ponto 7,5 mm, pode-se observar com este gráfico a distribuição das observações. A Figura 6b é um gráfico QQ normal das amostras medidas na posição 7,5 mm. A proximidade dos pontos com a reta diagonal representa um indicativo de normalidade da distribuição de dados, característica observada mais facilmente com o aumento da amostragem. Além desta análise gráfica, que foi realizada para todas as medições nas diferentes posições, utilizou-se o teste de normalidade de Shapiro-Wilks, cujos resultados encontram-se na Tabela 5, de onde observa-se que para as medições realizadas, as estatísticas W estão próximas de 1 e os p-valores estão acima da significância ( $\alpha=0,05$ ), levando, portanto, à não rejeição a hipótese nula de que a distribuição de dados seja normal com um intervalo de confiabilidade de 95%.



**Figura 6.** (a) Histograma de frequência para as medições das microcavidades na posição 7,5mm e (b) gráfico QQ normal para as amostras da posição 7,5 mm.

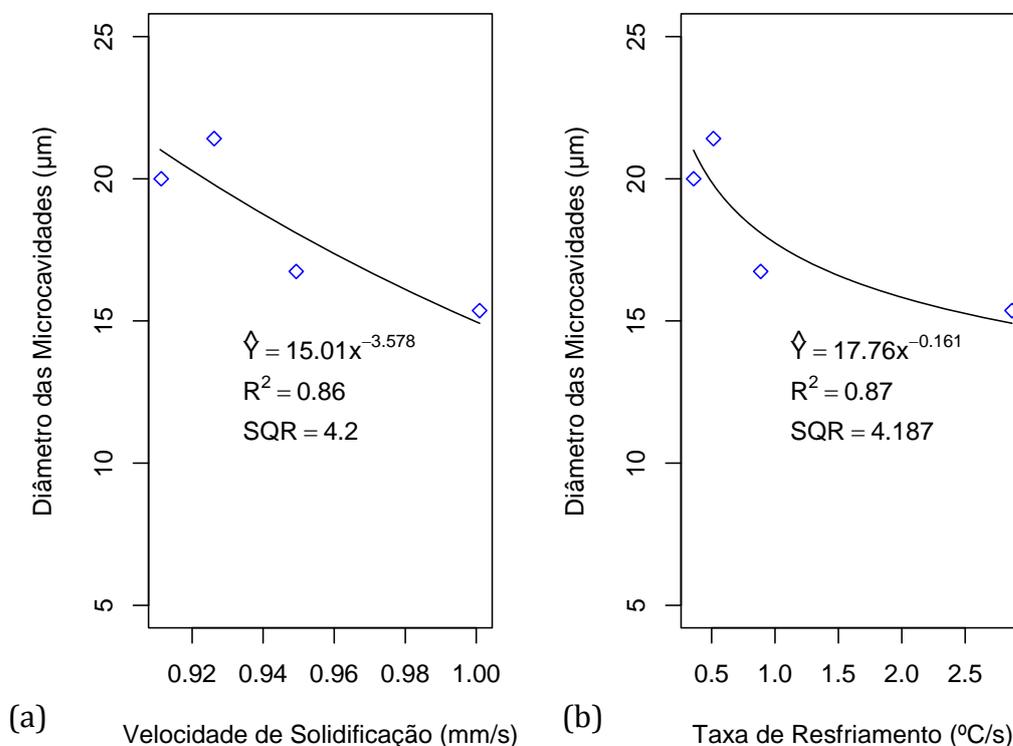
**Tabela 5.** Teste de normalidade, fev/2013

Teste de Shapiro-Wilks				
Posição (mm)	7,5	22,5	37,5	52,5
W	0,983	0,979	0,973	0,979
p	0,103	0,118	0,131	0,102

Pode-se observar na Tabela 4 que as médias das microcavidades para as amostras 1 e 2 são próximas, contudo, isto não basta para que possa admitir-se que as médias sejam iguais. É possível recorrer a um teste matemático que analise a distribuição dos dados, com o intuito de verificar se existem diferenças significativas entre as duas médias apresentadas para cada posição. O teste t de Welch para duas amostras foi o teste selecionado para este fim. A tabela 6 sumariza os resultados para os testes t de Welch para duas amostras. Como a estatística t encontra-se dentro do intervalo de confiança (IC) estabelecido a 95% e os p-valores são maiores do que a significância ( $\alpha=0,05$ ), o teste nega a hipótese alternativa de que existam diferenças significativas entre as duas médias. Com isto, pode-se minimizar o risco de que as medidas aqui utilizadas estejam incorretas. A Figura 7 apresenta a correlação da evolução das médias das microcavidades em relação às variáveis térmicas velocidade de solidificação (Figura 7a) e taxa de resfriamento (Figura 7b). Foi possível encontrar boa correlação entre as variáveis aqui apresentadas. Os modelos que melhor expressam as séries de dados são não-lineares do tipo potência.

**Tabela 6.** Teste de comparação de duas médias, fev/2013

Teste t de Welch para duas amostras				
Posição (mm)	7,5	22,5	37,5	52,5
Diferenças entre	Média 1 / Média 2			
t	1,455	0,184	0,088	0,475
IC a 95%	[-0,15 - inf.]	[-1,67 - inf.]	[-2,95 - inf.]	[-1,71 - inf.]
p	0,074	0,427	0,465	0,318



**Figura 7.** Diâmetros das microcavidades em relação a: (a) velocidades de solidificação e (b) taxas de resfriamento.

## 4 DISCUSSÃO

Os resultados da análise mecânica estão de acordo com o esperado, pois nas posições mais próximas do molde, no início do processo de solidificação, a troca de calor é mais intensa, o que provoca uma solidificação mais rápida e a formação de grãos menores.<sup>(26)</sup> Isto remete-nos à relação de Hall-Petch que explica o aumento de resistência de materiais em função da redução do tamanho dos grãos.<sup>(27)</sup> A condutividade elétrica apresentou resultados elevados quando comparada à das ligas da série 6000 (52,5 %IACS)<sup>(28)</sup> e ao longo do comprimento do lingote, houve um comportamento de aumento, sendo que para posições com maiores taxas de resfriamento e, conseqüentemente, maior presença de contornos de grão observou-se maior resistência à passagem de elétrons, o que traduziu-se em menor condutividade. Outros estudos encontrados na literatura, que estudam os efeitos da solidificação unidirecional horizontal, também remetem a este efeito.<sup>(15,29)</sup> Tanto os resultados dos ensaios mecânicos quanto os dos ensaios elétricos apresentaram baixos desvios-padrões, contudo os indicadores de correlação demonstram haver uma parcela do efeito que não está sendo explicada. Como este tipo de dispositivo de solidificação apresenta um forte componente convectivo, isto pode estar contribuindo para esta variação.

Em relação à análise microestrutural, o trabalho de Lobo<sup>(29)</sup> apresentou o mesmo comportamento, com as médias dos diâmetros das microcavidades aumentando ao longo do comprimento do lingote em ambientes com menores taxas de resfriamento. Outros fatores como o perfil de concentração de soluto da liga também podem estar contribuindo para este comportamento, mas somente ensaios de macrosegregação ou de espectroscopia dispersiva poderão confirmar estas afirmativas.

## 5 CONCLUSÃO

Quanto à aplicabilidade do material, a liga apresentou boas propriedades elétricas, com resultados próximos ao máximo de condutividade do alumínio e superando a condutividade de outras ligas comerciais. Suas propriedades mecânicas, entretanto, não apresentaram valores elevados, como os das ligas comerciais de Al-Mg-Si envelhecidas, mas apresentaram valores similares aos destas mesmas ligas quando elas não são tratadas termicamente. Isto pode ser um indicativo de que esta liga possa servir como base para futuros estudos com adições de elementos do grupo IV, ou mesmo Ni, com o objetivo de formar trialuminetos após um tratamento térmico de envelhecimento, para que se possa elevar sua resistência mecânica ou mesmo desenvolver condutores elétricos termorresistentes.

Sobre a caracterização do material, a pesar de a relação de Hall-Petch anteriormente citada ter um efeito importante sobre as características mecânicas, pode-se observar também que quanto menor o diâmetro das microcavidades, maior o limite de resistência à tração. Como as microcavidades são geradas a partir de partículas que nucleiam, coalescem e geram a fratura, uma maior quantidade destas partículas nos grãos menores parece estar contribuindo para uma elevação da resistência, contudo, não foi possível estabelecer bons indicadores de correlação no confronto entre os ensaios mecânicos e as medições das microcavidades, o mesmo ocorreu com os ensaios elétricos. Apesar de ter sido possível determinar boa correlação entre as variáveis térmicas e a distribuição das microcavidades, isto não aconteceu comparando tais variáveis com os ensaios mecânicos e elétricos. É necessário, portanto, evidenciar experimentalmente a forma a qual outros fatores,

como a segregação de soluto, ou correntes de convecção estão contribuindo para a difusão de agentes nucleantes ao longo do comprimento do lingote para que se tenha um melhor entendimento sobre a influência destes fatores sobre os ensaios.

## Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer à Capes, ao CNPq e ao GPEMAT pelo apoio financeiro, assim como a empresa Alubar Metais e Cabos S.A. pelos materiais fornecidos para execução das atividades experimentais.

## REFERÊNCIAS

- 1 ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. **Aplicações:** Indústria Elétrica, Disponível em: <<http://www.abal.org.br/aplicacoes/indeletrica.asp>>. Acesso em: 26 jul. 2011.
- 2 The Aluminum Association a. **Electrical Industry**, Disponível em:<<http://www.aluminum.org/Content/NavigationMenu/TheIndustry/Electrical/default.htm>>. Acesso em: 26 jul. 2012.
- 3 BOBRUK, E. V.; MURASHKIN, M. Y.; KAZYKHANOV, V. U.; VALIEV, R. Z. Aging behavior and properties of ultrafine-grained aluminum alloys of Al-Mg-Si system. *Reviews on Advanced Materials Science*, São Petersburgo, v. 31 n. 2. p.109-115, abr. 2012.
- 4 KARABAY, S. Modification of AA-6201 ally for manufacturing of high conductivity and extra high conductivity wire with property of high tensile stress after artificial aging heat treatment for all-aluminum alloy conductors. *Materials and Design*, v. 27, n. 10.p. 821-832, ago.2006.
- 5 MARTINOVA, Z.; DAMGALIEV, D.; HIRSH, M. The effect of room temperature pre-aging on tensile strength and electrical properties of thermomechanically treated Al-Mg-Si alloy. *Journal of Mining and Metallurgy*, v. 38, n. (1-2)B.p.61-73, fev. 2002.
- 6 SMYEAK, B. Influence of temperature and time of ageing on 6201 grade AlMgSi wire and rod.in: Metal, 5.,2011, Brno, Rep.Checa, Brno: VSB, 2011.
- 7 YUAN, W.; LIANG, Z. Effect of Zr addition on properties of Al-Mg-Si aluminum alloy used for all aluminum alloy conductors. *Materials and Design*, v. 32, n. 8-9,p. 4195-4200, abr. 2011.
- 8 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, set. 2007.
- 9 ZHOU, W. W.; CAI, B.; LI, W. J.; LIU, Z. X.; YANG, S. Heat- resistant Al-0.2Sc-0.04Zr electrical conductor. *Materials Science and Engineering A*, v. 552, n. 353-358,mai.2012.
- 10 ALAWAR, A. A.; BOSZE, E. J.; NUTT, S. R. High temperature strength and creep of an Al conductor with a hybrid composite core. in: 16<sup>th</sup> International conference on composite materials, 2007, Kyoto, Japan, p.1-8.
- 11 MERCÊS, M. P. **Influência dos parâmetros térmicos nas propriedades eletromecânicas e estruturais de ligas de alumínio modificadas com Fe.** 2008. 56 f. Trabalho de graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – UFPA, Belém, 2008.
- 12 SANTOS, E. D. C.; CAVALCANTE, F. A. J.; FEITOSA, J. P.; PRAZERES, U. R.; QUARESMA, J. M. V. Investigações preliminares sobre uma nova liga para fins de transmissão e distribuição de energia elétrica. in: 60<sup>o</sup>Congresso da ABM, 2005, Belo Horizonte. Anais do 60<sup>o</sup>Congresso da ABM, São Paulo: ABM, 2005.
- 13 FERNANDEZ, H. J. L. **Influência do teor de soluto na molhabilidade e características estruturais correlacionadas com propriedades mecânicas e elétricas de fios e cabos para transmissão e distribuição de energia nas ligas Al-EC-0,7%Si [0,05%;0,15%]Ti.** 2011. 114 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PPGEM/UFPA, Belém, 2011.

- 14 VENTURA, O. S. P. **Avaliação das propriedades mecânicas e elétricas da liga 6201 não refinada, modificada com os teores de cobre (0,05 e 0,3)% para transporte de energia elétrica.** 2009. 76 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PPGEM/UFPA, Belém, 2009.
- 15 FEITOSA, J. P. **Caracterização da liga 6101 refinada com adição de diferentes teores de cobre e solidificadas em molde unidirecional e em molde “U”.** 2007. 81 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) - PPGEM/UFPA, Belém, 2007.
- 16 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6814**; Fios e cabos elétricos –Ensaio de resistência elétrica. Rio de Janeiro, Mar.1985. 3p.
- 17 American Society for Testing and Materials: Standard test method for resistivity of electrical conductor materials **ASTM B-193**, ASTM, West Conshohocken, 2001. 4 p.
- 18 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5118**; Fios de alumínio 1350 nus, de seção circular, para fins elétricos. Rio de Janeiro, Jul. 2007. 7 p.
- 19 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6810**; Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos, Rio de Janeiro, Nov. 2010. 3 p.
- 20 SHARMA, V. M. J.; KUMAR, K. S.; RAO, B. N.; PATHAK, S. D. Effect of microstructure and strength on the fracture behavior of AA2219 alloy. *Materials Science and Engineering*, v. 528, n. 12, p.4040-4049, mai. 2011.
- 21 NIS/SEMATEC e-Handbook of Statistical Methods. Disponível em: <<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>>, 2012. Acesso em: 20 jan. 2013.
- 22 LEE, Y. H. **Fisher Information Test of Normality.** 1998. 78 f. Tese de Doutorado (Doutorado em Estatística) – Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 1998.
- 23 SPIEGEL, M. R. *Estatística*. São Paulo: Makron, 1994.
- 24 PETERNELLI, L. A.; MELLO, M. P. *Conhecendo o R: Uma visão estatística*. Viçosa: UFV, 2007.
- 25 OKAMOTO, T.; KISHITAKE, K. Dendritic structure in unidirectionally solidified aluminum, tin, and zinc base binary alloys. *Journal of Crystal Growth*, v. 29, p. 137-146, jun. 1975.
- 26 GARCIA, A. *Solidificação: Fundamentos e aplicações*. Campinas: UNICAMP, 2007.
- 27 RUSSEL, A. M.; LEE, K. L. *Structure-property relations in nonferrous metals*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- 28 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5285**; Fios de liga alumínio-magnésio-silício, têmpera T81, nus, de seção circular, para fins elétricos – Especificação, Rio de Janeiro, fev. 2010. 8 p.
- 29 LOBO, J. B. A. **Correlação entre as propriedades mecânicas e elétricas da liga Al-0,4%Si-0,6%Mg não refinada, modificada com teores de cobre.** 2007. 67 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PPGEM/UFPA, Belém, 2007.