

# ANÁLISE DA PROPRIEDADE MECÂNICA, ELÉTRICA E ESTRUTURAL DA LIGA AL-EC MODIFICADA COM 0,26% DE ZR PARA APLICAÇÃO EM FIOS E CABOS ELÉTRICOS<sup>1</sup>

Isabella Cristina da Silva Jorge<sup>2</sup>  
Alberto Luiz Mendes Macapuna<sup>2</sup>  
Washington Luis Reis Santos<sup>3</sup>  
Everaldo Afonso Fernandes<sup>4</sup>  
José Maria do Vale Quaresma<sup>5</sup>

## Resumo

Sob a expectativa do desenvolvimento de novos materiais foram realizados estudos visando avaliar o efeito da adição do Zr no Al-EC. Associada a esta expectativa o estudo submete a liga formada a diferentes ciclos térmicos na busca de verificar seu comportamento sob diferentes temperaturas, na tentativa de simular os fenômenos nos quais o material estará sujeito quando empregado em operações como cabos para transmissão [Tx] e/ou distribuição [Dx] de energia elétrica. As amostras foram obtidas a partir de perfis fundidos, usinados e deformados a frio para diferentes diâmetros. Nestas circunstâncias o diâmetro de 3 mm foi aquele que apresentou as melhores respostas elétricas e mecânicas, sendo, portanto, adotado como fonte de estudo.

**Palavras-chave:** Limite de resistência à tração; Condutividade elétrica; Tratamentos térmicos.

## ANALYSIS OF PROPERTY MECHANICAL, ELECTRICAL AND STRUCTURAL ALLOY MODIFIED WITH AL-EC 0.26% ZR OF APPLICATION IN ELECTRICAL WIRES AND CABLES

### Abstract

Under the expectation of developing new materials were studied to evaluate the effect of Zr adding in Al-EC. Associated with this expectation the study subjects the alloy formed at different thermal cycles in the search to verify its behavior under different temperatures, in an attempt to simulate the phenomena in which the material will be subjected when used in operations such as transmission and/or distribution power cables. Samples were obtained from profiles welded, machined and cold deformed to different diameters. In these circumstances the diameter of 3 mm presented the best electrical and mechanical responses, therefore, adopted as a source of study.

**Key words:** Limit of tensile strength; Electrical conductivity; Heat treatment.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Mestrando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Brasil.

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Brasil.

<sup>4</sup> Graduando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Brasil.

<sup>5</sup> Dr. em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria brasileira cresce em um ritmo acelerado. Isto gera a necessidade de grandes investimentos em infra-estrutura, principalmente no setor de distribuição de energia elétrica. Somas vultosas são gastas na implantação de novas linhas de transmissão e manutenção da rede já existente. Em contrapartida, estudos revelam que cabos produzidos a partir da introdução de novos materiais possuem capacidades muito superiores aos que existem atualmente no mercado.

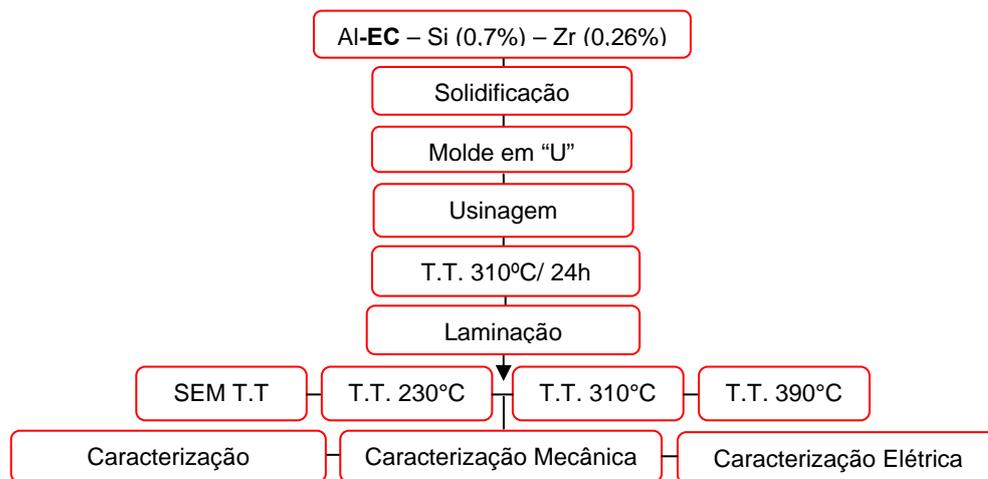
É pensando neste nicho que os elementos do GPEMAT estudam novos materiais, novas combinações de materiais e as suas características. Pois seriam necessários investimentos menores, em comparação aos que são feitos atualmente, para modificar as linhas de transmissão já existentes com os cabos feitos a partir destes novos materiais trazendo um incremento da temperatura operacional, sem aumentar as perdas de Joule-efeito, enquanto limita a flecha entre as torres dentro de valores aceitáveis nas instalações existentes.

Baseados nestes fatos, este trabalho propôs-se a estudar o comportamento elétrico, mecânico e estrutural da liga Al-EC-0,7%Si modificada com 0,26%Zr a caracterizando como uma liga TAL [Thermal resistant Aluminium Alloy - Liga de alumínio termorresistente] para a utilização na transmissão e distribuição de energia elétrica.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

As ligas foram obtidas por solidificação estática direta em lingoteira metálica no Sub-laboratório de Metalografia e Tratamento Térmicos da UFPa a partir do Al-EC (alumínio eletrocondutor ou Al-1350). Sua preparação foi realizada inicialmente com a modificação do Al-EC com 0,7%Si e em seguida através da adição de 0,26%Zr, na busca da proporção adequada para obtenção da composição química ideal para a liga.

Para obtenção de maiores informações, quanto às características de termorresistividade e formação das partículas de segunda fase que tendem a aumentar a temperatura de recristalização da liga, foram realizados os seguintes tratamentos térmicos descritos na Figura 1.

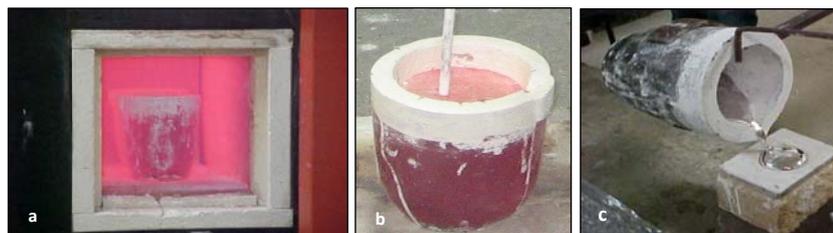


**Figura 1.** Fluxograma detalhando as operações metalúrgicas e de caracterização para a liga Al-EC-0,7%Si-0,26%Zr.

Este procedimento tem o objetivo de verificar a possibilidade de se provocar a presença das partículas de segunda fase e estudar seus efeitos sobre as características da liga Al-EC-0,7%Si-0,26%Zr.

Para preparação das ligas foram utilizadas barras de Al-EC, pedras de Silício metálico e barras de pré-liga Al-10% Zr que foram cortadas com serra de fitas, pesadas com balança digital e fundidas em forno tipo mufla no qual foram executadas todas as operações de fundição.

A composição foi confirmada em espectrômetro óptico de propriedade da empresa parceira de uso contínuo no monitoramento do processo industrial. Além das análises espectrométricas, todo o alumínio utilizado para a obtenção das ligas foi cedido pela empresa parceira no desenvolvimento dos estudos em questão.



**Figura 2.** Esquema de preparação e obtenção das ligas fundidas: (a) fundição do material; (b) injeção de argônio; (c) coleta de amostras para análise química.

Na sequência de imagens ilustrada na Figura 2, tem-se o processo de fundição das ligas nas composições químicas predefinidas (Figura 2a), seguida de injeção de argônio (Figura 2b), e vazamento para se obter as amostras para a análise química (Figura 2c).

O vazamento do metal líquido foi realizado em uma lingoteira metálica com formato em “U” como na Figura 3, que possibilita a solidificação estática do metal líquido.



**Figura 3.** Lingoteira em forma de “U”: (a) desmontada, (b) no momento do vazamento e (c) lingote fundido com identificação da região de corte.

Após a obtenção dos perfis solidificados, foram seccionadas as duas “pernas” do lingote com comprimento de 250 mm, para serem em seguida usinadas do diâmetro de 22 mm para o diâmetro de 18 mm e, então, laminadas a frio até a obtenção dos diâmetros de estudo [4; 3,8; 3 e 2,7] mm em um laminador duo elétrico de secção circular de diferentes diâmetros.

Como os diâmetros a serem estudados foram preestabelecidos foi possível construir os gráficos da Figura 4, nos quais pode ser observado passo a passo como o material foi deformado. Na Figura 4a tem-se o aumento gradativo do encruamento. A Figura 4b, mostra que entre um passe e outro o encruamento aplicado tem intensidade diferente, evidenciando a redução de 3,8 mm para 3 mm, que apresenta uma variação de trabalho a frio de 1,80%, sendo o maior grau de deformação aplicado neste processo.

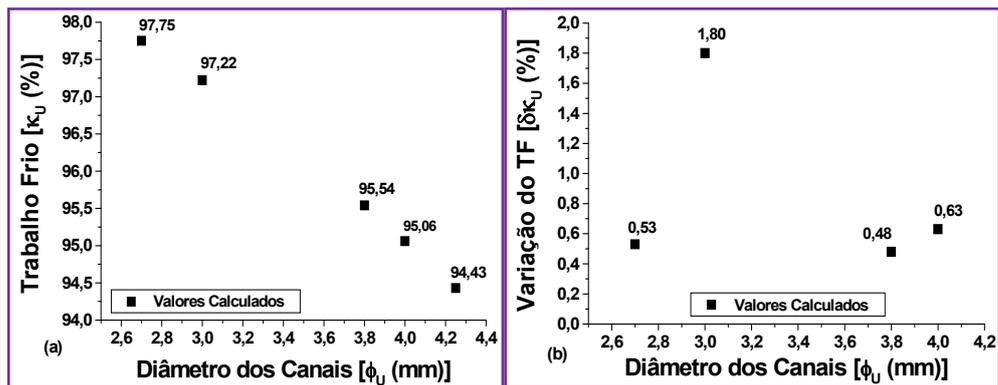


Figura 4. (a) Trabalho a frio previsto; (b) variação do trabalho a frio previsto, em função dos diâmetros dos canais. Diâmetro inicial de 18,5 mm.

## 2.1 Caracterizações Elétricas das Ligas

Nesta etapa, os corpos de provas são submetidos a ensaios com objetivo de se avaliar a resistência elétrica dos mesmos, com o auxílio de um multiohmímetro (ponte de kelvin).

Para se obter os primeiros resultados, foi necessário fazer a leitura das resistências dos corpos de prova (CP) deformados plasticamente em variados diâmetros e tendo por referência a norma NBR 6814.<sup>(1)</sup>

## 2.2 Caracterização Mecânica das Ligas.

Após a deformação a frio das ligas e a obtenção dos diâmetros desejados no estudo, os corpos de prova foram submetidos a ensaio mecânico, em uma máquina de ensaio de tração acoplada a um micro computador com sistema de aquisição de dados que facilita a coleta das informações. Os testes de tração foram ensaiados segundo a norma para cabos elétricos NBR 6810<sup>(2)</sup> executados em três amostras com 20 cm de comprimento para cada diâmetro ou tratamento térmico produzido ao longo do trabalho.

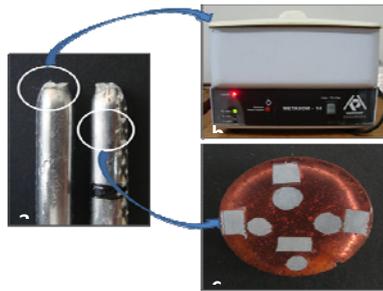
## 2.3 Testes de Termorresistividade

O teste de natureza térmica é realizado segundo especificações realizadas pela Copel (Companhia Paranaense de Energia), que descreve que condutores elétricos caracterizados como termorresistentes não devem apresentar perda superior a 10% de seu limite de resistência à tração [LRT] quando submetidos à temperatura de 230°C por uma hora.

Os tratamentos térmicos exigidos foram executados em um forno tipo mufla, marca Brasimet que já foi mostrado anteriormente na Figura 2a.

## 2.4 Caracterização Estrutural das Ligas

Para observação da superfície das fraturas provenientes dos corpos de prova resultantes do ensaio de tração (Figura 5a), o corpo de prova foi seccionado próximo a fratura e a sua limpeza foi realizada, em um limpador ultra sônico com tanque em aço inox (Figura 5b), com solução de limpeza composta de Álcool Etílico Absoluto, P.A. 99,99 e Acetona P.A.



**Figura 5.** (a) Corpo de prova ensaiado identificando as regiões que serão analisadas, (b) Ultra som e (c) Corpo de prova embutido com cortes longitudinal e transversal.

Para observação das microestruturas proveniente das regiões transversais e longitudinais foram seccionados e embutidos pequenos fragmentos, cortados abaixo da fratura como pode ser visto na Figura 5c.

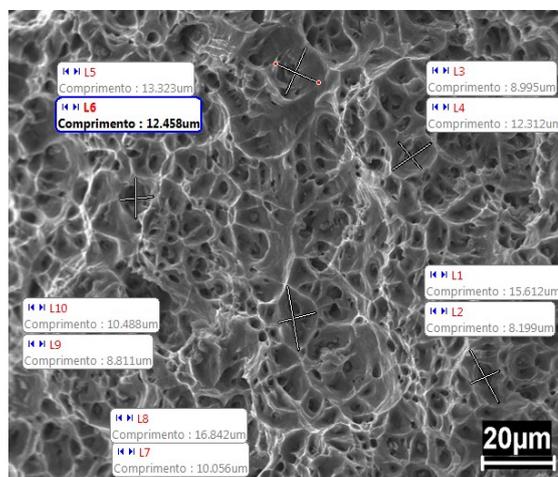
Segundo Mohanty e Gruzleski<sup>(3)</sup> Quando a proporção solvente/soluto é próximo da unidade, a probabilidade de existir um cristal bem ordenado é muito maior, e o refinamento de grão eficiente é alcançado, como é experimentalmente verificada com a adição de Nb, Ti e Ta no Al. Por outro lado, a incoerência significativa com a matriz de Al leva à “intoxicação” do material e à precipitação de estruturas metaestáveis, por exemplo, Zr e Cr. Nota-se que o Ti tem maior capacidade de nucleação quando ligado ao Al devido à sua elevada coerência com a matriz, caso oposto para o Zr. Esta relação do soluto com a coerência da matriz de alumínio tende a influenciar as propriedades mecânica e elétrica do material.

As imagens das fraturas e dos embutimentos contendo as regiões transversais e longitudinais foram obtidas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Através do MEV analisou-se a topografia da superfície da fratura. As medidas dos diâmetros médios das microcavidades foram obtidas por intermédio do software Motic, de acordo com o método de medição de partículas micrométricas proposta por Sharma,<sup>(4)</sup> no qual mede-se a dimensão menor e a maior da microcavidade e

calcula-se o valor do diâmetro (D) aplicando a fórmula  $D = \sqrt{d_1 \cdot d_2}$ , onde  $d_1$  e  $d_2$  são dimensões lidas. Foram realizados cinco leituras por fratura para obtenção de um valor médio.

A Figura 6 apresenta exemplos de leituras do diâmetro das microcavidades localizadas na fratura do fio com diâmetro de 3 mm, para a liga Al-EC-0,7%Si-0,26%Zr STT.



**Figura 6.** Leitura de diâmetro médio das microcavidades (Dimples) via software Motic, para a liga Al-EC-0,7%Si-0,26%Zr STT.

### 3 RESULTADOS

A Tabela 1 mostra os resultados da análise da composição química em amostras obtidas da liga Al-EC-0,7%Si modificada com 0,26%Zr. Esta leitura foi obtida a partir de análise em espectrômetro óptico de massa.

**Tabela 1.** Composição química da liga de Alumínio modificada com Zircônio

Liga	% Si	Zr
0,26% Zr	0,7262	0,2599

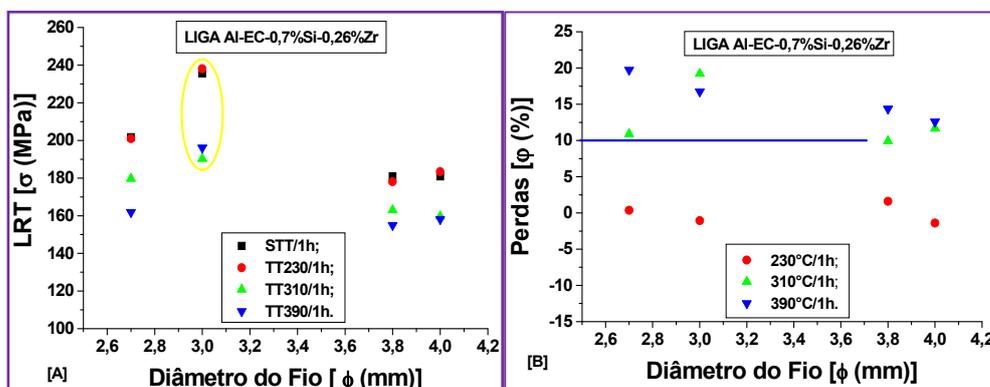
#### 3.1 Caracterização Mecânica

A Tabela 2 mostra a correlação entre o diâmetro do corpo de prova, limite de resistência à tração e temperatura de tratamento térmico para a liga Al-EC-0,7%Si-0,26% Zr.

**Tabela 2.** Correlação entre o diâmetro do corpo de prova, limite de resistência à tração (LRT) e temperatura de tratamento térmico

Diâmetro	STT	TT230°C		TT310°C		TT390°C	
	LRT	LRT	Perda (%)	LRT	Perda (%)	LRT	Perda (%)
4,0	180,86	183,39	+ 1,39	159,79	11,65	158,1	12,58
3,8	180,94	178,06	1,59	163	9,91	154,93	14,37
3,0	235,51	238,05	+1,07	190,24	19,22	196,08	16,74
2,7	201,68	200,97	0,352	179,7	10,89	161,86	19,74

A Figura 7 mostra resultados da Caracterização Mecânica para os diâmetros [4; 3,8; 3 e 2,7] mm relacionados às temperaturas dos tratamentos.



**Figura 7.** Resultados da Caracterização Mecânica para os diâmetros [4; 3,8; 3 e 2,7] mm. Em (a) sem Tratamento Térmico [STT] e com Tratamento Térmico [TT230/1h; TT 310/1 h e TT 390/1 h]; em (b) Relação das perdas ocorridas pós Tratamento Térmico [TT230/1h; TT 310/1 h e TT 390/1 h].

Na Figura 7, podem ser observados os seguintes aspectos:

- o maior Grau de Trabalho a Frio [ $\phi = 3,0$  mm] apresenta, para todas as temperaturas utilizadas, os maiores valores para o LRT, pontos no círculo amarelo da Figura 7a.
- para a liga Al-EC-0,7%Si-0,26% Zr quando ensaiada de acordo com o protocolo COPEL [230°C/1h], é observado um comportamento satisfatório, pois não ultrapassou o limite exigido de 10% (linha em azul), como fica

evidente pelos valores representados pelos pontos de cor vermelha da Figura 7b;

- fica evidente a possibilidade de se poder trabalhar com eficiência em temperaturas superiores a 230°C, mas menores que (310 e 390)°C, linha azul na Figura 7b; e
- existem fortíssimos indícios de que a liga Al-EC-0,7%Si-0,26%Zr apresenta características de Termorresistividade.

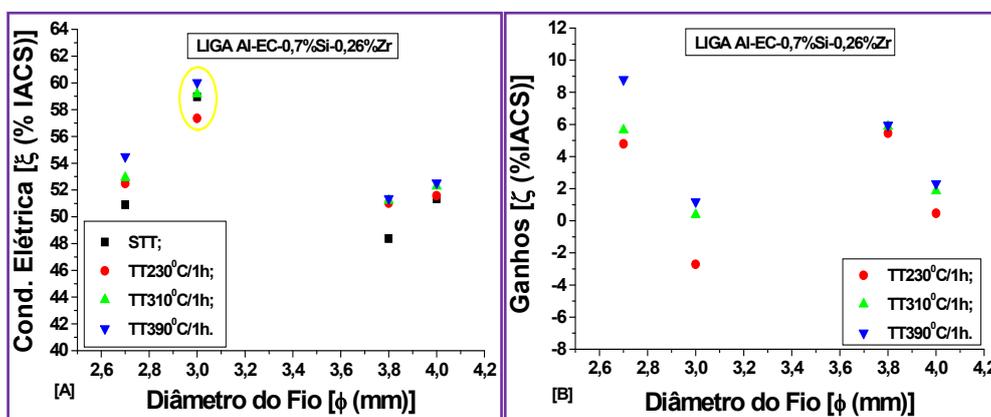
### 3.2 Caracterização Elétrica

Tem-se na Tabela 3 a correlação entre o diâmetro do corpo de prova, a Condutividade Elétrica e a temperatura de tratamento térmico para a liga Al-EC-0,7%Si-0,26% Zr.

**Tabela 3.** Correlação entre diâmetro do corpo de prova, condutividade IACS e temperatura de tratamento térmico

Diâmetro	STT	TT230°C		TT310°C		TT390°C	
	IACS	IACS	Ganho (%)	IACS	Ganho (%)	IACS	Ganho (%)
4,0	51,34	51,58	0,46	52,29	1,85	52,53	2,31
3,8	48,38	51,02	5,45	51,22	5,87	51,36	5,95
3,0	58,96	57,36	-2,71	59,18	0,37	60,03	1,18
2,7	50,9	52,49	4,79	52,92	5,65	54,5	8,8

A Figura 8 demonstra os resultados da caracterização elétrica apresentados na Tabela 3 para os diâmetros [4; 3,8; 3 e 2,7] mm relacionados às temperaturas de tratamentos.



**Figura 8.** Resultados da caracterização elétrica para os diâmetros [4; 3,8; 3 e 2,7] mm. Em (a) sem Trat. Térmico e com Tratamento Térmico [TT230/1 h; TT 310/1h e TT 390/1 h]; em (b) Relação aos ganhos ocorridos pós Tratamento Térmico [TT230/1 h; TT 310/1h e TT 390/1 h].

Na Figura 8, pode ser observado o seguinte aspecto:

- o maior Grau de Trabalho a Frio [ $\phi = 3$  mm] apresenta, para todas as temperaturas utilizadas, os maiores valores para a Condutividade Elétrica, pontos no círculo amarelo.

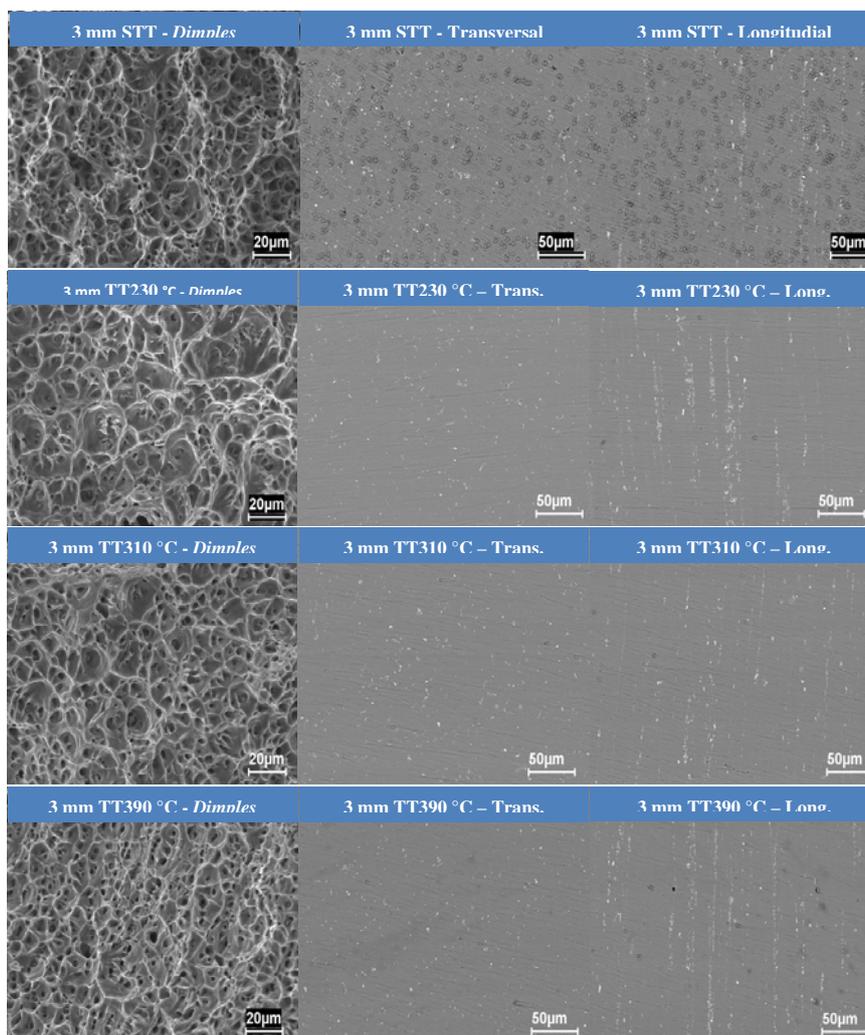
### 3.3 Caracterização Estrutural

A Tabela 4 demonstra a Variação do diâmetro dos Dimples [ $\psi$ ] e do LRT para os fios de  $\phi = 3$  mm da liga Al-EC-0,7%Si-0,26%Zr, em função das temperaturas de Tratamento Térmico.T

**Tabela 4.** Variação do diâmetro dos *Dimples* [ $\psi$ ] e do LRT para os fios de  $\phi= 3$ mm da liga Al-EC-0,7%Si-0,26%Zr, em função das temperaturas de TT

$\phi_{[Fio]} = 3$ mm	$\Psi_{[Dimple]} (\mu\text{m})$	LRT [MPa]
STT	11,47	235,51
TT 230°C	11,00	238,05
TT 310°C	9,54	190,24
TT 390°C	7,39	196,08

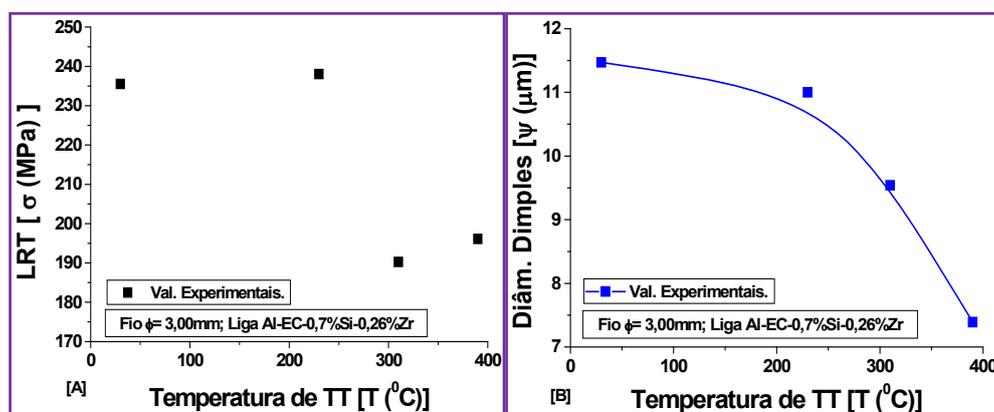
A Figura 9 apresenta as imagens micrográficas para o diâmetro de 3 mm, que apresentou os melhores resultados eletromecânico, obtidas via MEV para a topografia da fratura e da região do fio imediatamente abaixo, nos sentidos transversal e longitudinal de análise.



**Figura 9.** Comparação das topografias das fraturas (2.000x) e das regiões transversal e longitudinal (1.000x) das mesmas, para liga Al-EC-0,7%Si-0,26%Zr no diâmetro de 3 mm sem tratamento térmico e com diferentes tratamentos térmicos por 1 hora. [STT]; [TT230]; [TT310] e [TT390].

A observação da Figura 9 associada com os valores da Tabela 4 plotados no gráfico da Figura 10 permite constatar que:

- as fractografias das amostras, com 3 mm de diâmetro, submetidas a tratamentos térmicos em diferentes temperaturas evidencia diferença na profundidade e dimensões das microcavidades, apresentando melhores resultados, fatores benéficos para o tipo de aplicação desta liga;
- para o material sem tratamento térmico [STT] pode ser observado os maiores *Dimples* (Figura 10 e Tabela 4) que foram gerados por partículas de segunda fase fortemente dispersa na matriz de Al, que serviram como agente de ancoragem das discordâncias, provocando o conseqüente crescimento das microcavidades. Estas partículas podem ser melhor observadas nas imagens da Figura 9, especificamente nas micrografias das seções longitudinal dos fios;



**Figura 10.** Gráfico mostrando a variação do diâmetro dos *Dimples* [ $\psi$ ] e do LRT, para a liga Al-EC-0,7%Si-0,26%Zr, em função das temperaturas de TT para o fio de Diâmetro 3 mm.

- no material com tratamento térmico a 230°C [TT230] pode-se observar uma ligeira diminuição no tamanho das microcavidades, (Figura 10b), que pode ter sido causada pelo rearranjo da microestrutura deformada. Considera-se que o aquecimento da liga diminui a densidade das discordâncias, desemaranhando-as forte ou suavemente, podendo vir a provocar também, fortes ou suaves, perdas no limite de resistência a tração [LRT], dependendo da intensidade da temperatura e do tempo;
- observa-se com clareza, a modificação que ocorreu nas dimensões dos *Dimples* no material tratado termicamente a [310 e 390]°C, por uma hora (Figura 10). Verificando-se que com o aumento da temperatura de tratamento térmico as dimensões das micro cavidades (Figura 10b) e do LRT (Figura 10a) são fortemente reduzidas em conseqüência do forte desemaranhamento das discordâncias; e
- na fratura da liga Al-EC-0,7%Si-0,26%Zr que foi submetida à maior temperatura [TT390], pode ser constatado que além da diminuição mais pronunciada do tamanho das microcavidades (Figura 10b), observa-se também que os *Dimples* são mais profundos quando comparados com os obtidos nas outras temperaturas de tratamentos. É possível que estas diferenças acentuadas estejam relacionadas ao surgimento de partículas mais incoerentes e amplamente distribuídas na matriz de Al, provocado pelo aumento da temperatura e, desta forma, favorecendo a formação de numerosos sítios de nucleação de microcavidades. O aumento da

profundidade dos *Dimples*, por sua vez, pode estar relacionado ao desesmeranhado mais intenso das discordâncias no material, o que eleva sua plasticidade, tornando-o mais susceptível a deformar-se.

## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização Mecânica

De maneira geral, para cada diâmetro em particular, pode-se avaliar que com o tratamento térmico das amostras, há a tendência de decréscimo no LRT à medida que a temperatura do tratamento aumenta. Segundo Padilha e Siciliano,<sup>(5)</sup> isto pode estar ocorrendo devido a um rearranjo das discordâncias, seguido do desesmeranhamento das mesmas, que pode ser provocado pelo aquecimento.

### 4.2 Caracterização Elétrica

Os resultados da condutividade elétrica, exibidos na Tabela 3 e plotados no Gráfico da Figura 8a, demonstram de maneira geral, que com o aumento da temperatura dos tratamentos térmicos, há um acréscimo da condutividade elétrica o que pode ter sido causado principalmente pela eliminação de defeitos pontuais gerados no momento da deformação. Porém o corpo de prova com diâmetro de 3 mm teve um comportamento diferente em relação ao dos demais analisados. Para cada temperatura de tratamento apresentou, sempre, os maiores valores para a condutividade elétrica. É possível que este comportamento possa estar associado à menor intensidade de desesmeranhamento de discordâncias ou a maior intensidade de trabalho a frio.

### 4.3 Caracterização Estrutural

As avaliações tendo por base os fios com o diâmetro de 3 mm, se justificam por que estes fios, ao apresentarem os maiores índices de trabalho a frio, apresentaram os maiores valores para o LRT (Figura 7a) e para a Condutividade Elétrica Figura 8a] qualquer que tenha sido a temperatura de tratamento utilizada.

Na topografia das fraturas destes fios encontram-se microcavidades que diminuem à medida que as temperaturas de tratamento aumentam (Figura 10b) este resultado pode estar relacionado à maior intensidade das partículas de segunda (Figura 9), ao grau de deformação imposta no material, que no caso é o maior (Figura 4b), assim como ao crescente desesmeranhado das discordâncias geradas pela conformação mecânica.

## 5 CONCLUSÃO

As amostras foram submetidas a tratamento térmico à 310°C por 24 h, pretendendo formar partículas de segunda fase, que são partículas finas, distribuídas na matriz de Al. Através dos resultados obtidos com diferentes temperaturas de tratamento térmico durante 1 hora pôde ser observado que a característica de termorresistência, segundo o protocolo COPEL, associado a perdas ou a ganhos no limite de 10% no LRT, foi observado plenamente para o teste à temperatura de 230°C por 1 hora. Entretanto, foram verificadas fortes evidências de que esta

possibilidade pode ser alcançada em temperaturas superiores a 230<sup>o</sup>C, mas inferiores a [310 e 390]<sup>o</sup>C.

O melhor comportamento da condutividade elétrica está associado ao tratamento térmico aplicado às ligas utilizando as maiores temperaturas por promoverem: o rearranjos e a aniquilação dos defeitos cristalinos derivados da solidificação e a diminuição da intensidade no emaranhado das discordâncias.

## REFERÊNCIAS

- 1 ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas – “**Fios e cabos elétricos - Ensaio de resistência elétrica**”, Rio de Janeiro, Mar. 1986, NBR 6814;
- 2 ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas – “**Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos**”, Rio de Janeiro, Ago. 1981, NBR 6810;
- 3 MOHANTY, P. S. e GRUZLESKI, J. E.; **Mechanism of Grain Refinement in Aluminium**, *Acta metall. mater.*, Elsevier Science Ltd, Vol. 43, No. 5, pp. 2001-2012, 1995.
- 4 SHARMA, V. J. M., SREE KUMARA, K., NAGESWARA RAOB, B., PATHAKC, S.D.; **Effect of Microstructure and Strength on the Fracture Behavior of AA2219 Alloy**, *Materials Science and Engineering A* 502, 45–53, 2009;
- 5 PADILHA, A. F.; SICILIANO F. J.; **Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura**. 3ed. ver. amp. São Paulo: ABM, 1996;