



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PRÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL**

**ANNA MÁRCIA ROCHA RODRIGUES**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO DA  
LIGA Al-0,05%Cu- [0,35 - 0,45]%Fe MODIFICADA COM 0,15%Zr.**

**BELÉM**

**2017**

**ANNA MÁRCIA ROCHA RODRIGUES**

**Estudo do Comportamento do Coeficiente de Encruamento da Liga Al-0,05%Cu-  
[0,35 - 0,45]%Fe modificada com 0,15%Zr.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do Grau de Mestre Profissional em Engenharia Industrial na Área de Materiais e Metalurgia.

Orientador: Prof. Dr. José Maria do Vale Quaresma.

**BELÉM**

**2017**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com  
ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)  
autor(a)**

---

R696e Rodrigues, Anna Márcia Rocha  
Estudo do Comportamento do Coeficiente de Encruamento da Liga  
Al-0,05%Cu- [0,35 - 0,45]%Fe modificada com 0,15%Zr / Anna Márcia  
Rocha Rodrigues. — 2017.  
64 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. José Maria do Vale Quaresma  
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Industrial, Instituto de Tecnologia, Universidade  
Federal do Pará, Belém, 2017.

1. Liga de Al-0,15% Zr. 2. Coeficiente de Encruamento. 3. Razão  
de Microcavidades. 4. Teste Termorresistente. I. Título.

CDD 620.1

---

**ANNA MÁRCIA ROCHA RODRIGUES**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO DA  
LIGA Al-0,05%Cu- [0,35 - 0,45]%Fe MODIFICADA COM 0,15%Zr.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do Grau de Mestre Profissional em Engenharia Industrial na Área de Materiais e Metalurgia.

Data de Aprovação:                    de                    de 2017.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. José Maria do Vale Quaresma

UFPA – Orientador Presidente.

---

Prof. Msc. Everaldo Afonso Fernandes

IFPA – Membro Externo da banca examinadora.

---

Prof. Dra. Elza Monteiro Leão Filha

IFPA – Membro Externo da banca examinadora.

---

Prof. Dr. Laércio Gouvêa Gomes

IFPA – Membro Externo da banca examinadora.



Primeiramente a Deus, aos meus pais: Washington e Jacira Rocha, ao meu filho Marjan, amigos e a todos que tornaram possível a concretização deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente ao Deus Eterno por Ele me proporcionar esta oportunidade e a sabedoria necessárias para alcançar o resultado esperado, Shalom.

Agradeço ao meu pai, Washington Cordovil Rocha, que desde o início me incentivou e me acompanhou nesta jornada, que sempre me deu excelentes exemplos e orgulho do ser humano lindo que ele é e faz a nossa família ser. Agradeço a minha mãe, Jacira Bastos Rocha pelo amor, orações, carinho, apoio, compreensão, cuidado e zelo para com o meu filho Marjan porque eu precisava trabalhar e estudar.

Ao meu filho Marjan Rocha Rodrigues, dedico o empenho nesta graduação para lhe deixar como exemplo de que ele deva estudar sempre, ser honesto, amigo, amável e bom diante de Deus e dos homens. Ao Janilson Rodrigues Coelho “in memoriam”

Agradeço a minha amiga Viviane Costa, que me ajudou nas pesquisas e me orientou durante todo esse percurso, sem a qual jamais esse sonho seria possível e, a minha amiga Rebeca Duarte que sempre me apoiou e incentivou.

Ao Prof. Dr. José Maria do Vale Quaresma pela orientação, durante a realização deste trabalho. A Todos os membros do Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais (GPEMAT) da UFPA: Daniel Cavalcante, Carlos Sousa, Pedro Lamarão, Whellisson Dias, Mauro Quaresma, Mauro Alfaya.

De boas palavras transborda o meu coração. Ao Rei consagro o que compus; a minha língua é como a pena de habilidoso escritor.

Salmo 45.1

## RESUMO

Através do ensaio de tração é possível obter propriedades mecânicas como o coeficiente de encruamento, propriedade esta que representa a capacidade do material em se deformar plasticamente, ou seja, quanto maior for coeficiente de encruamento, maior será a capacidade do material em se deformar plasticamente antes da estrição. Portanto, esse trabalho, tem como objetivo principal o estudo do Coeficiente de Encruamento ( $\eta$ ) da liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr através do método de *Hollomon* e, correlacionar os seus resultados com o Limite de Resistência a Tração (LRT) obedecendo a normas (NBR 6810-10) para cada diâmetro (2,7; 3,0; 3,8 e 4,0)mm e com a finalidade de definir o diâmetro com melhor desempenho. Posteriormente o fio com melhor desempenho será submetido a dois testes de termorresistividade segundo o Protocolo COPEL (230°C/1h) e a Norma ASTM B941-10 (280°C/1h) com objetivo de avaliar e entender de que forma o tratamento térmico afeta o “n” e a resistência do material (LRT), em seguida será avaliado o alongamento e Razão de Microcavidades a fim de avaliar e comparar a ductilidade do material com e sem tratamentos térmicos que pode ser mensurada pelo coeficiente de encruamento apresentados para o diâmetro de 3,00mm que o obteve o melhor resultado nos ensaios e análises realizadas.

**Palavras-Chave:** Liga de Al-0,15% Zr, Coeficiente de Encruamento, Razão de Microcavidades, Teste Termorresistente.

## ABSTRACT

Through the tensile test it is possible to obtain mechanical properties as the work hardening coefficient property that it is the material's ability to deform plastically, that is, the higher strain hardening coefficient, the greater the ability of the material to deform plastically before the necking. Therefore, this work aims to study the Work hardening coefficient ( $\eta$ ) of the alloy Al-Cu-0.05% [0.35-0.45]% Fe-0.15% Zr by Hollomon method and correlate the results with the Resistencia limit the draw (LRT) under policies (NBR 6810-10) for each diameter (2.7, 3.0, 3.8 and 4.0) mm and with purpose to define the diameter with better performance. Later the wire with better performance will be submitted to two termorresistividade test by the Protocol COPEL (230 ° C / 1h) and ASTM B941-10 (280°C/1h) standard to evaluate and understand how the heat treatment affects the "n" and material strength (LRT), then it will be evaluated stretching and microwells ratio in order to evaluate and compare the ductility of the material with and without heat treatment that can be measured by the strain hardening coefficient presented to the diameter of 3.0 mm that was obtained the best results in the tests and analyzes performed.

**Keywords:** Al-0.15% Zr alloy, Work hardening coefficient, ratio of microwells, heat resistant test.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de usinas hidrelétricas na Amazônia - Em operação, obras e planejadas. ....	18
Figura 2 - Cabos de alumínio utilizados para transmissão de energia elétrica.....	19
Figura 3 - Elementos de liga.....	21
Figura 4 - Diagrama de fases Al-0,15Zr.....	25
Figura 5 - Estrutura esquemática de lingote apresentando zona coquilhada zona colunar e zona equiaxial. ....	28
Figura 6 - Mecanismo de deslizamento de discordâncias na deformação plástica. ....	29
Figura 7 - Discordâncias parciais delimitando defeitos de empilhamento.....	30
Figura 8 - Desenho esquemático do arranjo celular de discordâncias em grão encruado. ....	30
Figura 9 - Micrografia eletrônica de transmissão de uma liga de titânio, onde as linhas escuras correspondem a discordâncias. ....	32
Figura 10 - Esquema do efeito do trabalho à frio. ....	34
Figura 11 - Diagrama de fase de alumínio-cobre mostrando as três etapas do tratamento térmico de envelhecimento e as microestruturas produzidas durante o processo. ....	35
Figura 12 - Influência de $\eta$ sobre a curva tensão-deformação real.....	36
Figura 13 - Influência de $\eta$ sobre a curva tensão-deformação real.....	37
Figura 14 - Fluxograma esquemático de obtenção das ligas estudadas referentes às etapas I, e II. ....	40
Figura 15 - Equipamentos laboratoriais: (A) serra fita, (B) balança digital, (C) forno. ....	40
Figura 16 - Imagens da preparação e obtenção da liga fundida: (a) material ao forno para fundição; (b) injeção do gás inerte para formação de escória; (c) coleta de material para análise química. ....	41
Figura 17 - Imagens do molde em coquilha (a), do vazamento do metal líquido (c) e o metal solidificado desmoldado. ....	41
Figura 18 - Laminador duo elétrico MENAC usado na fabricação dos corpos de prova.....	42
Figura 19 - Fotos do conjunto componentes da Ponte de Kelvin utilizada para medir resistência elétrica: (a) da Ponte de Kelvin e esquema de materiais durante a caracterização; (b) da Ponte de Kelvin. ....	43
Figura 20 - Máquina de ensaio de tração KRATOS modelo IKCL1-USB acoplado ao computador com sistema de aquisição de dados. ....	44
Figura 21 - Estufa usada no tratamento térmico da liga estudada. ....	46

Figura 22 - (a) Identificação da região rompida para a análise no MEV, (b) embutimento dos cortes transversais dos corpos de prova para análise microestrutural e politriz usada no lixamento das amostras.....	47
Figura 23 - Ultrassom modelo METASOM – 14.....	47
Figura 24 - (a) microscópio eletrônico de varredura – MEV e (b) imagem da superfície de fratura capturada pelo microscópio. ....	48
Figura 25 - Representação do método Heyn. ....	49
Figura 26 - Esquemático da análise das micrografias. ....	49
Figura 27 - (a) Gráfico de condutividade elétrica e (b) limite de resistência a tração para a liga Al-0,15%Zr em estudo para todos os diâmetros, da liga STT e TT 150°C/4h.....	53
Figura 28 - Comparação entre os valores de LRT e o Coeficiente de Encruamento ( $\eta$ ) da liga Al-0,05%Cu [0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr para todo o diâmetro. ....	54
Figura 29 - Comportamento do Alongamento [ $\delta$ ] (a), Razão das Cavidades [ $\sigma$ ] (b) e do Coeficiente de Encruamento [ $\eta$ ] (c) da liga base STT para todas os diâmetros.....	55
Figura 30 - Comportamento do Alongamento [ $\delta$ ] (a), Razão das Cavidades [ $\sigma$ ] (b) e do Coeficiente de Encruamento [ $\eta$ ] (c) TT 150°C/4h para todas os diâmetros.....	56
Figura 31 - Correlação do LRT (a), perdas de LRT (b) e do coeficiente de Encruamento( $\eta$ ) (c) STT, TT-230° e 280°C/1h, para o $\varnothing= 3\text{mm}$ .....	57
Figura 32 - Correlação do LRT (a), perdas de LRT (b) e do Coeficiente de Encruamento (c) TT 150°C/4h, TT-230° e 280°C/1h, para o $\varnothing= 3\text{mm}$ .....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do lingote utilizado para a fundição da liga base e os resultados desejados para cada liga. ....	50
Tabela 2 - Composição química das ligas, após a solidificação.....	50
Tabela 3 - Resultados do ensaio de condutividade elétrica para a liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr sem (STT) e com (TT) tratamento térmico, bem como suas perdas percentuais.....	51
Tabela 4 - Resultados do Limite de resistência à tração (LRT) da liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr sem tratamento térmico (STT) e tratada termicamente (TT) a 150°C/4 h. ....	52
Tabela 5 - Valores de LRT e do Coeficiente de Encruamento da liga base para todos os diâmetros STT e TT 150°C/4h. ....	53
Tabela 6 - Valores de alongamento ( $\delta$ ), Razão das Cavidades ( $\vartheta$ ) e Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) da liga base STT para todos os diâmetros. ....	55
Tabela 7 - Valores de alongamento ( $\delta$ ), Razão das Cavidades ( $\vartheta$ ) e Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) da liga base TT 150°C/4h para todos os diâmetros.....	56
Tabela 8 - Valores de LRT (Mpa), Porcentagem de perdas [% (Mpa)] e Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) da liga base STTR, TTR 230° e 280°C/1h para o diâmetro $\varnothing=3,0$ mm. ....	57
Tabela 9 - Valores de LRT (Mpa), Porcentagem de perdas [% (Mpa)] e Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) da liga base TT 150°C/2h, TTR 230° e 280°C/1h para o diâmetro $\varnothing=3,0$ mm.....	59

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

### Letras latinas

A	Área da secção transversal do CP	[mm <sup>2</sup> ]
CP	Corpo de prova	
d <sub>c</sub>	Diâmetro de um <i>dimple</i>	
$\bar{d}_c$	Média dos diâmetros	[m]
d <sub>1</sub>	Maior dimensão de um <i>dimple</i>	
d <sub>2</sub>	Menor dimensão de um <i>dimple</i>	
G	Tamanho médio dos <i>dimples</i>	
L	Comprimento do fio	
L	Comprimento total utilizado na medição	
M	Magnificação da imagem	
N	Número de <i>dimples</i> medidos	
N <sub>i</sub>	Número de <i>dimples</i> medidos	
N <sub>L</sub>	Número de <i>dimples</i> x mm	
R <sub>t</sub>	Resistência a T °C	[Ω]
R <sub>v</sub>	Resistência elétrica do CP por unidade de comprimento a 20 °C	[Ω/m]
R <sub>20</sub>	Resistência corrigida a 20 °C	[Ω]
T	Temperatura na qual foi efetuada a medição	[°C]

### Letras Gregas

Δ	Alongamento	[%]
Θ	Razão das cavidades	
ρ <sub>Cu</sub>	Resistividade do Cobre	[kg/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>Al</sub>	Resistividade do Alumínio	[kg/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>c</sub>	Resistividade Volumétrica	$[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}]$

### Abreviações e siglas

FEM	Faculdade de Engenharia Mecânica
GPEMAT	Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais
IACS	International Annealed Cooper Standard
LRT	Limite de resistência à tração
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura

NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
TT	Tratamento Térmico
STT	Sem Tratamento Térmico
TT <sub>R</sub>	Com Teste de Termorresistividade
STT <sub>R</sub>	Sem Teste de Termorresistividade

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1. Considerações iniciais.....</b>	<b>18</b>
<b>1.2. Objetivos .....</b>	<b>20</b>
1.2.1. Objetivo Geral.....	20
1.2.2. Objetivos específicos .....	20
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1. Alumínio e suas ligas.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2. Elementos de liga .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3. Cabo termorresistente .....</b>	<b>23</b>
<b>2.4. Processo de fundição dos metais.....</b>	<b>24</b>
<b>2.5. Processos de solidificação dos metais .....</b>	<b>24</b>
2.5.1. Velocidade e taxa de resfriamento para ligas peritéticas.....	25
<b>2.6. Teste de termorresistividade.....</b>	<b>26</b>
<b>2.7. Estruturas de solidificação .....</b>	<b>26</b>
2.7.1. Zona Coquilhada.....	26
2.7.2. Zona Colunar .....	27
2.7.3. Zona Equiaxial.....	27
<b>2.8. Mecanismos de endurecimento .....</b>	<b>28</b>
2.8.1. Deformação Plástica .....	28
2.8.1.1. Energia de falha por empilhamento .....	29
2.8.1.2. Encruamento.....	32
2.8.1.3. Recuperação .....	33
2.8.2. Endurecimento Pela Formação de Precipitados.....	34
2.8.3. Coeficiente de Encruamento .....	35
2.8.3.1. Determinação do coeficiente de encruamento .....	35
2.8.3.2. Fatores que afetam o coeficiente de encruamento ( $\eta$ ).....	37
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1. Procedimento experimental .....</b>	<b>40</b>
<b>3.2. Fabricação dos corpos de prova .....</b>	<b>42</b>
<b>3.3. Caracterização elétrica das ligas .....</b>	<b>42</b>
<b>3.4. Caracterização mecânica da liga .....</b>	<b>44</b>
<b>3.5. Cálculo do coeficiente de encruamento (<math>\eta</math>) - método de Hollomon.....</b>	<b>44</b>

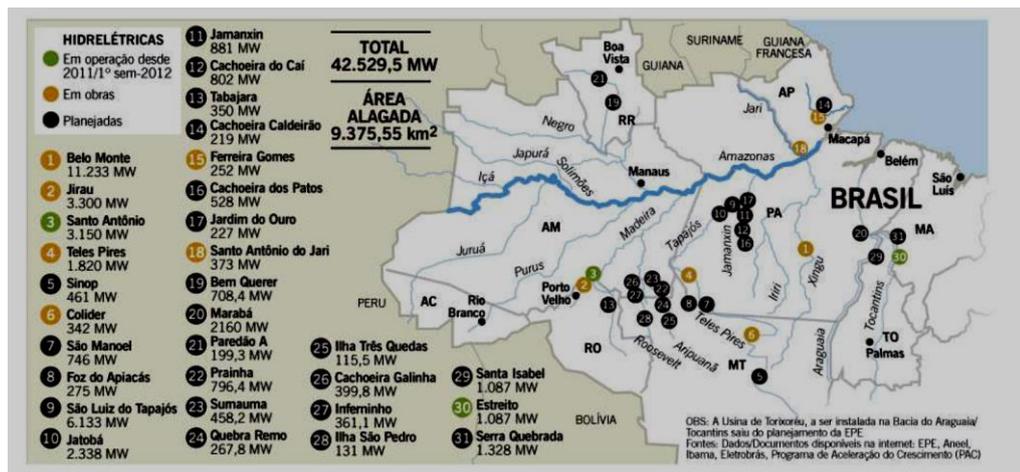
<b>3.6.</b>	<b>Teste de termorresistividade da liga .....</b>	<b>45</b>
<b>3.7.</b>	<b>Caracterização estrutural da liga .....</b>	<b>46</b>
3.7.1.	Procedimento De Preparação Das Amostras Para Análise Estrutural .....	46
3.7.2.	Procedimento experimental para caracterização estrutural das ligas.....	47
3.7.3.	Medidas do tamanho das microcavidades (dimples) .....	48
3.7.3.1.	Procedimento da interseção (ASTM E 112 - 96) .....	48
3.7.3.2.	Método dos diâmetros médios ou método da intersecção das linhas .....	49
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.</b>	<b>Análise química .....</b>	<b>50</b>
<b>4.2.</b>	<b>Caracterização elétrica e mecânica da liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr.....</b>	<b>50</b>
4.2.1.	Caracterização Elétrica da Liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr.....	51
4.2.2.	Caracterização mecânica da liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr .....	52
4.2.3.	Determinar o diâmetro que apresentar maior condutividade elétrica e LRT nas condições de STT e TT 150°C/4h da liga em estudo.....	52
4.2.4.	Análise da Correlação entre os valores do limite de resistência a tração (LRT) e o Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ). .....	53
4.2.5.	Avaliação da ductilidade: Liga STT. ....	55
4.2.6.	Avaliação da ductilidade: Liga TT 150°C/4h. ....	55
<b>4.3.</b>	<b>Teste de termorresistividade.....</b>	<b>56</b>
4.3.1.	Teste de termorresistividade: segundo o protocolo COPEL e a norma ASTM B941-10 para liga STT.....	56
4.3.2.	Teste de termorresistividade: segundo protocolo COPEL e a Norma ASTM B 941 – 10 para liga TT 150°C/4h.....	58
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>62</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é um sistema de geração e transmissão de energia elétrica, com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, englobando as cinco regiões do Brasil e com forte predomínio de usinas hidrelétricas (ONS, 2013). Cerca de 11 projetos hidrelétricos estão previstos para a Amazônia, entre 2018 e 2022. Outras oito usinas hidrelétricas têm implantação prevista entre 2013 a 2017 e já possuem licença prévia. A Figura 1 mostra um mapa com os projetos hidrelétricos previstos para os próximos anos na Amazônia (EPE, 2015).

**Figura 1** - Mapa de usinas hidrelétricas na Amazônia - Em operação, obras e planejadas.



**Fonte:** Empresa de Pesquisa Energética, 2015.

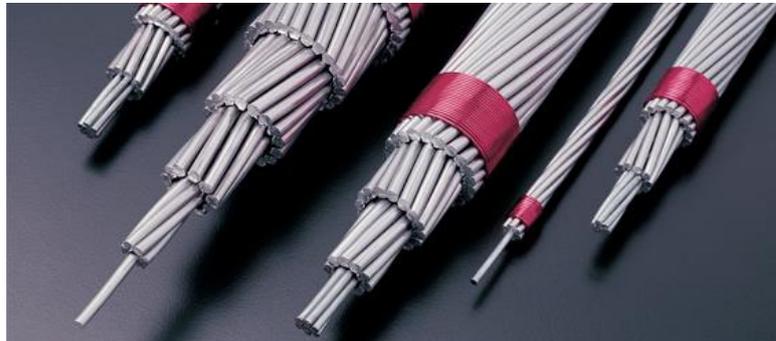
Como o aumento da temperatura nos cabos de linha de transmissão, que tem como principal consequência, a deterioração das propriedades mecânicas. Nesse contexto, vários pesquisadores tem se esforçado para encontrar uma liga que possua boas propriedades mecânicas mesmo quando submetidas a altas temperaturas.

É nesse cenário que o alumínio vem se destacando, devido a uma boa combinação de propriedades. O alumínio é um excelente meio de transmissão de energia, seja elétrica ou térmica. Um condutor elétrico de alumínio pode conduzir tanta corrente elétrica quanto um de cobre, que é duas vezes mais pesado e, conseqüentemente, mais caro. Por isso, o alumínio é muito utilizado pelo setor de fios e cabos (ABAL, 2014). Tais propriedades, que podem ser melhoradas e aliadas a outras podem produzir linhas de transmissão e distribuição de energia

elétrica cada vez mais eficiente e de menor custo. O conhecimento de diversos elementos de liga e seus efeitos sobre a estrutura do material é fundamental para esta finalidade.

É por isso que o alumínio é hoje material número um para aplicação nas linhas subterrâneas e aéreas, de transmissão, subtransmissão, distribuição e também em cabos para-raios que protegem os sistemas. Com peso específico significativamente inferior aos outros metais, o uso de cabos de alumínio para transporte de corrente elétrica reduz o peso nas estruturas de sustentação, minimizando o custo das redes com menores investimentos e menos manutenção (ABAL, 2014). A Figura 2 ilustra exemplos de cabos de alumínio de diferentes diâmetros.

**Figura 2** - Cabos de alumínio utilizados para transmissão de energia elétrica.



Fonte: ABAL (2014).

Ultimamente, em diversos ramos da engenharia, houve um aumento no interesse por ligas termorresistente, ou seja, aquelas que conseguem manter suas propriedades, principalmente as mecânicas, a altas temperaturas. Estudo de ligas de alumínio com adições de zircônio se apresentaram como uma maneira promissora de elevar a temperatura de recristalização de tais ligas.

Com o objetivo de melhorar, ou até mesmo criar novas ligas, que o grupo GPEMAT, composto por professores pesquisadores da Faculdade de engenharia mecânica (FEM) da Universidade Federal do Pará (UFPA) e alunos de graduação e pós-graduação em Engenharia Mecânica, desenvolve trabalhos ao combinar e aperfeiçoar as características dos materiais à base de alumínio, pois os investimentos realizados para modificar as linhas de transmissão já existentes com os cabos produzidos a partir destes novos materiais seriam bem menores se comparados aos atuais custos de manutenção das linhas já existente.

Por fim, este trabalho faz um estudo do efeito de um tratamento térmico sobre uma liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe modificada para o teor de 0,15% de Zr para verificar suas características e aplicabilidade para a transmissão e distribuição de energia elétrica.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo Geral

Este trabalho objetiva analisar o efeito de um tratamento térmico de 150°C por quatro (4) horas sobre a liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe, modificada para o teor de 0,15% de Zr para aplicação na transmissão e distribuição de energia elétrica por meio de fios e cabos.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- ✓ Determinar o diâmetro que apresentar maior Condutividade Elétrica e LRT nas condições de STT e TT 150°C/4h da liga em estudo.
- ✓ Analise da Correlação entre os valores do limite de resistência a tração (LRT) e o Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ).
- ✓ Avaliar a ductibilidade da liga Correlacionando Alongamento [ $\delta$ ], Razão das Cavidades [ $\sigma$ ] e do Coeficiente de Encruamento [ $\eta$ ] na condição de STT e TT150°C/4h.
- ✓ Avaliar o desempenho termorresistivo do material para o diâmetro que apresentar melhores respostas ao LRT, levando em consideração o Protocolo COPEL e a NORMA ASTM B941-10.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Alumínio e suas ligas

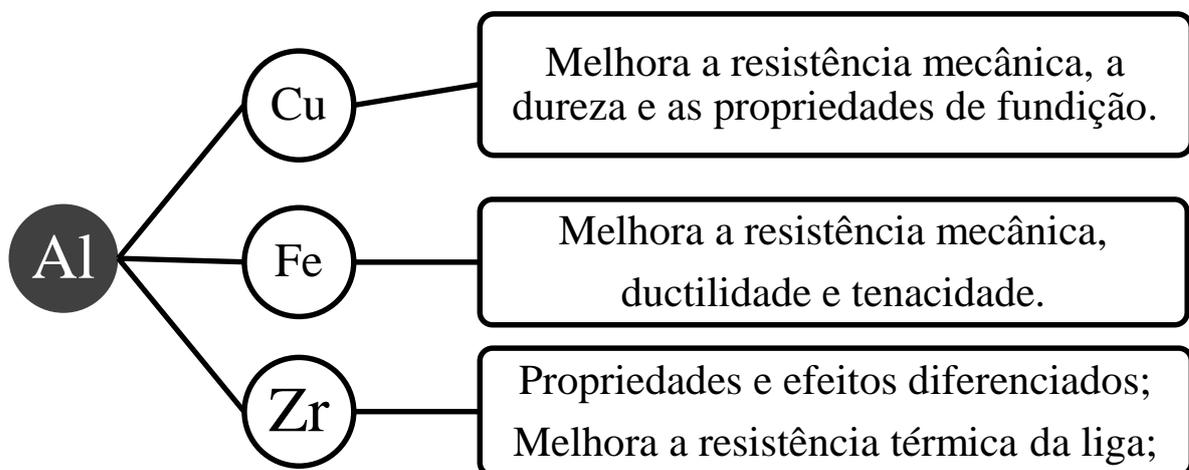
O alumínio e suas ligas são caracterizados por uma densidade relativamente baixa, altas condutividades elétrica e térmica e uma resistência à corrosão em alguns ambientes, incluindo o ambiente atmosférico (CALLISTER, 2007).

As condutividades elétrica e térmica do alumínio estão entre as mais altas de todos os materiais. O alumínio puro recozido tem cerca de 64% IACS (*International Annealed Copper Standard* – Padrão Internacional do Cobre Recozido) e o seu limite de resistência à tração alcança 100 MPa (HORIKOSHI et al., 2006, p. 1).

O alumínio tem uma baixa resistência mecânica e não pode ser usado diretamente em aplicações onde a resistência à deformação e à fratura é fundamental. Por este motivo, são adicionados ao alumínio outros elementos, em pequenas percentagens, que melhoram a sua resistência mecânica, sem uma deterioração considerável das outras propriedades, dando origem às ligas de alumínio. As diferentes combinações possíveis entre o alumínio e os elementos de liga têm permitido o desenvolvimento de novas ligas, direcionadas para aplicações finais específicas. (CHIAVERINI, 2003).

A adição de outros metais para a formação de ligas diminui a condutividade elétrica do alumínio, porém essa inserção provoca benefícios adicionais como o aumento na resistência mecânica. A Figura 3 mostra a influência da adição de elementos na condutividade elétrica do Al.

**Figura 3** - Elementos de liga.



**Fonte:** Adaptado de POLMEAR, 2000.

## 2.2. Elementos de liga

Um dos aspectos que tornam as ligas de alumínio tão atraentes é o fato de o alumínio poder combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, chamados de elementos de liga. Com essas associações, é possível obter características tecnológicas ajustadas de acordo com a aplicação do produto final. Mas para isso, é preciso conhecer bem as vantagens e limitações de cada elemento para fazer a melhor seleção (PRAZERES, 2007). Como os materiais utilizados neste estudo são: Cobre, Ferro e Zircônio, daremos ênfase nestes quatro.

**Cobre:** melhora substancialmente a resistência mecânica e dureza do alumínio nas condições como fundido e tratado termicamente. Ligas contendo de 4 a 5,5% de cobre respondem mais fortemente a tratamentos térmicos e demonstram propriedades de fundição relativamente melhores. O cobre geralmente reduz a resistência à corrosão e em composições específicas aumenta a suscetibilidade à corrosão conjugada à tensão no alumínio, contudo, baixos teores de cobre em ligas de Al-Zn inibem este efeito. Em adição, o cobre reduz a resistência ao rasgamento à quente e eleva o potencial para contração interdendrítica (KAUFMAN; ROOY, 2004).

**Ferro:** geralmente é uma impureza presente em praticamente todas as ligas de alumínio, mas em algumas delas pode estar presente como um importante elemento de liga, adicionado, porém em teores sempre inferiores a 1% (MERCES, 2008). O ferro apresenta alta solubilidade no alumínio fundido e por esta razão é facilmente dissolvido em todos os estágios de produção. A solubilidade do ferro no estado sólido é muito baixa, aproximadamente 0,05%, conseqüentemente a maior quantidade de Ferro presente no alumínio encontra-se apenas como fase intermetálica secundária, diluída frequentemente com outros elementos. Por causa da limitada solubilidade, o ferro é usado em condutores elétricos com o objetivo de aumentar a resistência mecânica da liga e melhorar moderadamente suas características de fluência a altas temperaturas (ASM INTERNATIONAL, 1998).

**Zircônio:** Pesquisas têm revelado que a adição em pequenas quantidades de zircônio no alumínio, causa a diminuição dos tamanhos dos grãos. No entanto, esse efeito de refinamento é menor quando comparado com o titânio (YANAGISAWA *et. al.*, 1956).

Apesar do maior potencial do titânio para refinar grão em relação ao zircônio, Lima (2014) constatou em seu estudo que a adição de 0,26% de Zr numa liga base Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,7%Si, proporciona um LRT superior a tal liga base com mesmo teor de Ti.

Esse efeito da presença do zircônio na resistência mecânica da liga tem íntima relação com o tamanho de grão formado. Quanto menor o grão, maior é a área de contato de seu

contorno que serve como efetivo obstáculo para o movimento das discordâncias, o que leva ao aumento da resistência (MEYER; CHAWLA, 2009).

Ligas de Al-Zr são utilizadas como condutores de energia de alta resistência térmica, conhecidos como TAL (Liga de Alumínio Termorresistente), que tem como principal vantagem preservar as suas características mecânicas, ou não sofrerem uma deterioração considerável, mesmo quando expostas a altas temperaturas de operação, durante longos períodos de tempo (ultrapassando 20 anos). (HANDEL, 2004).

### 2.3. Cabo termorresistente

Cabos termorresistentes são formados a partir de ligas de alumínio acrescidas de elementos que são capazes de elevar sua temperatura de recristalização.

De forma genérica esses cabos constituem-se de matérias que suportam altas temperaturas de operação, com o mínimo de dilatação térmica linear, mantendo as características fundamentais de projeto. Na literatura especializada em metalurgia cita alguns destes componentes aditivos que podem melhorar as características do alumínio submetido a temperaturas mais elevadas (ASM INTERNATIONAL, 1998).

“Os cabos fabricados com essa liga apresentam características de recozimento e fluência em alta temperatura significativamente superiores em relação ao alumínio 1350 (alumínio comercialmente puro). Devido a essas características, um condutor com alumínio termorresistente pode ser utilizado em regime contínuo de trabalho em temperaturas de até 150°C sem que haja deterioração das características mecânicas, tais como: tração, alongamento e dureza, já para condutores de alumínio 1350 a temperatura máxima recomendável para regime contínuo de trabalho está em torno de 90 °C.

Considerando estas premissas e mesmas condições ambientais, o cabo de liga apresenta, em relação a um cabo de alumínio puro de mesma bitola, uma capacidade de corrente até 50% maior. Por outro lado para uma mesma capacidade de corrente, um condutor de liga teria uma área transversal aproximadamente 50% menor e redução de 20% a 30% no diâmetro externo, com redução significativa nos esforços sobre os suportes de uma linha de transmissão. Ainda considerando mesma bitola, o cabo de liga apresenta mesmo peso por km e mesma carga de ruptura que o cabo convencional.

Este tipo de condutor tem uma aplicação muito adequada no aumento da capacidade de corrente de barramentos de subestações e usinas, para atender ao aumento de potência dos sistemas de transmissão associados”. (RÉGIS JÚNIOR, 1999).

De acordo com CAVASSIN (2011), a utilização de cabos termorresistentes na recapitação das linhas de transmissão traz as seguintes vantagens:

- Baixo custo de implantação;

- Baixo custo das perdas em função do regime de trabalho;
- Redução considerável no impacto ambiental;
- Não aumento dos esforços nas estruturas.

Portanto, o desenvolvimento de novas ligas de alumínio termorresistente encontra um ambiente propício ao estudo e entendimento dos fatores que influenciam as propriedades destes materiais.

#### **2.4. Processo de fundição dos metais**

O objetivo fundamental da fundição é o de dar forma adequada ao metal, vertendo-o em estado líquido dentro da cavidade de um molde com a forma desejada. O próprio molde retira calor do metal líquido, provocando sua solidificação e fixando sua forma inicial. A transformação líquido-sólido por que passa o metal é de natureza ativa e dinâmica, já que durante a mesma ocorrem diversos eventos que, se não forem devidamente controlados, podem comprometer o desempenho do produto final ou, até mesmo, interromper a sequência de fabricação. Tais eventos podem dar origem a diversos tipos de heterogeneidades, que interferem drasticamente na qualidade metalúrgica do produto final. (PRATES; DAVIES, 1978).

#### **2.5. Processos de solidificação dos metais**

A solidificação é um processo de transformação de fase, na qual, certa quantidade de calor latente é liberada pelo material no estado líquido para possibilitar a nucleação e o crescimento da fase sólida (PRATES; DAVIES, 1978).

O fenômeno da solidificação dos metais apresenta-se em dois aspectos:

- Metalúrgico, ligado à composição química do metal;
- Térmico, relativo à história térmica anterior do metal, ou seja, como o calor foi transferido do interior da peça para o meio ambiente, a cada instante do processo.

A interação entre estes dois aspectos determinará as características da microestrutura do metal solidificado.

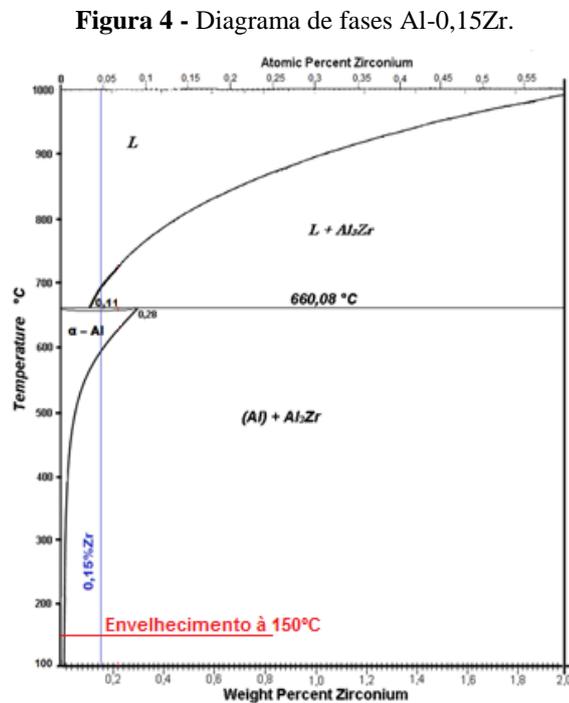
A solidificação se inicia quando o material no estado líquido atinge, durante o resfriamento, as condições termodinâmicas necessárias à transformação de fase líquida para a sólida. Nessas condições, havendo um gradiente de temperatura entre o material e o meio que absorve o calor, o calor latente liberado é removido através de um ou mais mecanismos de transferência de calor (GOULART, 2005).

### 2.5.1. Velocidade e taxa de resfriamento para ligas peritéticas.

As transformações peritéticas da liga de alumínio zircônio ocorrem em concentrações maiores de zircônio (Zr) Figura 4.

Segundo Kerr et al., (1974); as transformações peritéticas possíveis são:

- (i) a reação de equilíbrio peritética;
- (ii) a reação peritética de não equilíbrio ( resfriamento moderado);
- (iii) a eliminação da transformação peritética, com o aumento das taxas de resfriamento (tempera líquida) que favorecem as reações posteriores.



**Fonte:** Adaptado de HANDBOOK ASM METALS.

## 2.6. Teste de termorresistividade

Dentre as ligas para distribuição e transmissão de energia elétrica estão às ligas de alumínio termorresistente, conhecidas como TAL, que tem maior aplicação em países de clima tropical como o Brasil, onde as linhas de energia elétrica atingem maiores temperaturas de operação. O alumínio, com a adição de pequenas quantidades de zircônio, propicia a formação das ligas com características de termorresistividade. (KAMIZONO et al., 2011).

O ensaio específico de termorresistividade é aplicado segundo a especificação técnica da COPEL (Companhia Paranaense de Energia Elétrica – Especificação: 00000-30009-082 REV 01, 2006) que prediz que para a execução do ensaio de verificação da característica de termorresistência, as amostras dos fios de alumínio termorresistente deverão ser submetidas a uma temperatura de 230° C durante 1 hora, e a carga de ruptura não deverá ser menor do que 90% do valor original. O atendimento a este critério caracteriza o material como termorresistente. E da Norma ASTM B941, que para a liga de Al – Zr serem enquadradas como termorresistente o condutor elétrico não deve apresentar perda superior a 10% de seu limite de resistência a tração (LRT) quando submetido à temperatura de 280°C por uma (01) hora e resfriado à temperatura ambiente.

## 2.7. Estruturas de solidificação

### 2.7.1. Zona Coquilhada

De acordo com Oliveira (2001), no vazamento o líquido que entra em contato com as paredes do molde frio é rapidamente resfriado abaixo da temperatura *líquidus*, conseqüentemente formam-se muitos núcleos sólidos na parede do molde que vão crescer. À medida que a parede do molde vai aquecendo, é provável que muitos dos cristais que já se formaram se desliguem da parede do molde em consequência da turbulência do metal líquido. Se a temperatura de vazamento for baixa, o líquido irá resfriar rapidamente abaixo da temperatura *líquidus* e os cristais que se soltaram terão chance de continuar crescendo, pois o líquido é rapidamente cheio de pequenos cristais, apresentando uma estrutura equiaxial, sem região colunar. No entanto se a temperatura de vazamento for elevada, o líquido no centro do lingote permanecerá acima da temperatura *líquidus* por um tempo maior e os cristais que se

soltaram voltarão a se fundir, apenas os cristais que permaneceram junto à parede do molde irão se desenvolver.

### 2.7.2. Zona Colunar

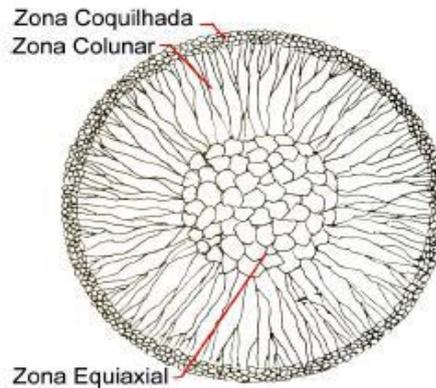
Segundo Soares (2000), pouco depois do vazamento do metal no molde, o gradiente de temperatura na parede do molde diminui e os cristais na região coquilhada crescem, desenvolvendo dendritas em determinadas direções cristalográficas. Os cristais cuja direção estiver próxima da direção do fluxo de calor, ou seja, perpendicular às paredes do molde, crescem mais rapidamente podendo prevalecer sobre outros com orientação menos favorável. Isto leva à formação de grãos colunares todos com a direção praticamente perpendicular às paredes do molde. Cada cristal colunar contém vários braços de dendritas primárias, sendo que à medida que aumenta o diâmetro destes grãos aparecem mais braços primários.

### 2.7.3. Zona Equiaxial

Oliveira (2001), diz que a zona equiaxial consiste de grãos equiaxiais aleatoriamente orientados no centro do molde. A formação desta região pode ser atribuída a braços secundários das dendritas que se desprendem da dendrita primária. Desde que a temperatura do líquido diminua antes deste pedaço de sólido volte a fundir, ele pode atuar como agente de nucleação. Assim quanto maior a temperatura de vazamento, menor a tendência para se formarem grãos equiaxiais.

A Figura 5 nos exemplifica as estruturas de solidificação de um molde formato “U” (PRATES e DAVIES, 1978).

**Figura 5** - Estrutura esquemática de lingote apresentando zona coquilhada zona colunar e zona equiaxial.



**Fonte:** Adaptado de PATRES (1978).

## 2.8. Mecanismos de endurecimento

Por diversas situações se faz necessário projetar uma liga com alta resistência, mas que ao mesmo tempo possua certa ductilidade e tenacidade; entretanto, o que ocorre na maioria das vezes é o alcance de uma dessas propriedades em detrimento da outra.

Inúmeras são as técnicas disponíveis para promover o endurecimento de uma liga metálica, todas elas adotando como princípio básico a geração de impedimentos para a mobilidade das discordâncias. No entanto, para que se mantenha um foco no escopo da atual discussão, nos restringiremos numa revisão dos mecanismos de endurecimento por deformação plástica a frio e pela formação de precipitados.

### 2.8.1. Deformação Plástica

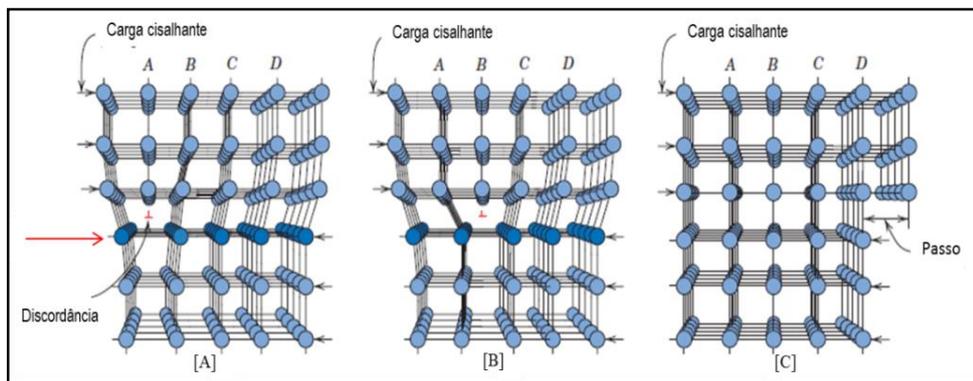
Apesar dos metais poderem ser solicitados por tração ou compressão, a maior parte são menos resistentes ao cisalhamento que os dois tipos de solicitação citados anteriormente. Segundo Van Vlack (1970), o cisalhamento pode causar deformação plástica ou escorregamento de um plano atômico em relação aos outros.

A deformação plástica envolve o movimento de um grande número de discordância, no qual possui tensão de cisalhamento crítico mínimo na direção de menor vetor de Burgers, ou seja, a de menor distancia de deslocamento de uma discordância e onde são concentradas as maiores densidades atômicas. Como pode ser visto na Figura 6, o movimento de uma discordância ocorre quando uma tensão de cisalhamento é aplicada como é indicado na Figura

6 [a], forçando o plano A para direita. Isso faz com que a metade dos outros planos superiores, B, C, e D, sejam empurrados também. Se houver tensão de cisalhamento suficiente para que ocorra quebra de ligações atômicas, a metade superior do plano B se torna plano extra, ao passo que a metade inferior de B se liga a parte superior de A, figura 6[b].

Durante o deslocamento do semiplano extra a estrutura cristalina é rompida, Figura 6 [b] e [c], causando no transcorrer desse processo a deformação permanente do material.

**Figura 6** - Mecanismo de deslizamento de discordâncias na deformação plástica.

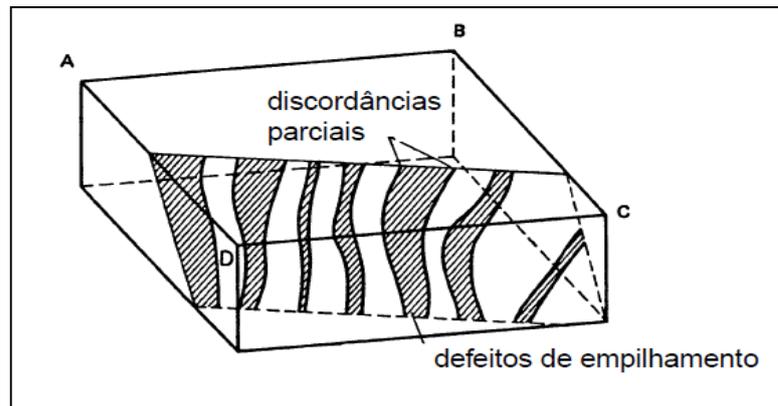


Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2007.

### 2.8.1.1. Energia de falha por empilhamento

A falha de empilhamento é um defeito bastante comum nos materiais cúbicos de face centrada (CFC) e cúbicos de corpo centrados (CCC), geradas durante a deformação plástica. Terá mais ou menos falhas de empilhamento de acordo com a sua energia de falha de empilhamento (E.F.E.) - um parâmetro sensível à composição química. A EFE ocorre quando, em uma pequena região do material, há uma falha na sequência de empilhamento de planos compactados. Os defeitos de empilhamento são limitados por discordâncias parciais, mostradas na Figura 7. Estas discordâncias parciais se repelem. Quanto maior for a energia por unidade de área do defeito de empilhamento, mais próximas estarão as discordâncias parciais, de modo a minimizar a área defeituosa (PADILHA, 2000).

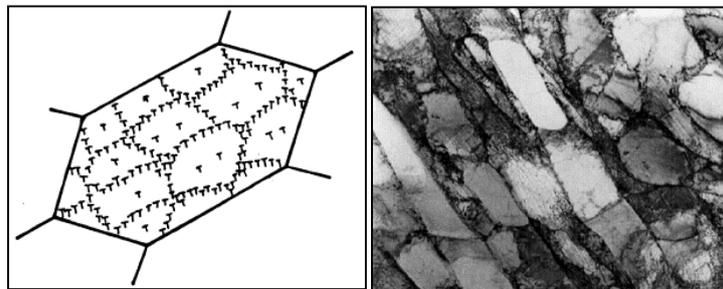
**Figura 7** - Discordâncias parciais delimitando defeitos de empilhamento.



Fonte: PADILHA, 2010.

Metais com alta energia de falha de empilhamento, tais como o alumínio ( $166 \text{ mJ/m}^2$ ) apresentam distribuição heterogênea de discordâncias e formam uma subestrutura celular como mostrado na figura 8. Isso implica em discordâncias com alta mobilidade que tendem a ter uma maior facilidade de ocorrência de aniquilação e rearranjo de discordâncias, ou seja, um metal com alta EFE apresenta uma menor densidade de discordâncias que um metal de baixa EFE, para um mesmo grau de deformação (PADILHA e SICILIANO, 1996).

**Figura 8** - Desenho esquemático do arranjo celular de discordâncias em grão encruado.



Fonte: PADILHA e SICILIANO, 1996; BARLAT et al., 2003.

Conforme D'Oliveira, (2011), metais com baixa EFE desenvolvem grandes e numerosas falhas de empilhamento no encruamento, e têm características mecânicas diferentes dos metais com alta EFE.

As falhas de empilhamento influenciam de forma marcante as características mecânicas dos materiais metálicos. Discordâncias dissociadas não podem realizar um movimento importante, que é o deslizamento cruzado. Assim, metais CFC com baixa energia de falha de empilhamento têm grande densidade de falhas, e costumam apresentar as seguintes características: Produzem arranjos planares de discordâncias no encruamento;

Possuem alta expoente de encruamento ( $n$ ); Possuem resistência à fluência, ou seja, ao amolecimento com a temperatura.

A Energia de Falha de empilhamento é o fator que controla os processos termicamente ativados de escorregamento cruzado e conseqüentemente a resistência a deformação, influenciando de forma marcante nas características mecânicas dos materiais metálicos. Metais com baixa energia de falha de empilhamento geralmente desenvolvem grandes e numerosas falhas de empilhamento no encruamento e têm características mecânicas diferentes dos metais com alta energia de falha de empilhamento. Algumas conseqüências são associadas à energia de falha de empilhamento, como por exemplo, uma energia de empilhamento muito baixa apresenta maior quantidade de discordâncias, maior energia armazenada de deformação, recristalização mais fácil, maior resistência a fluência, maior suscetibilidade à corrosão sobtensão, entre outras. Metais com baixa energia de falha de empilhamento geralmente desenvolvem grandes e numerosas falhas de empilhamento no encruamento e têm características mecânicas diferentes dos metais com alta energia de falha de empilhamento.

O níquel, elemento com estrutura cristalina CFC, estabiliza este tipo de estrutura e aumenta a energia de falha de empilhamento, reduzindo assim a dissociação de discordâncias. Assim como o níquel, o ferro também influi bastante sobre a energia de falha de empilhamento, devido à elevada solubilidade desses elementos no cobalto.

Elementos que apresentam estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), como o tungstênio e o molibdênio, reduzem a energia de falha de empilhamento, favorecendo a dissociação de discordâncias, de tal modo que a liga de cobalto torna-se mais dura e menos dúctil. Por outro lado, a adição de ferro e de níquel contrabalança este efeito, ao estabilizar a fase CFC e reduzir a dissociação de discordâncias.

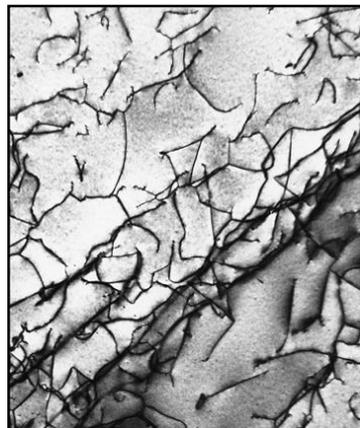
As falhas de empilhamento, além de endurecem o material ao dificultar o deslizamento cruzado e, conseqüentemente a movimentação de discordâncias, favorecem a formação de carbetos, ao atuarem com sítios para a nucleação de carbetos. Após envelhecimento forma-se uma fina dispersão de carbetos que contribuem para aumentar a resistência à tração e à fluência (INFOMET, 2016).

### 2.8.1.2. Encruamento

Para Jorge (2013), o encruamento, também conhecido como trabalho a frio, é um fenômeno no qual um material metálico é endurecido por uma deformação plástica realizada pelo trabalho a frio. Esse endurecimento ocorre pelo aumento da densidade de discordâncias e imperfeições oriundas da deformação que impede o deslizamento dos planos atômicos. A Figura 9 ilustra a densidade de discordâncias observada em uma região de uma liga de titânio.

Metais com alta energia de falha de empilhamento, tais como o alumínio (166 mJ/m<sup>2</sup>) apresentam distribuição heterogênea de discordâncias e formam uma subestrutura celular como mostrado na Figura 9. Isso implica em discordâncias com alta mobilidade que tendem a ter uma maior facilidade de ocorrência de aniquilação e rearranjo de discordâncias, ou seja, um metal com alta EFE apresenta uma menor densidade de discordâncias que um metal de baixa EFE, para um mesmo grau de deformação (PADILHA e SICILIANO, 1996).

**Figura 9** - Micrografia eletrônica de transmissão de uma liga de titânio, onde as linhas escuras correspondem a discordâncias.



Fonte: CALLISTER, 2007.

Com o aumento do encruamento, gerando como consequência um maior impedimento para a mobilidade das discordâncias devido suas próprias interações e com outros obstáculos, como solutos, contornos de grão e etc., uma força cada vez maior se faz necessário para o andamento da deformação. Através de tratamento térmico por recozimento, pode-se remover o acúmulo das discordâncias, eliminando assim o encruamento (TERTULIANO, 2013).

### 2.8.1.3. Recuperação

Na recuperação, que ocorre após a deformação plástica, uma parte da energia da interna que se encontra armazenada é liberada devido ao movimento de discordância, como resultado da difusão atômica em altas temperaturas. Ocorre nesse instante a aniquilação parcial das discordâncias e um rearranjo na configuração das remanescentes, com baixa energia de deformação (CALLISTER, 2001). Estas mudanças restabelecem parcialmente os valores das propriedades mecânicas aos valores anteriores à deformação. Existem basicamente dois tipos de recuperação:

- Recuperação dinâmica – Ocorre durante o processo de deformação plástica em virtude da saturação da armazenagem de defeitos cristalinos pelos grãos, levando à formação de uma microestrutura de subgrãos.
- Recuperação estática – Ocorre após o processo de deformação plástica, sendo provocada por flutuações térmicas.

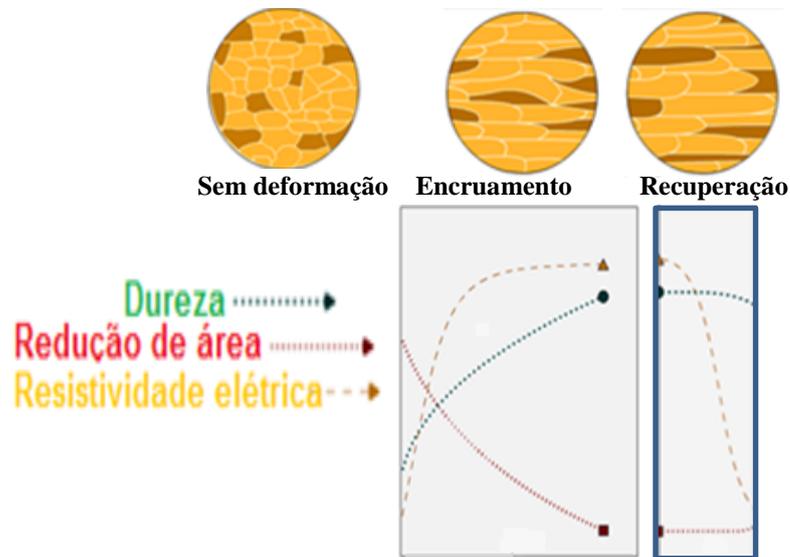
Santos (2005) sugere que, na recuperação estática há poucas mudanças na resistência mecânica e na dureza, que dependem principalmente da densidade das discordâncias, mas há uma redução sensível da resistividade elétrica, que depende principalmente dos defeitos intersticiais, tendendo a recuperar seu valor original.

“Na recuperação dinâmica, a tensão aplicada, que provoca a deformação do material, se adiciona às tensões que agem entre as discordâncias. Assim, os efeitos da recuperação dinâmica podem ser observados a temperaturas muito baixas, onde as tensões aplicadas podem ser elevadas. A recuperação dinâmica tende a diminuir a velocidade de encruamento e não é igual em todos os metais”. (FERNANDEZ, 2011).

Espósito (2006) afirma que, como as propriedades dos materiais estão intrinsecamente relacionadas ao seu estado microestrutural, a recuperação pode ser avaliada medindo-se as alterações nas propriedades mecânicas, resistividade elétrica e tensões residuais.

A figura 10 mostra um esquema, para uma liga metálica qualquer, que descreve a influência do tratamento térmico sobre a dureza, estrição e resistência elétrica. (CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2010).

**Figura 10** - Esquema do efeito do trabalho à frio.



Fonte: CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2010.

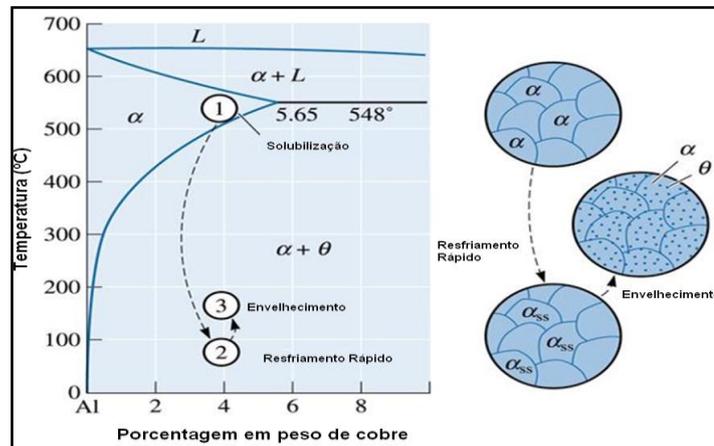
### 2.8.2. Endurecimento Pela Formação de Precipitados

Estas partículas podem se formar durante alguma operação termal abaixo da linha solvus. Acima dessa linha, tem-se a completa dissolução dos precipitados, gerando uma solução sólida homogênea, resultante de um tratamento térmico conhecido como solubilização. Após esta etapa, uma têmpera forma uma solução sólida supersaturada, pois neste regime de resfriamento, os átomos não têm tempo para se difundir em direção a locais de nucleação e com isto, não ocorre a formação de outra fase.

Após a solubilização, o metal passa pelo processo envelhecimento, que é uma etapa responsável pela formação de finos precipitados. Esse processo ocorre em temperaturas relativamente baixas, por esse motivo os átomos difundem-se em distâncias muito curtas para locais de nucleação. Como consequência, se tem a formação de precipitados muito pequenos e dispersos de forma bem homogênea na matriz de alumínio (ASKERLAND; PHULÉ, 2008). Nesse procedimento, é possível atingir o máximo de dureza para um determinado tempo de tratamento, após o qual o crescimento excessivo dos precipitados e a consequente perda de coerência dos mesmos com a matriz levam à queda de dureza denominada superenvelhecimento (CALLISTER, 2001).

A Figura 11 mostra o diagrama da liga de Al-4%Cu com a etapa de tratamento térmico e respectivas microestruturas.

**Figura 11** - Diagrama de fase de alumínio-cobre mostrando as três etapas do tratamento térmico de envelhecimento e as microestruturas produzidas durante o processo.



Fonte: ASKELAN, 2002.

### 2.8.3. Coeficiente de Encruamento

A quantidade de deformação a frio do material é representada pelo coeficiente de encruamento  $\eta$ , ou seja, este representa a quantidade de encruamento do material. Vários modelos matemáticos foram propostos por pesquisadores para cálculo do coeficiente de encruamento ( $\eta$ ), De acordo com Hoechele (2011, p.29).

#### 2.8.3.1. Determinação do coeficiente de encruamento

O coeficiente de encruamento é, normalmente, definido em função da equação de Hollomon (1945), apresentada no ensaio de tração. Pode-se demonstrar que o coeficiente de encruamento,  $n$ , é igual à deformação uniforme ocorrida até o início da estricção. Quanto maior for o coeficiente de encruamento maior será a capacidade do material se deformar, em tração, sem que ocorra a estricção.

O material encruado produz um novo conjunto de valores para a curva tensão-deformação. Como esse estado é caracterizado por uma redução de área transversal considerável, é mais conveniente trabalhar na zona plástica com valores de tensão e deformação verdadeiras.

A curva de encruamento para ligas de alumínio, quando plotada como função das tensões e deformações sofridas, é satisfatoriamente descrita pela Eq. de Hollomon, cuja relação matemática, de caráter absolutamente experimental, é (POLMEAR, 2005):

$$\sigma_r = K \varepsilon_r^n \quad (2.1)$$

“ $K$ ” é o coeficiente de resistência,

“ $\sigma_v$ ” a tensão verdadeira.

“ $\varepsilon_v$ ” a deformação verdadeira.

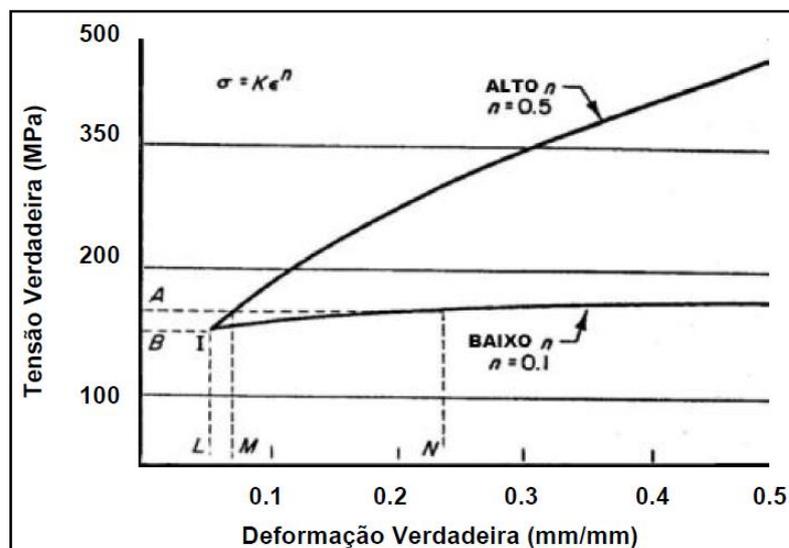
“ $n$ ” Coeficiente de encruamento.

Estas grandezas variam de um material para outro, além de dependerem da condição do material (tratado termicamente, conformado a quente ou a frio, etc.) (CALLISTER, 2007).

Estudos realizados por Hollomon (1945) mostraram que o coeficiente de encruamento possui uma relação dependente com o limite de resistência do material. Os experimentos realizados por este autor em aços carbono mostraram que, alterando a composição química do material e submetendo estes materiais a diversas condições de tratamentos térmicos, o coeficiente de encruamento apresentou uma clara dependência com o limite de resistência.

Sroul Junior (2002) afirma que o expoente de encruamento ( $n$ ) determina o aumento de tensão para cada incremento de deformação. Valores elevados de ( $n$ ) apontam para materiais mais duros e mais resistentes à estrição. As modificações que ( $n$ ) provoca na curva tensão-deformação real são mostradas na Figura 12.

**Figura 12** - Influência de  $n$  sobre a curva tensão-deformação real.



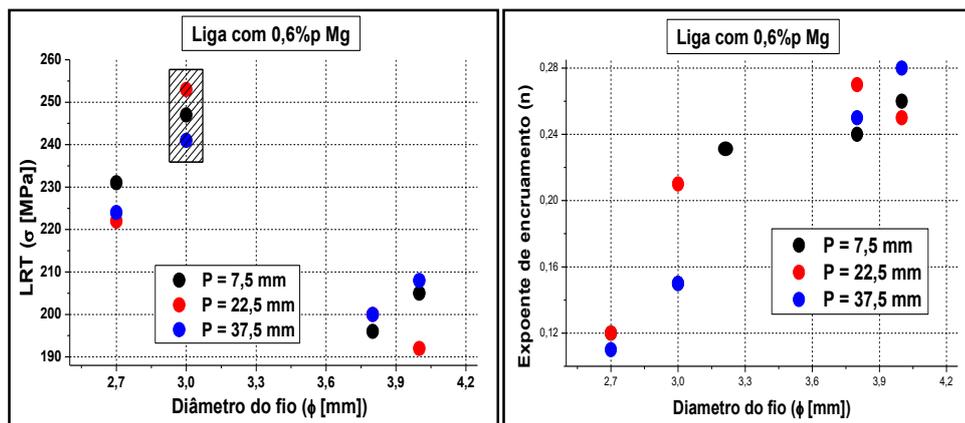
Fonte: KEELER, 1968 (apud SROUR JUNIOR, 2002).

### 2.8.3.2. Fatores que afetam o coeficiente de encruamento ( $\eta$ ).

Alterações promovidas nas propriedades mecânicas de um material por meio de tratamentos térmicos ou mecânicos podem afetar o coeficiente de encruamento  $\eta$ . Estudos realizados por Hollomon (1945) mostraram que o coeficiente de encruamento possui uma relação dependente com o limite de resistência do material.

Estudos realizados por Tertuliano (2013) em ligas de alumínio não deformados mostram que para valores elevados de LRT têm-se coeficientes de encruamento baixos. Em ligas deformadas de alumínio o comportamento do coeficiente de encruamento ( $\eta$ ), se configura de forma oposta à sua resistência (LRT). A medida que os diâmetros do fio aumenta verifica-se o decréscimo nos valores de limite de resistência a tração e um crescimento nos valor de ( $\eta$ ). (CARDOSO, 2013), Figura 13.

**Figura 13** - Influência de  $\eta$  sobre a curva tensão-deformação real.



Fonte: CARDOSO, (2013)

Experimentos realizados por Han et al., (2003) na liga de alumínio AA5083 mostraram a dependência do coeficiente de encruamento com o tamanho de grão, onde obteve-se um aumento do coeficiente de encruamento em função do aumento do tamanho de grão da liga AA5083 obtidos por meio de tratamentos termomecânicos.

Mishara et al., (2009) realizaram experimentos com a liga de alumínio AA1050, onde esta liga em uma condição metalúrgica recozida foi submetida a diversas condições de deformação a frio, e os resultados destes experimentos mostraram uma dependência do coeficiente de encruamento com o limite de deformação do material, ou seja, com a redução do limite de deformação houve redução do coeficiente de encruamento da liga de alumínio AA1050.

O coeficiente de encruamento está diretamente relacionado com as propriedades do material, e é definido como o expoente da relação entre tensão e deformação, conforme equação da conservação de energia descrita por Hollomon (1945), dessa forma, o coeficiente de encruamento determina o incremento de tensão para cada incremento da deformação do material que está diretamente relacionado com as propriedades do material (alongamento).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

As ligas produzidas nesse trabalho de pesquisa foram desenvolvidas para a fabricação de fios condutores de eletricidade a serem utilizados em linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, com o objetivo de maximizar a eficiência de condução dos cabos.

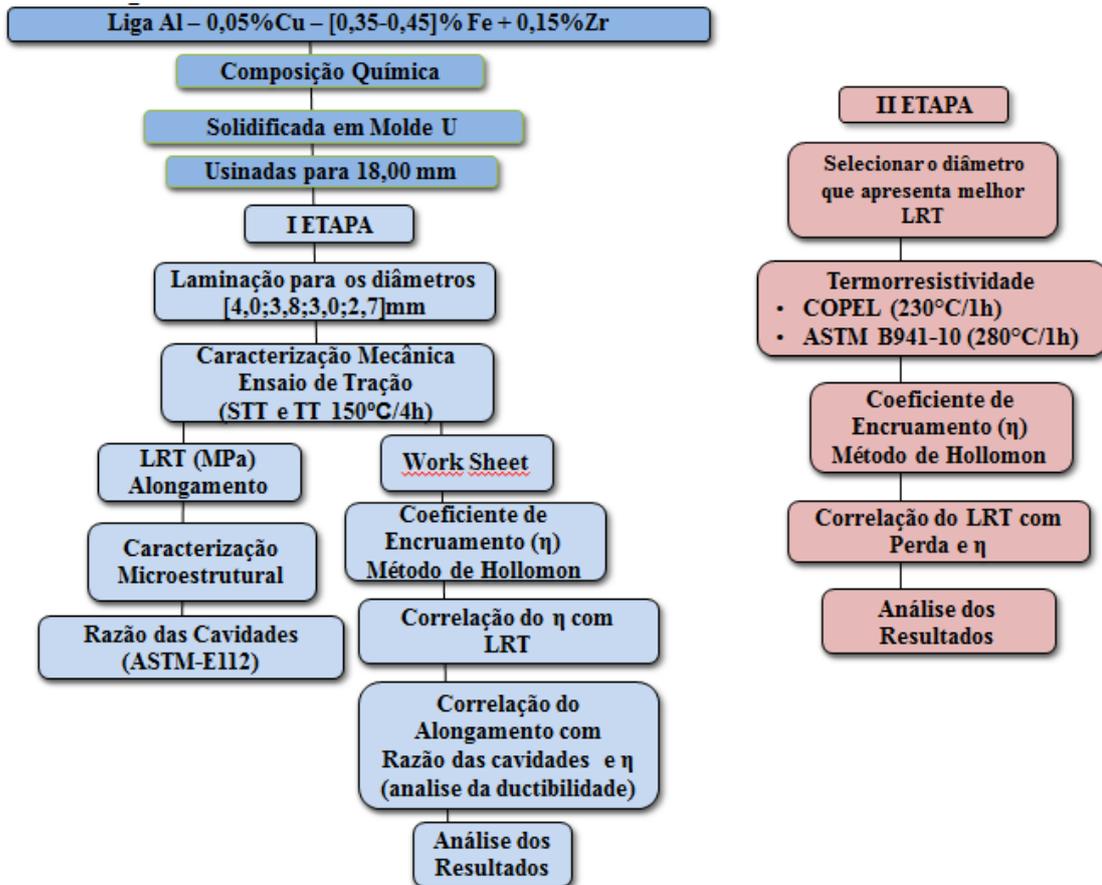
As ligas foram obtidas por fundição direta no laboratório de Metalografia e tratamento térmico da UFPA, a partir do alumínio comercialmente puro ou do alumínio eletro condutor (Al - EC). O balanceamento da composição química foi realizado pelo ajuste dos teores dos elementos até se alcançar 0,05% Cu (0,35 – 0,45)% Fe e 0,15% Zr, sendo todos os percentuais em peso. A aferição da composição química foi realizada através de ensaios após a obtenção da liga.

Para a condução do processo de fabricação das ligas pretendidas, o procedimento de preparação para a fundição se iniciou pelo corte e pesagem dos lingotes de alumínio e demais elementos constituintes. As massas balanceadas dos diversos materiais foram introduzidas num cadinho de carvão de silício de 3,5 l de volume, pintado internamente com solução de caulim para evitar aderência de material, o cadinho foi pré-aquecido à 130 °C por 25 minutos.

Após a obtenção da liga base [Al – 0,05% Cu – 0,4% Fe] foi realizada a adição de 0,15% Zr em cada cadinho, num sistema operacional para solidificação das ligas em molde “U”. Os lingotes foram desmoldados, usinados, laminados e feitos os ensaios de tração, segundo a norma NBR 6810, já os testes de termorresistividade seguiram as orientações do Protocolo COPEL e a norma ASTM B941, que para a liga de Al – Zr serem enquadradas como termorresistente o condutor elétrico não deve apresentar perda superior a 10% de seu limite de resistência a tração (LRT) quando submetido à temperatura de e 230 e 280°C por uma (01) hora, respectivamente, e resfriado à temperatura ambiente. O cálculo do coeficiente de encruamento a partir dos ensaios de tração e, os resultados da tensão x deformação Verdadeira, buscou-se calcular o seu encruamento utilizando o método de Hollomon.

Para um melhor entendimento dos procedimentos experimentais a Figura 14 contém o fluxograma esquemático de obtenção de parte dos resultados desenvolvida neste trabalho. E para tal, este foi dividido em duas (02)

**Figura 14** - Fluxograma esquemático de obtenção das ligas estudadas referentes às etapas I, e II.



Fonte: Autor, 2016.

### 3.1. Procedimento experimental

A Figura 15 mostra a serra fita que foi utilizada para cortar as barras de Al-EC, a balança digital utilizada para aferição da massa desejada para a preparação das ligas e o forno no qual foram executadas todas as operações de fundição.

**Figura 15** - Equipamentos laboratoriais: (A) serra fita, (B) balança digital, (C) forno.

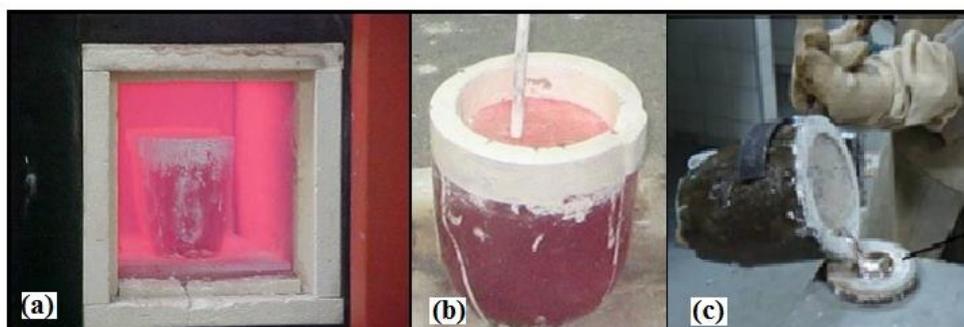


Fonte: GPEMAT (2014).

Após o tempo necessário para fusão completa dos elementos, o cadinho foi retirado do forno, e o metal líquido foi então agitado com uma haste de aço inoxidável, revestida com cimento refratário, para homogeneização.

Posteriormente a homogeneização da liga, o cadinho foi retirado novamente do forno para que fosse feita a injeção de gás inerte (argônio), através de um tubo de aço inoxidável ligado a um cilindro de 10m<sup>3</sup>, para que gases e impurezas de baixas densidades emergissem à superfície do banho, formando com isso uma camada de escória. A escória foi removida do banho com uma espátula de aço, para que então a amostra testemunho fosse retirada para a análise química, como pode ser visto na sequencia de imagens da figura 16.

**Figura 16** - Imagens da preparação e obtenção da liga fundida: (a) material ao forno para fundição; (b) injeção do gás inerte para formação de escória; (c) coleta de material para análise química.



Fonte: GPEMAT, 2014.

Após a coleta do material para análise química, o restante do metal líquido foi vazado num molde em coquilha que são duas paredes de aço alinhadas e parafusadas de modo a se obter uma cavidade com 22 mm de diâmetro. Assim como o cadinho, o molde em coquilha foi lixado e pintado para evitar a aderência do metal solidificado. A figura 17 mostra o molde em coquilha, o metal líquido sendo vazado e o metal solidificado desmoldado.

**Figura 17** - Imagens do molde em coquilha (a), do vazamento do metal líquido (c) e o metal solidificado desmoldado.



Fonte: GPEMAT, 2016.

### 3.2. Fabricação dos corpos de prova

Com a obtenção do material na forma fundida, como mostrado na figura 17 acima, as duas “pernas” do lingote foram serradas e usinadas de um diâmetro de 22 mm para 18,00 mm. Para a obtenção dos corpos de prova, o lingote foi laminado a frio até os diâmetros de 4 mm, 3,8 mm, 3 mm e 2,7 mm - os quais são amplamente utilizados na indústria de condutores elétricos para fins de Transmissão Tx e distribuição Dx de energia elétrica - em um laminador duo elétrico MENAC de secção circular de diferentes diâmetros. A figura 18 traz a imagem do laminador usado na fabricação dos corpos de prova.

**Figura 18** - Laminador duo elétrico MENAC usado na fabricação dos corpos de prova.

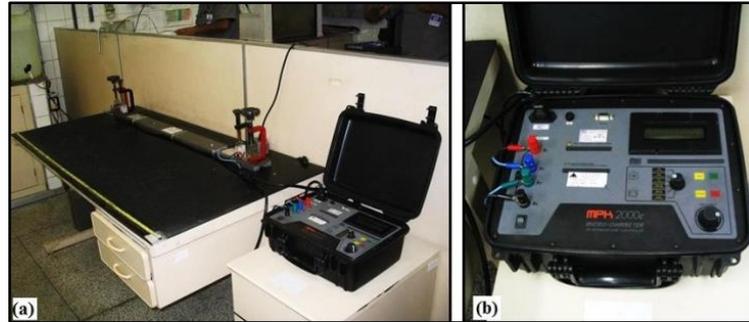


**Fonte:** Autor, 2016.

### 3.3. Caracterização elétrica das ligas

Objetivando a aferição das propriedades elétricas adotou-se como referencial a NBR-6814, que descreve com detalhes o método de medição de resistividade elétrica do condutor em corrente contínua, para fios e cabos elétricos. Para tanto, foi utilizado no procedimento de medição uma ponte de Kelvin MEGABRÁS modelo MPK-2000 figura 19.

**Figura 19** - Fotos do conjunto componentes da Ponte de Kelvin utilizada para medir resistência elétrica: (a) da Ponte de Kelvin e esquema de materiais durante a caracterização; (b) da Ponte de Kelvin.



Fonte: FREITAS, 2010.

As resistências elétricas dos fios nos diferentes diâmetros foram medidas em um intervalo de temperatura entre 10°C e 30°C, e posteriormente corrigida para a temperatura de 20°C como determina a norma NBR 5118. Depois de obtidos os resultados a partir da leitura das resistências dos corpos de provas, utilizou-se a equação fornecida pela norma NBR 6814 mostrada na Eq. 4.1.

$$R_{20} = R_t \left( \frac{1}{1 + \alpha(t - 20)} \right) \quad (4.1)$$

Sendo:

$t$  = temperatura na qual foi efetuada a medição, °C;

$R_t$  = resistência a  $T$  °C, em  $\Omega$ ;

$R_{20}$  = resistência corrigida a 20 °C, em  $\Omega$ ;

$\alpha$  = coeficiente de variação da resistência com a temperatura 20 °C, especificado pela norma para liga de alumínio.

Com a resistência já corrigida a 20 °C pode-se obter a resistividade, que é fornecida através da Eq. 3.2, obtida na norma NBR 6815.

$$R_v = \rho_c \cdot A \quad (4.2)$$

Sendo:

$R_v$  = resistência elétrica do CP por unidade de comprimento a 20 °C, em  $\frac{\Omega}{m}$ ;

$\rho_c$  = resistividade volumétrica do CP a 20 °C, em  $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$ ;

$A$  = área da seção transversal do CP, em  $mm^2$ .

Os resultados obtidos são posteriormente transformados em condutividade elétrica (IACS), “*International Annealed Cooper Standard*”, padrão internacional de condutividade correspondente à apresentada por um fio de cobre com 1m de comprimento, 1mm<sup>2</sup> de seção transversal a 20°C, através da fórmula:

$$\varphi = \frac{\rho_{Cu}}{\rho_{Al}} \quad (4.3)$$

Sendo:

$\varphi$  = a condutividade elétrica do fio em IACS;

$\rho_{Cu}$  = a resistividade elétrica do cobre em  $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$ ;

$\rho_{Al}$  = a resistividade elétrica do alumínio em  $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$ .

### 3.4. Caracterização mecânica da liga

Após os testes de resistividade e condutividade, os corpos de prova tiveram suas resistências mecânicas avaliadas através do ensaio de tração, que por sua vez foi realizado em uma máquina de ensaio universal KRATOS, modelo IKCL1 – USB acoplado a um computador com sistema de aquisição de dados Figura 19, pertencente ao laboratório de ensaios mecânicos do grupo GPEMAT. Os testes de tração foram realizados segundo a norma para cabos elétricos NBR 6810, executados em amostras com 20 cm de comprimento útil para a liga sem e com tratamento térmico.

**Figura 20** - Máquina de ensaio de tração KRATOS modelo IKCL1-USB acoplado ao computador com sistema de aquisição de dados.



Fonte: GPEMAT, 2016.

### 3.5. Cálculo do coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) - método de Hollomon

A partir dos dados obtidos no ensaio de tração (*Work Sheet*), calcula-se a tensão e deformação real ou verdadeira para plotagem do gráfico com a curva real e assim poder determinar o coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) segundo o método de Hollomon, equação 3.1.

$$\sigma = k \varepsilon^n \quad [3.1]$$

Aplicando as propriedades logarítmicas tem-se as equações 3.2 e 3.3.

$$\ln\sigma_1 = \ln K + n * \ln\varepsilon_1 \quad [3.2]$$

$$\ln\sigma_2 = \ln K + n * \ln\varepsilon_2 \quad [3.3]$$

Isolando log de k na equação 3.3

$$\ln K = \ln\sigma_2 - n * \ln\varepsilon_2 \quad [3.4]$$

Substituindo a equação 3.4 na 3.2;

$$\ln\sigma_1 = \ln\sigma_2 - n * \ln\varepsilon_2 + n * \ln\varepsilon_1 \quad [3.5]$$

Rearmando a equação 3.5 e colocando em evidencia o ( n), temos;

$$n(\ln\varepsilon_2 - \ln\varepsilon_1) = \ln\sigma_2 - \ln\sigma_1 \quad [3.6]$$

Reorganizando a equação;

$$n = \frac{\ln\sigma_2 - \ln\sigma_1}{\ln\varepsilon_2 - \ln\varepsilon_1} \quad [3.7]$$

A equação 3.7 será utilizada para os cálculos do coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) baseado na lei de Hollomon (1945), usando a curva tensão versus deformação real ou verdadeira entre o escoamento e a estricção.

### 3.6. Teste de termorresistividade da liga

Nesta fase do trabalho, o teste de termorresistividade foi aplicado ao diâmetro de melhor desempenho mecânico, após análise dos resultados da etapa um (I) limite de resistência a tração (**LRT**) e coeficiente de encruamento ( **$\eta$** ) o diâmetro de 3,0mm o que mostrou resultados mais satisfatórios, desta forma foram aplicados dois (02) teste de termorresistividade, de natureza térmica, de acordo com o protocolo COPEL e a norma ASTM B941-10, etapa dois do trabalho (II). O protocolo COPEL descreve que condutores elétricos caracterizados como termorresistentes não devem apresentar perda superior a 10% de seu limite de resistência à tração, quando submetidos à temperatura de 230°C por 1 (uma) hora. Para Norma ASTM B941-10, enquadram-se como liga termorresistente os condutores

elétricos que após serem submetidos a uma temperatura de 280°C por 1 hora não apresentem perda de superior de 10% do seu LRT.

Para execução do tratamento térmico a 230 e 280°C, utilizou-se uma estufa marca NEVONI, figura15c, e o um forno tipo MUFLA da marca GREFORTEC Figura 21 para a temperatura de 280°C.

**Figura 21** - Estufa usada no tratamento térmico da liga estudada.



Fonte: GPEMAT, 2016.

### 3.7. Caracterização estrutural da liga

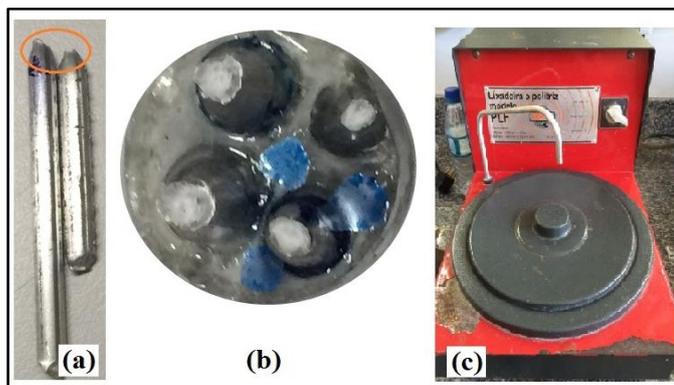
#### 3.7.1. Procedimento De Preparação Das Amostras Para Análise Estrutural

As características macroestruturais das ligas são reveladas em corpos de prova como fundidas, a partir do lixamento e polimento da secção cortadas do lingote. Após terem sido lixadas e polidas como o uso de uma politriz, as amostras foram atacadas por imersão em solução de “Keller” de composição [3mlHCl, 2ml HF, 5ml HNO<sub>3</sub>, 190ml H<sub>2</sub>O], preparadas segundo normatização técnicas de metalografia (ASM INTERNATIONAL, 2004). Após terem sofrido o ataque químico, as amostras foram lavadas em água corrente, e posteriormente com acetona e secada com um secador de ar quente.

A obtenção das microestruturas foi feita por um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) figura 22(a), usando-se o detector de elétrons retro espalhados, que torna possível observar a distribuição das partículas de segunda fase. As observações se deram a partir da superfície de fraturadas dos fios no ensaio de tração. Cortes transversais às proximidades da fratura da amostra foram embutidos com resina polimérica, afim facilitar o lixamento, feito

com uso de uma poltriz (figura 22 c), para perfeita planificação das bases das amostras que foram analisadas, figura 22 b.

**Figura 22** - (a) Identificação da região rompida para a análise no MEV, (b) embutimento dos cortes transversais dos corpos de prova para análise microestrutural e poltriz usada no lixamento das amostras.



Fonte: GPEMAT, 2016.

Para a limpeza das superfícies de fratura das amostras, foi usado um limpador ultrassônico com tanque de aço modelo METASOM – 14, figura 23. Esse aparelho emite ondas de ultrassom que age sobre uma solução de álcool etílico absoluto, P.A. 99,99 e acetona P.A.

**Figura 23** - Ultrassom modelo METASOM – 14.



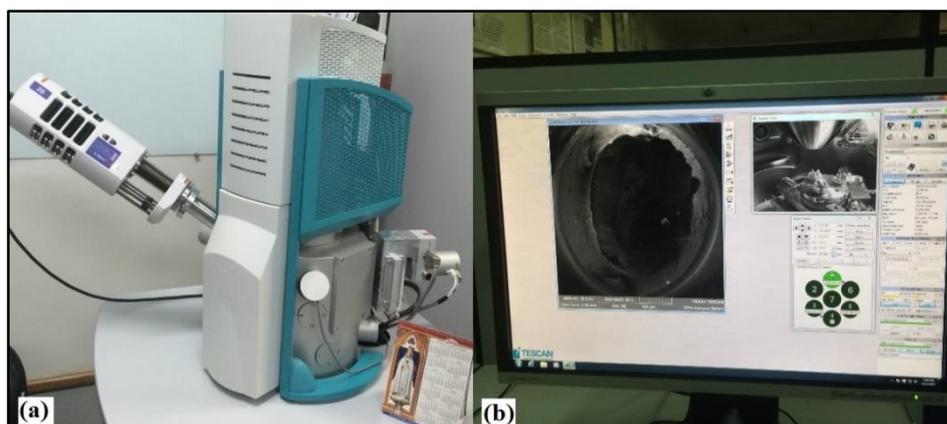
Fonte: GPEMAT, 2016.

### 3.7.2. Procedimento experimental para caracterização estrutural das ligas

A figura 24 mostra um microscópio eletrônico de varredura usado para a análise das amostras, e que também permite a obtenção de análises de espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDS), princípio esse fundamentado em medir a energia associada a

cada elétron dos átomos e íons, que são constantemente excitados pelo feixe de elétrons incidente do equipamento. Nesse microscópio foi possível capturar microimagens da superfície de fratura, com ampliações de 80X, 500X, 1000X, 2000X e 5000X.

**Figura 24** - (a) microscópio eletrônico de varredura – MEV e (b) imagem da superfície de fratura capturada pelo microscópio.



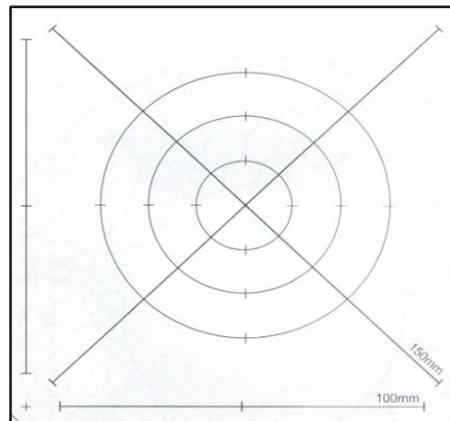
Fonte: GPEMAT, 2016.

### 3.7.3. Medidas do tamanho das microcavidades (dimples)

#### 3.7.3.1. Procedimento da interseção (ASTM E 112 - 96)

O procedimento, descrito por esta norma, envolve a determinação da contagem de contornos de grãos interceptados por linhas, as quais, nesse caso, serão os perímetros dos grãos. São utilizados diversos métodos para efetuar as medições por este procedimento, cada um utilizando diferentes geometrias conforme podemos ver na figura 25. As quatro linhas retas na imagem correspondem ao método Heyn, as três circunferências, que somam uma longitude de 500 mm representam o método de Abrams. Ainda pode ser utilizado um terceiro método, o método Hilliard, que utiliza uma circunferência de [100, 200 ou 250] mm. Como o objeto de estudo deste trabalho é avaliar o comportamento das microcavidades a partir das medições destas, e não há uma norma que reja este, foi feita uma adaptação desta norma, ASTM E112-96, para que se efetue a medição dos *dimples*.

**Figura 25** - Representação do método Heyn.



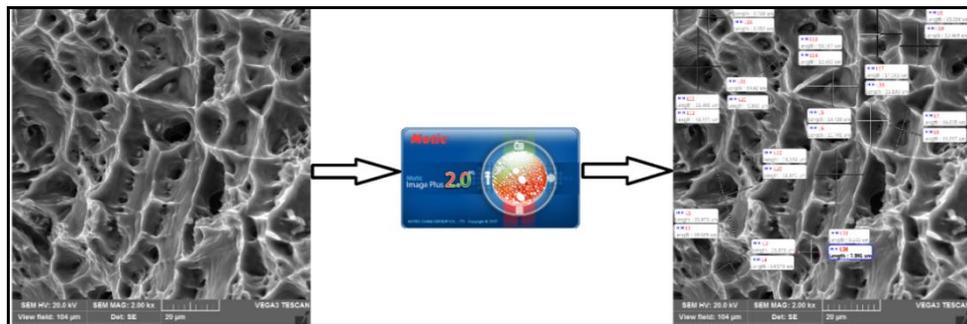
Fonte: ASTM E112-96.

### 3.7.3.2. Método dos diâmetros médios ou método da intersecção das linhas

Neste trabalho a medição do tamanho das microcavidades obedeceu à metodologia proposta para a obtenção da Razão  $[L/W]$  entre o comprimento (L) e a largura (W) das microcavidades, através da Eq. 4.4, com a qual se avalia se as microcavidades são esféricas; alongadas ou achatadas. Para tanto, foi utilizado o software MOTIC Plus 7.0, figura 26, que permite obter resultados com melhores precisões. Este método de dimensionamento das microcavidades foi também utilizado no trabalho de Narayanasamy et al., (2008).

$$\vartheta = \frac{L}{W} \quad (4.4)$$

**Figura 26** - Esquemático da análise das micrografias.



Fonte: GPEMAT, 2015.

Para cada amostra, foram feitas medições e obtidas vinte e duas razões  $[L/W]$  em diferentes microcavidades, e, posteriormente calculada a média dessas razões.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Análise química

Consta nesta etapa do trabalho a composição química dos lingotes e das ligas de alumínio fabricadas. a tabela 1 apresenta a composição em percentual de peso dos lingotes utilizados neste estudo. Na mesma tabela são apresentados os teores dos elementos para as ligas desejadas.

**Tabela 1** - Composição química do lingote utilizado para a fundição da liga base e os resultados desejados para cada liga.

Ligas	Elementos de liga (%p)		
	Cu	Fe	Zr
Composição do lingote	0,0038%	0,155%	0,0003%
Composição da liga Al-0,15%Zr	0,05%	[0,35 - 0,45]%	0,15%

Fonte: Autor, 2016.

Após a fundição das ligas, obteve-se o resultado da composição química do material produzido, conforme apresentado na tabela 2, indicando que o procedimento de cálculo estequiométrico efetuou-se corretamente, de acordo com a comprovação da análise em espectrômetro óptico. Portanto, as composições químicas obtidas estão de acordo com o escopo deste trabalho.

Tabela 2 - Composição química das ligas, após a solidificação.

Ligas	Elementos de liga (%p)			
	Cu	Fe	Zr	Al
Al-Cu-Fe-0,15%p Zr	0,046%	0,397%	0,148%	99,31%

Fonte: Autor, 2016.

### 4.2. Caracterização elétrica e mecânica da liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr

Nesta etapa do trabalho serão discutidos os resultados referentes ao teste de condutividade elétrica e ao ensaio de tração para a liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr tratada e não tratada termicamente em função de todos os diâmetros [2,7; 3,0; 3,8; e 4,0] mm.

#### 4.2.1. Caracterização Elétrica da Liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr

As propriedades elétricas foram avaliadas através da condutividade elétrica, como mostrado a seguir por meio de tabela com valores experimentais e gráficos. Inicialmente são apresentados, na Tabela 3, os valores que caracterizam as liga quanto às propriedades elétricas relacionadas aos diâmetros dos fios produzidos, tanto para a liga STT quanto para a liga TT 150°C/4h, para quatro (04) diferentes diâmetros  $\phi$  [4,00; 3,80; 3,00 e 2,70]mm.

**Tabela 3** - Resultados do ensaio de condutividade elétrica para a liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr sem (STT) e com (TT) tratamento térmico, bem como suas perdas percentuais.

Diâmetro dos Fios [ $\phi$ (mm)]	STT	TT 150°C/4h	Perda (%)
	Condutividade Elétrica(%IACS)	Condutividade Elétrica(%IACS)	
2,7	58,72	56,04	4,56
3,0	59,90	57,22	4,47
3,8	53,10	52,95	0,28
4,0	54,00	53,58	0,77

Fonte: Autor, 2016.

Nota-se na Tabela 3 que a liga sem e com tratamento térmico apresentaram comportamentos semelhantes na condutividade elétrica em função do diâmetro. Apesar do comportamento semelhante, a perda de condutividade da liga ao se aplicar o envelhecimento a 150°C por 4 horas, principalmente para os que menores diâmetros de fio contribuem para melhorar a condutividade elétrica, podendo este comportamento ser atribuído ao fenômeno da recuperação dinâmica.

Segundo Espósito (2006), diminui a densidade de defeitos no momento da deformação e, conseqüentemente, aumentando a condutividade elétrica. Nesse aspecto destaca-se a amostra com o diâmetro de 3 mm, pois sofre uma maior tensão nas cadeias de laminação.

Em ligas de alumínio contendo Zircônio, quando submetidas a tratamento térmico, há a precipitação de partículas de segunda fase, que são os trialuminetos  $Al_3Zr$ . Estas partículas durante a deformação plástica atuaram como obstáculos para a movimentação das discordâncias, fazendo com que o fenômeno do encruamento fosse mais acentuando na liga tratada termicamente, reduzindo sua condutividade elétrica Knipling (2007).

#### 4.2.2. Caracterização mecânica da liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr

Através dos resultados gerados pelo ensaio de tração, mostrados na Tabela 4, pode-se avaliar que com o tratamento térmico houve uma tendência de aumento no limite de resistência à tração (LRT).

**Tabela 4** - Resultados do Limite de resistência à tração (LRT) da liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr sem tratamento térmico (STT) e tratada termicamente (TT) a 150°C/4 h.

Diâmetro dos Fios[ $\phi$ (mm)]	STT	TT150°C/4h	Aumento (%)
	LRT (MPa)	LRT (MPa)	
2,7	197,52	208,67	5,64
3,0	204,64	214,77	4,95
3,8	170,52	180,83	6,04
4,0	174,24	185,36	6,38

Fonte: Autor, 2016.

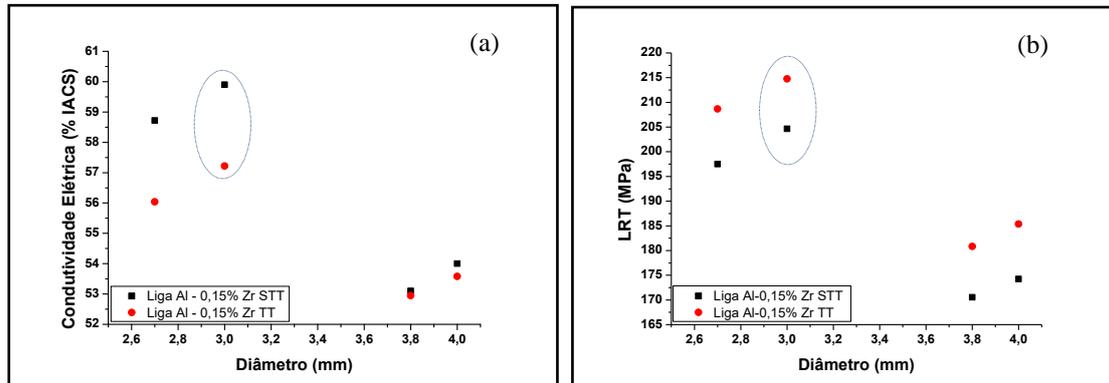
Na tabela 4, os resultados dos ensaios de tração em função dos diâmetros de amostras da liga em estudo, menores diâmetros de fio contribuem para melhorar a resistência mecânica onde o diâmetro de 3,00 mm se destaca novamente, sendo este comportamento atribuído também ao fenômeno da recuperação dinâmica, que diminui a densidade de defeitos no momento da deformação, aumentando, desse modo, a resistência mecânica e o comportamento quanto ao grau de deformação aplicado nos corpos de prova avaliados. Percebe-se que os valores de LRT aumentam com a evolução da deformação plástica. Para Bresciane Filho (1999), esse fato se deve ao encruamento decorrente do processo de deformação plástica.

#### 4.2.3. Determinar o diâmetro que apresentar maior condutividade elétrica e LRT nas condições de STT e TT 150°C/4h da liga em estudo

Para uma melhor visão da resposta da condutividade elétrica ao tratamento térmico na liga, construiu-se o gráfico da Figura 27(a), no qual se compara a condutividade elétrica antes do tratamento térmico e após o tratamento térmico da liga base.

Ao analisar a Figura 27(b), percebe-se o inverso do ocorrido com a condutividade elétrica.

**Figura 27** - (a) Gráfico de condutividade elétrica e (b) limite de resistência a tração para a liga Al-0,15%Zr em estudo para todos os diâmetros, da liga STT e TT 150°C/4h



Fonte: Autor, 2016.

Ao analisar o gráfico da Figura 27(a), nota-se um comportamento semelhante, tanto para a liga STT quanto para a liga TT 150°C/2h, porém com os valores expressos na Tabela 6 é possível identificar que mesmo tendo valores próximos de condutividade elétrica a que ainda apresenta uma melhor resposta é a liga STT destacando-se o diâmetro de 3 mm.

De acordo com a Figura 27(b), é visto que o diâmetro de 3 mm atingiu maiores resultados de resistência a tração. Para Santos (2010), esse comportamento pode ser justificado pelo alto grau de deformação plástica sofrida no canal de laminação, o que ocorre com menos intensidade para os demais diâmetros.

#### 4.2.4. Análise da Correlação entre os valores do limite de resistência a tração (LRT) e o Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ).

A tabela 5 mostra os valores obtidos dos resultados do ensaio de tração através da mensuração do limite de resistência a tração (LRT) e do cálculo do coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) para os diâmetros estudados da liga sem tratamento (STT) e tratada termicamente (TT) a 150°C/4h.

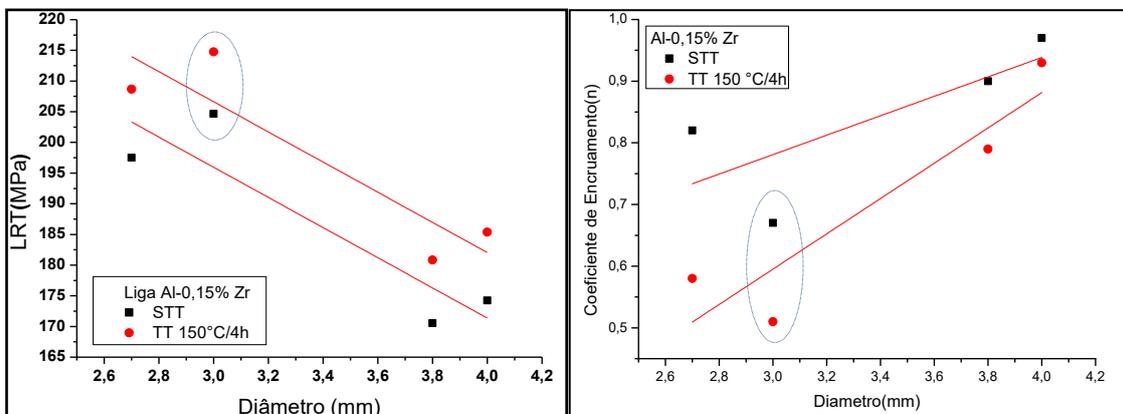
**Tabela 5** - Valores de LRT e do Coeficiente de Encruamento da liga base para todos os diâmetros STT e TT 150°C/4h.

Diametro (mm)	LRT(Mpa)STT	( $\eta$ )%STT	LRT(Mpa) TT150°C/4H	( $\eta$ ) % TT150°C/4H
2,7	197,52	0,82	208,67	0,58
3,0	204,64	0,67	214,77	0,51
3,8	170,52	0,90	180,83	0,71
4,0	174,24	0,97	185,36	0,93

Fonte: Autor, 2016.

A figura 28 apresenta os gráficos dos valores dos limites de resistência à tração (LRT) e dos coeficientes de encruamento ( $\eta$ ) a fim de avaliar o desempenho da liga base nesses parâmetros. Esse comportamento foi observado por Cardoso (2013), seus estudos mostram que em ligas deformadas de alumínio o comportamento do coeficiente de encruamento ( $\eta$ ), se configura de forma oposta à sua resistência (LRT). A medida que os diâmetros do fio aumentam há um comportamento decrescente do LRT e comportamento crescente do ( $\eta$ ), Cardoso (2013), Figura13.ou seja, maior capacidade de deformar uniformemente.

**Figura 28** - Comparação entre os valores de LRT e o Coeficiente de Encruamento ( $\eta$ ) da liga Al-0,05%Cu [0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr para todo o diâmetro.



Fonte: Autor, 2016.

Estudos realizados por Tertuliano (2013) em ligas de alumínio não deformados mostram que para valores elevados de LRT têm-se coeficientes de encruamento baixos e é possível verificar no gráfico acima da liga em estudo que esse comportamento realmente acontece e se evidencia no diâmetro de três milímetros (3mm) que provavelmente o fenômeno de recuperação dinâmica, que acontece na deformação plástica a frio é bem evidente

Através do encruamento, que aumenta a densidade de discordâncias adicionalmente, nas ligas endurecíveis por precipitação, acelera o aumento de dureza associado com a formação de precipitados.

A correlação de menor Coeficiente de encruamento está associada ao maior LRT do material. Este comportamento associado ao arranjo da matriz de alumínio com os demais elementos ligantes e do processo de conformação mecânica a que o material foi submetido.

Dessa forma tem-se que na liga e nos diâmetros estudados para os maiores valores elevados de limite de resistência à tração (LRT) estão associados os menores valores de coeficiente de encruamento ( $\eta$ ).

#### 4.2.5. Avaliação da ductilidade: Liga STT.

Na Tabela 6 estão relacionados os valores de alongamento ( $\delta$ ), Razão das Cavidades ( $\vartheta$ ) e Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) da liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr STT em todos os diâmetros.

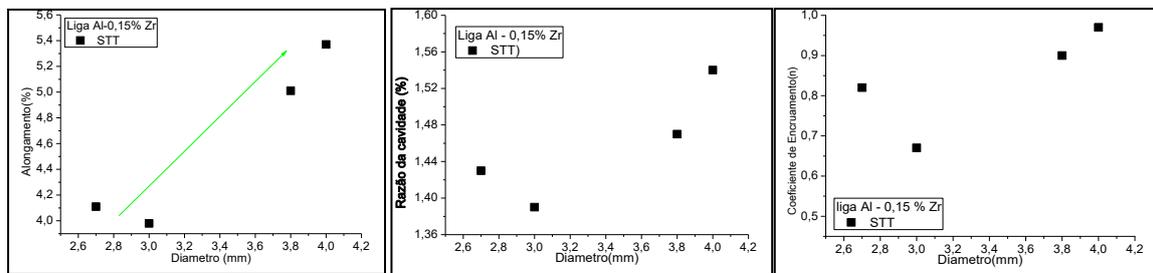
**Tabela 6** - Valores de alongamento ( $\delta$ ), Razão das Cavidades ( $\vartheta$ ) e Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) da liga base STT para todos os diâmetros.

Diâmetro (mm)	Alongamento ( $\delta$ ) em [%] STT	Razão das Cavidades ( $\vartheta$ ) STT	Coeficiente de Encruamento ( $\eta$ ) STT
2,7	4,11	1,43	0,82
3,0	3,98	1,39	0,67
3,8	5,01	1,47	0,90
4,0	5,37	1,54	0,97

Fonte: Autor, 2016.

A Figura 29 associa de forma gráfica o comportamento do alongamento ( $\delta$ ), Razão das Cavidades ( $\vartheta$ ) e Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) para a liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr STT em todos os diâmetros.

**Figura 29** - Comportamento do Alongamento [ $\delta$ ] (a), Razão das Cavidades [ $\vartheta$ ] (b) e do Coeficiente de Encruamento [ $\eta$ ] (c) da liga base STT para todas os diâmetros.



Fonte: Autor, 2016.

#### 4.2.6. Avaliação da ductilidade: Liga TT 150°C/4h.

Na Tabela 7 estão relacionados os valores de alongamento ( $\delta$ ), Razão das Cavidades ( $\vartheta$ ) e Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) da liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr TT 150°C/4h em todos os diâmetros.

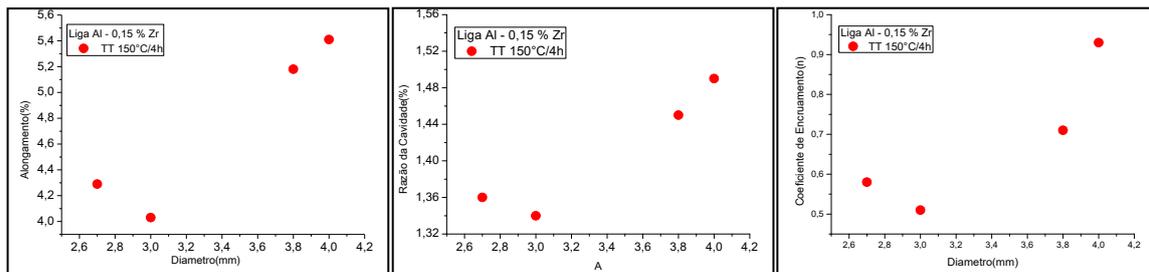
**Tabela 7 - Valores de alongamento ( $\delta$ ), Razão das Cavidades ( $\vartheta$ ) e Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) da liga base TT 150°C/4h para todos os diâmetros.**

Diâmetro (mm)	Alongamento ( $\delta$ ) em [%] TT 150°C/4h	Razão das Cavidades ( $\vartheta$ ) TT 150°C/4h	Coeficiente de Encruamento ( $\eta$ ) TT 150°C/4h
2,7	4,29	1,36	0,32
3,0	4,03	1,34	0,26
3,8	5,18	1,45	0,43
4,0	5,41	1,49	0,57

Fonte: Autor, 2016.

A Figura 30 associa de forma gráfica o comportamento do alongamento ( $\delta$ ), Razão das Cavidades ( $\vartheta$ ) e Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) para a liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr TT 150°C/2h em todos os diâmetros.

**Figura 30 - Comportamento do Alongamento [ $\delta$ ] (a), Razão das Cavidades [ $\sigma$ ] (b) e do Coeficiente de Encruamento [ $\eta$ ] (c) TT 150°C/4h para todas os diâmetros.**



Fonte: Autor, 2016.

No conjunto de informações apresentado na figura 29 e 30, observa-se que para um perfil crescente de alongamento, estão associados a perfis crescente de razão de cavidade e coeficiente de encruamento, na liga STT e TT 150°C/4h. Para maiores valores de alongamento e Razão de cavidades temos valores elevados de ( $\eta$ ). Figuras 29 e 30(a), 29 e 30 (b) e 29 e 30(c). Caracterizando desta forma que a maior ductilidade é a que esta associa a maiores “ $\eta$ ”; a maiores  $\delta$  e a maiores L/W tanto na liga STT como na TT 150°C/4h.

### 4.3. Teste de termorresistividade

4.3.1. Teste de termorresistividade: segundo o protocolo COPEL e a norma ASTM B941-10 para liga STT.

A tabela 8 apresenta os valores de Limite de Resistencia a Tração (LRT) da liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr submetido ao teste de Termorresistividade segundo o Protocolo COPEL – CTT<sub>R</sub> de 230°C/1h e a Norma ASTM B941-10 – CTT<sub>R</sub> de 280°C/1h e suas respectivas perdas e Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ), os teste foram realizados para o diâmetro de 3,00 mm.

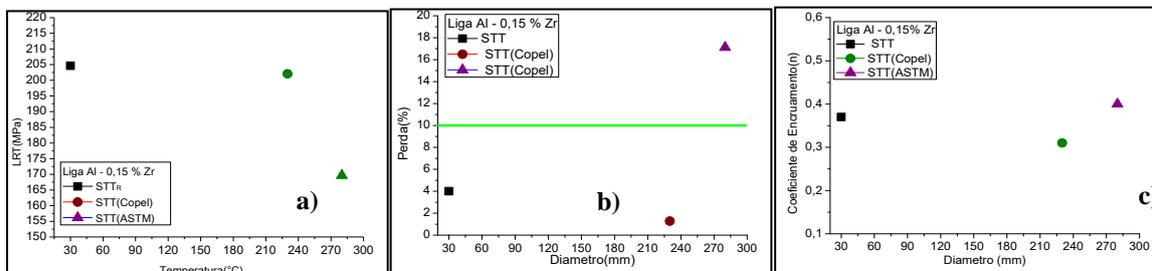
**Tabela 8** - Valores de LRT (Mpa), Porcentagem de perdas [% (Mpa)] e Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) da liga base STTR, TTR 230° e 280°C/1h para o diâmetro  $\varnothing=3,0$  mm.

Liga	Sem o teste de termorresistividade		Com o teste de termorresistividade					
			230 °C / 1h			280 °C / 1h		
	Limite de Resistência a Tração (MPa) / Perda (%) / $\eta$							
	LRT	$\eta$	LRT	Perda (%)	$\eta$	LRT	Perda (%)	$\eta$
Al-0,15%Zr - STT	204,64	0,67	202,04	1,27	0,31	169,61	17,11	0,40

Fonte: Autor, 2016.

Os gráficos da figura 31 mostram os resultados de LRT da liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr na comparação STT<sub>R</sub> e TT<sub>R</sub> de 230°C/1h, percebe-se que não há uma perda superior a 10% no valor de LRT fica entre 0% e 1,5%, isso torna essa liga termorresistente, segundo o protocolo COPEL. Na comparação STT<sub>R</sub> e TT<sub>R</sub> de 280°C/1h, percebe-se que há uma perda superior a 10% e os valor de perda de LRT que ficou em 17,11%, o que segundo a Norma ASTM B941-10 não enquadra essa liga como termorresistente e o Coeficiente de Encruamento ( $\eta$ ) o comportamento é bem variado comparando a liga STT<sub>R</sub> e com TT<sub>R</sub> de 230, 280°C/1h.

**Figura 31** - Correlação do LRT (a), perdas de LRT (b) e do coeficiente de Encruamento( $\eta$ ) (c) STT, TT-230° e 280°C/1h, para o  $\varnothing=3$ mm.



Fonte: Autor, 2016.

Na correlação entre os valores LRT, perdas de LRT e coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) da liga STT<sub>R</sub> que foi TT<sub>R</sub> de 230° e 280°C/1h, o arranjo gráfico da figura 31 permite as seguintes avaliações:

i - o comportamento do material com essa pequena perda pode está associadas ao zircônio, pois ligas de Al-Zr tendem a perde sua propriedade mecânica em temperatura em torno de 230°C, SENA (2015);

ii - Ao submeter o fio STT<sub>R</sub> ao TT<sub>R</sub> de 230°C/1h a temperatura não é suficiente para precipitar os trialuminetos (Al<sub>3</sub>Zr) como podemos analisar na figura 31(a) que verificamos uma pequena perda de LRT(Mpa) mostrado no figura 31(b) o que se enquadra como termorresistente;

iii - analisando agora o coeficiente de Encruamento ( $\eta$ ) na figura 31(c) consequentemente aumentando sua capacidade de deformar uniformemente, justificando assim seu menor valor de LRT.

Analisando o gráfico 31 quando a liga STT<sub>R</sub> é Submetida ao TT<sub>R</sub>280°C/1h permite as seguintes avaliações:

i - o comportamento do material com Essa perda maior quando a liga STT<sub>R</sub> é Submetida ao TT<sub>R</sub>280°C/1h não a enquadra como termorresistente;

ii - ocorre uma variação significativa na resistência mecânica da liga com perda bem acima dos 10% exigido pela norma a qual não se enquadra como termorresistente o que podemos verificar na figura 31(b);

iii - Tal comportamento de termorresistividade pode está associado ao nível de temperatura utilizada para esse teste, aparentemente provocando o surgimento de precipitado do tipo Al<sub>3</sub>Zr e se menores valores de LRT estão associados a maiores valores para o Coeficiente de Encruamento ( $\eta$ ) esta condição é indicativa de maiores níveis de ductilidade.

#### 4.3.2. Teste de termorresistividade: segundo protocolo COPEL e a Norma ASTM B 941 –10 para liga TT 150°C/4h.

A tabela 9 apresenta os resultados dos ensaios de limite de resistência a tração [LRT em (Mpa)], Porcentagem de perdas [% (Mpa) ] e Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) da liga base TT 150°C/4h com teste de termorresistividade segundo protocolo COPEL – TT<sub>R</sub> de 230°C/1h e a Norma ASTM B 941-10 – TT<sub>R</sub> de 280°C/1h e suas respectivas perdas e Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ), os teste foram realizados para o diâmetro de 3,00 mm.

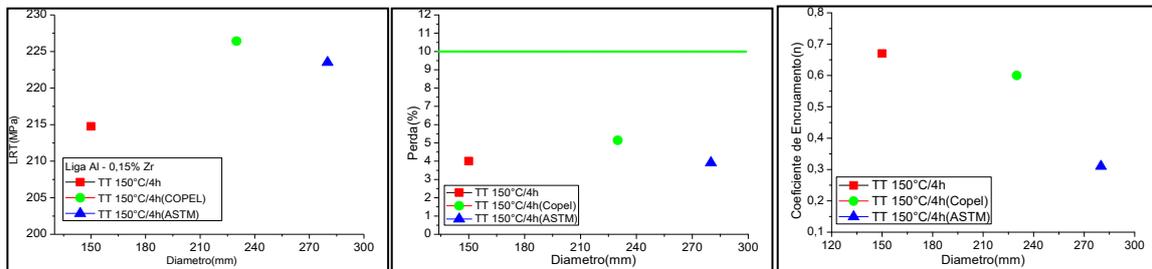
**Tabela 9 - Valores de LRT (Mpa), Porcentagem de perdas [%](Mpa) e Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) da liga base TT 150°C/2h, TTR 230° e 280°C/1h para o diâmetro  $\varnothing = 3,0\text{mm}$ .**

Liga	Sem o teste de termorresistividade		Com o teste de termorresistividade					
			230 °C / 1h		280 °C / 1h			
	LRT	$\eta$	LRT	Perda (%)	H	LRT	Perda (%)	$\eta$
Al-0,15% Zr -TT 150°C/4h	204,64	0,51	226,42	5,14	0,60	224,51	3,91	0,31

Fonte: Autor, 2016.

Os gráficos da figura 32 mostram os resultados de LRT da liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr na comparação TT 150°C/4h e TTR de 230°C/1h, onde percebe-se que não há uma perda superior a 10% nos valores de LRT fica entre 0% e 5,25%,isso torna essa liga termorresistente, segundo o protocolo COPEL e na comparação TT 150°C/4h e TTR de 280°C/1h, percebe-se novamente que não há uma perda superior a 10% do valor de perda de LRT que fica menor com 3,91%, o que segundo a Norma ASTM B941-10 se enquadra como termorresistente e o Coeficiente de Encruamento ( $\eta$ ) o comportamento ocorre o inverso do comparando da liga STTR e com TTR de 230, 280°C/1h.

**Figura 32 - Correlação do LRT (a), perdas de LRT (b) e do Coeficiente de Encruamento (c) TT 150°C/4h, TT-230° e 280°C/1h, para o  $\varnothing = 3\text{mm}$ .**



Fonte: Autor, 2016.

Com os resultados analisados no arranjo de gráficos na figura 32 para a liga base TT150°C/4h e que foi submetida ao TTR 230°C e 280°C/1h permite as seguintes avaliações:

i - o comportamento do material com Essa perda um pouco maior pode está associadas ao zircônio, pois a liga com duplo tratamento térmico tem ganhado na propriedade mecânica em temperatura em torno de 230°C comportamento inverso ao da liga STTR e com TTR de 230°C/1h;

ii - Ao submeter o fio TT150°C/4h ao TTR de 230°C/1h o duplo tratamento térmico enquadra a liga como termorresistente o que mostra a figura 32(b);

iii - analisando o coeficiente de Encruamento ( $\eta$ ) verificamos que o duplo tratamento térmico diminuiu os valores de encruamento  $\eta$  e o perfil que foi submetido a temperaturas maiores que 150°C o material encontra-se mais encruado.

Analisando o gráfico 32 quando a liga base TT150°C/4h que foi Submetida ao TT<sub>R</sub>280°C/1h permite as seguintes avaliações:

i – o comportamento do material com Essa perda menor novamente pode esta associada ao Zircônio que com temperatura maior alivia as discordâncias diminuindo o LRT comparando com a TT<sub>R</sub> 230°C;

ii - ocorreu um aumento significativo na resistência mecânica da liga com perda bem abaixo dos 10% exigidos pela norma a qual se enquadra como termorresistente o que podemos verificar na figura 32 (b);

iii – inferi que o duplo tratamento influencia na propriedade mecânicas do material pois a temperatura influencia de tal forma que aumenta a capacidade de encruamento do material quando verificamos que menores valores de encruamento  $\eta$  estão no perfil que foi submetido a temperaturas maiores que 150°C onde o material encontra-se mais encruado.

## 5. CONCLUSÕES

A partir da avaliação do efeito de um tratamento térmico de 150°C/4h para liga **Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe -0,15% de Zr** solidificada em molde “U”, podem ser extraídas as conclusões, que para melhor serem apresentadas nesta seção uniu-se aos objetivos:

✓ **Determinar o diâmetro que apresentar maior Condutividade Elétrica e LRT nas condições de STT e TT 150°C/4h da liga em estudo**

Dentre os diâmetros em estudo o que apresentou os maiores valores de Condutividade Elétrica e LRT foi o de 3mm tanto na liga STT quanto TT 150°C/4h.

✓ **Analisar o Coeficiente de encruamento ( $\eta$ ) com relação ao LRT da liga em estudo na condição de STT e TT 150°C/4h**

Analisando o Coeficiente de Encruamento ( $\eta$ ) observa-se que para valores elevadas de LRT temos valores de ( $\eta$ ) pequenos, esse comportamento é melhor observado no diâmetro de 3mm.

✓ **Avaliar a ductibilidade da liga Correlacionando Alongamento [ $\delta$ ], Razão das Cavidades [ $\sigma$ ] e do Coeficiente de Encruamento [ $\eta$ ] na condição de STT e TT150°C/4h.**

Nos parâmetros analisados foi constatado que valores crescentes de [ $n$ ] estão associados a um comportamento crescente de alongamento [ $\delta$ ], indicando aumento de ductilidade tanto na STT quanto na TT 150°C/4h.

✓ **Avaliar o desempenho termorresistivo do material para o diâmetro que apresentar melhor resposta ao LRT, levando em consideração o Protocolo COPEL e a NORMA ASTM B941-10.**

• **TESTE DE TERMORRESISTIVIDADE (COPEL)**

De acordo com o protocolo COPEL a liga em estudo para o diâmetro de 3 mm tanto STT quanto a TT150°C/24h se enquadram como Termorresistente.

• **TESTE DE TERMORRESISTIVIDADE ( NORMA ASTM B941-10)**

De acordo com a Norma ASTM B941-10 a liga em estudo para o diâmetro de 3 mm se enquadram como termorresistente.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO - ABAL (ABAL, 2014). Disponível em: <<http://www.abal.org.br/aplicacoes/industria-eletrica/>>. Acesso em: 04 fev. 2014.

ASKERLAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**, 1 ed., São Paulo, Cengage Learning, 2008, 594p.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS - ASM INTERNATIONAL, **Aluminum and Aluminum alloys**. v. 4. American Society for Metals - ASM Handbook, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. B941: **Standard Specification for Heat Resistant Aluminum-Zirconium Alloy Wire for Electrical Purposes**. West Conshohocken, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR 5118). Fios de alumínio 1350 nus, de seção circular, para fins elétricos. Rio de Janeiro, ago. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR 6810). Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos. Rio de Janeiro, ago. 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR 5285)– “Fios de alumínio-liga, nus, de seção circular, para fins elétricos”, Rio de Janeiro, Nov. 1985.

CALLISTER, W. D. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Salt Lake, John Wiley, 2007.

CHIAVERINI, V. *Tratamento Térmicos das Ligas Metálicas*. S.I.: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, p 243, 2003;

CAVASSIN, R. S. *Uma abordagem multicritérios para recapitação de linhas de transmissão*. Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

CALLISTER JR, W. D. *Fundamental of Materials Science and Engineering*, 5 ed., Nova York, John Willey & Sons, 2001, 920p.

Ciência dos materiais multimídia; Disponível em: <<http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=21&top=289>>. Acesso em: 13 jun. 2010.

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.. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.*

D’OLIVEIRA, A. S. C. M., Ph.D. Profa Titular/DEMEC - UFPR- TM 704 – Metalurgia Física PIPE e PG-MEC- disponível

em:<[http://servidor.demec.ufpr.br/pesquisas/superficie/material%20didatico/tm704\\_Metalurgia\\_Fisica/2011/1.Introducao\\_e\\_Revisao.pdf](http://servidor.demec.ufpr.br/pesquisas/superficie/material%20didatico/tm704_Metalurgia_Fisica/2011/1.Introducao_e_Revisao.pdf)> Acesso em: 05 de Dezembro de 2016.

EPE- Empresa de Pesquisa energética (EPE 2015): Disponível em <http://www.epe.gov.br>. Acesso em 27 de julho de 2015.

ESPÓSITO, I. M. **Caracterização e cinética de recristalização da liga de alumínio 6063 após tratamentos termomecânicos**. Dissertação de mestrado – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Autarquia Associada à Universidade de São Paulo), Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear – Materiais, São Paulo, 2006.

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, Belém: 2011, 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Área de concentração materiais e processos de fabricação, FEM, ITEC, Universidade federal do Pará, Belém, 2011.

FREITAS, E. S. **Correlação entre as propriedades mecânicas e elétricas de fios para Tx e Dx de energia elétrica do Al-EC modificado com teores de silício e titânio**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belém, 2010.

GOULART, P. R.; SPINELLI, J. E.; OSÓRIO, W. R.; GARCIA, A. Mechanical properties as a function of microstructure and thermal variables of Al-Si castings. *Materials Science and Engineering A*, n.421. p.245-253, jan.2006.

GRUPO DE PESQUISA EM ENGENHARIA DOS MATERIAIS – GPEMAT. Disponível em: <http://www.ufpa.br/gpemat/equipe.htm>. Acesso em: 17 nov. 2014.

HORIKOSHI, T.; KURODA, H.; SHIMIZU, M.; AOYAMA, S. **Development of Aluminum Alloy Conductor with High Electrical Conductivity and Controlled Tensile Strength and Elongation**. *Hitachi Cable Review* N° 25 August, Japan, 2006.

HANDEL, M. **New types of conductors for overhead lines with high thermal resistance, which increase the current transmission capacity and limit the thermal expansion at high current intensity**. *Bulk Power System Dynamics and Control VI*, Cortina d'Ampezzo, Italy, 2004.

HOLLOMON, J. H. **Tensile Deformation**. A.I.M.E. New York. Pag. 268 – 290, 1945.

HOECHELE, A. R. **Efeito da quantidade de trabalho a frio da liga de alumínio aa1350 no coeficiente de encruamento determinado por ensaios de dureza**. Dissertação (mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, 2011.

HAN, B. Q., MOHAMED, F. A. and LAVERNIA, E. J. Tensile behavior of bulk nanostructured and ultrafine grained aluminum alloys. *J. Mater. Sci.*, 38, 3319–3324, 2003.

INFOMET. Metalurgia Física, Propriedades e Aplicações Disponível em:<  
<http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=106>>. Acesso em: 05 dezembro. 2016.

JORGE, I. C. S. **Estudo da coalescência de microcavidades na liga Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe modificada com os teores [0,05 e 0,15]%Ti para fins transmissão [Tx] e distribuição [Dx] de energia elétrica.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.

KAUFMAN, J. G.; ROOY, E. L. **Aluminium alloy casting: properties, process and applications.** ASM International – Metals park, 2004.

KERR, H. W; J. CISSE and G. F. BOILING. *Met.*22. 677 (1974).

KAMIZONO, K. A. **Estudo do efeito da adição de silício sobre propriedades mecânicas e elétricas de fios para transmissão e distribuição de energia elétrica da liga Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,22%(Zr,Ti).** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

KEELER, Stuart P. **The state of the Art. Understanding sheet metal formability.** Machinery, v. 74 n. 6, p. 88–95, fev. 1968.

KEELER, Stuart P. **Proprieties related to forming. Understanding sheet metal formability.** Machinery; v. 74 n. 8, p. 94-103, apr. 1968.

KEELER, Stuart P. **Visible strain patterns. Understanding sheet metal formability.** Machinery, v. 74, n. 7, p. 94–101, mar. 1968.

MISHRA, S. K., DESAI, S. G., PANT, P., NARASIMHAN, K. and SAMAJDAR, I.: Improved predictability of forming limit curves through microstructural input. *Int. J. Mater. Form.*, 2, 59–67, 2009.

MERCES, M. P.; **Influência dos Parâmetros Térmicos nas Propriedades Eletro Mecânicas e Estruturais de Ligas de Alumínio Modificadas com Ferro; Monografia – Universidade Federal do Pará, graduação em engenharia mecânica, Belém, 2008.**

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K.; **Mechanical Behavior of Materials;** Ed. Cambridge University Press; São Paulo. 2009.

NARAYANASAMY, R.; PARTHASARATHI, N. L.; RAVINDRAN, R.; SATHIYA NARAYANAN, C. Analysis of fracture limit curves and void coalescence in high strength interstitial free steel sheets formed under different stress conditions. Received: 10 May 2007 / Accepted: 11 February 2008 / Published online: 22 March 2008\_ Springer Science+Business Media, LLC 2008.

NARAYANASAMY, R; PARTHASARATHI, N.L, SATHIYA NARAYANAN, C. Effect of microstructure on void nucleation and coalescence during forming of three different HSLA steel sheets under different stress conditions. *Materials and Design*, 2008.

Oliveira, A. S. C. M. **Apostila de Solidificação**. Curso de Especialização em Engenharia de Materiais Metálicos. Universidade Federal do Paraná, 2001.

POLMEAR, I. J. **Light alloys – metallurgy of the light metals**. New Jersey: Prentice-Hall, 2005.

PRATES, M.; DAVIES, G.J. **Solidificação de metais e suas ligas**. Rio de Janeiro: LTC, 1978.

PRAZERES, U. R. **Avaliação do feito do ferro em ligas de alumínio destinadas a condução de energia elétrica**. Belém: 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Área de concentração materiais e processos de fabricação, ITEC, Universidade federal do Pará, Belém, 2007.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia**. Hemus Livraria, Distribuidora e Editora S.A. 2000.

PADILHA, A. F.; SICILIANO F. J. **Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura**. 3ed. ver. amp. São Paulo: ABM, 1996.

RÉGIS JÚNIOR, O. et al., A utilização de condutores de liga de Al termo-resistente na repotencialização de LT de transmissão e sub-transmissão. In: SEMINÁRIO DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA, 15, 1999, Foz do Iguaçu. Anais, 1999.

Soares, G. A. **FUNDIÇÃO: Mercado, Processos e Metalurgia**. Rio de Janeiro: ED. Livros Técnicos e Científicos, 2000.

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: 60º Congresso da ABM, 2005, Belo Horizonte. Anais do 60º Congresso da ABM, São Paulo: ABM, 2005.

TERTULIANO, A. J. O. **Análise da influência de dois teores de níquel sobre as propriedades térmicas, mecânicas, elétricas e estruturais da liga Al-0,05%Cu [0,24-0,28]%Fe-0,7%Si destinada à produção de cabos para Tx e Dx de energia elétrica**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.

VLACK, L. H. V. **Princípios de ciências dos materiais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

YANAGISAWA M.; NAKAMURA M.; MATSUO S.; AMITANI T.; **On the Casting and the Recrystallization of Al and some Al Alloys Containing Zr**, Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 1956 (1956) No. 20 p.68-75,44.