

COMPARAÇÃO DA RELAÇÃO EXISTENTE ENTRE AS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E MECÂNICAS COM O TAMANHO DE DIMPLES DE UMA LIGA AL-CU-FE-SI-TI ANTES E APÓS TRATAMENTO TÉRMICO¹

Ana Júlia Oliveira Tertuliano²
 Jessiana Avelar de Lima²
 Everaldo Afonso Fernandes³
 Iramar da Silva Tertuliano³
 José Maria do Vale Quaresma⁴

Resumo

Nos dias atuais são necessários parâmetros que quantifiquem, de alguma maneira, a microestrutura do material a fim de relacioná-la com as propriedades do mesmo. Assim, a metalografia quantitativa fornece meios de quantificar a microestrutura, de forma que se tenha informações que auxiliem na monitoração do comportamento do material em função da composição química, tratamento térmico e trabalho mecânico. Portanto, este estudo visa analisar a relação existente entre as propriedades mecânicas e elétricas e a dimensão de microcavidades (*dimples*), influenciadas pelo teor de 0,26% em peso de Ti. Para tanto, a liga estudada foi obtida por fundição direta em uma lingoteira metálica em forma de "U", a partir da liga base Al-EC-0,22%Fe-0,05%Cu-0,7% em peso Si, cuja foi modificada com o teor de Ti anteriormente citado. Após usinagem e laminação, obteve-se corpos de prova com diâmetro de até 2,7 mm. Assim, a liga foi submetida a ensaios de tração e de condutividade elétrica. Após um tratamento térmico a 230°C por uma hora, foram realizados os mesmos procedimentos citados acima. A topografia das fraturas dos corpos de prova obtidos foi analisada utilizando microscopia eletrônica de varredura. As dimensões dos *dimples*, obtidas através destas imagens, foram relacionadas com os valores encontrados para as características elétricas e mecânicas. Ademais, observou-se que ocorre uma relação inversamente proporcional entre a condutividade elétrica e o desvio padrão das dimensões de *dimples*, e deste diretamente proporcional com o LRT.

Palavras-chave: Microcavidades; Desvio padrão; Tratamento térmico.

COMPARISON OF EXISTING RELATION BETWEEN THE ELECTRICAL AND MECHANICAL PROPERTIES WITH THE SIZE OF THE DIMPLES FOR AN AL-CU-FE-SI-TI ALLOY BEFORE AND AFTER HEAT TREATMENT

Abstract

Nowadays parameters are needed to quantify, in some ways, the microstructure of the material in order to relate it to the properties thereof. Thus the quantitative metallography provides tactics to quantify the microstructure to obtain information to monitoring the behavior of the material as a function of chemical composition, heat treatment and machine work. Therefore, this study aims to examine the relation between the mechanical and electrical properties and the size of microcavities (*dimples*), influenced by the content of 0.26%Wt Ti. For this purpose, the alloy studied was obtained by direct casting in a metallic mold with the shape of "U", from the base alloy Al-EC-0.22%Fe-0.05%Cu-0.7%Wt Si, which has been modified with Ti content quoted previously. After machining and rolling were obtained specimens with diameters up to 2.7mm. After the alloy was subjected to tensile and electrical conductivity tests. After heat treatment at 230°C for one hour, the same procedures – mentioned above – were performed. The topography of fractures of the specimens obtained was analyzed using scanning electron microscopy. So the dimensions of the *dimples*, obtained through these images, were related to the values found for the electrical and mechanical properties. Moreover, it was observed that there is an inverse relation between electrical conductivity and standard deviation of the size of *dimples*, and a directly proportional relation of this with the LRT.

Key words: Microcavities; Standard deviation; Heat treatment.

¹ Contribuição Técnica ao 68º Congresso Anual da ABM, 30 de julho a 02 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheira de Produção. Mestranda, Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.

³ Graduando, Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.

⁴ Engenheiro Mecânico. Dr. em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O alumínio, apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, é um dos metais de uso mais recente em escala industrial. Mesmo utilizado há milênios antes de Cristo, o alumínio começou a ser produzido comercialmente há cerca de 150 anos. Sua produção atual supera a soma de todos os outros metais não ferrosos, sendo amplamente utilizado pela indústria de diversas maneiras. Tal versatilidade se deve às suas propriedades e excelente desempenho na maioria das aplicações. No mercado interno, a maior parte do alumínio e seus produtos são aplicados nos segmentos de embalagens e transportes. Na sequência, vem os segmentos de distribuição de eletricidade, construção civil, bens de consumo, máquinas, equipamentos e outros.⁽¹⁾

Nas últimas cinco décadas, a fundição de alumínio e suas ligas receberam maior atenção, principalmente devido às suas aplicações na indústria automotiva e aeroespacial. Peças forjadas de aço estrutural estão sendo substituídas por peças fundidas em alumínio para minimizar o peso e custos de produção. O bom desempenho do alumínio e suas ligas também são reconhecidos pela indústria elétrica, que o utiliza em larga escala em forma de vergalhão e arame, atendendo diversos segmentos, dentre eles destacam-se: linhas de transmissão de grande porte e cabos condutores para distribuição aérea ou subterrânea. Portanto, devido a tais fatores, vê-se a necessidade de compreender cada vez mais o comportamento eletromecânico do alumínio e suas ligas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A liga foi obtida por fundição direta no Sub-laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos da UFPa a partir do Al-EC (alumínio eletrocondutor ou Al-1350). Após a obtenção da liga base, ocorreu a adição de 0,26% em peso de Ti, na proporção adequada para obtenção das composições químicas. O sistema operacional adotado para a solidificação da liga foi a coquilha em formato de “U”, que tem como característica minimizar o efeito da variação da velocidade de solidificação sobre a estrutura obtida, pois promove a solidificação quase estática. Logo após o desmolde, os perfis obtidos foram usinados para o diâmetro 18,5mm, sendo posteriormente submetidos ao processo de deformação a frio por laminação que gerou os corpos de provas em forma de fios, nas dimensões de 2,7mm, 3,0mm, 3,8mm e 4,00mm para os ensaios de tração e condutividade elétrica, bem como o tratamento térmico, a fim de verificar se o material atende a exigência do Protocolo Copel (Companhia Paranaense de Energia).⁽²⁾

A composição química foi confirmada em um espectrômetro modelo Espectrometro Optico De Massa fabricante Espectrolab Espectro de propriedade da empresa parceira de uso contínuo no monitoramento do processo industrial.

Na sequência das imagens ilustradas na Figura 1, tem-se o processo de fundição das ligas nas composições químicas predefinidas, seguida de injeção de argônio, para a redução do percentual de hidrogênio e vazamento para obter-se as amostras para a análise.

Em seguida, o metal líquido foi vertido em uma lingoteira com formato em “U” como ilustrado na Figura 2b. A lingoteira, antes do vazamento, foi pintada internamente com caulim para evitar a aderência do alumínio nas paredes do molde (Figura 2a), e aquecida a uma temperatura média de 250°C em uma estufa, procedimento este realizado para que houvesse o preenchimento total do “U”.



Figura 1. Esquema de preparação e obtenção das ligas fundidas: (a) fundição do material; (b) injeção de argônio; (c) coleta de amostras para análise química.



Figura 2. Lingoteira em forma de “U”: (a) desmontada; (b) no momento do vazamento.

Após a obtenção do corpo de prova foram seccionadas as duas “pernas” do lingote com comprimento de 250 mm. Posteriormente, estas foram usinadas do diâmetro de 22 mm para o diâmetro de 18 mm e, então, laminadas a frio até 2,7 mm em um laminador duo elétrico MENAC de secção circular de diferentes diâmetros (Figura 3).

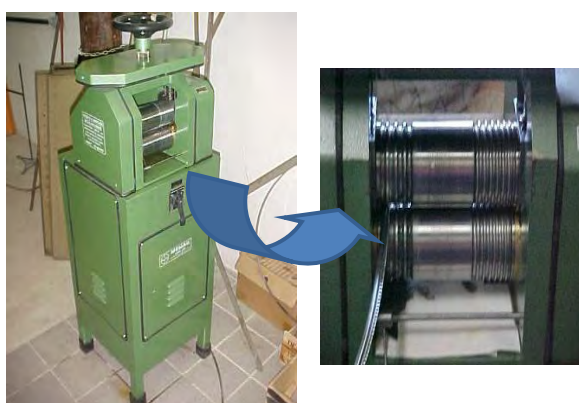


Figura 3. Laminador elétrico duo reversível, laboratório de Mecânica/UFGA.

2.1 Teste de Termorresistividade

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

Neste trabalho, considerar como sinônimo as palavras teste de termorresistividade e tratamento térmico, mesmo que o efeito deste último, no sentido literal, consista na modificação das propriedades do material. Portanto, atentar-se neste trabalho apenas à operação que inclui o aquecimento e o resfriamento das amostras em condições controladas.

Assim, o tratamento térmico exigido foi executado em um forno tipo mufla da marca Brasimet, que já foi mostrado anteriormente na Figura 1.

2.2 Caracterização Elétrica das Ligas

Nesta etapa, os corpos de provas são submetidos a ensaios com objetivo de se avaliar a resistência elétrica dos mesmos, com o auxílio de um Multiohmímetro Megabrás (ponte de kelvin) modelo MPK-2000.

Para obter-se os primeiros resultados, foi necessário fazer a leitura das resistências dos corpos de prova (CP) deformados plasticamente em variados diâmetros e tendo por referência a norma NBR 5118,⁽³⁾ que recomenda que as medições sejam feitas a uma temperatura não inferior a 10°C e nem superior a 30°C, sendo corrigida para a temperatura de 20°C.

2.3 Caracterização Mecânica das Ligas

Após a deformação a frio das ligas e obtenção dos diâmetros desejados no estudo, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio mecânico, em uma máquina de ensaio de tração Kratos modelo IKCL1 – USB. Os testes de tração foram ensaiados segundo a norma para cabos elétricos NBR 6810,⁽⁴⁾ sendo executados em três amostras com 20 cm de comprimento para cada diâmetro ou tratamento térmico produzido ao longo do trabalho, resultando em um valor médio de Limite de Resistência a Tração (LRT) em MPa.

2.4 Caracterização Estrutural das Ligas

Para observação da superfície das fraturas provenientes dos corpos de prova resultantes do ensaio de tração, cada corpo de prova foi seccionado próximo à fratura, além de ter sido realizado também – logo abaixo desta – um corte na direção longitudinal. Posteriormente, a limpeza foi realizada em um limpador ultrassônico com tanque de aço modelo METASOM – 14, com a peça imersa em solução de limpeza de Álcool etílico absoluto, P.A. 99,99% e acetona. Após serem preparados, os corpos de prova foram analisados em um microscópio eletrônico de varredura LEO (MEV) modelo 1450VP; marca GRESHAM, com o objetivo de avaliar as topografias da superfície das fraturas através da obtenção de imagens com ampliação de 2000 vezes.

Ulteriormente foram realizadas as medidas dos diâmetros médios das microcavidades com auxílio do software Motic, através do qual foi medida as dimensões maior e menor dos *dimples* e, então, calculado o valor do diâmetro (D). Foram realizadas cinco leituras por fratura para obtenção de um valor médio.

3 RESULTADOS

3.1 Composição Química da Liga

A Tabela 1 mostra os resultados da análise da composição química da liga modificada com o teor de titânio.

Tabela 1. Composição química da liga de alumínio modificada com Titânio

Liga	Elementos Químicos da Liga		
	Si	Ti	Al
0,26%Ti	0,6818	0,2556	Balanço

3.2 Caracterização Estrutural da Liga

As Figuras abaixo mostram micrografias obtidas via MEV para os fios de diâmetros [2,7; 3; 3,8 e 4]mm, nas regiões das fraturas e em região logo abaixo da fratura, no sentido longitudinal.

As imagens das posições abaixo das fraturas, seccionadas no sentido longitudinal da deformação, mostram que as partículas de segunda fase, para o material sem tratamento térmico (STT), tendem a diminuir de tamanho e intensidade, dispersando-se nas seções observadas à medida que o grau de deformação aumenta. Este comportamento provavelmente está associado ao tamanho dos *dimples* gerados.

As micrografias referentes à topografia da fratura, agrupadas na Figura 4, também para STT, sugerem que a liga de titânio apresenta, de uma forma geral, *dimples* com dimensões que variam muito pouco, provavelmente por estarem relacionados com a intensidade, dispersão e tamanho das partículas, apesar de apresentarem aspecto transgranular, confirmando a elevada ductilidade e trabalhabilidade da liga.

Observando-se as Figuras da liga que foi submetida a temperatura de 230°C por uma hora, é possível notar que os *dimples* apresentam um aspecto transgranular e um aparente aumento de profundidade e de dimensões em comparação com os *dimples* para a liga sem tratamento térmico. Esta diferença observada nas fraturas com tratamento térmico (CTT), pode estar ligada a etapa da recuperação estática, que tem como consequência atenuar o emaranhado das discordâncias geradas no processo de deformação. Este mecanismo pode ter ocorrido devido à temperatura na qual a amostra foi exposta por uma hora e que pode resultar, comparativamente, em boa ductilidade na liga, resultando no aspecto mais profundo e mais aberto dos *dimples*.

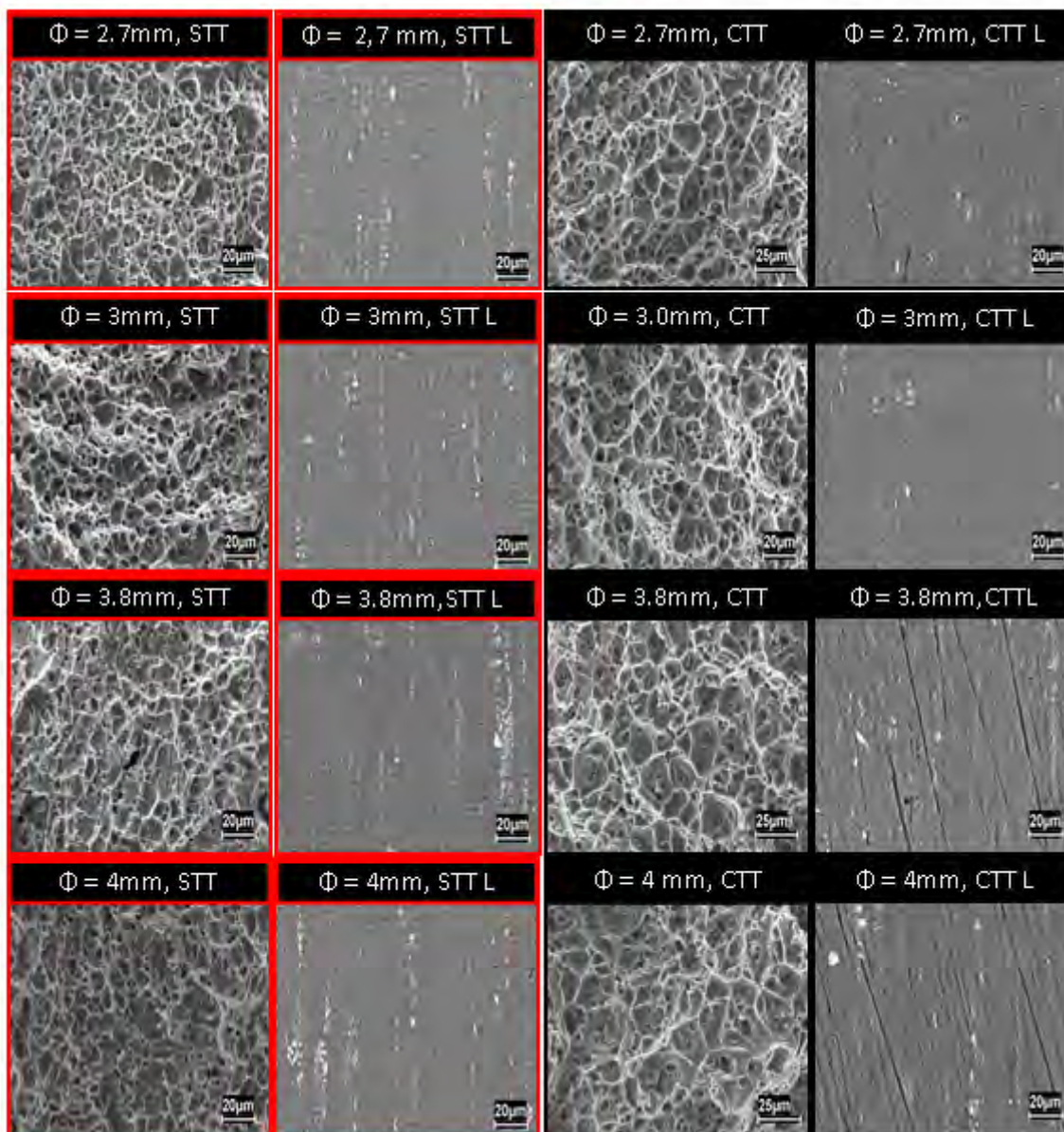


Figura 4. Topografia da fratura e corte longitudinal para os CPs com teor 0,26%Ti, para os fios com diâmetros [2,7; 3; 3,8; 4]mm, sem e com teste de termorresistividade, respectivamente.

A variação nas dimensões dos *dimples* é regida pela diminuição da área e aproximação de partículas de segunda fase, movimentação de discordâncias e deslocamentos de contornos de grão. Estes elementos promovem a nucleação, crescimento e a coalescência dos *dimples*.

Através dos valores da Tabela 2, fica evidente haver tendência de redução do tamanho dos *dimples* à medida que ocorreu a diminuição dos diâmetros tanto para a liga STT como para a liga CTT.

Tabela 2. Valores da leitura de dimensões de *dimples* e dos desvios padrões para os teores de [0,05-0,15-0,26]%Ti obtidos para os respectivos diâmetros dos fios, com e sem tratamento térmico

Ligas	Diâmetro (φ [mm])	Tamanho de <i>Dimples</i> [μm]					Média [μm]	Desvio Padrão [μm]
0,26 % Ti - STT	2,7	7,974	6,824	9,050	6,358	9,045	7,850	1,241
	3	7,341	9,4325	8,117	9,794	6,129	8,163	1,507
	3,8	7,435	8,777	10,165	9,267	7,118	8,552	1,272
	4	8,744	10,430	8,427	9,669	11,362	9,726	1,207
0,26 % Ti - CTT	2,7	8,557	9,819	6,774	9,183	9,254	8,717	1,175
	3	8,045	9,968	10,883	10,1115	7,199	9,241	1,548
	3,8	8,619	10,575	9,050	10,854	8,339	9,487	1,153
	4	9,378	10,717	8,800	10,808	8,045	9,549	1,204

O diâmetro de 3 mm se destacou dentre os desvios padrões dos quatro diâmetros, e este comportamento, que ocorreu para as ligas com e sem Teste de Termorresistividade, pode estar relacionado com a recuperação dinâmica e com a coalescência das microcavidades, as quais, por sua vez, podem estar associadas à maior tenacidade para o perfil de 3 mm.

3.3 Caracterização Elétrica da Liga

A caracterização elétrica da liga foi realizada com base na condutividade elétrica obtida para os diferentes diâmetros dos fios. Com vistas à melhor emissão de juízo de valor destes resultados, os mesmos foram relacionados com os desvios padrões das dimensões médias dos *dimples*. Logo, estes foram realizados com e sem teste de termorresistividade

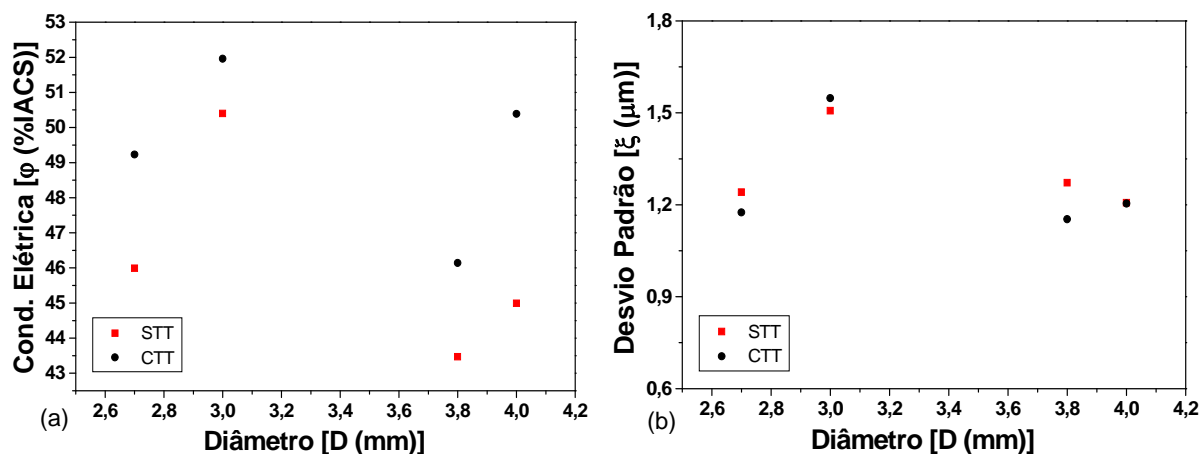


Figura 5. (a) Condutividade Elétrica e o (b) desvio padrão em função dos teores de [0,05- 0,15- 0,26]% de Ti, sem teste termorresistente.

Ao avaliar-se o gráfico, torna-se evidente o melhor comportamento apresentado pelos fios submetidos por uma hora à temperatura de 230°C, pois estes obtiveram maiores valores de condutividade elétrica, com destaque especial para o diâmetro de 3 mm tratado termicamente, cujo obteve o maior valor de condutividade elétrica. No entanto, observa-se também que o fio com diâmetro de 3 mm apresenta também o melhor resultado sem o teste de termorresistividade. Além disso, observou-se que para este diâmetro, o valor do desvio padrão foi maior – dada a variabilidade do tamanho dos *dimples* –, o que pode estar associado ao melhor desempenho

encontrado. No mais, tais resultados mostram que a taxa de deformação entre os diâmetros de 3,8 e 3mm provocam possivelmente um período de alívio de tensões seguido de trabalho a frio intenso, o que contribui para melhorar a capacidade de conduzir eletricidade da liga Al-EC-0,7%Si modificada com o teor de Ti.

3.4 Caracterização Mecânica da Liga

A propriedade mecânica da liga com teor de 0,26%Ti – com e sem teste de termorresistividade – foi analisada, em função dos diâmetros de [2,7; 3; 3,8 e 4]mm, através do Limite de Resistência à Tração (LRT). E visando melhor compreender a relação existente entre as características mecânicas e o tamanho das microcavidades, os desvios padrões também foram dispostos na Tabela 3 e Figura 5.

Tabela 3. Resultados experimentais do LRT com e sem teste de termorresistividade

Diâmetro [ϕ_F (mm)]	STT		CTT	
	LRT [MPa]	Desvio Padrão [μm]	LRT [MPa]	Desvio Padrão [μm]
2,7	230,800	1,241	201,660	1,175
3	248,340	1,507	232,040	1,548
3,8	205,580	1,272	178,780	1,153
4	207,000	1,207	187,100	1,204

Ao avaliar a Tabela 3, nota-se que as amostras submetidas ao teste de termorresistividade apresentam uma tendência de decréscimo da resistência mecânica, e que segundo Padilha e Siciliano Junior,⁽⁵⁾ isto pode estar ocorrendo devido a um rearranjo das discordâncias, seguido do aniquilamento das mesmas, o que é provocado pelo aquecimento.

Na Figura 5, verifica-se que os resultados obtidos para o fio de diâmetro de 3 mm, tanto para o comportamento elétrico como para o mecânico, apresentou a melhor resposta. E desta forma, quando ocorre um ganho considerável de condutividade elétrica sem que o LRT seja prejudicado, é um comportamento característico do fenômeno de recuperação dinâmica.⁽⁶⁾

Os melhores resultados atribuídos ao diâmetro 3mm, também pode estar atribuído as maiores variações do tamanho das microcavidades, que pode ser visto através dos valores de desvio padrão.

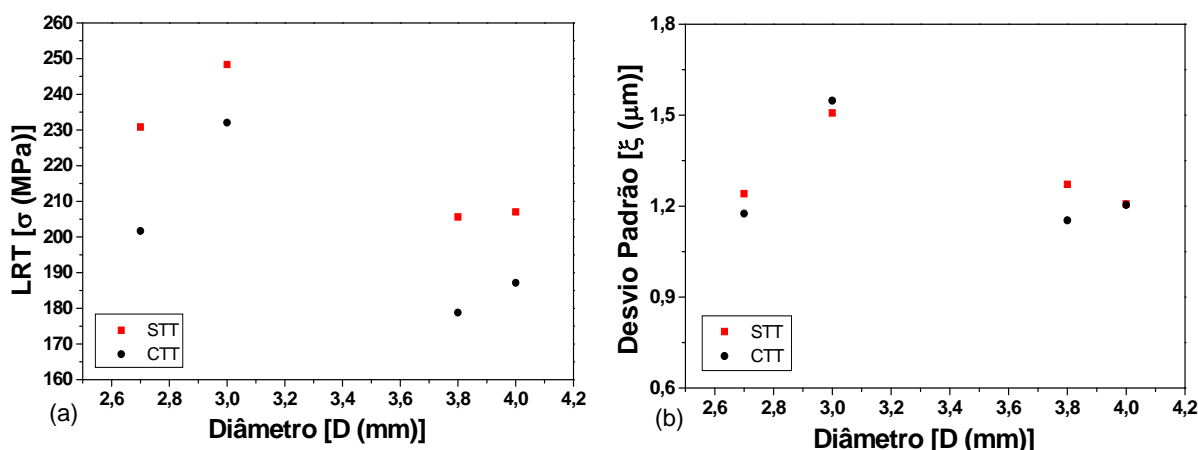


Figura 5. (a) Evolução do LRT com e sem teste de termorresistividade; (b) Desvio Padrão em função dos diâmetros com e sem teste de termorresistividade.

3.4.1 Avaliação das perdas de limite de resistência à tração da liga

De acordo com o Protocolo COPEL, as ligas para cabos de transmissão, após serem submetidas a uma temperatura de 230°C por 1h, não devem perder mais do que 10% do LRT, pois isso implicaria em danos significativos quando do emprego destas na distribuição e transmissão de energia elétrica. Assim, para análise da termorresistividade, a Tabela 3 apresenta os resultados experimentais de LRT tanto para a liga sem tratamento térmico, como para a liga com tratamento térmico.

Os valores calculados de perda de LRT para os diâmetros da liga submetida ao teste de termorresistividade estão plotados no gráfico da Figura 6, possibilitando observar-se o bom resultado obtido para o fio de diâmetro de 3 mm para a liga com 0,26%Ti, sendo este o que melhor atende ao Protocolo COPEL, quando comparado ao do diâmetro de 4 mm.

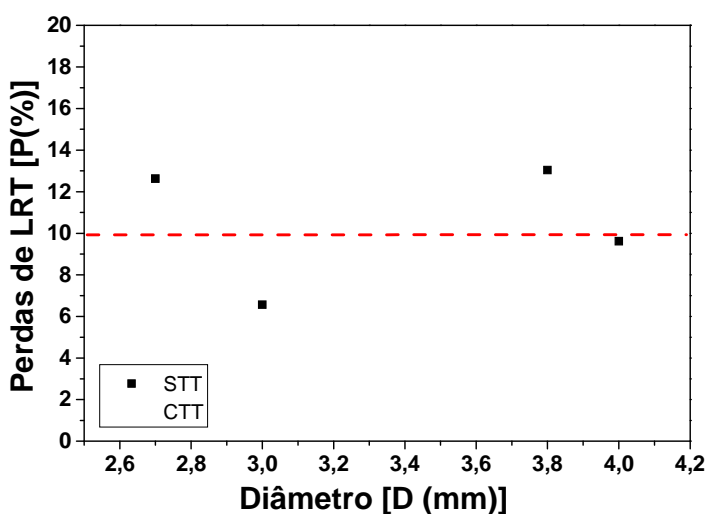


Figura 6. Porcentagens de perdas de LRT para a liga.

4 CONCLUSÃO

Para o STT, ao analisar as imagens das seções seccionadas abaixo da fratura, no sentido longitudinal, foi possível notar que as partículas de segunda fase tenderam a diminuir à medida que o diâmetro dos fios foi diminuído, situação esta que parece estar associada ao tamanho dos *dimples*, uma vez que estes apresentaram um comportamento semelhante, pois também tenderam a diminuir à medida que o grau de deformação aumentou.

Para o CTT, percebeu-se o mesmo comportamento com a diminuição dos *dimples* e a dispersão das partículas de segunda fase na medida em que se aumenta o grau de encruamento.

Com relação ao desvio padrão, foi notável o desempenho do fio com diâmetro de 3 mm, tanto para a liga sem tratamento como para a com tratamento térmico, fato que pode estar associado à coalescência dos *dimples*.

A liga tratada termicamente apresentou maiores valores de condutividade elétrica, sendo que o fio com diâmetro de 3 mm se destacou em ambos os métodos, comportamento esse provavelmente causado pelo fenômeno de recuperação dinâmica ocorrido durante a deformação plástica.

Com relação ao LRT, o diâmetro de 3 mm para ambos os casos apresentou melhores resultados, sendo que para o STT os valores de LRT foram mais elevados. O fio com diâmetro de 3 mm da liga de Ti foi o único diâmetro e teor, dentre os estudados aqui, a atender o protocolo COPEL.

A correlação entre o desvio padrão com as propriedades mecânicas e elétricas mostrou que, quanto maior a variabilidade das dimensões dos *dimples* (com ênfase em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica), melhor a sua aplicabilidade, pois melhora as duas propriedades.

REFERÊNCIAS

- 1 Associação Brasileira de Alumínio; ABAL. Disponível em: <http://www.abal.org.br/aluminio/temperas.asp>. Acesso em: 12 fev. 2012.
- 2 COPEL, Especificação Técnica [00000-30009-082], Abr., 2006.
- 3 Associação Brasileira de Normas Técnicas; ABNT NBR 5118. Fios de alumínio 1350 nus, de seção circular, para fins elétricos, Rio de Janeiro, 2006.
- 4 ABNT NBR 6810. Fios e cabos elétricos: Tração à ruptura em componentes metálicos, Rio de Janeiro, NBR 6810, 1981.
- 5 PADILHA, A.F. & SICILIANO JR., F. Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura. São Paulo, ABM, p. 158, 1996.
- 6 PADILHA, A.F. & SICILIANO JR., F. Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura. São Paulo, ABM, p. 123, 1995.