

# CORRELAÇÃO ENTRE A CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA, ELÉTRICA E ESTRUTURAL DA LIGA AL-0,9%SI MODIFICADA COM (0,05 E 0,2)%TI <sup>1</sup>

*Emmanuelle Sá Freitas<sup>2</sup>  
Luciana Bezerra Farias<sup>2</sup>  
Washington Luiz Reis Santos<sup>2</sup>  
Paulo Cordeiro Machado<sup>3</sup>  
José Maria do Vale Quaresma<sup>4</sup>*

## **Resumo**

Neste trabalho foi analisada a variação do teor de Titânio e sua influência na condutividade elétrica, no limite de resistência a tração e na trabalhabilidade da liga. As ligas estudadas Al-0,9%Si-(0,05 e 0,2)%Ti, foram vazadas em lingoteiras de aço SAE 1010. Os corpos de prova foram usinados para um diâmetro de 9,5mm e, desta forma um primeiro conjunto destes foram avaliados mecânica e estruturalmente. Um segundo conjunto de corpos de prova usinado foi laminado a frio até o diâmetro de 3,98mm e, desta forma caracterizados mecânica, estrutural e eletricamente. Os resultados destes ensaios associam a presença das Linhas de Ferro, com o teor e distribuição do Titânio ao comportamento mecânico e elétrico da liga Al-Si modificada.

**Palavras-chave:** Liga Al-Si; Propriedades mecânicas; Condutividade elétrica; Caracterização estrutural.

## **CORRELATION BETWEEN THE MECHANICAL CHARACTERIZATION, ELECTRICAL AND STRUCTURAL LEAGUE AL-0, MODIFIED WITH 9% SI (0,05 AND 0,2)% TI**

### **Abstract**

In this work, the Titanium variation content was analyzed and its influence in alloy's electrical conductivity, tensile strength, and workability. The studied Al-0.9%Si-(0.05 e 0,2)%Ti alloys were poured in a SAE 1010 steel ingot mold. The test specimen were machined to 9.5 mm diameter. By this way, a primary group was mechanical and structural evaluated. A second group of machined tests specimen was cold-rolled until 3.98 mm diameter and mechanical, structural and electrical characterized. The results of these tests associate Iron Lines' presence with Titanium distribution and content to mechanical and electrical behavior of Al-Si modified alloy.

**Key words:** Al-Si alloy; Mechanical properties; Electrical conductivity; Structural characterization.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Mestrandos, Universidade Federal do Pará.*

<sup>3</sup> *Graduando, Universidade Federal do Pará.*

<sup>4</sup> *Doutor. Universidade Federal do Pará.*

## 1 INTRODUÇÃO

O trabalho proposto visa o estudo de uma liga Al-Si modificada com Ti, como sabemos o sistema Al-Si é amplamente estudado, porém possui solubilidade sólida limitada em ambas as extremidades, forma um eutético simples à temperatura de 580 °C para um teor de 12,5 % de silício.<sup>(1)</sup>

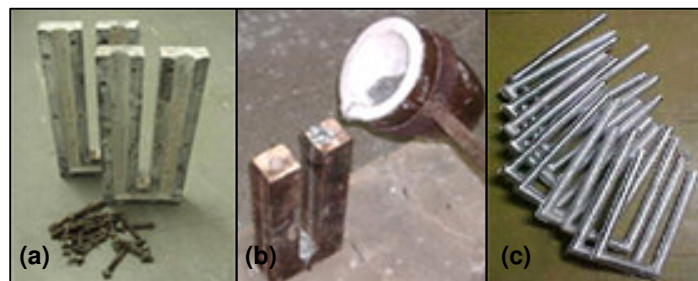
As ligas do sistema Al-Si são as mais importantes entre as ligas fundidas de alumínio, principalmente por sua alta fluidez, baixa contração nos fundidos, elevada resistência à corrosão, boa soldabilidade, fácil brasagem e seu baixo coeficiente de expansão térmica.

O Titânio é adicionado em pequenos teores (de 0,05% a 0,2%) como refinador de grão, tendo como consequência o aumento da resistência à tração e da ductilidade, reduzindo, porém a condutividade térmica.<sup>(2)</sup>

A resposta em relação a trabalhabilidade será também observada, visto que é um conceito tecnológico complexo, que está relacionada com a magnitude com a qual um material é deformado em um processo de conformação plástica específico, tais como forjamento, trefilação, extrusão, embutimento, sem sofrer fissuras superficiais, além de se deixar endurecer mantendo parcialmente a ductilidade. O trabalho a frio é acompanhado do encruamento (*strain hardening*) do metal, que é ocasionado pela interação das discordâncias entre si e com outras barreiras – tais como contornos de grão – que impede o seu movimento através da rede cristalina.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

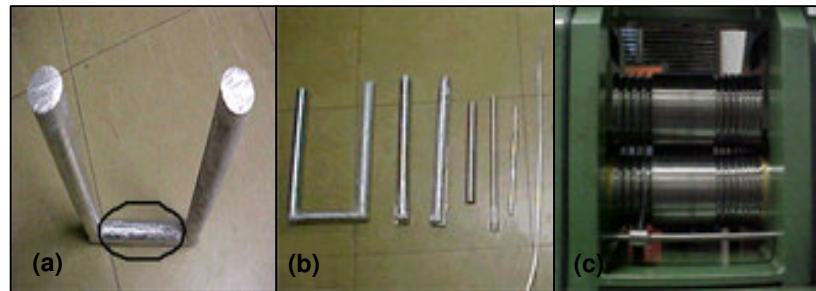
As ligas Al-0,9%Si, modificadas com (0,05 e 0,2)%Ti, foram preparadas por fundição utilizando Alumínio comercial em cadinhos de Carbetto de Silício revestido interiormente por uma pintura protetora de Caulim, em um forno tipo Mufla. As ligas foram vazadas nas mesmas condições térmicas, em um molde de coquilha de aço carbono com o formato de “U” (Figura 1a). A utilização do molde “U” além de permitir uma avaliação rápida da ação do elemento de liga sobre a base metálica a ser modificada possibilita a obtenção de corpo de prova com dimensões suficientes para gerar amostras longas e de secção cilíndrica a partir da usinagem e deformação dos braços do “U”, facilitando a obtenção dos fios com os quais serão feitas as caracterizações mecânica e elétrica das ligas.



**Figura 1.** (a) Molde bi-partido em forma de “U”, (b) Vazamento e (c) Lingotes obtidos do vazamento.

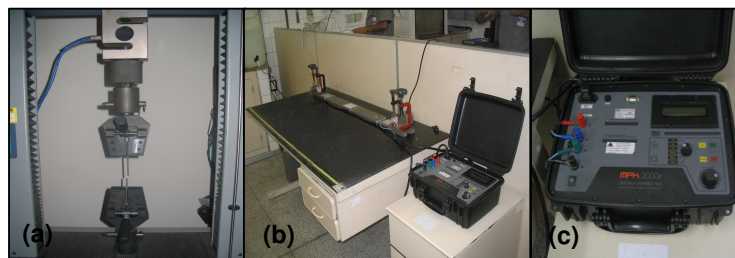
A peça obtida em formato de U é cortada na base, sendo usinados os maiores comprimentos “braços” até o diâmetro [ $\phi$ ] de 9,5 mm, em seguida lamina-se à frio em um laminador duo elétrico com canal circular, sendo feitos sucessivos

passes até chegar-se a fios de  $[\phi] = 3,98$  mm. Estas etapas encontram-se ilustradas na Figura 2.



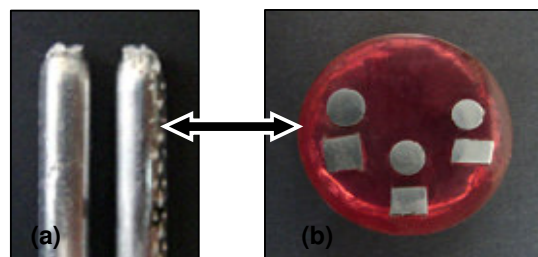
**Figura 2.** (a) Região de corte do lingote, (b) Etapas de preparação e deformação da liga nos diâmetros de usinagem ( $\phi=9,5$  mm) e laminação ( $\phi=3,98$  mm) e (c) Laminador.

Após o processo de deformação os corpos de prova obtidos são caracterizados eletricamente através do ensaio de resistividade/conductividade no qual, utiliza-se um Micro Homímetro, marca Megabras, modelo MPK – 2000e, obedecendo a norma NBR-6814.<sup>(3)</sup> A caracterização mecânica realiza-se através de ensaios de tração segundo a norma NBR-6810,<sup>(4)</sup> utilizando-se uma máquina Kratos, modelo KE 3000 MP. Estes equipamentos podem ser vistos na Figura 3.



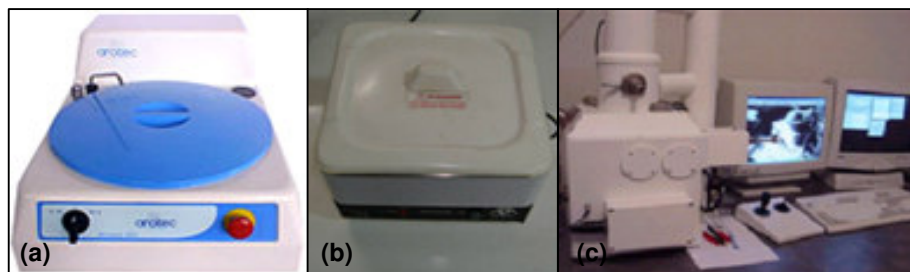
**Figura 3.** Equipamentos para a Caracterização Mecânica [KRATOS] e Elétrica [Micro Homímetro].

Sendo feita a caracterização mecânica, obtêm-se corpos-de-prova resultantes do ensaio de tração (Figura 4a), que será preparada para caracterização estrutural realizada via Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV que envolve corte da região da fratura e cortes transversal e longitudinal do fio ensaiado. Os cortes transversal e longitudinal são analisados a partir de embutimentos preparados com resina, a fim de facilitar e possibilitar o polimento das peças que precisam está com suas superfícies perfeitamente planas e polidas para análise (Figura 4b).



**Figura 4.** (a) Superfície fraturada, (b) Embutimento dos cortes transversal e longitudinal.

Os embutimentos são preparados com o uso de uma Politriz (Figura 5a), e posteriormente limpas assim como as fraturas em um aparelho de Ultra som (Figura 5b).



**Figura 5.** (a) Politriz elétrica, (b) Ultra som modelo METASOM – 14 e (c) Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

As imagens microestruturais das ligas são obtidas no MEV, mostrado na Figura 5(c). Onde a técnica adotada para a análise das fraturas é por elétrons secundários, com a finalidade de se observar a topografia da fratura, já para análise das amostras embutidas usa-se a técnica de elétrons retro espalhados, onde é possível observar as chamadas “Linhas de Ferro”.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Caracterização Mecânica e Elétrica

Na Tabela 1, encontra-se o resumo dos resultados das propriedades mecânicas e elétricas, tanto para as ligas em forma de vergalhão ( $\phi=9,5$  mm) como para as ligas deformadas a fio “laminadas” ( $\phi=3,98$  mm), onde pode ser observado que a liga modificada com 0,05% de titânio apresenta de início uma tendência a melhores propriedades.

**Tabela 1:** Resultados da caracterização mecânica e elétrica das ligas estudadas.

Vergalhão (9,5 mm)			Fio (3,98 mm)		
Liga	LRT (MPa)	Alongamento (%)	LRT (MPa)	Alongamento (%)	C.E (%IACS)
Al-0,9%Si	<b>43,06</b>	<b>8,53</b>	<b>149,67</b>	<b>4,61</b>	<b>52,72</b>
Al-0,9%Si-0,05%Ti	<b>81,25</b>	<b>15,09</b>	<b>173,12</b>	<b>8,30</b>	<b>52,19</b>
Al-0,9%Si-0,2%Ti	<b>80,42</b>	<b>12,22</b>	<b>140,51</b>	<b>4,27</b>	<b>50,59</b>

Na Figura 6, estão mostrados graficamente os resultados da Tabela 1, para cada diâmetro e modificação com Ti.

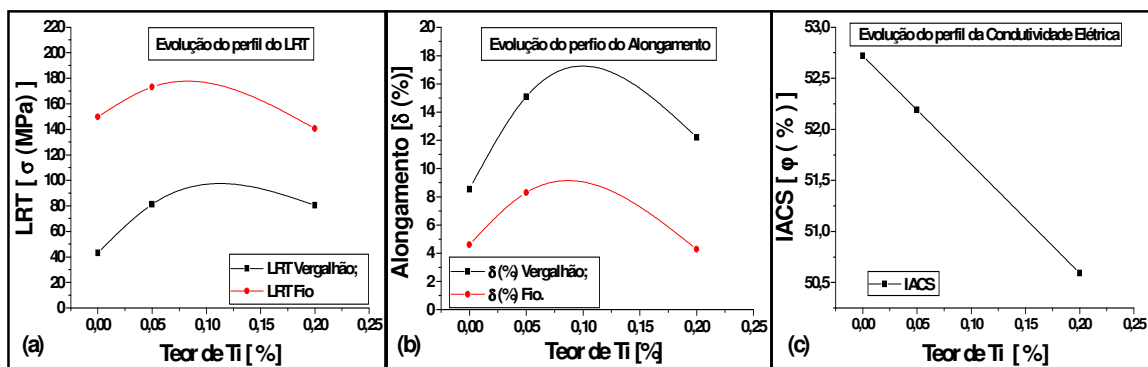


Figura 6. Comportamento gráfico dos resultados da caracterização mecânica (a) e (b), e caracterização elétrica(c).

## 3.2 Caracterização Estrutural

### 3.2.1 Análise microestrutural da fratura

Com as fraturas dos corpos de prova ensaiados mecanicamente das ligas, Al-0.9%Si, Al-0.9%Si-0.05%Ti e Al-0.9%Si-0,2%Ti, deu-se início a caracterização estrutural tanto para o diâmetro de vergalhão ( $\phi = 9,5$  mm) como para a liga deformada a fio ( $\phi = 3,98$  mm). A seguir estão os resultados das análises realizadas no MEV.

Na Figura 7, estão ilustradas as micrografias das fraturas para os corpos-de-prova com diâmetro de 9,5mm, as imagens foram capturadas via MEV com aproximações de 1.000 x.

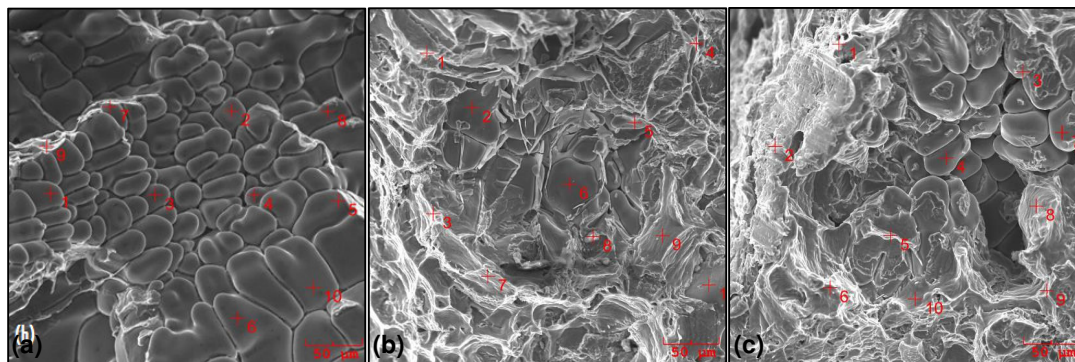
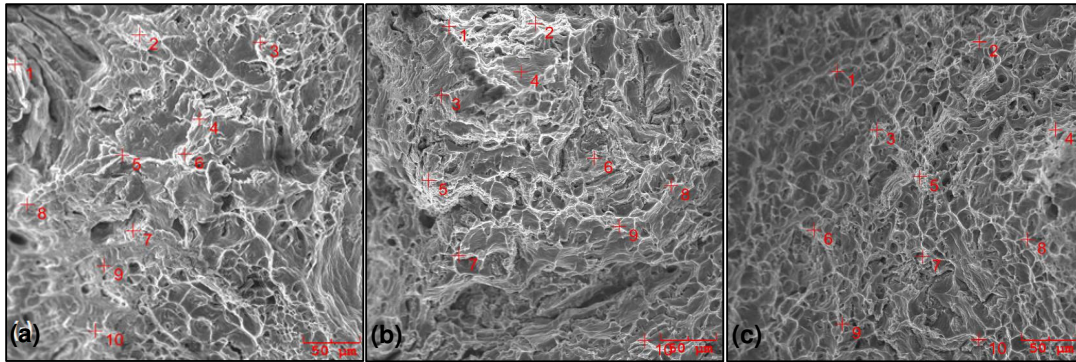


Figura 7. Micrografia das fraturas com 9,5 mm de diâmetro: (a) Liga Al-0,9%Si, (b) Liga Al-0,9%Si-0,05%Ti e (c) Liga Al-0,9%Si-0,2%Ti.

Na Figura 8, estão ilustradas as micrografias das fraturas para os corpos-de-prova com diâmetro de 3,98mm, as imagens foram capturadas via MEV com aproximações de 1.000 x.

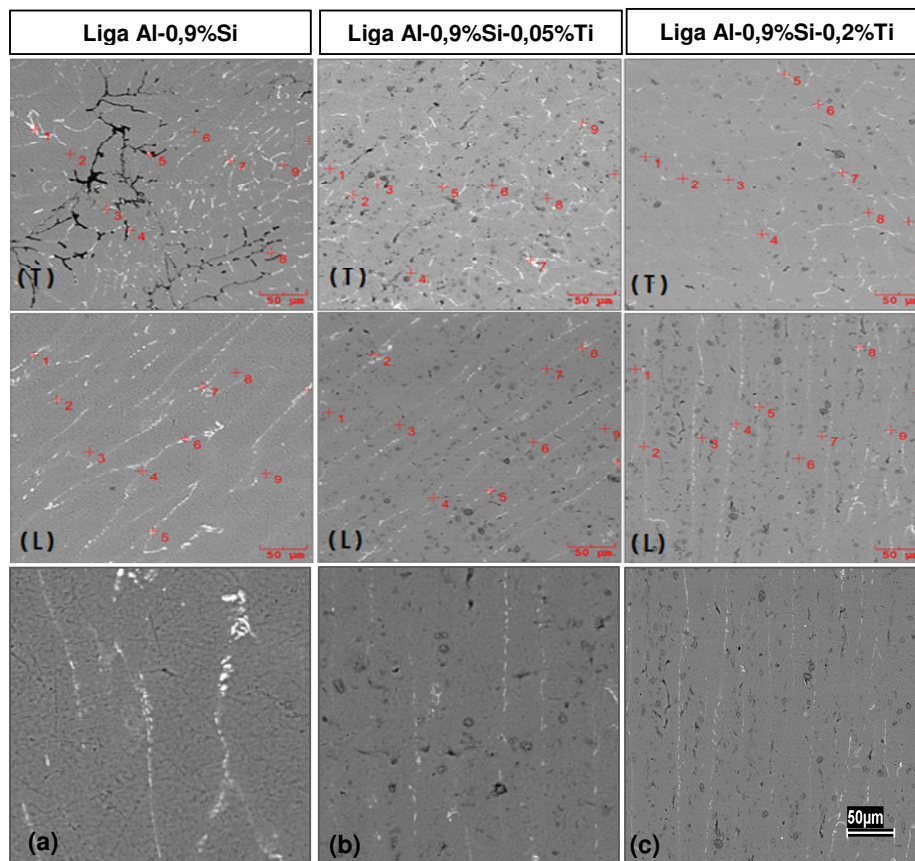




**Figura 8.** Micrografia das fraturas com 3,98 mm de diâmetro: (a) Liga Al-0,9%Si, (b) Liga Al-0,9%Si-0,05%Ti e (c) Liga Al-0,9%Si-0,2%Ti.

### 3.2.2 Análise de corte longitudinal e transversal das ligas estudadas: “linhas de ferro”

A partir de corpos-de-prova preparados para análise no MEV por elétron retro espalhados, foi possível observar a distribuição das “Linhas de Fe” nas secções transversais e longitudinais das três ligas estudadas, as imagens foram capturadas com aproximação de 1,500x, mostradas na Figura 9.



**Figura 9.** Análise do MEV pela técnica de elétrons retro espalhados para avaliação das linhas de Ferro para os fios com  $\phi = 3,98$  mm, (a) Al-0,9%Si, (b) Al-0,9%Si-0,05%Ti e (c) Al-0,9%Si-0,2%Ti. técnica de elétrons retro espalhados

## **4 DISCUSSÃO**

### **4.1 Caracterização Mecânica e Elétrica**

A caracterização mecânica e elétrica realizada atendeu as normas NBR6810 e NBR6814, respectivamente. Os resultados do ensaio mecânico (vergalhão de  $\phi = 9,5\text{mm}$  e fio  $\phi = 3,98\text{mm}$ ) e elétrico para o fio  $\phi = 3,98\text{mm}$ , presentes na Tabela 1, mostram que a presença do Titânio no teor de 0,05% modificou positivamente as propriedades analisadas. A condição de boa trabalhabilidade fica entendida pelo diâmetro obtido e sem defeitos superficiais. E pela boa deformação plástica, que mesmo com o material encruado, ainda mostrou um bom alongamento.

O limite de resistência a tração para as ligas estudadas foi modificado sensivelmente com a adição de 0,2% do Titânio. À medida que o Titânio teve seu teor aumentado houve decréscimo das propriedades mecânicas e elétricas. Apesar de a condutividade elétrica decair muito suavemente para o teor de 0,05%Ti e mais acentuada para o teor de 0,2%Ti. A baixa variação da Condutividade Elétrica, associada ao bom desempenho mecânica, representa um resultado favorável à experimentação realizada.

### **4.2 Caracterização Estrutural**

#### **4.2.1 Análise microestrutural da fratura**

Na Figura 7(a), pode ser observada a fratura do vergalhão da liga Al-0,9%Si, na qual os grãos da matriz encontram-se intactos indicando que a fratura aconteceu entre os grãos – Intergranular, caracterizando uma fratura frágil. Na Figura 8(a), pode ser observada a fratura do fio na qual é observada outro tipo de fratura, desta feita através dos grãos – Transgranular, pela presença de micro cavidades e com aspecto dúctil.

Referente à liga Al-0,9%Si-0,05%Ti, pode ser observado que os grãos da matriz tanto para o vergalhão Figura 7(b) como para o fio Figura 8(b) não se encontram mais intactos indicando que a fratura aconteceu através dos grãos – Transgranular, pela presença de micro cavidades com aspecto refinado, caracterizando uma fratura dúctil.

Por outro lado, referente a liga Al-0,9%Si-0,2%Ti, pode ser observado que na fratura do vergalhão da liga (Figura 7c), os grãos da matriz encontram-se quase que intactos, indicando que a fratura aconteceu entre os grãos – Intergranular. Enquanto que na Figura 8(c), pode ser observado outro tipo de fratura, esta feita através dos grãos – Transgranular, pela presença de micro cavidades com aspecto bastante refinado.

De uma forma geral, de acordo com as micrografias do material deformado (Fio  $\phi 3,98\text{ mm}$ ), na Figura 8, comparando-se as micrografias, fica evidente que os mecanismos de fratura foram distintos. Pode ser também, observado que à medida que o teor de Titânio aumenta as microcavidades diminuem, indicando a ação de refinar grãos do Titânio.

#### **4.2.2 Análise de corte longitudinal e transversal das ligas estudadas: “linhas de ferro”**

Depois de analisadas as topografias das superfícies das fraturas, foram feitos cortes longitudinal e transversal nos corpos de prova das ligas deformadas, para que além da região da fratura, pudesse ser observada a distribuição das Linhas de Ferro

nas mesmas, as quais foram seqüencialmente mostradas na Figura 9. Visto que a partir dos resultados obtidos, a distribuição do Ferro representado pelos pontos brancos devido ao seu maior peso atômico, foram confirmados. Constatando-se também que com maior teor de Ti as Linhas de Ferro tornam-se menos evidentes, como pode ser observado na Figura 9. A conseqüência disto pode ser a maior dificuldade em transferir e/ou distribuir energia elétrica como indicado pela Figura 6(c).

## **5 CONCLUSÃO**

Tendo em vista que o objetivo principal foi o estudo de uma liga de base muito pesquisada, Alumínio-Silício, sendo modificada com Titânio; os resultados apontaram para os seguintes aspectos:

- na característica de trabalhabilidade, a liga com 0,05%Ti apresentou um excelente comportamento, quase que duplicando seu alongamento para o material deformado;
- quanto a caracterização mecânica a liga com 0,05%Ti também apresentou melhor comportamento ao reagir melhor a deformação plástica à frio e, conseqüentemente, ao encruamento;
- quanto a caracterização elétrica, as duas ligas, modificadas com Titânio, apresentaram valores inferiores em relação a liga Al-0,9%Si, sendo que a medida que o teor de Ti aumenta, a condutividade elétrica diminui; e
- os resultados parecem indicar que teores de titânio crescente, em ligas de Alumínio-0,9%Si, podem desfavorecer as características mecânicas e, de forma mais agressiva, prejudicar a condutividade elétrica.

## **REFERENCIAS**

- 1 BROOKS, C.R. "Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys", American Society for Metals (ASM), Metals Park, Ohio, USA, 1982, chapter 9, p.329-387.
- 2 GOMES, M. R; FILHO, E. B. Propriedades e Usos de Metais Não-Ferrosos, ABM, São Paulo, 1987.
- 3 ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas –“ Fios e cabos elétrico -Ensaio de resistência elétrica”, Rio de Janeiro, Mar. 1986, NBR 6814
- 4 ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas –“ Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos”, Rio de Janeiro, Ago. 1981, NBR 6810.