

CORRELAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS MACROESTRUTURAIS, ELÉTRICAS E MECÂNICAS DAS LIGAS Al-1% e Al-2%Si

Luane Luiza Pereira arques, luanemarques18.lm@gmail.com¹
Wellington Bruno Silva de Jesus, wellingtonjesus.eng@gmail.com²
Jenniffer Cristina Pena dos Santos, penajcps@gmail.com¹
Mateus José Araújo de Souza, mateus.souza@itec.ufpa.br²
Yan Christian Silva de Araújo, ycsaraujo@gmail.com¹
Amanda Lucena de Medeiros, almedeiros@hotmail.com.br²
Emerson Rodrigues Prazeres, eng.emersonrodrigues@gmail.com²
Deibson Silva da Costa, deibsonsc@yahoo.com.br¹

¹ Universidade Federal do Pará, Colégio Intelectual- Tv. we vinte e seis, 2 – Coqueiro, Ananindeua – PA, 67130-7189.

² Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa, 01- Guamá, Belém – PA, 66067-110.

Resumo: O alumínio é um material não ferroso que possui baixa densidade, leveza, condutibilidade térmica e elétrica muito similar ao cobre (Cu), podendo suas ligas substituírem em algumas aplicações as ligas de cobre. É um material reciclável em grande abundância na crosta terrestre. Em decorrência das respectivas propriedades esse metal é capaz de substituir materiais tradicionalmente utilizados nos setores automobilísticos, aeroespaciais e na produção de cabos e fios condutores de energia elétrica. O objetivo do presente trabalho consiste em produzir duas ligas de Alumínio com adição de 1 e 2% de Si por métodos convencionais de fundição, correlacionar suas macroestruturas, avaliar a condutividade elétrica e o LRT (Limite de Resistência a Tração) dos fios após a laminação. O material foi fundido e vazado em molde de coquilha vertical, após o desmolde, foi retirado uma amostra na qual foi preparada através do processo de metalografia, em seguida foi feito o ataque químico com o ácido keller revelando a macroestrutura do material, o restante da liga foi usinada até o diâmetro de 18,5 cm e laminada a frio até o diâmetro fosse reduzido a 3 mm. Foi realizado o ensaio de condutividade elétrica do fio com 40 cm de distância entre garras de acordo com as normas NBR 5118 e NBR 6814. Posteriormente foi feito o ensaio de tração nos fios com distância de 15 cm entre as garras, de acordo com NBR 6810. De acordo com os resultados, foi possível observar há presença parcial em sua macroestrutura de grãos equiaxiais e colunares. O ensaio de condutividade elétrica mostrou que quanto menor a porcentagem de silício maior a condutividade elétrica. Porém, a liga que teve maior LRT foi a liga com maior teor de Si (Al-2 %Si). Logo, os resultados foram satisfatórios ficando evidente que ambas tiveram ganhos em suas propriedades.

Palavras-chave: Alumínio, Propriedades, Solidificação, Silício.

1. INTRODUÇÃO

O alumínio (Al) é o elemento mais abundante da crosta terrestre e o metal mais utilizado comercialmente (Abal, 2012). Sendo um metal não ferroso que apresenta excelentes propriedades físico- químicas, com destaque a resistência à corrosão, baixa densidade, elevada condutividade térmica e elétrica, além de facilidade no processamento por vários métodos de fabricação. Sua posição no cenário industrial mundial perde apenas para o aço (Almeida, 2013).

O alumínio não é tóxico como metal, não-magnético e não cria faíscas quando exposto a atrito. Quando puro possui tensão de cerca de 19 megapascas (MPa) e 400 MPa se inserido dentro de uma liga. Sua densidade é aproximadamente de um terço do aço ou cobre. É muito maleável e dúctil, apto para a mecanização e fundição, além de ter uma excelente resistência à corrosão e durabilidade devido à camada protetora de óxido. É o segundo metal mais maleável, sendo o primeiro o ouro, e o sexto mais dúctil (Prazeres, 2014).

Um dos principais elementos de ligas utilizados nesses processos é o silício (Si), pois sua combinação com Al diminui a temperatura de fusão, aumenta a fluidez da liga e a resistência mecânica, melhorando também a ductilidade (Wada, 2013).

O processo de fundição ocorre quando o metal fundido é vazado em um molde, que logo após se solidifica (Callister, 2021). A macroestrutura é definida pela caracterização de seus grãos cristalinos, que são classificados em três regiões durante o resfriamento da peça: zona coquilhada, tem formação de grãos cristalinos com orientações aleatórias, de pequenas

dimensões, localizada junto as paredes do molde; zona colunar, contem grãos cristalinos alongados e alinhados perpendicularmente as paredes do molde e zona equiaxial, composta por grãos sem orientação preferencial e de dimensões maiores que os coquilhados (Prazeres, 2016).

A capacidade que um material tem de propagar uma corrente elétrica e determinada pela condutividade elétrica. O limite de resistência à tração (LRT) é a tensão no ponto máximo que o material resiste antes de acontecer sua ruptura (Callister, 2021). Assim, o Al é muito utilizado em linhas de transmissão de eletricidade por possuir boa condutibilidade elétrica e baixa densidade quando comparado ao cobre (Peixoto, 2001).

Portanto, o objetivo do presente trabalho consiste em produzir ligas de Al-1% e Al-2 % Si por métodos convencionais de fundição, correlacionar suas macroestruturas, avaliar as condutividades elétricas e o LRT (Limite de Resistência a Tração) dos fios após a laminação.

2. METODOLOGIA

2.1 Fundição e Vazamento

De início os materiais foram preparados para o processo de fundição, o cadinho utilizado no vazamento foi colocado no forno e aquecido até uma temperatura de 400 °C. Em seguida, o cadinho foi retirado do forno e pintado com caulim com objetivo de diminuir a aderência do material Figura 1 (a). Em seguida, foram introduzidos no cadinho o alumínio e silício com elevados graus de pureza, cerca de 99,98% e 99,50% respectivamente. Primeiramente a fundição foi realizada com teor de 1 % e em seguida 2 % de silício, onde o mesmos retoram para o forno da marca GREFORTEC Figura 1 (b) o qual foi programado para atingir uma temperatura de 900 °C para a fundição dos elementos.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Cadinho pintado com caulim; (b) Forno usado na fundição. Fonte: Autor, 2022.

Após atingir à temperatura programada de 900 °C, a mesma é mantida por uma hora e trinta minutos e logo em seguida o cadinho é retirado do forno para se realizar a homogeneização do metal fundido através de agitação manual vigorosa usando uma espátula de aço (Figura 2). Com o material homogeneizado, foi injetado argônio na vazão de 0, 2 L/s através de um tubo de aço inoxidável ligado a um cilindro de 10 mm³ durante 1 minuto, para a remoção de gases e impurezas com baixa densidade, foi formado na superfície do banho uma camada de escória que o protege contra a reincidência de gases nocivos ao banho metálico.

O metal em seguida foi vazado em um molde de coquilha cilíndrico metálico (Figura 2) e posteriormente, após 24 horas foi feito o desmolde. Após o desmolde foram retiradas 3 amostras utilizando uma serra manual, para os ensaios metalográfico, resistividade elétrica e limite de resistência a tração (LRT).



Figura 2. Espátula de aço e molde usados no vazamento do material. Fonte: Autor, 2022.

2.2 Metalografia

No ensaio metalográfico a amostra passou por lixas de 80 a 2000 mesh, em seguida foi polida em uma politriz moarca/modelo WEG, CFW10 (Figura 3), utilizando alumina de 1 e 0,3 microns. O ataque químico foi realizado com ácido keller de acordo com a norma ASM INTERNACIONAL 2004, para revelar a macroestrutura da liga e então seguir para análise visual.



Figura 3. Polimento da peça. Fonte: Autor, 2022.

2.3 Usinagem e Laminação

Após a desmoldagem da peça, parte foi retirada para o processo de usinagem, com um diâmetro inicial de 22 mm a mesma foi usinada até a diâmetro de 18,5 mm. Em seguida, foi realizado a laminação a frio para a confecção dos fios em uma laminadora semi- industrial marca/modelo MENAC (Figura 4) até atingirem o diâmetro de 3 mm.



Figura 4. Laminadoras utilizadas na produção dos fios. Fonte: Autor, 2022.

2.4 Condutividade Elétrica

O ensaio de condutividade elétrica foi realizado em um multiohmímetro MEGABRÁS (ponte de kelvin), modelo MPK-2000 de acordo com a norma NBR 5118, que estabelece uma temperatura superior a 10 °C e inferior a 30 °C, corrigida para a temperatura de 20 °C. Foi utilizada a equação da norma NBR 6814 para se determinar a resistividade dos fios. A distância entre as garras no fio ensaiado foi de 40 cm. Os resultados obtidos foram em seguida transformados em condutividade elétrica (IACS), “International Annealed Cooper Standard”. Padrão internacional de condutividade correspondente à apresentada por um fio de cobre com 1 m de comprimento e 1 mm² de seção transversal a 20 °C.

2.5 Limite de Resistência a Tração (LRT)

O ensaio de resistência a tração foi realizado em 3 fios com 20 cm de comprimento que posteriormente foi submetido ao ensaio de limite de resistência a tração (LRT) em um corpo de prova, de acordo com os parâmetros da norma NBR 6810 e NBR ISO 6892 no intuito de avaliar suas resistências mecânicas. O ensaio foi realizado em uma máquina de ensaio de tração marca SERVOPULSER, modelo SHIMADZU.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Macroestrutura

De acordo com Peixoto as condições termodinâmicas a solidificação se processa dando origem a núcleos, que vão crescendo e formando grãos cristalinos, que definirão a macroestrutura da peça. Onde a macroestrutura de um metal solidificado será caracterizado pelos seus grãos cristalinos, ou seja, suas dimensões, orientações, forma e distribuição.

Com base nas análises realizadas, a morfologia estrutural (Figura 5) das ligas com (a) 1 % e (b) 2 % de Si, após o processo de solidificação demonstra que a liga com 1% de Si apresenta a formação de grãos parcialmente colunares e equiaxiais, diferentemente da liga com 2 % Si que, observa-se a predominância de grãos equiaxiais.

Os contornos de grãos possuem as larguras de alguns poucos átomos e dentro deles existem desencontros atômicos na transição de orientação cristalina de um grão para o outro. Quando esses desencontros são pequenos, com poucos graus, recebe o nome de contorno de grão de baixo ângulo que pode ser descrito em termos de arranjo de discordâncias (Castro, 2013). Devido a propriedade refinadora do Si, a liga com 2 % possui maior quantidade de contornos de grãos que influenciou diretamente em suas propriedades mecânicas.

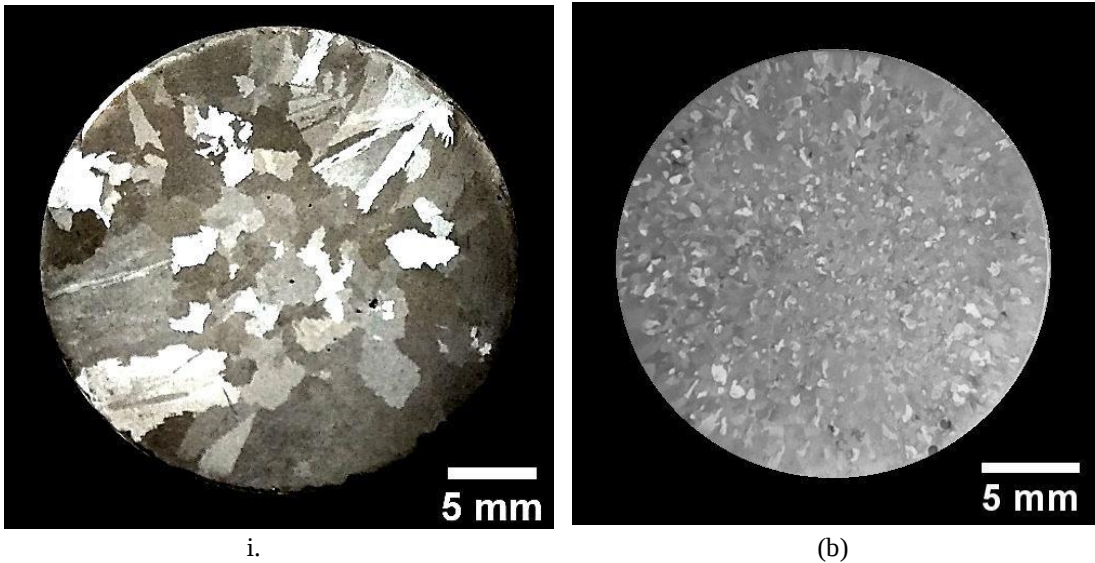


Figura 5. Macroestrutura das ligas: (a) Al- 1% Si; (b) Al- 2% Si. Fonte: Autor, 2022.

3.2 Caracterização elétrica e mecânica dos fios

Os resultados obtidos das análises de condutividade elétrica e limite de resistência a tração (LRT) das duas ligas estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1. Condutividade elétrica e LRT das ligas Al- 1% e Al-2 % Si.				
Ligas	Condutividade Elétrica		LRT	
	Valor(Ω)	Desv. P	Valor	Desv.P
Al 1%Si	60,55	0,74	205,14	2,88
Al 2% Si	57,84	0,003	228,73	5,83

Fonte: Autor, 2022.

Baseado nos resultados apresentados na Tabela 1 foi possível plotar os gráficos de condutividade elétrica e LRT adotando o diâmetro estudado e 3 mm para os fios.

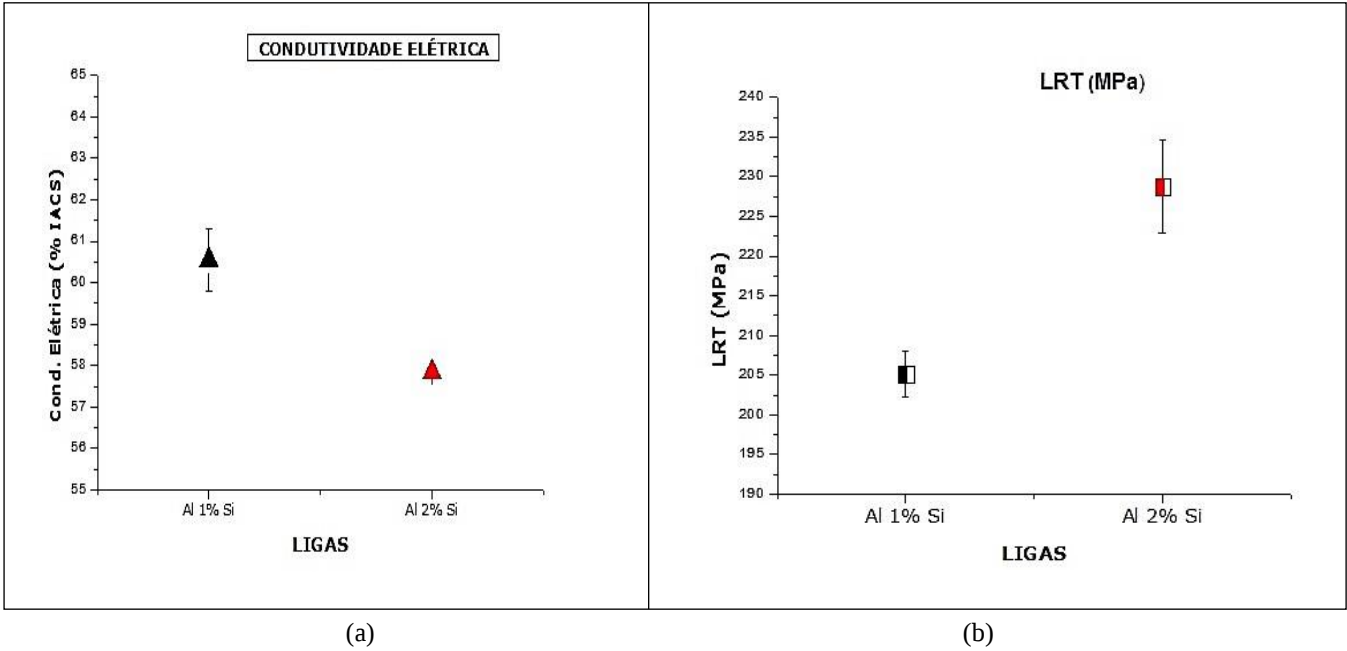


Figura 6. (a) Condutividade elétrica; (b) LRT das ligas Al- 1% e 2% Si. Fonte: Autor, 2022.

Na Figura 6 a liga com 1 % obteve o melhor desempenho na propagação de corrente elétrica, possivelmente associada a presença parcial de grãos colunares, que facilitam a passagem desta corrente elétrica, ou seja, a menor adição de Si não afeta drasticamente a capacidade de condução elétrica do alumínio puro.

Na liga com 2 % de Si o tamanho do grão material influenciou diretamente nas suas propriedades mecânicas, ou seja, os grãos adjacentes possuem, normalmente, orientações cristalográficas diferentes de um contorno de grão comum. Durante a deformação plástica que ocorreu no ensaio de tração, o escorregamento acontece através desse contorno de grão comum (Castro, 2013). Este evento de acordo com a literatura implica diretamente no desempenho mecânico da liga, pois impede a movimentação das discordâncias.

Para contorno de alto ângulo pode acontecer de as discordâncias não atravessarem o contorno de grão durante a deformação, e a concentração de tensões frente ao plano de escorregamento gerar novas fontes de discordâncias nos grãos adjacentes (Callister, 2021). Assim um material que possui granulação fina é mais duro e resistente do que um material que possua granulação grosseira, uma vez que o primeiro possui uma maior área total de contornos de grão para dificultar o movimento das discordâncias.

Para muitos materiais o limite de escoamento varia com o tamanho do grão (Castro, 2013). Os fios das ligas estudadas quando submetidos ao ensaio de resistência a tração, observou-se que a liga com 2 %, apresenta maior limite de resistência, associada a presença de grãos equiaxiais.

4. CONCLUSÃO

Ao analisar a macroestrutura do material, observa-se que quanto maior a adição do elemento de liga Si, ocorreu maior refino de grãos no material gerando maior quantidade de contornos de grãos e consequentemente dificultando a movimentação de discordâncias. Observado esse refino de grãos na liga com 2 % de silício que melhorou a capacidade de resistência a ruptura do material. Este evento de acordo com a literatura implica diretamente no desempenho mecânico da liga, pois impede a movimentação das discordâncias.

As análises de resistividades elétricas das duas ligas mostram que o melhor desempenho ocorreu na liga com 1 % Si, pois através de sua morfologia observa-se a presença de grãos colunares que devido a sua anatomia possuem menores quantidades de barreiras que facilitam a propagação da corrente elétrica no material.

Através do LRT do material comprovou-se que de acordo com a literatura, quanto mais finos são os grãos maior e sua resistência a fratura, sendo maior sua capacidade de deformação necessitando de mais força para romper. Neste caso a capacidade refinadora do Silício teve um resultado satisfatório, porém para a liga com teor de 2 % Si a condutividade elétrica foi menor, justamente pela quantidade de barreiras internas (contornos de grão) que dificultaram a passagem da corrente elétrica.

Os resultados obtidos após as respectivas caracterizações feitas nas ligas de Al- 1 % e Al- 2 % Si, correlacionados com as normas e a literatura são parcialmente satisfatórios, pois quanto maior o teor de Si adicionado melhor e o desempenho mecânico da liga e menor sua resistividade elétrica. Há necessidade de outras caracterizações destes materiais visando direcionar suas propriedades a uma possível aplicabilidade dentro do setor industrial.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao grupo de pesquisa em engenharia de materiais (GPEMAT), ao grupo de pesquisa em engenharia de materiais metálicos (GPEMM) e

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio, 2012 *“Fundamento e Aplicações do Alumínio”*. 2 ed. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio. em especial ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

6. REFERÊNCIAS

- American Society For Metals (ASM International),1998. *“Aluminum and aluminum alloys”*. v. 4. American Society for Metals - ASM Handbook.
- American Society For Metals (ASM International), 2004. *“Metallography and microstructures”*. v 9, American Society for Metals, ASM Handbook.
- American Society for Testing and Materials (ASTM International E384-11), 2013. *“Standard Test Method For Knoop And Vickers Hardness Of Materials”*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 5118), 2007. *“Fios de alumínio 1350 nus, de seção circular, para fins elétricos”*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6810), 1981. *“Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos”*. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6814), 1986. *“Fios e cabos elétricos – Ensaio de resistência elétrica”*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR ISO 6892), 2002. *“Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente”*. Rio de Janeiro.
- Almeida, D. T., 2013. *“Estudo dos parâmetros no processo de soldagem de mistura por atrito (FSW) da liga de alumínio 5083-O. 2013. 107f”*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi.
- Callister JR., W. D.; Rethwisch, D. G., 2021. *“Ciência e engenharia dos materiais”*. Uma Introdução. 10. ed. Rio de Janeiro. LTC.
- Castro, R., 2014. *“Efeito do tamanho de grão em diferentes propriedades do aço AISI 1010”*. Orientador (a): Elaine Carballo Siqueira Corrêa. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) em Engenharia de Materiais- Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte.
- Diniz, L. M., 2018. *“Influência do tratamento térmico na vida em fadiga de fios de alumínio”*. Orientador: Cosme Roberto Moreira da Silva. 157 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) — Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília.
- Prazeres, E. R., 2016. *“Avaliação da modificação da liga base Al-Cu-Fe-Mg por teores de Ni e Ti quanto a caracterização estrutural, elétrica e mecânica, a partir de ligas solidificadas em molde u”*. Orientador: José Maria do Vale Quaresma. 80f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica, Belém.
- Prazeres, E. R., 2014. *“Estudo do tratamento térmico e da modificação da liga al0,05%pcu-[0,24-0,28]%pfe-0,6%pmg com a adição de 0,03% ””*. Orientador: José Maria do Vale Quaresma. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica, Belém.
- Peixoto, E. M. A., 2001. *Alumínio. Química Nova na Escola*. São Paulo, n. 13.
- Wada, C. M.; Tubosaka, L. S., 2013. *“Caracterização estrutural da liga de Al-1% Si”*. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores Luane Luiza Pereira Marques, Wellington Bruno Silva de Jesus, Jennifer Cristina Pena dos Santos, Mateus José Araújo de Souza, Yan Christian Silva de Araújo, Amanda Lucena de Medeiros, Emerson Rodrigues Prazeres e Deibson Silva da Costa são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

CORRELATION BETWEEN MACROSTRUCTURAL, ELECTRICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ALLOYS AL- 1% AND AL-2%SI

Luane Luiza Pereira Marques, luanemarques18.lm@gmail.com¹
Wellington Bruno Silva de Jesus, wellingtonjesus.eng@gmail.com²
Jenniffer Cristina Pena dos Santos, penajcps@gmail.com¹
Mateus José Araújo de Souza, mateus.souza@itec.ufpa.br²
Yan Christian Silva de Araújo, ycsaraujo@gmail.com¹
Amanda Lucena de Medeiros, almedeiros@hotmail.com.br²
Emerson Rodrigues Prazeres, eng.emersonrodrigues@gmail.com²
Deibson Silva da Costa, deibsonsc@yahoo.com.br¹

¹ Federal University of Pará, Colégio Intellectual - Tv. We Vinte e Seis, 2 – Coqueiro, Ananindeua – PA, 67130-7189.

² Federal University of Pará, Rua Augusto Corrêa, 01- Guamá, Belém – PA, 66067-110

Abstract: Aluminum is a non-ferrous material that has low density, lightness, thermal and electrical conductivity, very similar to copper (Cu), and its alloys can replace copper alloys in some applications. It is a recyclable material in great abundance in the earth's crust. Due to its respective properties, this metal is able to replace materials traditionally used in the automotive, aerospace and in the production of cables and wires for electrical energy. The objective of the present work is to produce two aluminum alloys with the addition of 1 and 2 % of Si by conventional casting methods, to correlate their macrostructures, to evaluate, the electrical conductivity and the LRT (Limit of Tensile Strength) of the wires after lamination. The material was melted and poured into a vertical mold, after demolding, a sample was taken from which it was prepared through the metallographic process, then the chemical attack was carried out with keller acid revealing the macrostructure of the material, the rest of the Alloy was machined to a diameter of 18.5 mm and cold rolled until the diameter was reduced to 3 mm. The electrical conductivity test was carried out on the wire with a distance of 40 cm between the clamps according to the NBR 5118 and NBR 6814 standards. Subsequently, the tensile test was carried out on the wires with a distance of 15 cm between the clamps, according to NBR 6810. According to the results, it was possible to observe a partial presence in its macrostructure of equiaxed and columnar grains. The electrical conductivity test showed that the lower the percentage of silicon, the higher the electrical conductivity. However, the alloy that had the highest LRT was the alloy with the highest Si content (Al-2%Si), with higher tensile strength. Therefore, the results were satisfactory, being evident that both had gains in their properties.

Keywords: Aluminum, Properties, Solidification, Silicon.

