

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DAS CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DE LIGAS DILUÍDAS DE Al MODIFICADAS COM TEORES DE TITÂNIO

Emmanuelle Sá Freitas, mmanufreitas@hotmail.com¹

Thamy de Melo Duarte, thamy.md@hotmail.com¹

Amanda Thicyane de Miranda Duarte de Souza, amanda_thicyane@hotmail.com¹

Patrick dos Santos Nogueira, patricksn@msn.com¹

José Maria do Vale Quaresma, quaresma@fem.unicamp.br¹

¹Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Mecânica, Grupo de Pesquisa em Engenharia dos Materiais, Rua Augusto Corrêa, 01, CEP: 66075-110, Caixa postal 479, Belém, Pará, Brasil.

Resumo: *Este trabalho visa a avaliação das propriedades mecânicas e das características macro e microestruturais de ligas de alumínio diluídas quando modificadas com teores de titânio, visto que tais ligas tem por objetivo formarem cabos para transmissão de energia elétrica. Portanto, com a referente pesquisa, pretende se estudar novos materiais com propriedades mecânicas cada vez melhor, ou seja, mais resistentes aos fenômenos que os cabos de transmissão estão sujeitos. As ligas foram obtidas por fundição em molde em forma de “U”, laminadas em seguida para avaliação de suas propriedades, por meio da correlação dos resultados experimentais das propriedades mecânicas e da análise macro e microestruturais foi possível observar que apesar dos grãos refinados, a crescente presença de Ti e o grau de deformação não contribuíram para elevar destacadamente os valores dos limites de resistência a tração.*

Palavras-chave: *Propriedade mecânica, cabos de transmissão, liga de Al diluída.*

1. INTRODUÇÃO

O titânio é usualmente adicionado em teores de 0,05 a 0,2% como refinador de grão para todas as ligas de fundição em areia e molde permanente, e dispensável na fundição sob pressão, pois a microestrutura já é fina devido ao resfriamento rápido (Ferrarini, 2005). É adicionado principalmente na forma de comprimidos (incluindo metal puro), mas na maioria das vezes através de ligas mãe.

O titânio diminui a condutividade elétrica do alumínio, mas o seu efeito pode ser reduzido pela adição de boro ao fundido para formar o insolúvel TiB₂. O titânio é usado principalmente como um refinador de grão de peças fundidas de liga de alumínio e lingotes. Quando utilizado isoladamente, o seu efeito diminui com o tempo de exploração, no estado fundido e com repetida refusão. O efeito do refinamento de grão é reforçado se o boro está presente na fundição ou se ele for adicionado como uma liga mãe contendo boro em grande parte como combinado, na forma, TiB₂ (ASM INTERNATIONAL, 1990).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de fundição e solidificação de metais passa por várias etapas, e a confirmação da composição química é uma das principais etapas. O processo de fundição é iniciado com a coleta do alumínio e outros elementos para a composição da liga, após a pesagem, as massas dos materiais são introduzidos em um cadinho de carbetto de silício de 3,5 l de volume, o qual é pintado internamente com solução de caulim para evitar a aderência de uma quantidade considerável de metal, e submetido a um pré-aquecimento de vinte minutos a 150°C para eliminar a umidade.

A fusão dos metais realizada em um forno tipo MUFLA da marca BRASIMET (Fig. (1a)), cuja temperatura de trabalho ajustada em 790°C, temperatura esta que garante a fusão completa dos metais. Após a constatação da fusão total do metal, o cadinho é retirado do forno e executa se a homogeneização do metal fundido, através de agitação manual vigorosa, utilizando-se uma espátula de aço.



Figura 1. (a) forno utilizado na preparação das ligas e (b) injeção de argônio.

Posteriormente à homogeneização, faz-se a injeção de gás inerte (argônio) na vazão de 0,1 l/s, Fig. (1b), através de um tubo de aço inoxidável ligado a um cilindro de 10m³. A injeção de argônio no metal líquido é realizada por aproximadamente 1 min com a intenção de inibir a presença de hidrogênio e impurezas com baixa densidade, formando na superfície do banho uma camada de escoria, removida com uma espátula de aço antes da realização do vazamento.

Após a retirada da amostra para análise química (amostra testemunho), é introduzido um termopar no cadinho com o intuito de verificar a temperatura do metal, até que se atinja um valor de temperatura entre 730°C a 735°C, faixa de temperatura prevista para a realização do vazamento.

2.1. Composição Química

Com a amostra testemunho faz-se a análise química através do espectrômetro de massa (Fig. (2b)), onde os resultados são obtidos da média de no mínimo três leituras da composição química da amostra Fig. (2a), apresentando valores em peso para liga. O equipamento pertence à ALUBAR METAIS S/A.

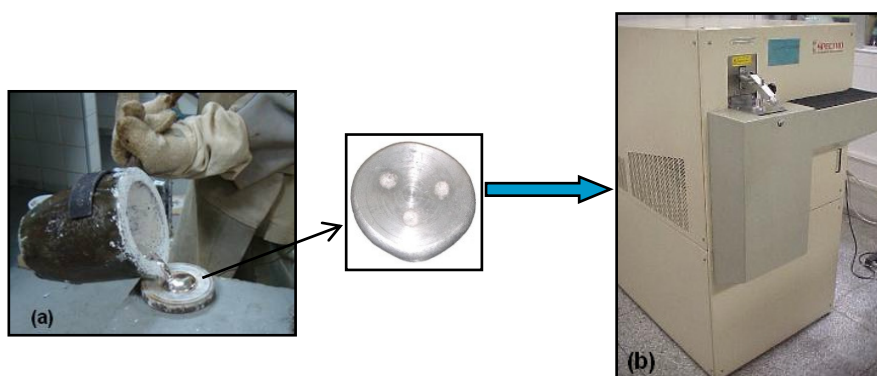


Figura 2. (a) Amostra testemunho utilizada na análise de composição das ligas e (b) Espectrômetro de massa.

O conhecimento da composição química das ligas diluídas faz se necessário devido a forte influencia dos teores dos elementos de liga sobre as propriedades dos materiais, e devido as ligas estudadas serem para o transporte de energia elétrica, deve haver um controle maior sobre as flutuações dos teores.

2.2. Dimensionamento do Molde de solidificação em “U”

O dispositivo utilizado para a solidificação é feito pelo processo de molde permanente, consistindo em duas partes que são convenientemente alinhadas e fechadas, de modo a obter cavidade na forma cilíndrica, com as paredes constituídas em aço SAE1020, tendo perfil em “U”. As principais medidas da coquilha em forma de “U” estão na Fig. (3a) e a Fig. (3b) mostram o molde bipartido com pintura interna de solução de caulim que tem função de ajudar no momento do desmolde e inibir a relação direta do metal/molde, proporcionando uma solidificação onde espera se observar a ação dos elementos químicos. A Fig. (3c) ilustra a realização do vazamento do metal líquido na lingoteira em “U”.

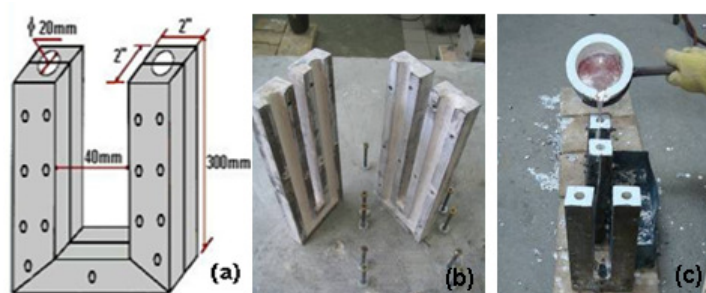


Figura 3. (a) principais medidas da coquilha em “U”; (b) dispositivo de solidificação bipartido pintado com solução de caulim e (c) vazamento em molde “U”.

O metal líquido é vazado no molde de forma convencional, e o preenchimento da cavidade se dá pela ação da gravidade. Depois que a peça solidifica, o molde é aberto e a peça é retirada manualmente.

2.2.1. Obtenção dos Lingotes em “U”

A utilização do molde “U” permite uma avaliação rápida da ação do elemento de liga sobre a base metálica a ser modificada além de possibilitar a obtenção de corpo de prova com dimensões suficientes para gerar amostras longas e de secção cilíndrica a partir da usinagem das “pernas do U”.

Alguns perfis fundidos apresentam defeitos na extremidade superior provenientes da contração durante o processo de solidificação. Essas regiões são removidas com cortes em serra de fita, cortando se também a base do lingote para metalografia da secção transversal, as “pernas” do lingote com comprimento de 250 mm cada, sem os defeitos, são usinadas de 22 mm para 18,5 mm de diâmetro e devidamente identificadas. A sequencia operacional está mostrada na Fig. (4), abaixo.



Figura 4. (a) defeito gerado na solidificação, (b) lingote fundido sem os defeitos com identificação da região de corte e (c) as “pernas” do lingote identificadas para usinagem.

2.3. Caracterização Mecânica das Ligas

Após a obtenção dos corpos de prova “pernas do U” usinados, inicia se a etapa de deformação plástica necessária para o estudo experimental pertinente neste trabalho. A caracterização elétrica e mecânica será realizada em corpos de prova deformados por laminação a frio, em um laminador elétrico duo reversível mostrado na Fig. (5) e em detalhe o cilindro de laminação com as diferentes secções circulares, com diâmetros de (4,0; 3,8; 3,0; 2,7)mm, desta forma os fios obtidos com as ligas foram posteriormente submetidos aos ensaios de tração. O processo de usinagem foi executado no laboratório de máquinas operatrizes e a laminação no sub-laboratório de metalografia e tratamento térmico da UFPa.

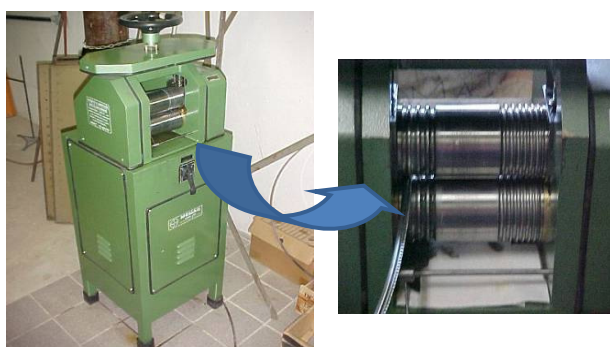


Figura 5. Laminador elétrico duo reversível, laboratório de Mecânica/UFPa

O material ao ser submetido à mudança de forma, seja por usinagem seja por deformação plástica a frio, foi submetido a avaliações prévias macroscópicas a olho nu, na qual se verificava a integridade superficial do perfil que estava sendo constituído passo a passo. Da laminação do corpo de prova adquiriram-se os diâmetros de 4 mm, 3,8 mm, 3 mm e 2,7 mm.

A caracterização dos perfis obtidos, já na forma de fios com os diâmetros desejados e após a etapa de caracterização elétrica, foi realizada através de ensaios de tração, em uma máquina de tração KRATOS modelo IKCL1-USB ilustrada na Fig. (6) a seguir e acoplada a um micro computador com sistema de aquisição de dados, segundo a norma para cabos elétricos NBR 6810. Os ensaios de tração, para a geração de dados permitem caracterizar os perfis mecanicamente segundo o LRT.

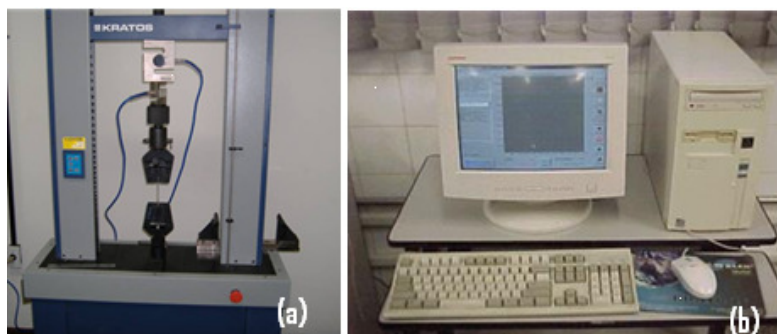


Figura 6. Máquina de ensaio KRATOS, modelo IKCL1-USB e o sistema de aquisição de dados.

2.4. Caracterização Estrutural das Ligas

2.4.1. Procedimento de Preparação das Amostras para Análise Estrutural

As macroestruturas das ligas são reveladas em corpos de prova como fundidas, a partir do lixamento e polimento da secção transversal da região do fundo do lingote em “U”. As superfícies polidas das amostras são atacadas por imersão em solução de Poultons [12ml HCl (conc.), 6 ml HNO₃ (conc.), 1 ml HF (48%), 1 ml H₂O], preparadas segundo técnicas-padrão em metalografia (ASM – METAL’S HANDBOOK). Após o ataque químico, as superfícies dos corpos de prova são lavadas em água corrente abundante, enxaguada com acetona e secada com um secador de ar quente, em seguida utiliza-se um scanner para capturar as imagens dos corpos de prova para a observação da macroestrutura.

Diferentemente, a microestrutura e a topografia das ligas, é feita em corpos-de-prova resultantes do ensaio de tração que são preparadas para caracterização estrutural realizada via Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV que envolve corte da região da fratura do fio ensaiado.

E para a limpeza da superfície foi utilizado um ultra som em solução de limpeza [Álcool etílico absoluto, P.A. 99,99 e Acetona P.A. (CH₃)₂CO].

As imagens microestruturais das ligas são obtidas via MEV, usando-se a técnica de elétrons retro espalhados, que torna possível observar as aqui chamadas “Texturas de Solidificação Deformadas” ou “Linhas de Ferro”.

2.4.2. Procedimento Experimental para Caracterização Estrutural das Ligas

A macroestrutura das ligas reveladas com o ataque químico “solução Pouton” possibilita a observação do tamanho e orientação dos grãos resultante da solidificação. A Fig. (7) mostra o microscópio eletrônico de varredura utilizado para a caracterização microestrutural, que realiza análises de espectrometria de energia dispersiva de raios x - EDS. A caracterização, nesta etapa, teve a preocupação de avaliar o aspecto das fraturas macro e microscopicamente, por meio de observação em elétrons secundários, e corte transversal e longitudinal das ligas, por observação em elétrons retroespalhados.



Figura 7. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Composição Química das Ligas

A Tab. (1) mostra os resultados da análise da composição química das ligas modificadas com diferentes teores de titânio, onde podemos verificar que os teores dos elementos químicos que compõem as ligas não sofrem grande flutuação em relação aos valores propostos. A leitura da composição foi obtida a partir de análise em espectrômetro óptico como descrito anteriormente em materiais e métodos.

Tabela 1. Composição química das ligas de Alumínio modificadas com titânio.

Ligas Al-EC	Elementos Químicos da Liga (%)	
	Ti	Al
0,05% Ti	0,0509	Balanço
0,15% Ti	0,1479	Balanço
0,26% Ti	0,2556	Balanço

3.1. Análise Macro e Microestrutural das Ligas

A seguir pode ser observada a comparação das estruturas produzidas para o Al-EC e as modificações com os teores de (0,05–0,15–0,26)%Ti, sobre este. As respectivas estruturas das ligas foram reveladas por meio de ataque com solução química “Poulton”. Observa-se que o tamanho e a orientação dos grãos adquirem configuração diferente à medida que o teor de Ti aumenta. Os grãos tendem a se mostrar mais refinados, característica já esperada, pois muitos são os estudos que mostram tal atuação do Ti em ligas de alumínio (Dons, 1985).

Na Fig. (8), são apresentados aspectos macro estruturais obtidos e pode ser constatado que a presença de Ti consegue refinar o grão da liga com mais eficiência para o maior teor. Os teores de Ti na faixa [0,15 – 1,2] % formam com o Al as ligas hipo-peritéticas, susceptíveis a formar as fases pro-peritéticas, que apresenta estequiometricamente a forma $[Al_3Ti]$, além de sofrerem as transformações Peritéticas. Dentro desta faixa encontram-se os teores [0,15 e 0,26] %Ti, alvos deste estudo. Segundo Stefanescu et al (2002), este intermetálico ao se formar em temperatura maior que a temperatura de fusão do Al-EC, pode servir como núcleo heterogêneo e assim contribuir para refinar o grão.

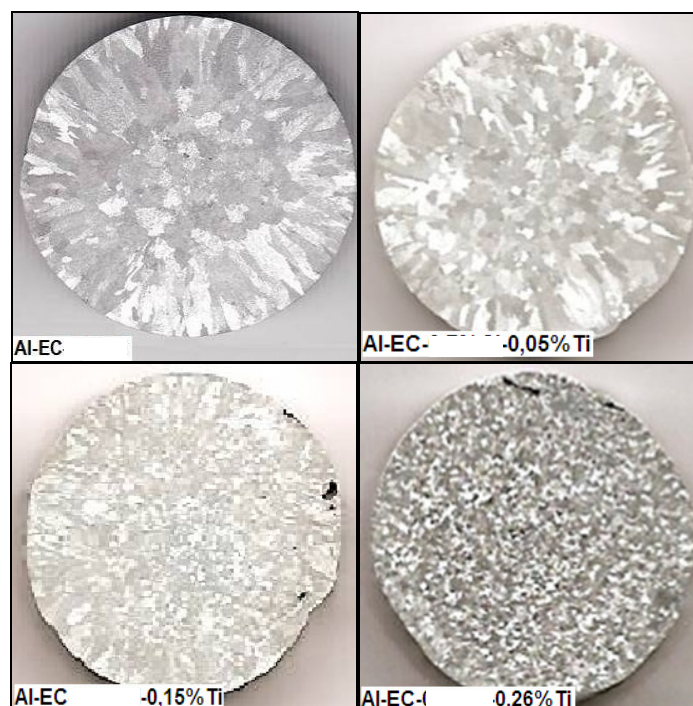


Figura 8. Macro dos cortes transversal das ligas com Al-EC e Al-EC-(0,05-0,15-0,26) %Ti, respectivamente, aproximados 2000x.

Para o Al-EC foi observado a existência de uma partícula [α], que é descrita por muitos autores como uma estrutura complexa e denominada de “Escrita Chinesa”, esta partícula é considerada não prejudicial para as propriedades mecânicas da liga quando comparada com a fase [β] que concentra tensões devido ao seu formato acicular (em forma de agulha) (Narayanan e Grulezky, 1995; Kuijpers, 2000; Mrówka-Nowotnik, 2007).

Através das imagens obtidas foi constatada a presença desta partícula tanto na liga Al-EC como nas ligas modificadas com a adição do Ti, Al-EC-(0,05-0,15-0,26)%Ti, como pode ser vista na Fig. (9).

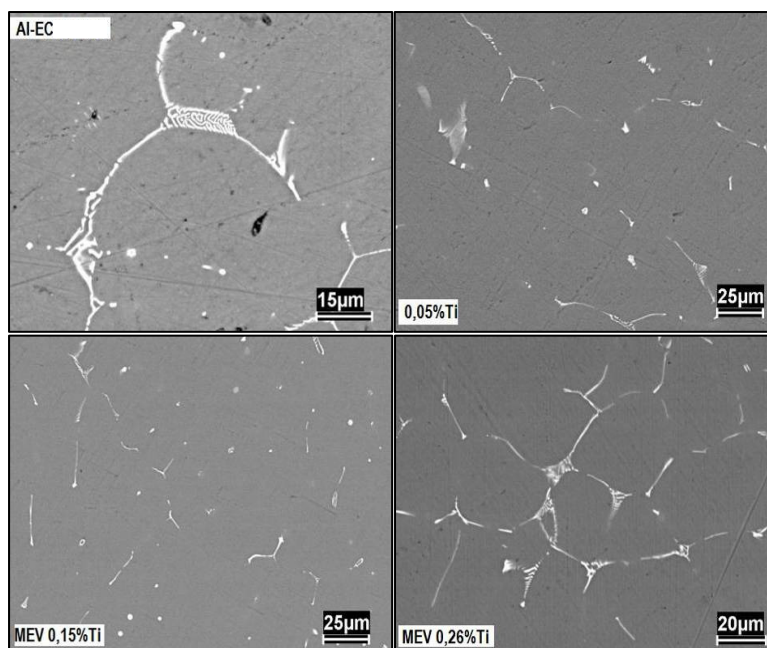


Figura 9. Micrografias dos cortes transversais das amostras Al-EC e Al-EC-(0,05-0,15-0,26) % Ti, apresentando a morfologia das estruturas brutas de fusão observada via Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), evidenciando a presença da estrutura complexa “Escrita Chinesa” para todos os teores. Aumento 2000x.

Em alguns estudos já realizados a utilização do diagrama de fase não é suficiente, para prever a precipitação das fases metaestáveis, então nas pesquisas feitas por Dons, 1985 e Gail, 1994 foi sugerido um “Diagrama de Partícula”.

Observa-se, entretanto, que as modificações com Ti levadas a efeito não tiveram a capacidade de inibir a formação das mesmas apesar da capacidade de refinar os grãos, desta forma as ligas modificadas podem ser empregadas para o uso que se pretende destinar – produção de fios e cabos para transmissão e distribuição de energia elétrica, por não interferirem na trabalhabilidade/ductilidade.

A estrutura e os contornos dos grãos refinados são visíveis através das micrografias das ligas Fig. (9), revelados com precipitados ricos em ferro, confirmados através de energia dispersiva de raios-X no MEV. Não foram encontrados precipitados primários de Al_3Ti , esperado para as ligas com [0,15 e 0,26] %Ti, indicando que o Ti pode estar retido na liga em solução sólida ou na forma de Dispersóides com dimensões nano métricas visíveis somente com o auxílio de potentes Microscópios Eletrônicos de Transmissão. O Ti tende a formar Partículas de Segunda Fase ou Dispersóides que apesar de muito pequenos [inferior a 50 nm] possuem densidade maior que a matriz de alumínio, e neste caso pode ser observado em conjunto com outros elementos, porém a suas baixas solubilidades e consequente baixa mobilidade no alumínio (Russell, 2005 e Cavalcante et al, 2006) dificultam a formação de grandes partículas (Russel, 2005).

3.2. Caracterização Mecânica e Estrutural (Micrografias e Factografias) das Ligas

Os dados abaixo mostram os resultados dos ensaios de tração em função dos diâmetros de deformação plástica das ligas em estudo, apresentados nos gráficos.

Tabela 2. Resultados experimentais dos ensaios de caracterização mecânica, obtidos nas amostras laminadas.

Caracterização Mecânica das Ligas								
Liga	Diâmetro ϕ [mm]	LRT (MPa)	Liga	Diâmetro ϕ [mm]	LRT (MPa)	Liga	Diâmetro ϕ [mm]	LRT (MPa)
0,05 %Ti	4,0	209,635	0,15 %Ti	4,0	202,51	0,26 %Ti	4,0	207,00
	3,8	204,29		3,8	208,40		3,8	205,58
	3,0	249,555		3,0	252,16		3,0	248,34
	2,7	235,94		2,7	235,51		2,7	230,80

Segundo Garcia, 2005 a estrutura que se forma imediatamente após a solidificação determina as propriedades do produto final, não somente no caso de peças de fundição que já apresentam essencialmente a forma definitiva, mas também naqueles produtos que serão trabalhados para a produção de chapas, fios ou forjados. Embora se acredite que eventuais defeitos da estrutura bruta de solidificação sejam eliminados durante a etapa de conformação plástica de lingotes, não ocorre exatamente isto na prática e em particular para ligas de alumínio. Mesmo que determinados defeitos desapareçam macroscopicamente com o processo de deformação, geralmente a maioria deles é conduzida até o produto acabado. As características mecânicas deste produto dependem da macroestrutura e da microestrutura resultantes.

No arranjo da Fig. (10) pode-se observar que os valores de LRT, para a liga com 0,26%Ti, não sofreram grande influência pela adição de titânio, como esperado. Geralmente as inserções de elementos de liga aumentam a resistência mecânica das ligas.

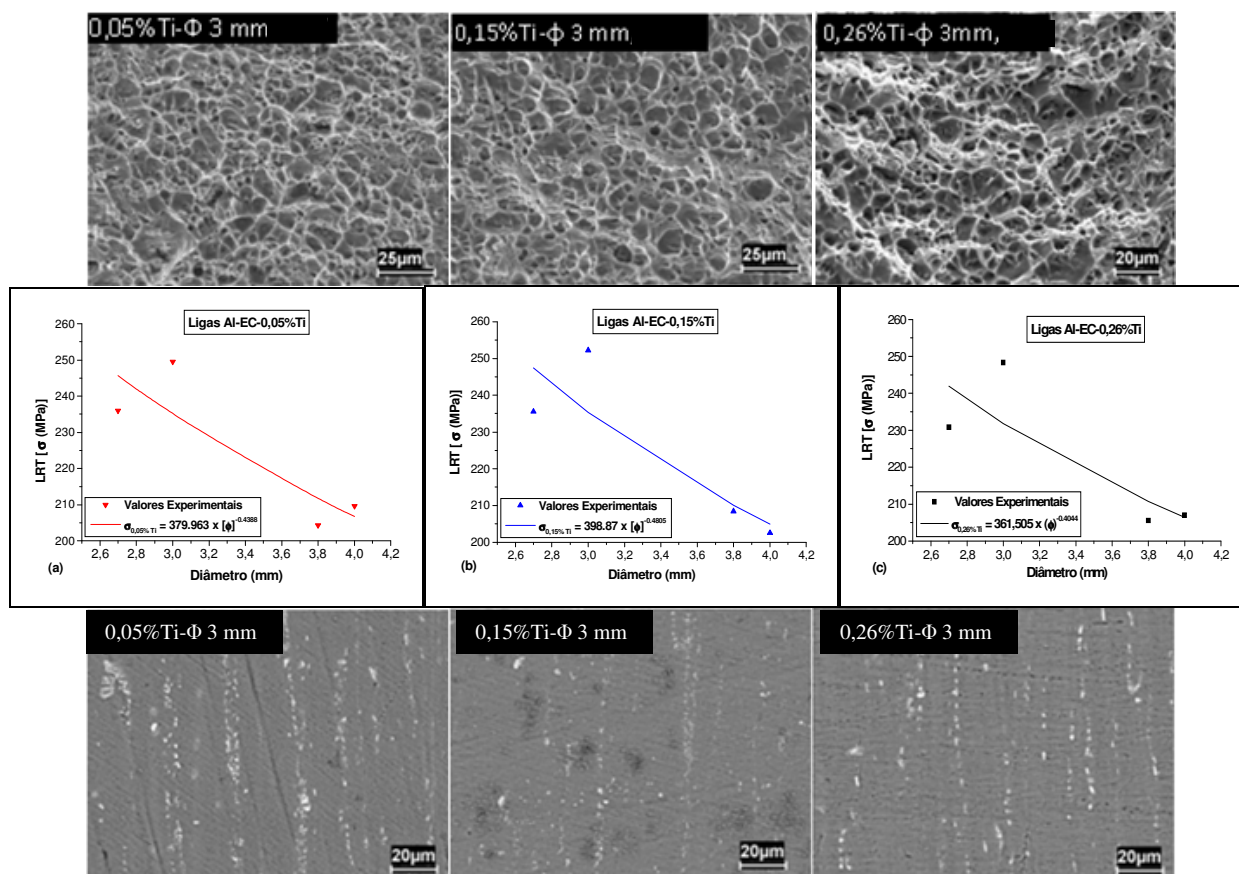


Figura 10. Avaliação do limite de resistência a tração as das ligas modificadas com diferentes teores de titânio em função do diâmetro 3 mm das micrografias.

A partir da observação dos gráfico de LRT, pode ser considerado que as ligas mostraram que variaram muito pouco em função dos teores de titânio, apesar da nítida diferença dos tamanhos de grãos que são fortemente influenciados pela presença do titânio (Fig. (8)).

Observando o conjunto de imagens da Fig. (10) para as ligas com [0,05; 0,15; 0,26]% Ti, respectivamente, no diâmetro 3 mm, pode ser verificado que as partículas brancas, identificadas neste trabalho como “Linhas de Ferro” tendem a diminuir de tamanho, de intensidade e espalham-se nas seções observadas à medida que o teor de soluto aumenta. Esta tendência parece acompanhar o aspecto da fratura que apresenta “dimples” com diâmetros menores, justificando o destacado comportamento das propriedades mecânicas dos fios com este diâmetro, como mostrado na caracterização mecânica das ligas.

4. CONCLUSÕES

A primeira conclusão que pode ser tirada dos resultados é a de que o titânio tem realmente uma grande capacidade de refinar os grãos, como pôde ser visto na Fig. (8). Entretanto, os grãos bastante refinados para o teor de 0,26%Ti não apresentaram resultados esperados, já que as ligas com menores teores de Ti (0,05 e 0,15)% apresentaram valores muito próximos para o LRT. Portanto, neste estudo apesar dos grãos refinados, menores “dimples” e “Linhas de Ferro” menos intensas e mais espalhadas, a crescente presença de Ti e o grau de deformação não contribuíram para elevar destacadamente os valores dos limites de resistência a tração.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem a Universidade Federal do Pará, Eletronorte e a Alubar Metais pela ajuda e financiamento dos estudos.

6. REFERÊNCIAS

- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos”, Rio de Janeiro, Ago. 1981, NBR 6810.
- ASM-METAL’S HANDBOOK.
- Cavalcante, F. A. J. et. al. Avaliação Mecânica e Elétrica de Ligas Al-Fe-Zr para Fios Elétricos Após Envelhecimento Natural de 18 Meses, ENGEVISTA, v. 8, n. 2, p. 69-76, dezembro 2006;
- Dons, A. L., 1985, “AlFeSi-Particles in industrially cast aluminum alloys, Z.”, *Mettalkunde*, v. 76, p. 609-612.
- Ferrarini, C. F., 2005, “Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Ligas Al-Si Hipoeutéticas Conformadas Por Spray”, Universidade Federal De São Carlos, São Carlos, pp. 44.
- Gail, S., 1994, “Al-Fe-Si INTERMETALLICS IN 1000 SERIES ALUMINUM ALLOYS”, A Thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in partial fulfilment of the requirements of the degree of Master of Engineering. Montreal, Canada.
- Garcia, A., 2005, “Influência das variáveis térmicas de solidificação na formação da macroestrutura e da microestrutura e correlação com propriedades decorrentes.”, *Projeções*, v. 23, pp. 13-32, jan./dez.
- Kuijpers, N.C.W., 2000, “Intermetallic phase transformations during homogenisation of 6xxx Al alloys.”, A literature review, Netherlands Institute for Metal Research, Delft, February.
- Mohanty, P.S. e Gruzleski, J.E., 1996, “Grain Refinement Mechanisms of Hypoeutectic Al-Si Alloys.”, *Acta Materialia*. v.44 (9), p.3749-3760.
- Mrówka-Nowotnik, G. et al., 2007, “Intermetallic phase particles in 6082 aluminium alloy.”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineerin*, v. 28; p. 69-76; February.
- Narayanan, L. A., Samuel, F. R. e Gruzleski, I. E., 1995, “Dissolution of Iron Intermetallics in Al-Si Alloys through Non Equilibrium Heat Treatment”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 26A, AUGUST; p. 2161.
- Russell, A. M., Lee, K. L., 2005, “STRUCTURE-PROPERTY RELATIONS IN NONFERROUS METALS”, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Stefanescu, D. M., 2002, “Science and Engineering of Casting Solidification”, Springer, pp. 311.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores Emmanuelle Freitas, Thamy Duarte, Amanda de Souza, Patrick Nogueira e José Quaresma são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos neste trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

MECHANICAL AND STRUCTURAL EVALUATION OF CHARACTERISTICS OF DILUTED Al ALLOY MODIFIED WITH CONTENTS OF TITANIUM

Emmanuelle Sá Freitas, mmanufreitas@hotmail.com¹

Thamy de Melo Duarte, thamy.md@hotmail.com¹

Amanda Thicyane de Miranda Duarte de Souza, amanda_thicyane@hotmail.com¹

Patrick dos Santos Nogueira, patricksn@msn.com¹

José Maria do Vale Quaresma, quaresma@fem.unicamp.br¹

¹Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Mecânica, Grupo de Pesquisa em Engenharia dos Materiais, Rua Augusto Corrêa, 01, CEP: 66075-110, Caixa postal 479, Belém, Pará, Brasil.

Abstract. *This study aims to evaluate the mechanical properties of the macro and microstructure of diluted aluminum alloys when modified with contents of titanium, such as alloys aims to form cables for power transmission. So on with the research aims to study new materials with better mechanical properties, is more resistant to the phenomena that the transmission cables are subjected. The alloys were obtained by die-casting in the shape of "U", then rolled to evaluate of its properties, through the correlation of experimental results of mechanical properties and analysis of macro and microstructure was possible to observe that despite the refined grains, the increasing presence of Ti and the degree of deformation did not contribute prominently to raise the values of the tensile strength.*

Keywords: *Mechanical property, transmission cables, alloy Al diluted.*