

AVALIAÇÃO DA VARIÇÃO DO TEOR DE MAGNÉSIO NAS PROPRIEDADES MECÂNICA E ELÉTRICAS DA LIGA Al – [x] %Mg – 0,6 %Si¹

Paulo Cordeiro Machado²
Thiago Augusto Pacheco Tavares²
Emerson David Cavalcante Santos²
Emmanuelle Sá Freitas²
José Maria do Vale Quaresma³

Resumo

Este trabalho propõe avaliar a influência da variação do magnésio nas propriedades mecânica e elétrica das ligas Al – [0,5, 0,7 e 1,1] %Mg – 0,6 %Si, vazadas em molde unidirecional horizontal. Para determinação das curvas de solidificação realizou-se o mapeamento das temperaturas em pontos previamente escolhidos no molde e no metal ao longo da câmara de solidificação. Posteriormente, com o auxílio destas curvas, foi possível determinar velocidade e taxa de resfriamento através da obtenção das temperaturas liquidus das ligas em estudo. Em seguida, realizou-se a retirada de corpos de prova do corpo fundido para ser feito os ensaios de tração e condutividade elétrica. E, desta forma, estabeleceu-se a correlação entre a característica mecânica (limite de resistência à tração - LRT) e elétrica (IACS%) do material.

Palavras-chave: Liga 6000; Solidificação unidirecional horizontal; Condutividade elétrica; Ensaio de tração.

EVALUATION OF MAGNESIUM'S VARIATION CONTENT ON MECHANICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF AL – [X] %MG – 0,6 %SI

Abstract

This paper proposes to evaluate the influence of magnesium variation on mechanical and electrical properties in Al – [0,5, 0,7 e 1,1] %Mg – 0,6 %Si alloys, poured out in a unidirectional horizontal mold. The mapping of temperatures in previously chosen points in mold and in the metal along the solidification chamber was realized to determine the solidification curves. By aiding of these curves, was possible to determine the rate of chilling and its speed through obtaining the liquidus temperatures of studied alloys. After that, the removal of cast body's specimen was realized for the tensile test and electrical conductivity. By this way, was established a correlation between the material's mechanical (tensile strength - TS) and electrical (IACS%) characteristics.

Key words: 6000 alloy; Unidirectional horizontal solidification; Electrical conductivity; Tension test.

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

² Graduando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará.

³ Dr. em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará.

1 INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia e a competitividade do mercado exigem cada vez mais produtos de melhor qualidade⁽¹⁾ impulsionando o desenvolvimento das ligas de alumínio e assim, para essas ligas, construindo um importante papel no crescimento de toda a indústria.⁽²⁾

No que diz respeito às ligas diluídas da série 6000, tem-se uma aplicabilidade muito intensa na fabricação de cabos e fios para distribuição e transmissão de energia elétrica na liga 6101 (Al-Mg-Si),⁽³⁾ por aliar boa trabalhabilidade com resistência mecânica. Uma vantagem adicional no uso dessas ligas é a diminuição considerável do peso pela baixa massa específica do alumínio.

Este estudo propõe variar concentrações de magnésio em uma liga diluída de alumínio, da série 6.000, com o intuito de verificar os resultados dos ensaios de caráter mecânico e elétrico, os quais são necessários para aplicação em linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Esta aplicabilidade requer do material boa resistência mecânica trativa e condutividade elétrica dentro dos padrões exigidos por normas, para serem produzidos em escala industrial. Integrado a este estudo temos também análises de características térmicas, retiradas no momento do vazamento das ligas, como velocidade de solidificação e taxa de solidificação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Como dito anteriormente, foram utilizadas ligas da série 6xxx, mais precisamente ligas do sistema Al-Mg-Si. As composições nominais das ligas 6101/6201 estão dispostas em uma faixa admissível, na qual os teores de Mg se alteram sem comprometer a identidade das ligas.

Com o intuito de avaliar a influência da variação do magnésio nas propriedades mecânicas da liga, adotou-se os seguintes teores de magnésio próximos aos limites admissíveis dos sistemas 6101/6201, [0,5; 0,7; 1,1]%. A liga base adaptada para ser modificada foi o binário Al – 0,6 %Si. A composição química das ligas utilizadas neste trabalho foi determinada em um espectrômetro de massa, e os resultados encontram-se na Tabela 1.

A Figura 1 apresenta um conjunto de informações úteis ao entendimento da experimentação. O sistema todo é isolado de tal forma que a extração de calor ocorra somente através do bloco metálico, gerando assim uma solidificação unidirecional. As temperaturas foram monitoradas durante a solidificação através de um conjunto de seis termopares, sendo quatro tipo “K” e dois tipo “J”, em posições específicas na câmara de vazamento. Os quatro termopares tipo “K” foram colocados no metal, nas seguintes posições em relação à interface metal/molde: 7,5 mm; 22,5 mm; 37,5 mm e 52,5 mm, e os dois do tipo “J”, um foi posicionado no molde (bloco metálico) e o outro na interface molde/ambiente. Todos os termopares foram conectados por um cabo coaxial a um registrador de temperaturas e o histórico térmico das ligas capturado foi repassado posteriormente para um computador, no qual realizou-se os tratamentos nos dados.

Para a leitura da condutividade elétrica foi necessário submeter as amostras a seqüência de trabalho a frio: [82; 83; 84; 85 e 86]%, a partir do diâmetro $\phi = 9,5$ mm para a obtenção dos diâmetros $\phi = [3,98; 3,88; 3,74; 3,62$ e $3,45]$ mm. A intensidade de trabalho a frio a qual o material foi submetido pode ser avaliado com o auxílio da Equação 1.⁽⁴⁾

$$\kappa = \left[\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right] \times 100 \quad (1)$$

Na qual $[A_0]$ e $[A_f]$ são as áreas inicial e final do perfil, respectivamente.

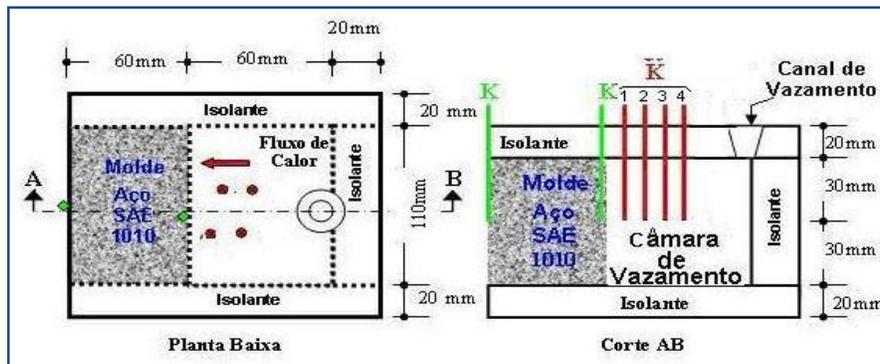


Figura 1. Vista superior e lateral da câmara de vazamento, com os termopares instalados nas suas posições previamente escolhidas.⁽⁵⁾

Após a fusão, as ligas foram vazadas, com 10% de superaquecimento, no aparato de solidificação observado na Figura 2, em cada montagem utiliza-se um bloco de aço SAE 1010 com 60 mm de espessura, que funciona como molde e fonte extratora de calor proveniente do metal fundido. A câmara de vazamento possui as seguintes medidas 60 x 60 x 110 mm.

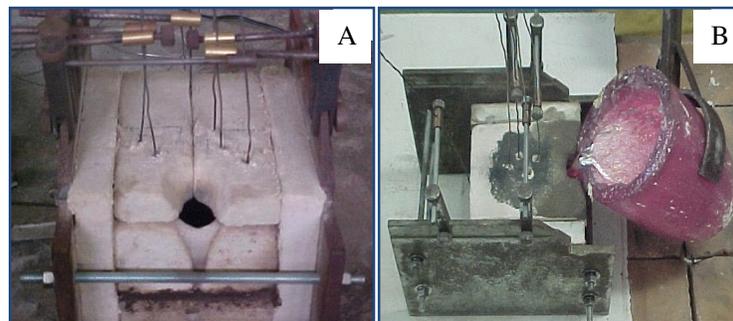


Figura 2. [A] Câmara de vazamento e a disposição dos Termopares e [B] Vazamento da Liga na Câmara.

Os corpos de prova para o ensaio de tração foram retirados do lingote em uma posição transversal em relação à direção de extração de calor, e usinados (Figura 3). A coleta transversal dos corpos de prova, para os ensaios de tração como ilustrado na Figura 3B, deve-se a necessidade de se caracterizar o material através de sua estrutura bruta de fusão mais significativa, os Espaçamentos Dendríticos Secundários – EDS ou λ_2 .

A técnica utilizada para a medição do λ_2 nas posições específicas dos termopares foi uma adaptação de Schievenbusch, Zimmermann e Mathes,⁽⁶⁾ em solidificação unidirecional. Assim adaptou-se esse critério, onde o valor do λ_2 foi obtido da distância média entre braços dendríticos, conforme ilustra a Figura 3 B.

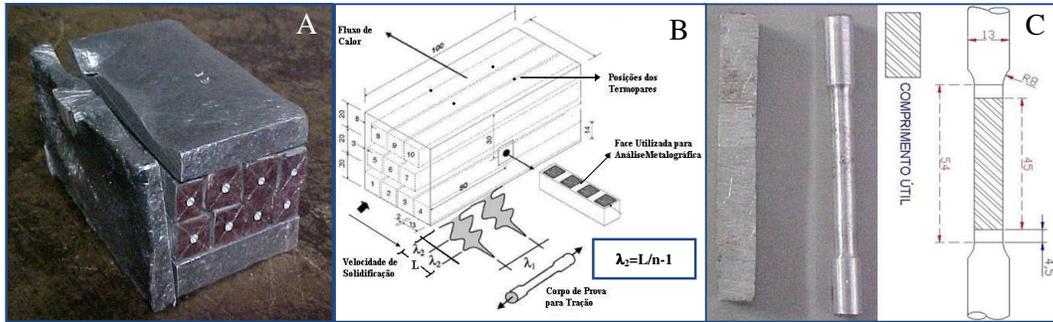


Figura 3. A disposição da retirada dos Corpos de Prova: Em [A], Foto mostrando o lingote obtido cortado obedecendo o disposto em [B], no qual mostra o sentido de evolução dendrítico em relação a coleta do corpo de prova de tração; Em [C], Foto mostrando a barra de secção quadrada após o corte do lingote e o corpo de prova confeccionado, com as dimensões do corpo de prova segundo a norma ASTM-E8M.⁽⁷⁾

Para o levantamento das propriedades mecânicas e elétricas, foram realizados ensaios de tração (máquina Kratos) e de condutividade elétrica (equipamento Micro Homímetro) (Figura 4) e, para tanto, foram utilizadas respectivamente as seguintes normas NBR 6810⁽⁸⁾ e NBR-6814.⁽⁹⁾ Os corpos de prova para o ensaio de condutividade elétrica foram deformados por laminação e trefilação.

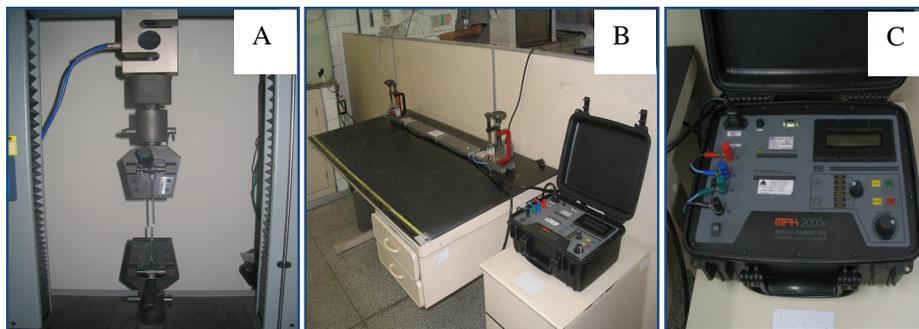


Figura 4. [A] Equipamentos para a Caracterização Mecânica [KRATOS] e [B;C] Elétrica [Micro homímetro - Ponte de kelvin, MEGABRÁS modelo MPK-2000].

3 RESULTADOS

A Tabela 1 representa as ligas obtidas para o estudo, cada liga produzida gera perfiz térmicos (figura 6) a serem analisados em cada posição.

Tabela 1. Composições Químicas das Ligas Utilizadas.

Ligas	Si %	Mg %	Fe %	Al%	Outros %
Al-0,6%Si-0,5%Mg	0,6574	0,5388	0,1813	98,5896	0,0329
Al-0,6%Si-0,7%Mg	0,6184	0,7631	0,1746	98,4259	0,01800
Al-0,6%Si-1,1%Mg	0,6480	1,1326	0,1932	97,9939	0,0255

Na Figura 5A, estão relacionadas as curvas provenientes dos termopares posicionados no metal, em posições previamente escolhidas em relação a interface

Metal/Molde (M/M), no molde e na interface molde/Ambiente ilustrando a história térmica experimental para a liga Al-0,6%Si-0,7%Mg.

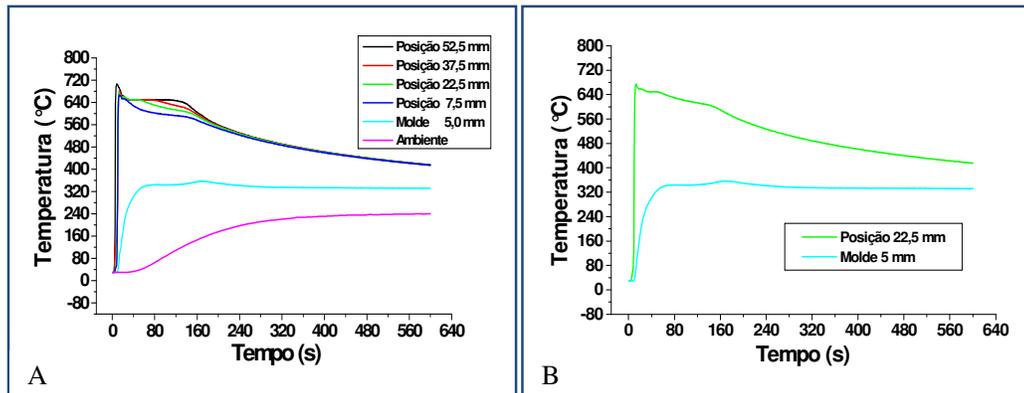


Figura 5. [A] Perfis Térmicos Experimentais obtidos do vazamento para a liga Al-0,6%Si-0,7%Mg, [B] Perfil térmico do metal da posição 22,5 mm associado ao do molde a 5 mm.

Na Figura 5B, é apresentado perfil térmico do metal da posição 22,5 mm associado ao do molde a 5 mm como auxiliar para obtenção dos pares $[P; t_L]$.

Com o objetivo de obter-se as temperaturas liquidus $[T_L]$, é traçada uma reta horizontal paralela ao eixo das abscissas [Tempos], partindo da invariância térmica até o eixo das ordenadas [Temperaturas]; em seguida, objetivando a determinação do tempo liquidus $[t_L]$, partindo do perfil térmico e da invariância térmica traçou-se uma reta perpendicular ao eixo das abscissas que, ao cortá-lo, define o instante em que a isoterma liquidus atinge cada termopar.

A partir dos resultados experimentais obtidos, a utilização de um software gráfico possibilita a obtenção de curvas do tipo $P=C \cdot t_L^n$, como ilustrado pela figura 6, que por sua vez, facilita a construção de equações experimentais que relacionem a velocidade de deslocamento da linha liquidus para as ligas Al-0,6%Si-[0,5; 0,7 e 1,1]%Mg em função da posição (P) de cada termopar em relação à interface Metal/Molde $[V_L = f(P)]$, como ilustrado na Figura 7.⁽¹⁰⁾

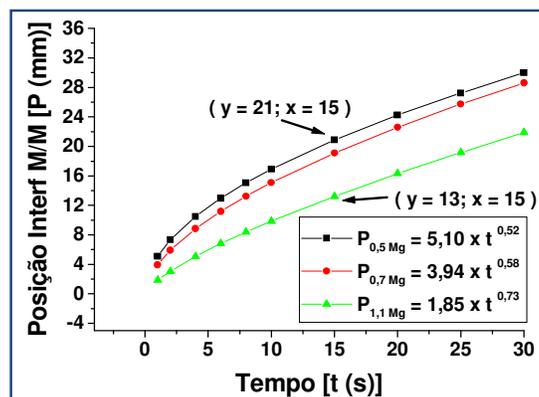


Figura 6. Evolução dos Perfis das Isothermas Liquidus das ligas estudadas, variação do teor de Si e do teor do Mg, respectivamente.

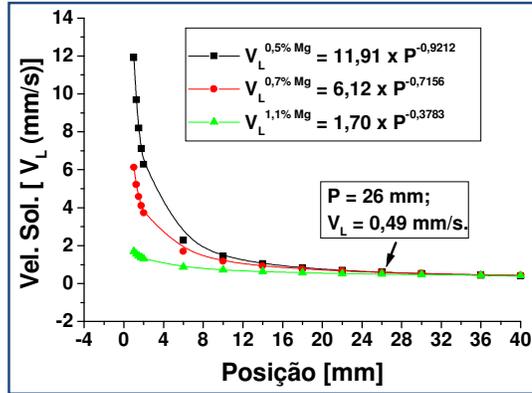


Figura 7. Curvas que descrevem a variação da velocidade da isoterma liquidus (V_L) com a distância da interface M/M em função da evolução do Si e do Mg, respectivamente.

Com base nos resultados e com relação aos parâmetros: velocidade da isoterma liquidus (V_L) e taxa de resfriamento (T^*) observa-se existir uma correspondência entre eles que obedece a relação analítica existente entre estes dois parâmetros para ligas diluídas representada pela equação 2^(10,11) como pode ser visto na Figura 8.

$$\dot{T} = \frac{d_s \cdot L}{k_s} V_L^2 \quad \text{Taxa de Resfriamento } (T^*) \quad (2)$$

Na qual L, Calor Latente de Fusão = 385.000 J/Kg; d_s , Densidade = 2.550 Kg/m³; k_s , Condutividade Térmica = 222 W/m.K.

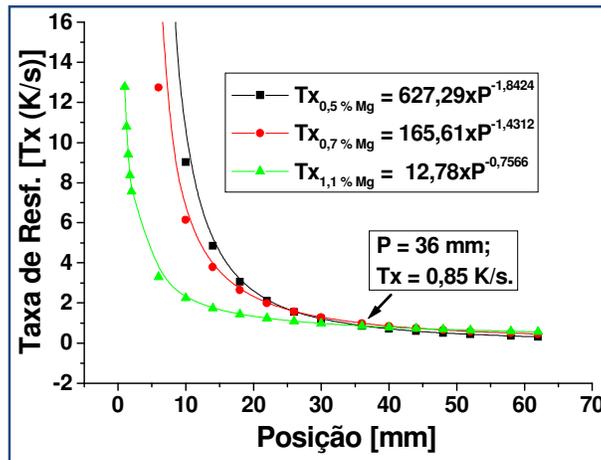


Figura 8. Correlação entre a Taxa de Resfriamento e a Posição em relação à Interface M/M e o teor de Sólido das ligas: Em variação do teor Mg.

Todas essas conseqüências comportamentais provocarão arranjos estruturais diferentes, os quais refletirão diretamente no comportamento físico do fundido. A crescente facilidade na transferência de calor entre o metal e o molde tem conseqüência direta na forma da estrutura bruta de fusão produzida, como pode ser avaliada através da análise da Figura 9.^(10,11)

A macroestrutura observada na Figura 9 é consequência das taxas de resfriamento impostas ao sistema.

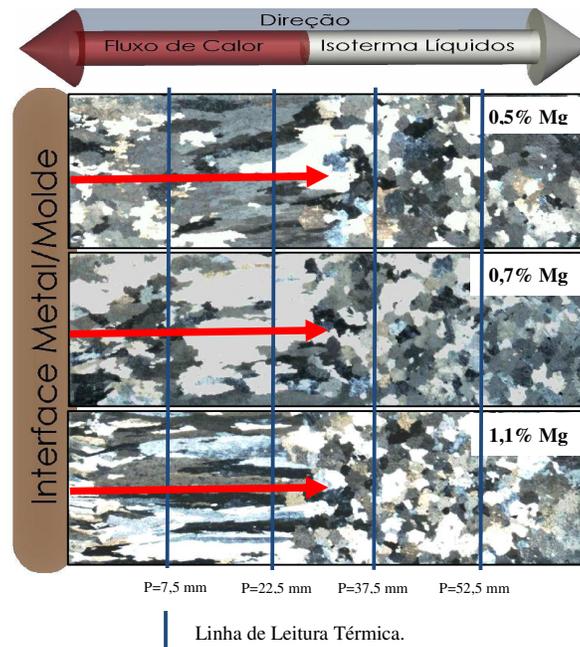


Figura 9. Macrografia das ligas modificadas com os teores de Mg propostos.

Os resultados dos ensaios de tração encontram-se relacionados na Figura 10, em função da distância da interface M/M.

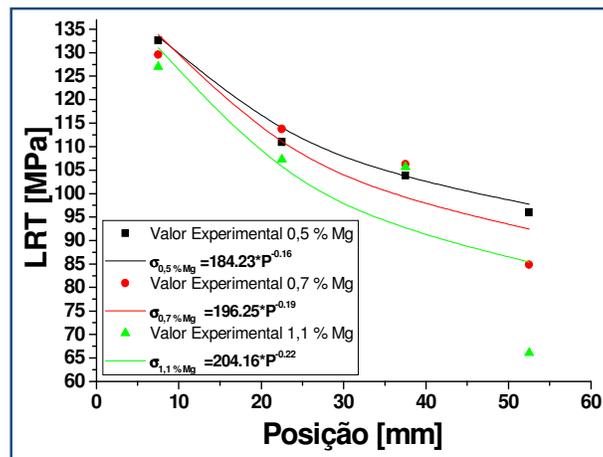


Figura 10. Relação do LRT em função da posição.

A Figura 11 relaciona as fotos micrográficas da liga com 1,1% Mg nas posições extremas com as curvas dos espaçamento dendrítico secundário (λ_2 ou EDS) em relação a posição da interface metal/molde.

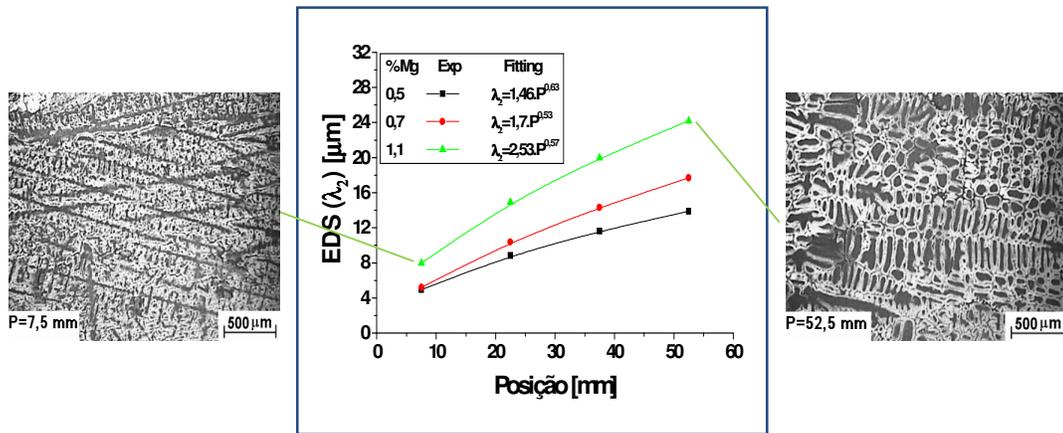


Figura 11. EDS em função da posição e foto micrográfica.

Os resultados de condutividade elétrica das ligas em estudo estão em função do diâmetro do fio (Figura 12), o qual foi submetido ao processo conformativo de laminação a frio.

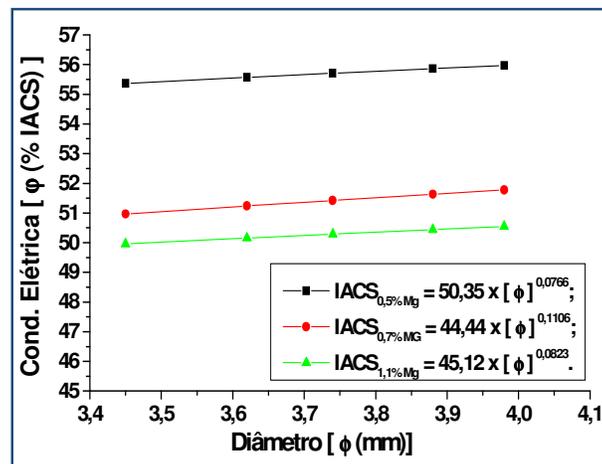


Figura 12. Condutividade elétrica em relação ao diâmetro do fio.

4 DISCUSSÕES

No gráfico da Figura 7 constata-se que a curva correspondente à liga com o teor 1,1%Mg apresenta valores mais baixos de V_L demonstrando que o processo foi sensivelmente mais lento quando comparado ao da solidificação das outras ligas. A mesma tendência ocorre com a taxa de resfriamento (Figura 8).

Na Figura 9, é possível observar que à medida que o teor de Mg aumenta ocorre nítida mudança na forma da estrutura bruta de fusão, partindo de grãos colunares pequenos para colunares nitidamente alongados com evidente transição colunar/equiaxial para todas as ligas à cerca de 28,9 mm da interface metal/molde (mostrado pelas setas).

Os gráficos da Figura 10 permitem constatar, que os valores obtidos nos ensaios de tração diminuem à medida que a concentração de Magnésio aumenta na liga e a posição dos corpos de prova em relação à interface M/M é maior.

Na Figura 11 observa-se, de maneira geral, que os valores de EDS aumentam à medida que são lidos mais afastados da interface M/M e quanto maior o teor de magnésio na liga. Isto deve-se provavelmente, à redução da taxa de resfriamento do metal. À medida que a camada solidificada vai ficando mais espessa, o avanço da interface sólido/líquido fica cada vez mais lento, aumentando gradativamente a resistência térmica. Este conjunto de comportamento pode favorecer o fenômeno da macrosegregação (segregação normal).

Nos resultados de condutividade elétrica (Figura 12) das ligas Al-0,6%Si -(0,5 %; 0,7 %; 1,1 %) Mg, observa-se que com a adição do soluto, apresentam-se valores menores de condutividade que podem estar associados aos seguintes motivos: i. ao maior emaranhamento de discordâncias devido ao grau de deformação aplicado nas amostras com maior teor de soluto; ii. a consequência parece ser maior resistência a passagem dos elétrons; iii. que também pode estar associado a formação do composto intermetálico Mg_2Si .⁽¹²⁾

5 CONCLUSÃO

Como consequência da afinidade entre o metal e o molde tem-se que:

O maior teor de soluto (1,1 %Mg) apresenta menores valores de Velocidade e Taxa de Resfriamento, que refletem diretamente na formação da estrutura final do fundido; apresentando valores de EDS maiores com o crescente teor de Mg e quanto mais afastados da interface metal/molde.

Estes dois aspectos encontram-se refletidos nos valores obtidos dos LRT que diminuem.

Como consequência do grau de deformação aplicado tem-se que:

O maior emaranhamento das discordâncias devido ao crescente teor de soluto e ao trabalho a frio imposto nas amostras, parece dificultar a passagem dos elétrons e, conseqüentemente, estas apresentam valores menores de condutividade elétrica (IACS%).

Agradecimentos

Os Autores agradecem aos integrantes do grupo GPEMAT, pela concessão do uso dos equipamentos, a ALUBAR METAIS S/A, UFPA, CNPq e PROPESP, pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 Fernandes Neto, M.; Pires, J. C. S.; Garcia, A.; Pinto, F. N.; *Investigação de inclusões não metálicas em fios elétricos de alumínio*; REM – Revista Escola de Minas, Brasil, v.55, n.2; p. 97-101, 2002;
- 2 Atxaga G., Pelayo A., and Mrisan A., *Effect of Microstructure on Fatigue Behaviour of Cast Al-7Si-Mg Alloy*; vol 17, Materials Science and Technology; 2001;
- 3 Fernandes, Denilson Santos; Sena, Hélio Cleidson de Oliveira; Kishi, André Oliveira; Sá, Fernando Antônio; Quaresma, J. M. do Vale; *Avaliação do Comportamento do Mg na Liga Al-Mg-Si (6101) Dentro de uma Faixa Admissível para a Fabricação de Fios e cabos Elétricos*; 58º Congresso Internacional anual da ABM - RJ, 2003;
- 4 Vlack, V.; Hall, L., *Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais*, tradução Edson Monteiro, editora Elsevier, 21ª Reimpressão, Rio de Janeiro, 1984;
- 5 MATTOS, P.R.O.; *Estudo da Trabalhabilidade da Liga Al-0,5%Si-0,6%Cu, Modificada com Diferentes Teores de Magnésio*, 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia

- Mecânica) - Universidade Federal do Pará, *Orientador*: José Maria do Vale Quaresma, 2005;
- 6 Schievenbusch, A.; Zimmermann, G.; Mathes, M.: *Comparison of different analysis techniques to determine the cellular and dendritic spacing* *Materials Science and Engineering*, A, 173 (1), pp.85-88, 1993;
 - 7 ASTM – *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [METRIC] (Designation: E 8m – 00B – METRIC)*;
 - 8 NBR 6810 - *Fios e cabos elétricos tração à ruptura em componentes metálicos. – Especificação*. São Paulo, 1981;
 - 9 NBR 6814/1985 – *Ensaio de resistência elétrica*. Especificação. São Paulo, 1985;
 - 10 GARCIA, A.; *Solidificação: Fundamentos e Aplicações*, Editora da UNICAMP, Campinas, Brasil, 2001;
 - 11 QUARESMA, J. M. V.; *Correlação entre Condições de Solidificação, Microestrutura e Resistência Mecânica* – Tese de Doutorado - UNICAMP – FEM; 1999;
 - 12 REED-HILL, R.E.; *Princípios de Metalurgia Física*; Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1982.