

INFLUÊNCIA DOS TEORES DE 2, 4 E 6% DE MG NAS VARIÁVEIS DE SOLIDIFICAÇÃO DO ALUMÍNIO ELETROCONDUTOR.

Carlos Alexandre Cavalcante de Sousa, carlosmec21@gmail.com¹

Marcos Felipe Macêdo Cardoso, mecânica.marcos@gmail.com¹

Gustavo Neves Rebelo, guga1365@gmail.com¹

Victor Lima Melo, victormelo.eng@gmail.com¹

Marielle Maria Medeiros Vital, mariellemd@gmail.com¹

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

¹Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá, CP 478, CEP 66075-110, Belém-Pará

Resumo: As ligas de alumínio possuem grandes aplicações na indústria e no cotidiano da sociedade, desde fios elétricos, rebites molas e até estruturas de veículos rodoviários; navais e aéreos. Uma parte importante das ligas de alumínio são as ligas de Alumínio-Magnésio (Al-Mg), sendo essas possuindo como característica marcante a baixa massa específica, possibilitando a aplicação na indústria como componente estrutural. Este trabalho tem como objetivo avaliar as curvas de solidificação do Alumínio eletrocondutor (Al-EC) e de ligas com os teores de Magnésio [Mg] [2;4 e 6]% o modificando. As amostras foram obtidas em molde de solidificação com extração de calor unidirecional horizontal, cortados em forma prismática de base retangular [15x15x110mm. Após a fundição, obteve-se as curvas de solidificação além de outros parâmetros como velocidade de deslocamento da isoterma liquidus.

Palavras-chave: Alumínio, Magnésio, Velocidade de Solidificação e Taxa de solidificação.

1. INTRODUÇÃO

O alumínio, apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, é o metal mais jovem usado em escala industrial (ABAL). Porém, há evidências de utensílios fabricados pelos Persas em 6000 a.C. que continham alumina (Al₂O₃), já em 3000 a.C. povos do Egito utilizavam Argila, que continha alumina, para fabricação de medicamentos, corantes e outros objetos. Entretanto, o uso do alumínio nessa época era bem diferente do que estamos acostumados. O estabelecimento da produção de alumínio em escala global se deu somente em 1886 quando foi desenvolvido o método de extração do alumínio por eletrólise ígnea por Charles M. Hall e Paul Héroult, o método ficou conhecido como Processo Hall-Héroult.

O alumínio e suas ligas têm como característica principal a massa específica relativamente baixa (2,7g/cm³), condutividade elétrica e térmica elevadas e resistência à corrosão em alguns ambientes comuns, incluindo a atmosfera ambiente (Callister, 2013, p. 348). O alumínio possui uma variedade de ligas aplicadas na indústria, dentre essas estão as ligas de Al-Mg, o magnésio é um elemento com a mais baixa massa específica dentre todos os metais estruturais (1,7g/cm³), dessa forma as ligas formadas dessa junção são usadas onde o peso baixo é de grande importância. Como por exemplo, em tanques de combustível, linhas de combustível e de óleo em aeronaves, além de poderem ser utilizadas em utensílios e outros objetos do cotidiano.

Dentro desse contexto nacional, o Grupo de Pesquisas em Engenharia de Materiais – GPEMAT/FEM/ITEC/UFPA vem estudando novas ligas de alumínio que possam ser capazes de serem utilizadas para atuar de forma superior e fornecendo propriedades eletromecânicas melhores para maximizar a vida útil do material e fornecer maiores aplicações na indústria.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A liga foi produzida a partir da utilização do alumínio eletrocondutor (AL-EC) com pureza comercial. Junto com o magnésio, o Al-EC foi seccionado com a utilização de serra de fita, pesados com a utilização de balança de precisão e fundidos em forno mufla em cadinho de carbetto de silício de 3,5l.

Primeiramente, o cadinho de carbetto de silício foi preparado, pintado internamente com solução de caulim de modo a evitar aderência da liga com as paredes internas, aquecido a uma temperatura de 150°C para a retirada de umidade. Em seguida o material pesado é inserido no cadinho e levado novamente ao forno a uma temperatura de 900°C para fusão completa.

Antes de ser efetuado o vazamento do metal líquido nas cavidades dos moldes foi realizada a homogeneização do metal líquido através de agitação manual, utilizando-se uma espátula de aço já previamente pintada com a solução de caulim e aquecida para a retirada de humidade. Logo após a homogeneização, faz-se a injeção de gás inerte (argônio) na vazão entre 0,2 e 0,4 l/s através de um tubo de aço inoxidável ligado a um cilindro de 10 m³. Após esses procedimentos, o magnésio já previamente embrulhado em papel alumínio de modo que o mesmo contenha o mínimo de ar possível, e inserido no metal líquido e é efetuada agitação vigorosa como forma de homogeneizar o banho. O metal líquido foi vazado rapidamente e com um superaquecimento de 10% acima da temperatura liquidus. O modelo esquemático do molde de solidificação unidirecional horizontal pode ser observado na figura 01, o mesmo foi utilizado nos trabalhos de Quaresma, 1999; Monteiro, 2013; Sousa 2017.

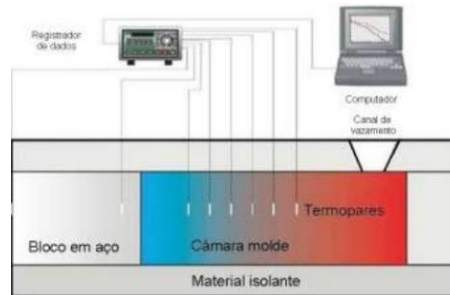


Figura 01 – Modelo esquemático da câmara de solidificação unidirecional horizontal. Fonte: Quaresma, 1999; Monteiro, 2013; Sousa 2017.

O molde utilizado para a solidificação foi um molde de solidificação com extração de calor unidirecional horizontal. Para as dimensões do molde, baseou-se no trabalho de Quaresma (1999). Na sua montagem utilizou-se um bloco de geometria regular com dimensões de [60x60x110] mm de aço SAE 1010 e nas dimensões da câmara de vazamento [60x60x110] mm.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Curvas de Solidificação

No conjunto de gráficos presentes na figura 02 pode-se verificar as curvas de solidificação para o Al-EC e para todas as ligas produzidas posteriormente.

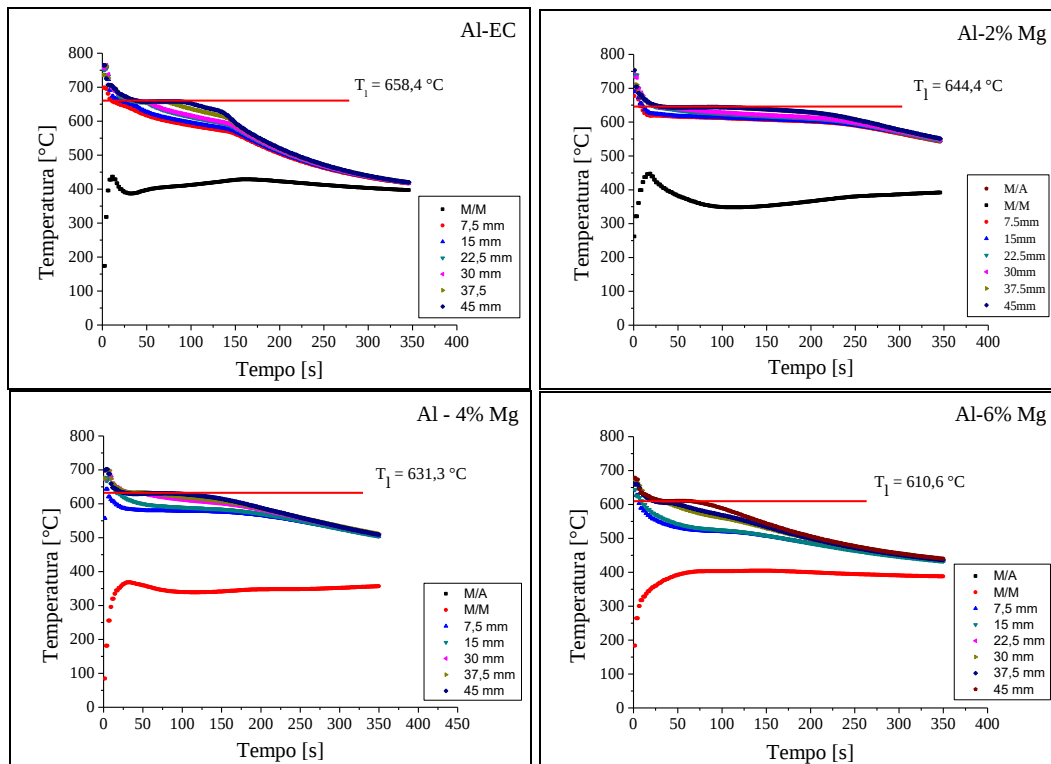


Figura 02 - Curvas de Solidificação. Liga Al-100%/Al-EC.

Com a análise dos dados obtidos durante a solidificação das ligas foram plotados os gráficos da figura 02 e obtido a temperatura liquidus para o Al-EC e todas as ligas.

Outro ponto importante obtido e a redução da temperatura liquidus com a elevação do teor de magnésio na liga, que pode ser observado na figura 04. Esse comportamento, já esperado, está de acordo com a literatura como pode ser visto na figura 03. Por outro lado, fica evidente que os maiores teores de Mg estão associados a maiores “mushi zone” indicativo de que a liga se apresenta dentro da região solido/líquido do diagrama mais “LÍQUIDA” e em condições de melhor “MOLHAR” o molde.

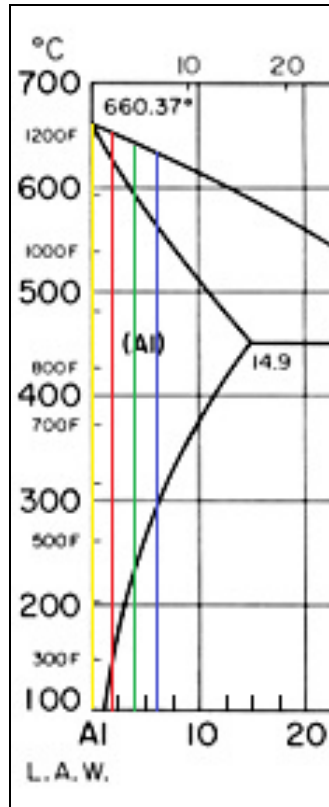


Figura 03 – Diagrama de fases com as marcações da composição de Al-EC; Al-2%Mg; Al-4%Mg e Al-6%Mg respectivamente em amarelo, vermelho, verde e azul. Fonte: Adaptado de Infomet.

Tabela 01 – Dados de Temperatura *Liquidus* por material obtido.

Ligas de Alumínio	Temperatura <i>Liquidus</i> (T_L) [°C]
Al-EC	658,4
Al-2%Mg	644,4
Al-4%Mg	631,3
Al-6%Mg	610,6

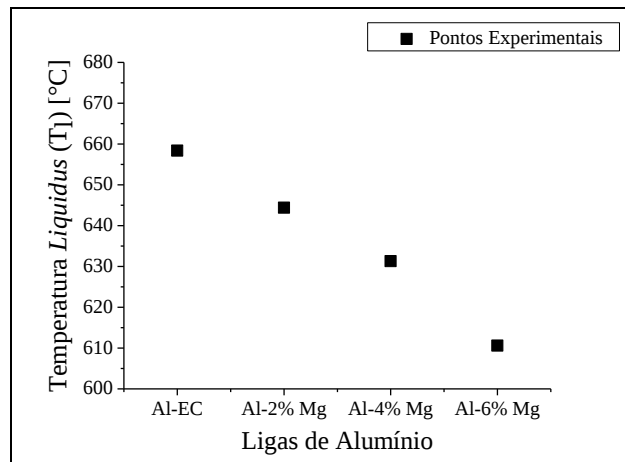


Figura 04 – Temperatura *liquidus* para o Al-EC, com adição de 2, 4 e 6% de magnésio.

3.2. Variáveis de Solidificação

Após a análise dos gráficos de temperatura x tempo presentes na figura 02 os dados são novamente organizados e é verificado o tempo de passagem da isoterma liquidus para cada posição dentro da câmara de solidificação. Os dados obtidos com a respectiva análise foram plotados e estão expostos na figura 05.

Tabela 02 –Dados de Posição x Tempo.

Posição[mm]	7,5	15	22,5	30	37,5	45
Ligas	Tempo					
Al-EC	12,03	22,83	36,58	41	63,91	82
Al-2%Mg	9,21	11,27	27,5	30,1	67	95
Al-4%Mg	5,54	18,48	--	36,97	62,85	80
Al-6%Mg	5,69	10	--	23,88	41,9	59

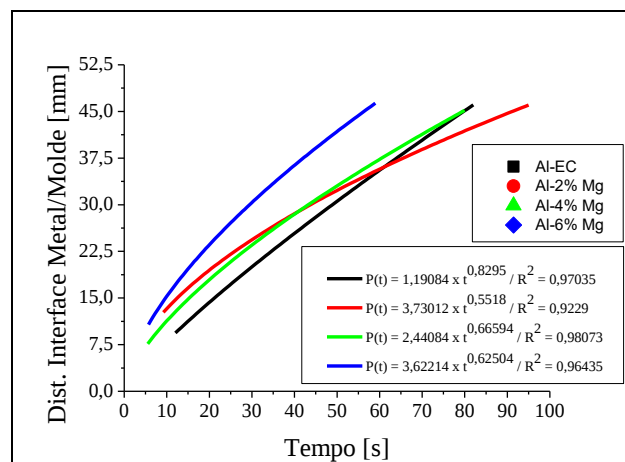


Figura 05 – Gráfico Posição x Tempo de passagem da *isoterma liquidus*.

Com a utilização do gráfico e das equações de posição por tempo, do tipo $P(t) = Axt^b$, contidas na figura 05. Derivando-se o modelo de equação citada anteriormente temos:

$$P(t) = a \times t^b \quad (1)$$

$$V(t) = \frac{dP}{dt} = a_2 \times t^{b_2} \quad (2)$$

Utilizando a derivada da equação (1) e aplicando os pontos obtemos os dados de velocidade pelo tempo expostos na figura 06.

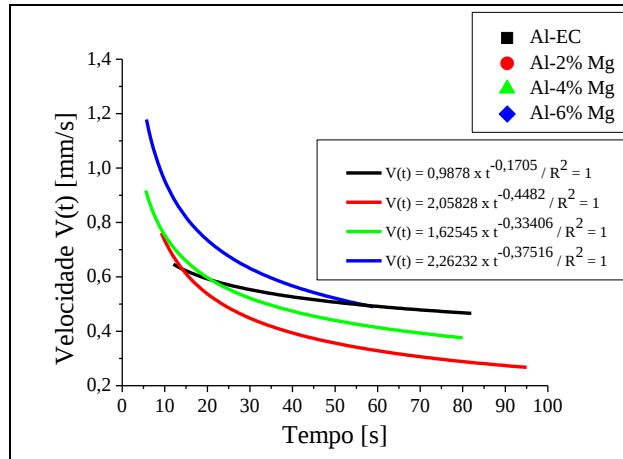


Figura 06 – Gráfico de Velocidade x Tempo.

Analisando as curvas de solidificação presentes no gráfico da figura 06, é possível perceber que a liga com 6%Mg apresentou a passagem da isoterma liquidus em todas as posições com maior velocidade que o alumínio EC e as ligas com 2% e 4% de magnésio. Este comportamento caracteriza maior molhabilidade do molde pelo metal líquido em virtude da característica que o Mg possui de elevar a fluidez do Al líquido e por apresentar maior “mushi zone”.

Aplicando os conceitos de Log nas equações 01 e 02 e isolando e igualando o tempo para ambas as equações é possível a obtenção da equação da velocidade por posição e as curvas contidas na Figura 7.

$$V(P) = a_t \times P^{b_t} \quad (3)$$

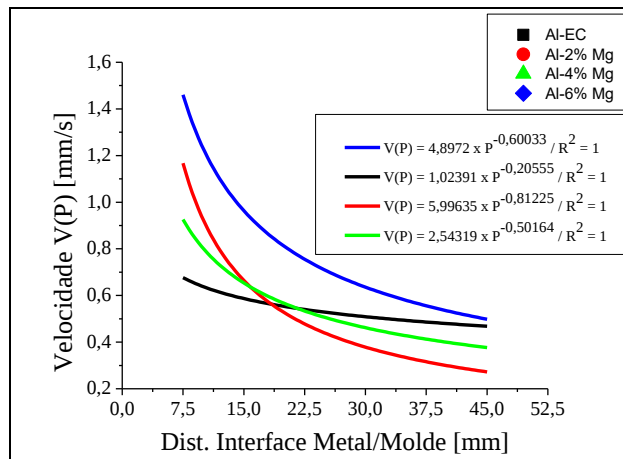


Figura 07 – Gráfico de Velocidade x Posição.

Fica evidente, pelos resultados apresentado nas Figura 6 e 7, que a liga com 6,0%Mg tem o primeiro contato com o molde com maior intimidade, molhando-o mais intensamente, e como consequência tem formada a sua primeira camada muito delgada que não resiste a pressão metalostática sendo naturalmente empurrada de volta para o contato com o molde facilitando assim a troca térmica

3.3. Taxa de resfriamento experimental

O método utilizado se encontra descrito no trabalho de Okamoto e Kishitake (1995), no qual a taxa é obtida com a utilização do método numérico de Diferenças Finitas utilizando como base a temperatura liquidus e as curvas de resfriamento em cada posição.

Calcula-se o modulo da razão entre os intervalos de temperatura e tempo antes e depois da temperatura liquidus como ilustrado na figura 08.

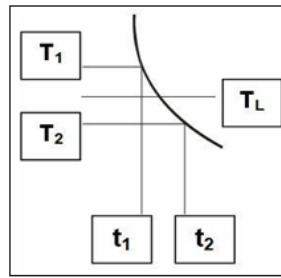


Figura 08 - Esquema representativo para determinação da taxa de resfriamento. Fonte: GPEMAT.

$$\dot{T} = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \left| \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1} \right| \quad (4)$$

Os valores obtidos encontram-se relacionados na Tabela 03 e podem ser visualizados nas curvas da Figura 9 e o seu comportamento ao longo das distâncias a interface M/M, mais uma vez evidencia os maiores valores e como comentados anteriormente são consequências da maior molhabilidade do molde pelo metal líquido

Tabela 03 – Dados de Taxa Experimental.

Posição [mm]	7,5	15	22,5	30	37,5	45
Ligas	Taxa Experimental [°C/s]					
Al-EC	9,18	2,4	1,2	0,7	0,41	0,1
Al-2%Mg	12	2,89	1,3	1	0,1	0,1
Al-4%Mg	22,5	3,5	--	0,4	0,7	0,1
Al-6%Mg	24,3	10,5	--	2,6	2,1	0,2

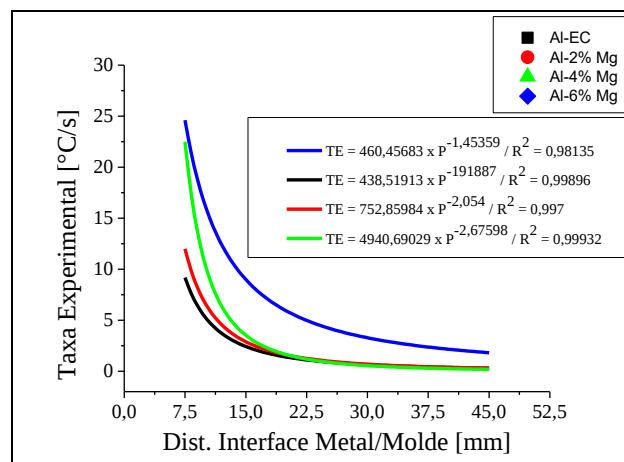


Figura 09 – Gráfico de Taxa Experimental.

4. CONCLUSÕES

Com a elevação dos teores de magnésio nas ligas de alumínio, observou-se a redução nos valores de temperatura liquidus.

A liga Al-6%Mg apresenta os maiores valores para a passagem da isoterma liquidus dentre todos os materiais estudados. Ademais, a liga também possui os maiores valores de taxa experimental para todas as posições. Comportamento conseqüente da maior fluidez que o Mg confere às ligas de Al, lhes proporcionando maior molhabilidade do molde.

5. REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Alumínio (ABAL), 2017.

OKAMOTO T.;Kishitake K.: "Dendritic structure in unidirectionally solidified aluminum, tin, and zinc base binary alloys". Journal of Crystal Growth, v. 129, p. 137-146, 1975.

- QUARESMA, J. M. V. Correlação entre condições de solidificação, microestrutura e resistência mecânica. 1999. Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, 1999.
- SOUSA, C. A. Caracterização elétrica e mecânica da liga al-cu-fe-si modificada com teores de zircônio, para fins de transmissão e distribuição de energia elétrica. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.
- W. D. Callister. Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução. 8 Ed. p 348, 2013.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho”.

INFLUENCE OF THE CONTENTS OF 2, 4 AND 6% OF MG IN THE SOLIDIFICATION VARIABLES OF ELETROCONDUCTOR ALUMINUM.

Carlos Alexandre Cavalcante de Sousa, carlosmec21@gmail.com¹

Marcos Felipe Macêdo Cardoso, mecânica.marcos@gmail.com¹

Gustavo Neves Rebelo, guga1365@gmail.com¹

Victor Lima Melo, victormelo.eng@gmail.com¹

Marielle Maria Medeiros Vital, mariellemd@gmail.com¹

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

¹Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá, CP 478, CEP 66075-110, Belém-Pará

Abstract: Aluminum alloys have great applications in industry and everyday life, from electrical wires, rivets to springs and even road vehicle structures; naval and air. An important part of the aluminum alloys are the Alumina-Magnesium alloys (Al-Mg), these having as a characteristic the low density, allowing the application in the industry as a structural component. This work aims to evaluate the solidification curves of the electroconducting aluminum (Al-EC) and alloys with the magnesium [Mg] [2, 4 and 6]% by modifying it. The samples were obtained in solidification mold with horizontal unidirectional heat extraction, cut in prismatic rectangular form [15x15x110mm. After the casting, the curves of solidification besides other parameters were obtained as speed of displacement of the liquidus isotherm.

Keywords: Aluminum, Magnesium, Solidification Rate and Solidification Rate.