

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS TÉRMICOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ELÉTRICAS DAS LIGAS DE ALUMÍNIO MODIFICADAS COM FERRO¹

*Manoelson Pereira das Mercês²
Washington Luis Reis Santos²
Paulo Cordeiro Machado²
José Maria do Vale Quaresma³*

Resumo

Este estudo visa analisar o efeito do ferro nas propriedades mecânicas e elétricas do alumínio EC solidificado unidirecionalmente. Com o intuito de se avaliar a influencia da variação do ferro no alumínio EC, adotou-se um critério de variação do ferro nos teores de [0,15; 0,20; 0,30 e Al-EC]%. As ligas foram preparadas por fundição em um forno tipo mufla, e posteriormente vertidas em uma câmara de solidificação unidirecional horizontal. A coleta dos dados térmicos foi efetivada através de termopares posicionados estrategicamente, em relação a interface Metal/Molde. As amostras produzidas foram usinadas e laminadas, e em seguida submetidas a ensaios de tração e resistência elétrica. Com o aumento do teor de ferro, houve uma significativa variação nos parâmetros térmicos, refletidos nos aspectos macro-estruturais. Ocasionalmente um aumento dos valores de resistência mecânica sem grandes perdas para as propriedades elétricas.

Palavras-chave: Solidificação unidirecional; Características térmicas; Propriedades mecânicas; Propriedades elétricas; Ligas de Al-Fe.

THERMIC PARAMETERS OF INFLUENCE ON MECHANICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF ALLOYS ALUMINIUM PRODUCTS MODIFIED WITH IRON

Abstract

This study aims to examine the effect of iron in the electrical and mechanical properties of aluminium EC unidirectionally solidified. In order to assess the influence of the variation of the iron in aluminium EC, has taken up a criterion of variation in the iron content of [0.15, 0.20, 0.30, and Al-EC]%. The alloys were prepared by melting in a furnace type mufla, and subsequently included in a Board of unidirectional solidification horizontal. Data collection was carried out by means of thermal thermocouples positioned strategically, for interface Metal / Mold. The samples produced were machined and rolled, and then subjected to tests of traction and electrical resistance. With the increase in the content of iron, there was a significant variation in thermal parameters, reflected on aspects macro-structural. Building an increase in the values of mechanical strength without major losses for the electrical properties.

Key words: Unidirectional solidification; Thermal features; Mechanical properties; Electrical properties; Al-Fe alloy.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Graduando em engenharia mecânica – Universidade Federal do Pará*

³ *Dr. em engenharia mecânica – Universidade Federal do Pará*

1 INTRODUÇÃO

Este estudo visa analisar o efeito do ferro na solidificação unidirecional do alumínio EC comercialmente puro, já que na maioria dos estudos o ferro é visto apenas como uma impureza com pouca ou quase nenhuma influência na macroestrutura de solidificação. O ferro é a mais comum impureza encontrada no alumínio, pois tem alta solubilidade no alumínio fundido e por esta razão ele é facilmente dissolvido em todos os estágios de produção. Conseqüentemente, a maior quantidade de ferro presente no alumínio está na forma apenas como fase intermetálica secundária, diluída e freqüentemente com outros elementos. O ferro é usado em condutores elétricos com o objetivo de aumentar a resistência mecânica e melhorar moderadamente características de fluência a altas temperaturas. O ferro reduz o tamanho de grão em produtos trabalhados ASM International.⁽¹⁾

As estruturas de solidificação de peças fundidas, ou lingotes pode apresentar-se na forma de grãos completamente colunares ou totalmente equiaxiais, dependendo da composição química da liga e das condições de solidificação. Essa mudança pode ser influenciada por alguns dos seguintes fatores: sistema metal/molde, composição da liga; temperatura do molde e do metal; Velocidade de Vazamentos e de Solidificação além da Taxa de Solidificação.

O refinamento de grão é uma técnica importante para a melhoria dos produtos fabricados a partir do alumínio. Estruturas equiaxiais tornam as propriedades mecânicas do material uniforme, melhorando a usinabilidade e os aspectos superficiais. Os refinadores normalmente utilizados são Al-Ti ou Al-Ti-B, entretanto, estudos desenvolvidos no GPEMAT/UFGA constataram que o Si apresenta características que podem promover o refinamento do grão de ligas 6101, Al-0,06%Mg-[0,40; 0,80 e 1,20]%Si, com solidificação unidirecional horizontal,^(2,3) por outro lado Johnsson,⁽⁴⁾ Zhiyong Liu⁽⁵⁾ desenvolveram estudo com teores variados de Si e constataram sua capacidade de refinar grão. Recentes estudos de Zhang,^(6,7) mostram o efeito do teor de ferro, em alumínio eletro-condutor como refinador de grão como visto nas macros estruturas da Figura 1.

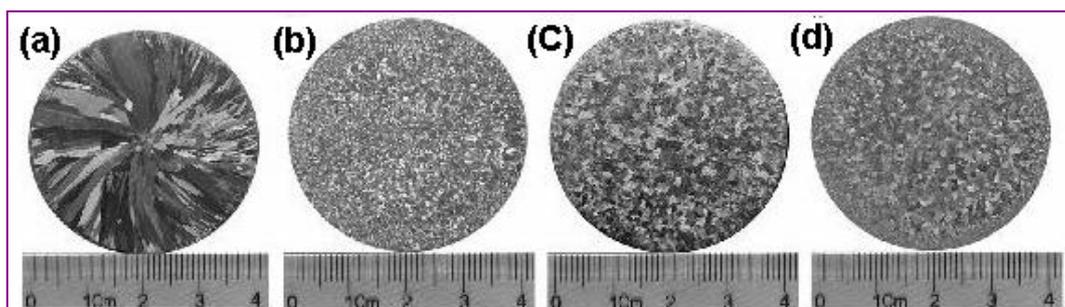


Figura 1 – Evolução da macroestrutura do Al-EC com variação do teor de Fe: (a) Al-EC; (b) 0,5 %Fe; (c) 0,8%Fe; (d)1,2 %Fe.

Estes benefícios são cruciais na indústria de condutores elétricos, visto que se almejam ligas capazes de serem deformadas sem apresentar defeitos estruturais e sem comprometer as características mecânicas e elétricas do perfil deformado. Baseado em estudos realizados sobre a influência de teores de Fe na formação da macroestrutura de alumínio, este artigo pretende contribuir com estas considerações ao apresentar um estudo no qual investiga-se a ação modificadora do binário Cu-Fe; no qual fixou-se o teor de cobre em 0,05% e variou-se o ferro nos seguintes teores: [0,15; 0,20; 0,30]%; sobre a macro estrutura de solidificação, além de avaliar-se as conseqüências sobre as características mecânicas e elétricas do produto final.

2 MATERIAIS E METODOS

Com o intuito de se avaliar a influência da variação do ferro na macroestrutura do alumínio comercialmente puro, foram produzidas inicialmente a liga base Al-0,05%Cu que em seguida foi modificada com os seguintes teores de Ferro [0,15%; 0,20%; 0,30%]. A composição química das ligas utilizadas neste trabalho foi determinada em um espectrômetro de massa, e são apresentados na Tabela 1.

O material foi colocado em um cadinho de carvão de silício, revestido interiormente por uma camada protetora de caulim. A fusão dos metais foi feita em um forno tipo MUFLA com temperatura de trabalho ajustada em 800°C, para que fosse garantida a fusão completa dos metais. Depois de fundido e homogeneizado, foi realizada a injeção do gás inerte (argônio) à vazão de 0,2 l/s, através de um tubo de inox ligado a um cilindro de 10m³ (Figura 2) e uma haste de aço inoxidável foi utilizada para remoção do filme de óxido formado na superfície do banho líquido. Durante este processo um termopar introduzido no metal líquido foi utilizado para controlar a temperatura de vazamento.



Figura 2 – Seqüência operacional de preparação e obtenção das ligas fundidas: A, Fusão do material; B, Injeção de argônio; C, Vazamento do metal líquido na coquilha unidirecional e os termopares posicionados e D, Coleta de amostras para análise química.

Os vazamentos foram realizados em um aparato experimental de solidificação, que foi projetado de tal modo que a extração de calor seja realizada somente pela parede composta pelo bloco metálico lixado (aço SAE 1010) (Figura 2C), promovendo uma solidificação unidirecional, fato este que facilita o estudo da evolução estrutural a partir da interface metal/molde. O uso desta configuração experimental permite minimizar a convecção natural, bem como àquelas provenientes de correntes convectivas por rejeição de soluto.

Neste trabalho executou-se quatro vazamentos buscando a obtenção de perfis térmicos, os quais mostraram a variação térmica durante a solidificação de cada liga. Inicialmente, posicionou-se oito termopares, sendo seis tipo K e dois do tipo J em posições predeterminadas da câmara de vazamento. Onde os termopares tipo K foram posicionados dentro da câmara de vazamento, nas posições em relação à interface metal/molde de 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm e 30 mm, e os dois termopares do tipo J foram posicionados em locais diferentes, um ficou no molde metálico, a 3 mm da interface metal/molde e o outro na interface molde/ambiente.

Os termopares foram conectados em um dispositivo para registrar a temperatura de tal sorte a registrar-se todo o histórico térmico da liga durante a solidificação. Os dados coletados foram repassados a um computador, onde as alterações térmicas ao longo do tempo foram tratadas, visando à aquisição das curvas de resfriamento de cada liga.

A partir das interseções das retas de cada temperatura com os perfis térmicos em cada posição dos termopares, obtém-se o tempo correspondente da passagem da isoterma liquidus em cada posição do termopar. Possibilitando a construção do gráfico experimental da posição da isoterma liquidus com o tempo.

As curvas de resfriamento contidas nos gráficos da Figura 3, representam o registro térmico do processo de solidificação para o Al-EC com 0,05%Cu.

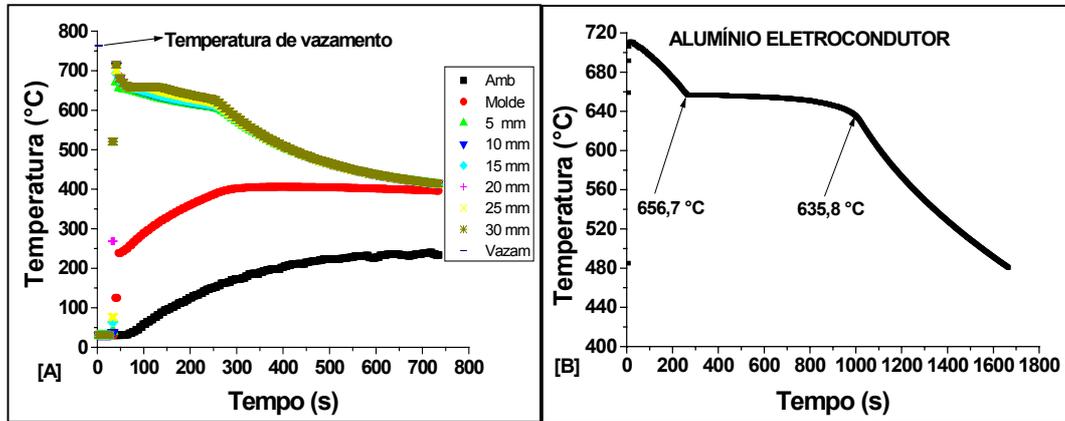


Figura 3 – [A] Curvas experimentais de resfriamento para a liga Al-EC-0,05%Cu; [B] Perfil térmico da posição 30mm.

As velocidades experimentais da isoterma liquidus (V_L) assim como as Taxas de Resfriamento, para todas as ligas, foram determinadas experimentalmente a partir das curvas de solidificação obtidas.

Para a investigação da estrutura das amostras as mesmas foram preparadas segundo técnicas-padrão da metalografia. Na revelação da macroestrutura das ligas em estudo foi utilizado como solução de ataque o reagente Poultons com a seguinte configuração [12ml HCl (conc), 6ml HNO₃ (conc). 1ml HF (48%), 1ml H₂O], com o tempo de exposição ao ataque de 65 segundos.

3 RESULTADOS

3.1 Composição Química

Na Tabela 1 encontra-se relacionado os teores dos elementos de liga que constituíram as ligas estudadas neste trabalho, ressalta-se aos teores dos elementos Ferro[Fe]; Cobre [Cu] além dos elementos Titânio [T] e boro [B]. Estes dois últimos como refinadores de grão.

Tabela 1 – Média de 2 análises da composição química

	Si (%)	Mg (%)	Fe (%)	Cu (%)	Zr (%)	Ti (%)	B (%)	V (%)	Cr (%)	Al (%)	Outros (%)
Al-EC 0,15% Fe	0,0486	0,0023	0,1663	0,0467	0,0016	0,0018	0,0011	0,0022	0,0026	99,71	
	0,0475	0,0019	0,1663	0,0499	0,0006	0,0012	0,0012	0,002	0,0051	99,71	
	0,0481	0,0021	0,1663	0,0483	0,0011	0,0015	0,0012	0,0021	0,00385	99,71	0,0156
Al-EC 0,20% Fe	0,0609	0,0021	0,1961	0,0528	0,0002	0,0019	0,0014	0,0020	0,0006	99,64	
	0,0605	0,0020	0,2028	0,0527	0,0001	0,0013	0,0012	0,0019	0,0003	99,64	
	0,0607	0,0021	0,1995	0,0528	0,0002	0,0016	0,0013	0,0020	0,0005	99,64	0,0396
Al-EC 0,30% Fe	0,0532	0,0025	0,2790	0,0485	0,0003	0,0003	0,0014	0,0017	0,0008	99,58	
	0,0536	0,0025	0,2740	0,0496	0,0003	0,0004	0,0013	0,0015	0,0008	99,59	
	0,0534	0,0025	0,2760	0,0491	0,0003	0,0004	0,0014	0,0016	0,0008	99,59	0,0293
Al-EC	0,0540	0,0093	0,1096	0,047	0,0011	0,0013	0,0016	0,0025	0,0022	99,75	
	0,0520	0,0084	0,1147	0,0456	0,0011	0,0009	0,0013	0,0021	0,0010	99,76	
	0,0530	0,0089	0,1122	0,0463	0,0011	0,0011	0,0015	0,0023	0,0016	99,76	0,0172

Fonte: Dados da Pesquisa.

3.2 Caracterização Térmica

3.2.1 Velocidade de Solidificação (V_L)

Depois de obtidas as curvas de resfriamento, foram plotadas as curvas experimentais da posição da isoterma liquidus pelo tempo para cada liga. A Figura 4A mostra as curvas que descrevem a evolução dos perfis da isoterma liquidus para as ligas estudadas. A partir da derivação das equações obtidas chega-se às equações que descrevem a perfil das velocidades de deslocamento das Isotermas Liquidus para cada liga como pode ser visto na Figura 4B.

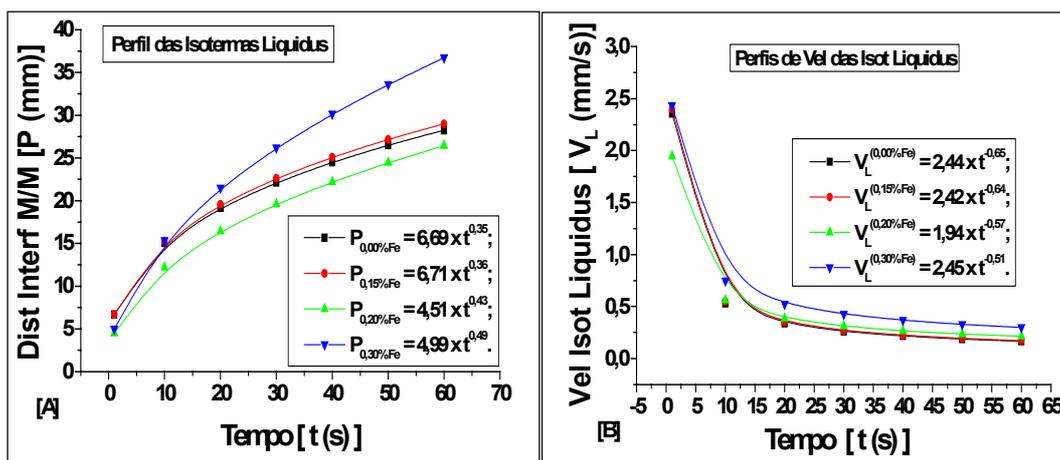


Figura 4. A) Curva experimental da posição da isoterma liquidus; B) Velocidades das isotermas das ligas estudadas.

De um modo geral todas as ligas apresentaram, inicialmente, as mesmas afinidades com o molde. Entretanto, a liga com 0,30% Fe apresenta o perfil para a velocidade final de solidificação (V_L) superior, provável consequência de presença de um “gap” de ar entre o metal e o molde menor, em virtude da elevada viscosidade

que o Fe provoca no Al. Esta circunstância pode contribuir para a formação de uma camada sólida inicial bastante espessa e capaz de suportar a pressão metalostática.

Por outro lado, com o auxílio de breve manipulação matemática das equações contidas na Figura 4 é possível escrever-se as equações descritivas dos perfis de velocidade de deslocamento destas isotermais em função da posição em relação a interface metal/molde, como pode ser visto na Figura 5A.

Taxa de resfriamento

Observa-se nas curvas de Taxa de Resfriamento da Figura 5B, que para todas as ligas acontece uma diminuição progressiva da variável térmica em relação às posições mais afastadas da interface metal/molde, e que a medida que a solidificação progride as taxas tendem a convergir nas posições mais afastadas do molde. Sendo que as curvas com maior teor de Fe, apresentaram os maiores perfis de Taxa de Resfriamento, resultado este que vem confirmar a evolução dos perfis da Figura 5A, em que as curvas com maior teor de soluto apresentaram um perfil de velocidade mais elevados. A configuração estrutural apresentada pelas ligas com os teores de ferro e cobre associados vista na figura 6, mesmo com os teores de Ti e B compatíveis ao refino de grão, não apresenta grãos refinados. É provável que o modo de vazamento e de extração de calor empregados tenham atuado com mais preponderância, de forma a inibir a ação destes elementos, e mais de acordo com a proposta de Garcia⁽⁸⁾ a velocidade com que o calor é extraído e transferido através do molde para o ambiente tem relação direta com estrutura obtida, podendo ser colunar quando a velocidade for elevada ou equiaxial quando for baixa. A tendência de grãos colunares mais delgados à medida em que cresce o teor de ferro não dificultou a imposição da taxa de deformação de 58%, como pode ser visto na Figura 7.

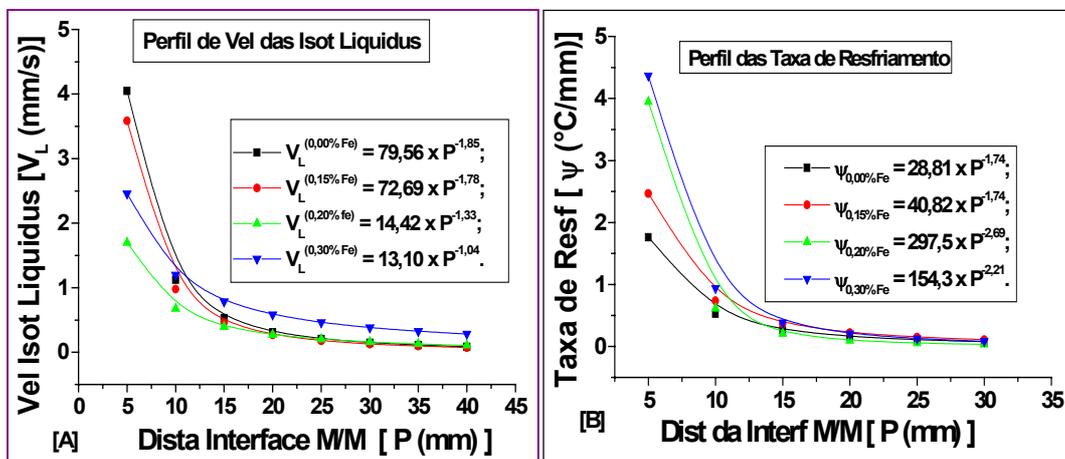


Figura 5. Curvas experimentais para: [A] Velocidade de deslocamento da Isotherma liquidus e [B] Taxa de Resfriamento.

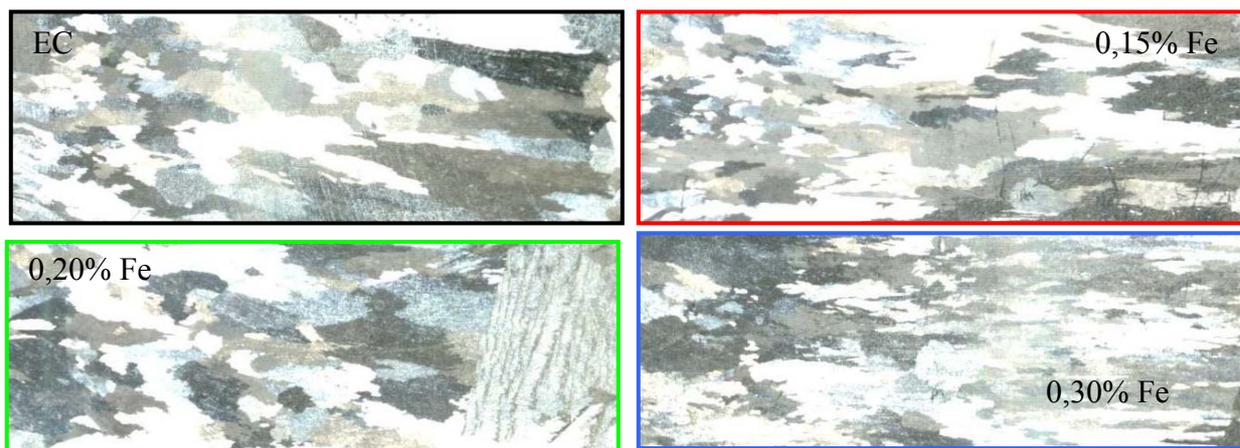


Figura 6 – Macro estruturas de solidificação obtidas de vazamentos unidirecionais em função do teor de ferro.

3.3 Caracterização Mecânica

3.3.1 Ensaio de tração

Os resultados do ensaio de tração que podem ser observados na Figura 7 abaixo, tanto para o vergalhão (Figura 7A), como para o fio (Figura 7B), apresentaram a mesma tendência na medida em que as amostras foram retiradas mais afastadas da interface M/M e quanto maior a presença de ferro na liga.

Estes resultados revelam que as ligas além de apresentarem boa trabalhabilidade, pois todas foram submetidas à mesma taxa de deformação, responderam de modo satisfatório ao encruamento. Sendo que a liga com 0,15%Fe foi a que melhor respondeu à taxa de deformação imposta.

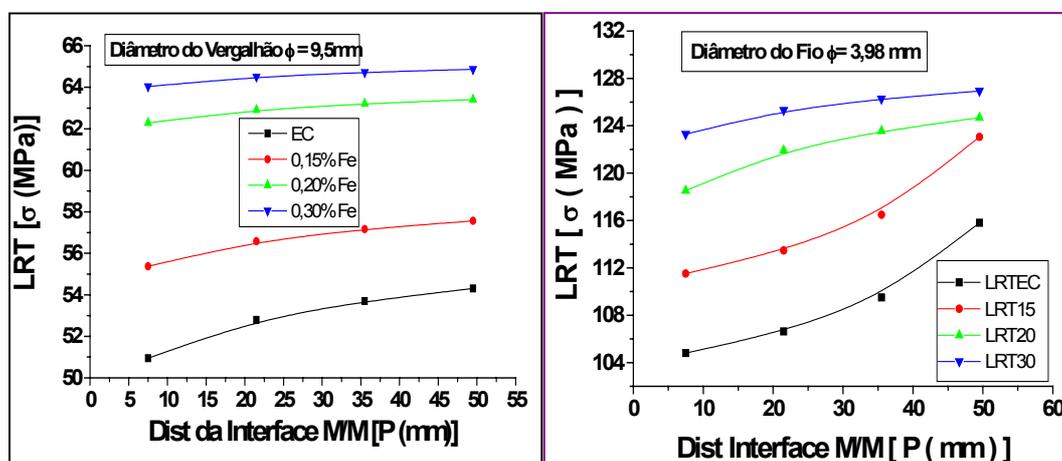


Figura 7 - Resultados dos Ensaio de Tração: [A] Vergalhão; [B] Fio⁽⁹⁾.

3.8 Propriedades Elétricas

Os resultados da caracterização elétrica ilustrados pelas curvas da figura 8, permitem a observação de que, nas condições experimentais empregadas neste trabalho, o teor de ferro crescente prejudica a condutividade elétrica do alumínio. Entretanto, a observação dos resultados apresentados nas Figuras 7 e 8, permitem sugerir que teores de ferro entre 0,2% e 0,15%, podem associar boas características mecânicas e elétricas.

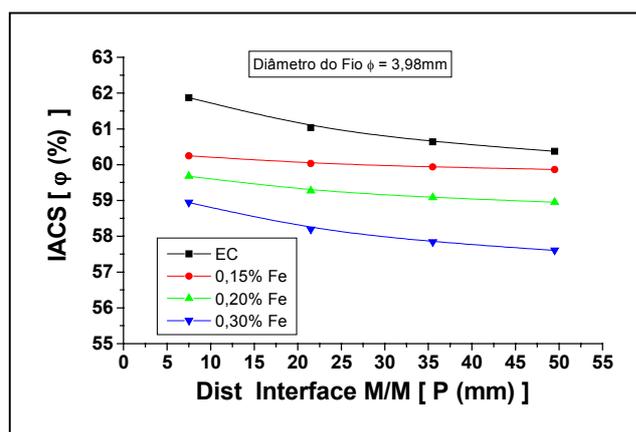


Figura 9. Condutividade elétrica (IACS %) ^(10; 11).

4 DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para as curvas de velocidade e taxa de resfriamento (Figura 5), mostram um comportamento similar. Com a liga com 0,30%Fe apresentando velocidade final de solidificação (V_L) superior, provável consequência de presença de um “gap” de ar entre o metal e o molde menor, em virtude da elevada viscosidade que o Fe provoca no Al. Esta circunstância pode contribuir para a formação de uma camada sólida inicial bastante espessa e capaz de suportar a pressão metalostática.

A configuração estrutural obtida pelas ligas vista na figura 6, mesmo com os teores de Ti e B compatíveis ao refino de grão, não apresenta grão refinados. É provável que o modo de vazamento e de extração de calor empregados tenham atuado com mais preponderância, de forma a inibir a ação destes elementos, e mais de acordo com a proposta de Garcia⁽⁸⁾ a velocidade com que o calor é extraído e transferido através do molde para o ambiente tem relação direta com estrutura obtida, podendo ser colunar quando a velocidade for elevada ou equiaxial quando for baixa.

A tendência de grãos colunares mais delgados à medida em que cresce o teor de ferro não dificultou a imposição da taxa de deformação de 58%, como pode ser visto na Figura 7.

Estes resultados revelam que as ligas além de apresentarem boa trabalhabilidade, pois todas foram submetidas à mesma taxa de deformação, responderam de modo satisfatório ao encruamento. Sendo que a liga com 0,15%Fe foi a que melhor respondeu à taxa de deformação imposta.

Os resultados da caracterização elétrica ilustrados pelas curvas da Figura 8, permitem a observação de que, nas condições experimentais empregadas neste trabalho, o teor de ferro crescente prejudica a condutividade elétrica do alumínio. Entretanto, a observação dos resultados apresentados nas Figuras 7 e 8, permitem sugerir que teores de ferro entre 0,2% e 0,15%, podem associar boas características mecânicas e elétricas.

5 CONCLUSÃO

Ligas com teores entre 0,15% e 0,20% de ferro foram as que apresentaram os melhores resultados, no que diz respeito a características mecânicas e elétricas. Apesar de apresentar redução de suas propriedades elétricas (IACS%), estas perdas não foram tão significativas, podendo inclusive ser atenuadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem as Industrias ALUBAR S.A.; a UPPA; a FADESP e ao GPEMAT pelo apoio financeiro e técnico científico que recebem destas instituições.

REFERÊNCIA

- 1 ASM INTERNATIONAL. Aluminum and Aluminum alloys. v.4. Estados Unidos: Davis & Associates, 1998.
- 2 Maia, R. F. S.; Moreira, A. E. A.; Sá, F., A.; Borges, M. S.; QUARESMA, J. M. V.. - Relação entre a Deformação e as Estruturas de Ligas Al-Mg-Si Solidificadas Unidirecionalmente. In: II Congresso Internacional do Alumínio - Expoalumínio, 2005, São Paulo, 2005.
- 3 Maia, R. F. S ; Moreira, D. A ; Prazeres, U. R. ; Borges, M. S; QUARESMA, J. M. V. ; - Caracterização da Estrutura Bruta de Fusão da Liga Al-Mg-Si Solidificada Unidirecionalmente, Deformada a frio. In: 12º Congresso de Fundição - CONAF, 2005, São Paulo, 2005.
- 4 BACKERUD, L, JOHNSON, M. - The relative importance of nucleation and growth mechanisms to control grain size in various aluminum alloys. Light Met 1996;27(4):679–85;
- 5 ZHIYONG, L.; MINGXING, W.; YONGGANG, W. - Effect of silicon on grain refinement of aluminum produced by electrolysis. Mater Trans 2003;44(10):2157–62;
- 6 ZHANG , Y.; MA, N.; YI, H.; LI, S.; WANG, H. - Effect of Fe on grain refining of pure aluminum refined by Al5TiB master alloy, Materials Letters 59 (2005) 3398 – 3401
- 7 ZHANG , Y.; MA, N.; YI, H.; LI, S.; WANG, H. - Effect of Fe on grain refinement of commercial purity aluminum, Materials and Design 27 (2006) 794–798;
- 8 GARCIA, A. – Solidificação: Fundamentos e Aplicações. Editora da UNICAMP, Campinas, Brasil, 2001.
- 9 NBR 6810 - Fios e cabos elétricos tração à ruptura em componentes metálicos. – Especificação. São Paulo, 1981
- 10 NBR 6814/1985 – Ensaio de resistência elétrica. Especificação. São Paulo, 1985.
- 11 NBR 6815/1981 – Fios e Cabos elétricos – Ensaio de determinação da resistividade em componentes metálicos – método do ensaio.