

OBTENÇÃO DE ESTRUTURA REOFUNDIDA DA LIGA Al-4,5wt%Cu: COMPARAÇÃO ENTRE ULTRA-REFINO E AGITAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Paes, Marcelo¹

Zoqui, Eugênio José²

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica,
Departamento de Engenharia da Fabricação, Laboratório de Tixoconformação
Cx. P. 6122, CEP: 13083-970, Campinas, SP, Brasil

Resumo. *O presente trabalho busca analisar os mecanismos envolvidos na formação da estrutura reofundida (globular), para a liga Al-4,5wt%Cu, produzida por agitação eletromagnética do líquido em solidificação a partir de quatro condições básicas: temperaturas de vazamento de 750 e 800°C, com e sem a utilização de refinador de grão. O objetivo é estabelecer uma comparação direta entre dois métodos de obtenção de pastas reofundidas, bem como verificar a possibilidade de utilização destes métodos em conjunto, a saber a agitação eletro-magnética e o ultra-refino. O experimento contou com um aparato constituído de uma lingoteira metálica envolta por uma seqüência de bobinas de indução e uma fonte de potência que gerou um campo eletromagnético com potência estimada em 26Watts, suficiente para uma quantidade fixa de 1kg de metal em solidificação. Os lingotes obtidos foram caracterizados macro e micrograficamente através de microscopia ótica para se estabelecer o tamanho de glóbulo gerado e o fator de forma para as estruturas globulares (para se levantar a eficiência da globularização). O objetivo é estabelecer uma relação entre a agitação eletro-magnética e o ultra-refino para se obter a estrutura com a maior globularização possível, levantando-se qual o fator de maior influência: o refinador de grão ou o campo eletromagnético induzido.*

Palavras-chave: Reofundição, Ligas de Alumínio, Agitação Eletromagnética.

1. INTRODUÇÃO

A reofundição é uma tecnologia emergente que se aplica à obtenção de componentes a partir da conformação de ligas no estado semi-sólido. São inúmeras as vantagens apresentadas pelo método: menor consumo de energia; ampla variedade de ligas e formas geométricas; excelentes propriedades mecânicas; aumento da vida útil de matrizes; excelente acabamento superficial e alta qualidade dimensional, entre outros (Flemings, 1991).

¹ Mestrando: marpaes@fem.unicamp.br

² Prof. Colaborador: zoqui@fem.unicamp.br

A conformação de peças no estado reofundido, ou semi-sólido é possível devido à morfologia desta estrutura: uma fase primária globular, envolta pela fase secundária. Quando aquecida a temperatura intermediária entre a *temperatura solidus e liquidus*, a fase secundária se liquefaz agindo como um lubrificante quando da conformação do material. Esta modificação de morfologia da fase primária pode ser conseguida de diversas maneiras, entre elas a agitação do material em solidificação (Flemings, 1976, Vivés, 1992).

Esta agitação pode se dar de várias maneiras, dentre as quais podemos destacar a agitação mecânica e a agitação eletromagnética, sendo a primeira muito limitada devido ao contato entre o rotor e metal líquido que pode provocar contaminação da liga. Já a agitação eletromagnética é mais utilizada, devido a possibilidade de produção contínua de lingotes e a não existência de contato entre o agitador e o banho. Além disso, este tipo de agitação tem uma relação consumo de energia por lingote produzido, muito baixa. O que justifica sua aplicação extensiva (Vivés, 1993, Lim, 1997).

Quanto a microestrutura final, a agitação eletromagnética apresenta uma pequena desvantagem em relação à mecânica, uma vez que existe uma limitação da profundidade do campo magnético que restringe o tamanho do lingote produzido, apresentando no interior de lingotes acima de 80mm de diâmetro o que se chama de estrutura pré-reofundida formada por dendritas quebradas. Já a mecânica, apresenta a estrutura um pouco mais globular devido a eficiência da agitação (Hirt, 1996).

No entanto, um bom controle dos parâmetros que formam o campo magnético como potência induzida, tipo de indutor, uso de campo elétrico alternado e controle da massa agitada podem melhorar a microestrutura final. Pode ainda controlar o tempo de agitação e adicionar inoculantes e refinadores de grão (Vivés, 1993).

Zillgen e Hirt (1996), analisaram a influência do uso de refinador de grão Al-Ti-B juntamente com a agitação eletromagnética sobre a microestrutura e observaram que ação conjunta destes dois métodos gera homogeneização e refino muito intenso na estrutura da liga. Desta forma, é possível efetuar alterações microestruturais na liga, a fim de que se obtenha a mais globular possível sem necessidade de tratamentos térmicos posteriores, que encarecem e limitam o processo.

O objetivo deste trabalho é reproduzir os experimentos de Vivés (1992) e Hirt (1996) em um sistema de agitação eletromagnética simplificado e capaz de produzir lingotes de até 1Kg. Este sistema é a gênese de um sistema de lingotamento semi-contínuo para a produção de lingotes com até 1 metro de comprimento. Além deste objetivo, procurar-se-á estabelecer se a formação da estrutura reofundida se dá preferencialmente devido ao ultra refino ou se é oriunda da agitação eletromagnética.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o presente caso foi utilizada a liga AA 2024 (Al-4,5wt%Cu-0,20wt%Si-0,30wt%Fe-0,15wt%Mg). Os testes foram realizados no equipamento esquematizado na Figura 1, que consiste em um motor estator com controle de potência induzida e de inversão de campo, acoplado de uma lingoteira de aço inoxidável austenítico 304 com 42 mm de diâmetro e 500mm de comprimento, na qual o metal líquido foi vazado e em seguida agitado, com reversões no sentido do campo por períodos pré-determinados.

A massa do lingote foi mantida em 900g. Os teste foram realizados em duas temperaturas de vazamento: 750 e 800°C, com e sem a adição de refinador de grão (0,2% de titânio, ou seja, 4g da liga Al-5wt%Ti-1,0wt%B).

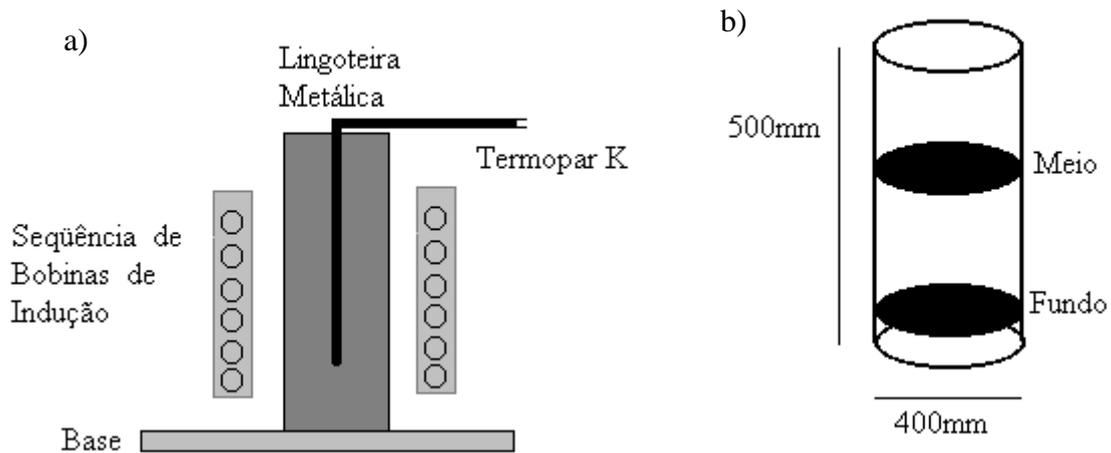


Figura 1 – a) Esquema Geral do Aparato de Agitação Eletromagnética e b) Amostra Obtida.

Primeiramente, a liga AA 2024 foi fundida em forno-poço, medida a temperatura, vazada na lingoteira e iniciada a agitação com reversão de potência (ciclos de 2s e corrente de 7A), até a completa solidificação. Nos testes que utilizaram refinador de grão, este foi adicionado ao metal líquido antes do vazamento e rapidamente dissolvido.

Em todas as condições testadas, utilizou-se um termopar fixo dentro da lingoteira, a fim de medir a temperatura da liga desde seu estado líquido até a solidificação total, montando-se assim a curva de resfriamento da liga nas condições analisadas. Para uma comparação da eficiência da agitação, as mesmas condições também foram utilizadas para as amostras fundidas convencionalmente, com e sem a presença de refinadores de grão na mesma proporção a fim de comparação com as estruturas reofundidas.

Foram retiradas amostras do fundo e do meio (indicadas na Figura 1) da lingoteira de todos os testes, a fim de caracterizar a macro e microestrutura. As amostras foram lixadas até granulometria de 600 e atacadas quimicamente (15ml HF, 4,5ml HNO₃, 9,0ml HCl, 271ml H₂O dest.), para realização de macrografias. Para as micrografias, as amostras foram lixadas até granulometria 1200 e polidas eletroliticamente com eletrólito II numa corrente de 1A por 40s.

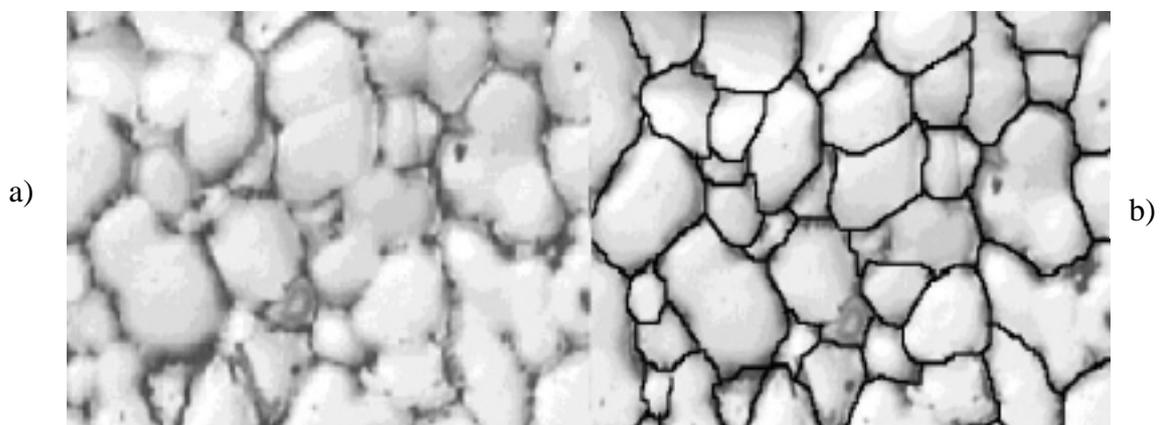


Figura 2 - Fotomicrografia da liga Al-4,5wt%Cu no estado reofundido mostrando: a) a amostra como vista ao microscópio ótico e b) a imagem depois da aquisição, filtragem e delimitação dos contornos de glóbulo.

As macro e micrografias foram captadas por um analisador de imagens acoplado ao microscópio ótico. As medidas de tamanho de glóbulo e fator de forma foram realizados pelo mesmo software, porém a escassez de fase secundária (CuAl_2) nos contornos, gerou muitos erros no momento dos cálculos. Para corrigi-los, as imagens foram primeiramente tratadas no software Paint Shop Pro, onde manualmente, os contornos foram delineados. O critério utilizado para este fechamento baseou-se em reforçar os contornos não revelados, devido a pouca quantidade de fase secundária presente na liga, mas que podiam ser observados no microscópio. Em seguida, a imagem tratada foi analisada pelo e corrigido os erros da medida de tamanho de glóbulo e fator de forma. A Figura 2 ilustra o método utilizado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o auxílio de termopares inseridos na lingoteira durante os vazamentos foram levantadas as curvas de resfriamento para todas as condições testadas. Os resultados não apresentam significativa variação entre as curvas de resfriamento da estrutura com ou sem agitação eletromagnética, podendo-se afirmar que as pequenas distinções existentes se deveram a fatores de inércia térmica dos dispositivos utilizados nos testes. Ou seja a agitação eletromagnética parece não afetar as temperaturas de transição de fase par a liga estudada.

Os lingotes refundidos obtidos foram caracterizados macro e microscopicamente. As macrografias referentes ao fundo da lingoteira, apresentam diferenças significativas quanto ao tamanho de grão obtido: as amostras obtidas com a maior temperatura de vazamento apresentam maior tamanho de grão. Isto é facilmente explicado pela existência de uma maior tempo para a nucleação e crescimento dos grãos. As amostras refundidas utilizando-se refinador de grão apresentaram um menor tamanho de grão, apresentando estruturas idênticas tanto a 750°C como a 800°C : Tem-se portanto que o efeito do refinador de grão é maior que o efeito da temperatura na formação dos grãos para esta liga nesta faixa de temperatura. Pode-se concluir pela observação da Figura 1 que as amostras refundidas com o auxílio de refinador de grão apresentam um menor tamanho que as amostras não refinadas.

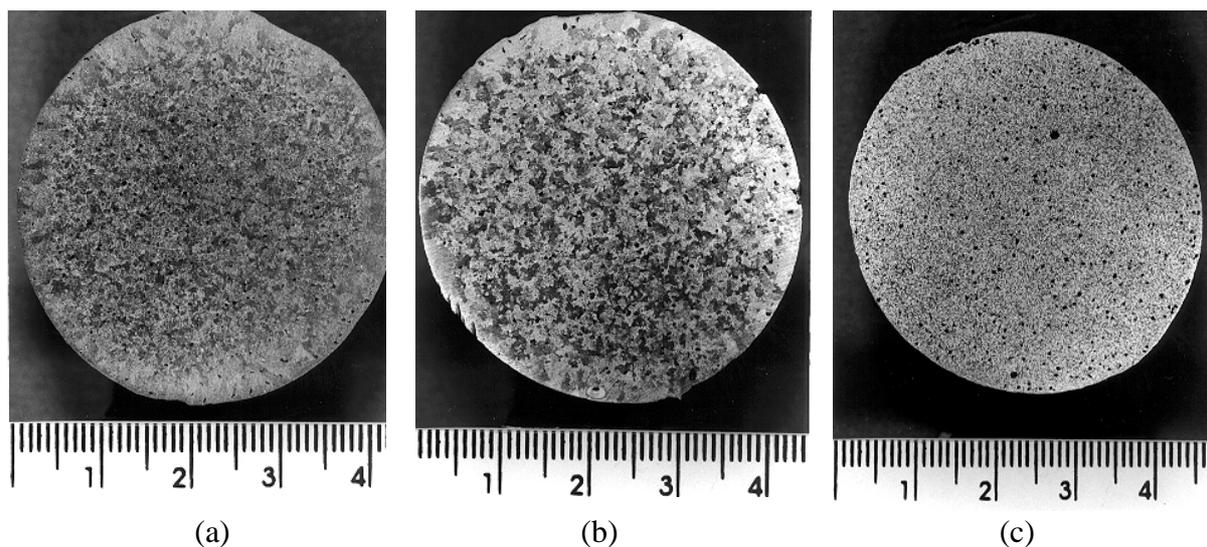


Figura 3. Macrografias obtidas para as amostras refundidas obtidas para o fundo da lingoteira para as condições: a) vazado a 750°C sem refinador; b) vazado a 800°C sem refinador; c) vazado a 750 ou 800°C com refinador (estruturas idênticas).

As micrografias obtidas permitiram a contagem do tamanho de grão/glóbulo e do fator de forma. A tabela 1 mostra esta contagem, para todas as amostras produzidas com agitação eletromagnética e também para a estrutura obtida convencionalmente (dendrítica). Observa-se que nas duas condições, a dispersão diminui a medida que se aumenta a temperatura de vazamento, devido, ao maior tempo de permanência do banho no estado líquido que favorece uma agitação mais eficaz e maior homogeneização da estrutura.

Tabela 1. Medidas de tamanho de glóbulo e fator de forma para a liga Al-4,5%Cu reofundida com agitação eletro-magnética em várias condições, e para a estrutura fundida convencional.

	Temperatura De Vazamento (°C)	Uso de Refinador	Fundo		Meio	
			Tamanho de Glóbulo (µm)	Fator de Forma (µm)	Tamanho de Glóbulo (µm)	Fator de Forma (µm)
R ^a	750	Não	Não Glob*	Não Glob*	121,9 ± 65,0	1,74 ± 0,61
	800	Não	Não Glob*	Não Glob*	108,9 ± 49,4	1,75 ± 0,42
	750	Sim	121,7 ± 64,5	1,69 ± 0,56	96,5 ± 47,0	1,72 ± 0,52
	800	Sim	110,9 ± 46,5	1,73 ± 0,48	113,2 ± 38,3	1,77 ± 0,50
F ^b	750	Não	Não Glob*	Não Glob*	Não Glob*	Não Glob*
	800	Não	Não Glob*	Não Glob*	Não Glob*	Não Glob*
	750	Sim	128,9 ± 71,2	2,30 ± 2,47	118,5 ± 81,9	2,13 ± 1,68
	800	Sim	117,1 ± 65,7	2,16 ± 1,71	136,0 ± 76,2	2,08 ± 1,41

*) Não foi detectada globularização. Fator de forma maior que 10,00.

a) Reofundido obtido por agitação eletromagnética.

b) Fundido convencional.

Com relação as amostras obtidas sem agitação eletromagnética, ou seja, fundidas convencionalmente, pode-se notar que a ausência de refinador impede a formação da estrutura reofundida, como pode ser visto na Figura 4. Porém a utilização de refinador de grão, sem a utilização de agitação eletromagnética já é suficiente para que ocorra uma pequena globularização ainda que imperfeita. A amostra fundida observada na Figura 4 demonstra este efeito claramente, pois pode-se comparar as estruturas com as medidas para o tamanho de glóbulo e fator de forma para estas estruturas. Para a estrutura sem refinador não foi possível medir nem o fator de forma nem o tamanho de glóbulo uma vez que este não ocorreu, porém o tamanho de glóbulo gerado para a estrutura com refinador apesar de equivalente (em torno de 120µm) apresenta uma maior heterogeneidade traduzida pelo desvio padrão observado (70 contra 50µm). Este fato é mais marcante quando comparamos seu fator de forma, que passa de 1,7 para 2,3 com o respectivo desvio padrão passa de 0,5 para 2. Isto indica uma forte heterogeneidade da estrutura.

Na Figura 5 é possível ver a mesma estrutura tratada anteriormente, ou seja, fundida com e sem refinador de grão, retirada do meio do lingote obtido. Pode-se notar que para a estrutura sem a presença de refinador de grão a globularização não ocorreu, e que quando da utilização do refinador esta globularização é efetiva, porém, novamente, apesar de o glóbulo apresentar um tamanho médio similar à estrutura reofundida, a heterogeneidades da estrutura é pronunciada, como pode ser observado através da comparação do desvio padrão apresentado. O mesmo ocorre com relação ao fator de forma.

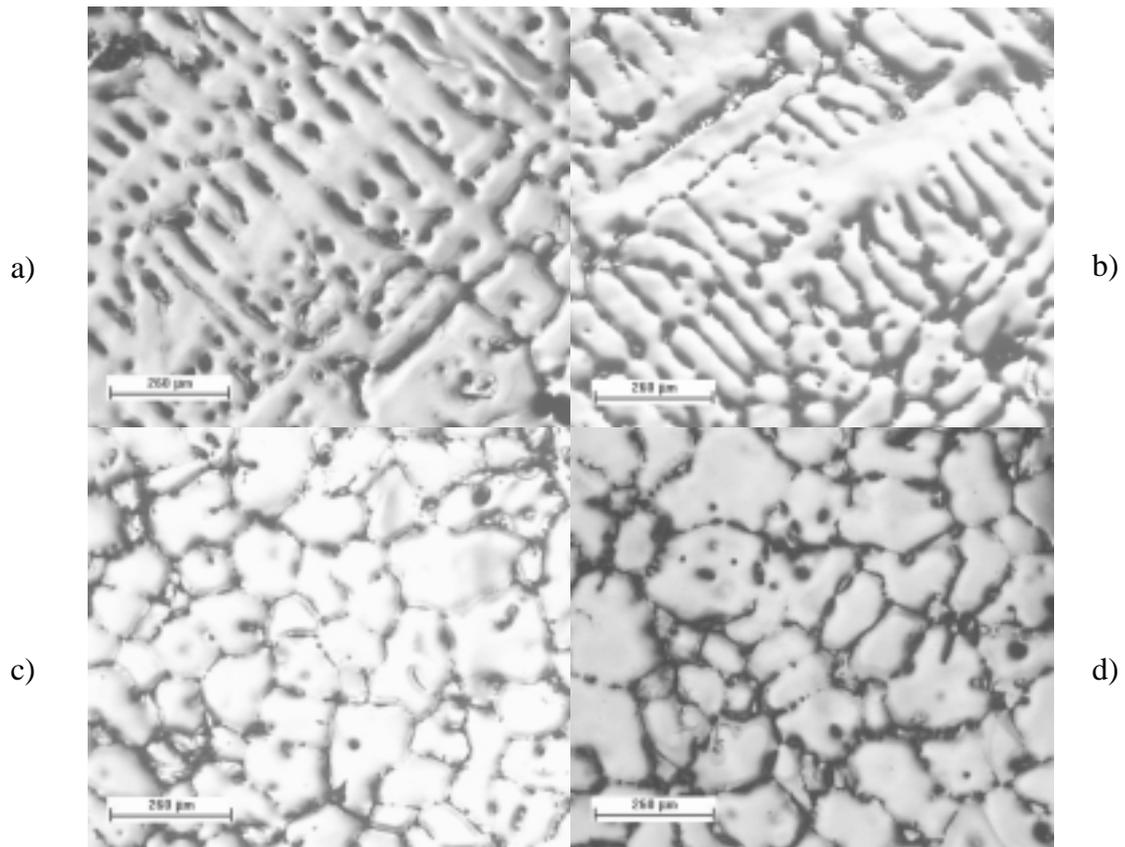


Figura 4) Micrografias das amostras fundidas (Fundo da lingoteira) nas condições: a) 750°C sem refinador; b) 800°C sem refinador; c) 750°C com refinador e d) 800°C com refinador.

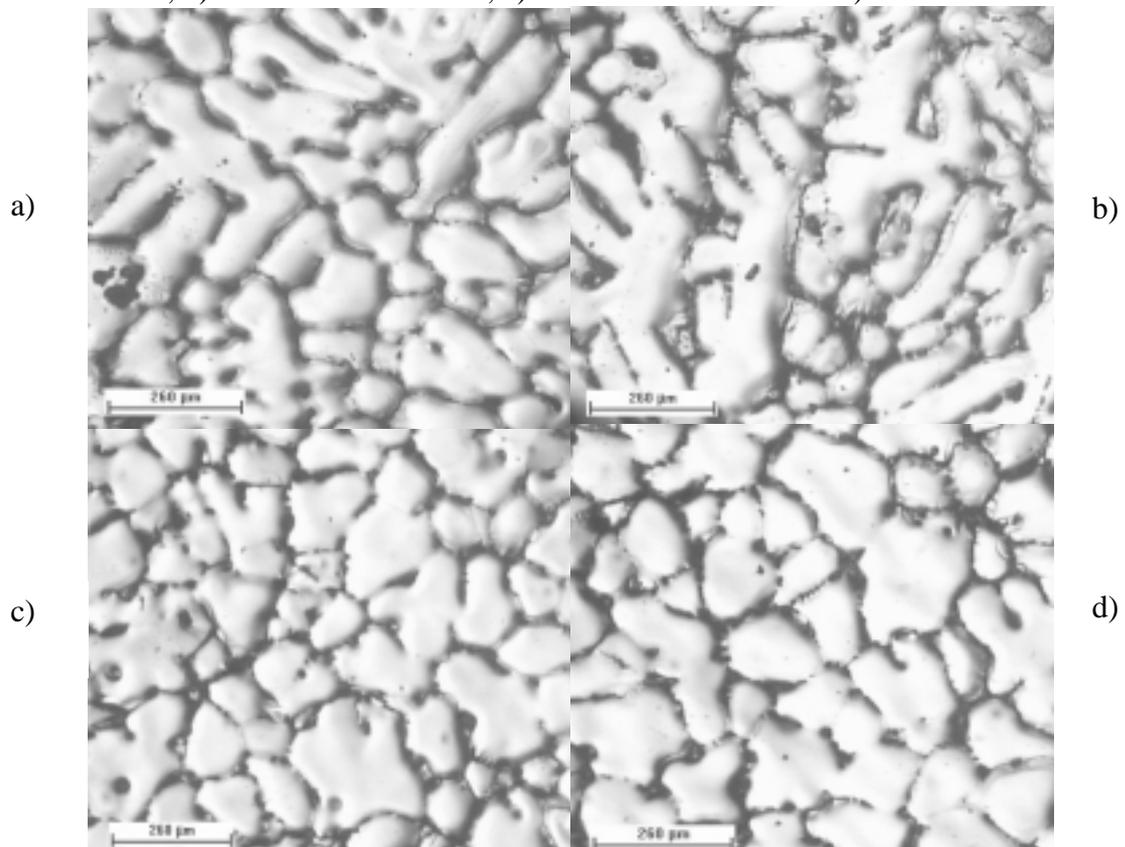


Figura 5) Micrografias das amostras fundidas (Meio da lingoteira) nas condições: a) 750°C sem refinador; b) 800°C sem refinador; c) 750°C com refinador e d) 800°C com refinador.

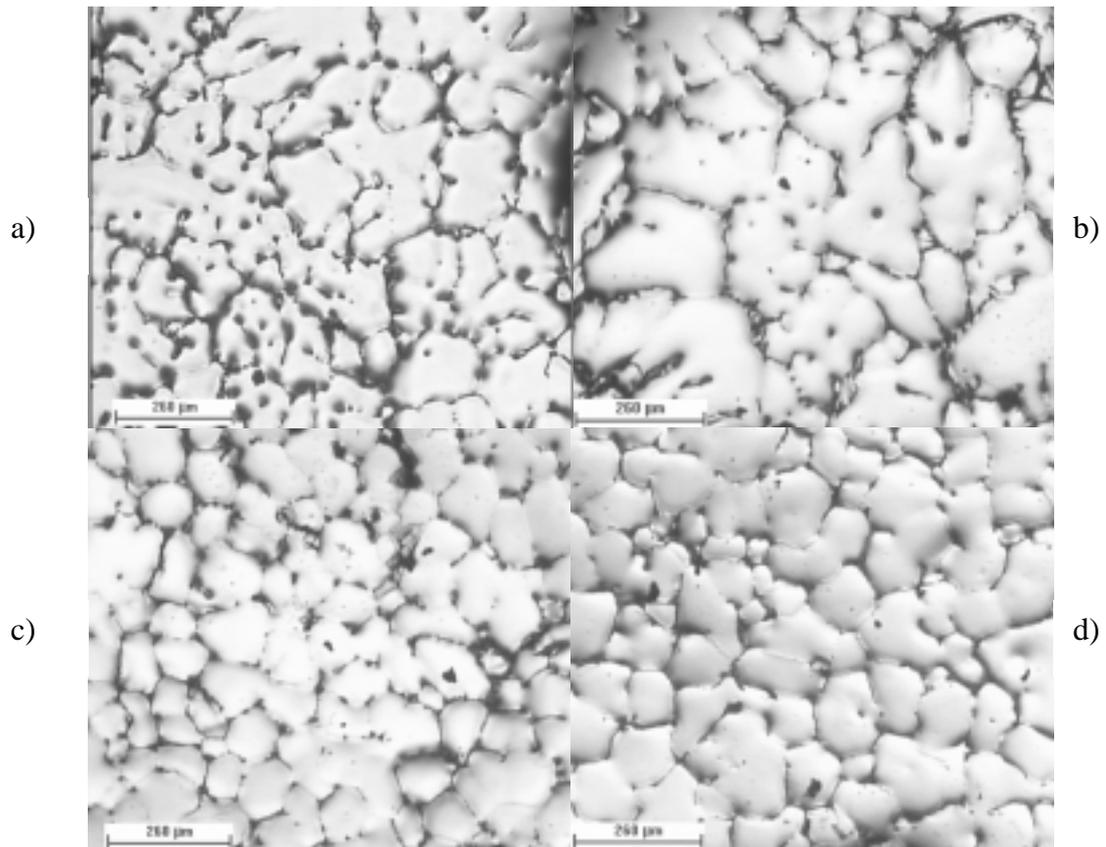


Figura 6) Micrografia das amostras refundidas (Fundo da lingoteira) nas condições: a) 750°C sem refinador; b) 800°C sem refinador; c) 750°C com refinador e d) 800°C com refinador.

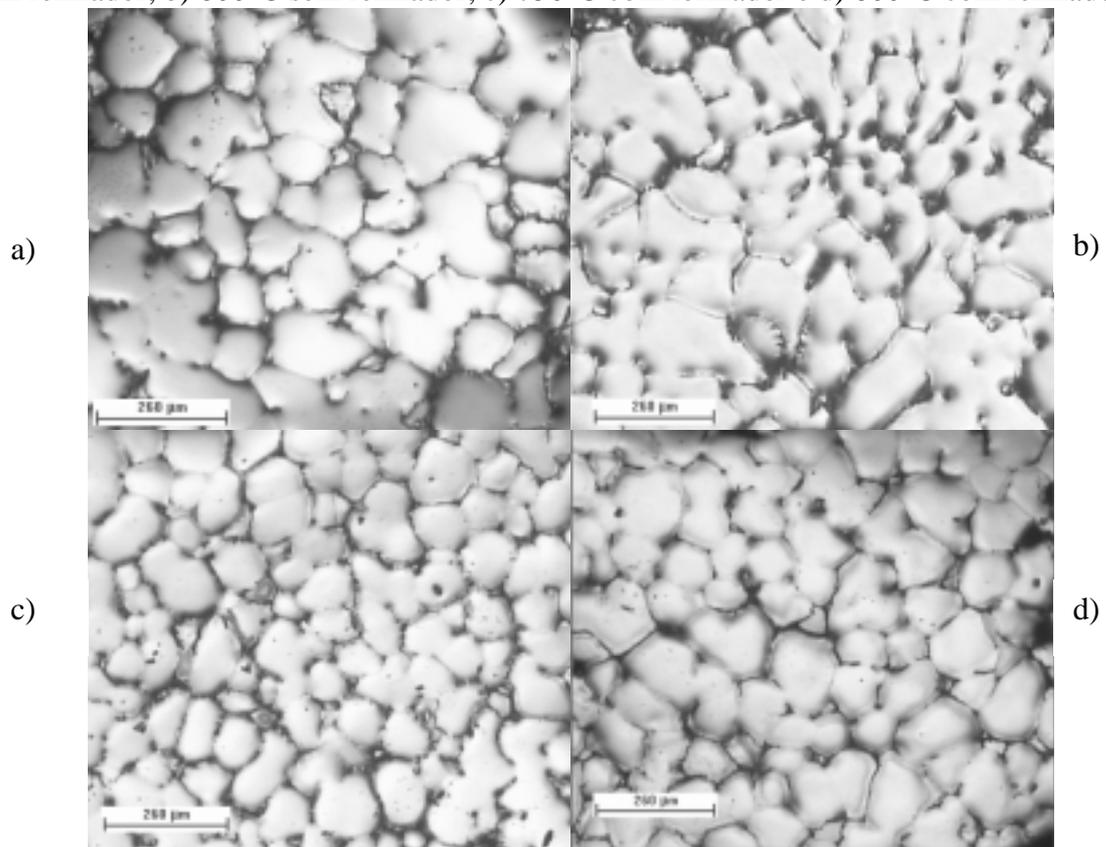


Figura 7) Micrografia das amostras refundidas (Meio da lingoteira) nas condições: a) 750°C sem refinador; b) 800°C sem refinador; c) 750°C com refinador e d) 800°C com refinador.

Analisando-se as fotomicrografias das amostras refundidas (Figuras 6 e 7) em conjunto com os dados da Tabela 1, pode-se observar que mesmo para a região aonde o resfriamento é rápido, ou seja, o fundo da lingoteira, houve tempo suficiente de agitação para promover a formação da estrutura refundida globular. Tem-se também que a estrutura originada além de mais homogênea, (tamanho de glóbulo variando de 96 a 121 μm) apresenta uma menor dispersão de dados (desvio padrão entre 38 e 65 μm). Apresenta ainda fator de forma mais próximo do ideal (1 - referente ao círculo), com desvio padrão bastante inferior aos dados obtidos para a estrutura dendrítica globularizada com o uso do refinador de grão.

Da Tabela 1 em conjunto com as Figuras 6 e 7 ainda é possível ressaltar que não existe uma diferença significativa dos dados relativos à uma comparação entre a agitação eletromagnética com e sem o uso do refinador, ou seja, o uso do refinador é plenamente dispensável para a promoção da estrutura refundida. A combinação entre agitação eletromagnética e utilização de refinador encarece o produto final, tem-se portanto que pode-se conseguir uma total globularização com a utilização da agitação eletromagnética apenas.

Em relação ao tamanho de glóbulo obtido, observa-se que na condição sem refinador de grão, existe uma diminuição em seu valor médio de tamanho de grão e fator de forma: este efeito pode ser justificado pela maior eficácia da agitação, devido ao maior tempo de agitação observado. Este fato não ocorre na condição com refinador de grão que apresenta um pequeno aumento nestes valores, embora a dispersão diminua: este comportamento pode ser explicado, pela inexistência de um sistema de refrigeração e controle de temperatura, que ocasionou uma perturbação no comportamento de crescimento do glóbulo, ou seja, a temperatura se manteve num valor suficientemente alto para gerar fenômenos de engrossamento.

Numa outra situação, pode-se comparar os tamanhos médios de glóbulos entre as amostras com e sem refinador de grão. Observa-se que com o aumento da temperatura de vazamento, as amostras de fundo tendem a apresentar uma queda no tamanho médio de glóbulo, isto se deve ao fato de que existe uma faixa ótima de trabalho para o refinador: 750 - 790°C fornecido pelo fabricante FOSECO na qual acima ou abaixo dela, não se observa uma ação significativa do refino.

Uma outra questão, é a respeito do alto valor de dispersão encontrado em todos os casos, que é justificado pelo tipo de resfriamento empregado: ao ar. Este fato, gerou uma grande heterogeneidade na microestrutura, que pode ser reduzida controlando-se estas condições.

4. CONCLUSÕES

Em todos os casos de agitação eletro-magnética observou-se a formação de estruturas refundidas, sendo que os experimentos realizados com refinadores de grão, geraram microestruturas mais homogêneas e com menor tamanho de glóbulos, porém esta diferença é pouco significativa levando-se em conta os custos da etapa extra de refino.

A utilização de refinadores de grão propicia, por si só a formação da estrutura refundida, porém, a estrutura originada desta maneira possui tamanho de glóbulo e fator de forma com grande heterogeneidade, o que, por sua vez comprometerá os processos de tixo-conformação posteriores.

As amostras de fundo da lingoteira, nos experimentos sem refinadores de grão, não foram totalmente globularizadas, devido ao fato de a posição do sistema de indução eletro-magnética estar postado no meio do lingote.

Este experimento simples permitiu inovar na obtenção de estruturas refundidas, pois mostrou que a agitação eletro-magnética é mais eficiente que o ultra-refino. Tem-se portanto que experimentos de controle de potência e controle do sistema de agitação através de toda a massa metálica podem ser uma solução barata na obtenção de estruturas refundidas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e a Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas.

BIBLIOGRAFIA

- Flemings, M.C., Riek, R.G., Young, K.P., Rheocasting, *Material Science and Engineering*, 25 1976.
- Flemings, M.C., Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State, *Metallurgical Transactions*, 22 A, maio 1991.
- Hirt, G., Zillgen, M. Microstructural effects of eletromagnetic stirring in continuous casting of various aluminium alloys, *Proceeding of the 4th International Conference on Semisolid Processing of alloys and Componentes*, Sheffield, junho 1996.
- Lim, S. and Yoon, E., The Effect of Electro-Magnetic Stirring on the Microstructure of Al-7,0wt%Si Alloy, *Journal of Materials Science Letters*, v. 16, 1997.
- Vivés, C., Elaboration of Semisolid Alloys by Means of New Eletromagnetic Rheocasting Processes, *Metallurgical Transactions*, 23B, abril 1992.
- Vivés, C., Elaboration of Metal Matrix Composites from Thixotropic Slurries using a New Magneto-hydrodynamic Caster, *Metallurgical Transactions*, 24B, junho 1993.

OBTENTION RHEOCAST STRUCTURE FOR Al-4,5wt%Cu ALLOY: COMPARISON ULTRA - REFINING AND ELECTRO - MAGNETIC STIRRING

Abstract: *The present work analyses the mechanisms involved in the formation of the rheocast structure (globular) for the Al-4,5wt%Cu alloy, produced by electro-magnetic stirring (EMS) of the liquid during solidification, under the following basic conditions: pouring temperatures of 750 and 800°C with and without addition of a grain refiner. The objective is to directly compare between the electro - magnetic stirring and ultra - refining as methods of obtaining rheocast materials, as well as to verify the possibility of using these methods together. The experimental apparatus was made of a wrapped metallic ingot mould surrounded by a sequence of induction coils and a power source that generated na estimated power of electromagnetic field with 26Watts, which was enough for a fixed amount of 1kg of moulding metal). The macro and microstructures ingots obtained had the characterised by optical microscopy to measure the globular size and the roundness of the globular structures (to verify the efficiency of the globularization). The principal objective is to compare electro-magnetic stirring and ultra-refining to determine the better structure (level of globularization), determining the factor of larger influence: the grain refiner or the electro-magnetic induced field.*

Key-Words: Rheocasting, Aluminium-Copper Alloys, Electro-Magnetic Stirring, Ultra-Refining.