



PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE LINGOTAMENTO SEMI-CONTÍNUO PARA PRODUÇÃO DE MATERIAIS REOFUNDIDOS

José Ednil G. dos Santos¹, Marcelo Paes², Eugênio J. Zoqui³

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Fabricação

(1) edsantos@fem.unicamp.br, (2) marpaes@fem.unicamp.br, (3) zoqui@fem.unicamp.br

Campinas, SP, Brasil

Resumo. *O presente trabalho relata o projeto e construção de um equipamento simples, de baixo custo e fácil operação, capaz de produzir pastas metálicas reofundidas através do uso de agitação eletromagnética durante o processo de solidificação em uma operação de lingotamento semi-contínuo. O objetivo principal é analisar a possibilidade de se obter matéria prima com estruturas globulares, apropriadas para processamento posterior no estado semi-sólido (tixoconformação), de ligas de baixo e médio ponto de fusão. Basicamente o equipamento é constituído de um sistema de lingotamento semi-contínuo vertical, um sistema de indução eletromagnética e um sistema de controle e aquisição de dados, que permite o controle computadorizado do equipamento. Utilizando a liga Al-4,8wt%Cu, foram produzidos lingotes com e sem agitação do metal (iniciada já com 20% de sólido formado) utilizando velocidades de lingotamento de 1 cm/s e 3 cm/s. Foram produzidos lingotes com altura de 450 mm e diâmetro médio de 45 mm apresentando a estrutura dos cristais da fase primária com morfologia globular, com diâmetro médio de até $139 \pm 38 \mu\text{m}$, na melhor condição. O fator de forma variou de 1,8 a 2,4. Os lingotes apresentam estrutura típica da reofundição e poderão ser utilizados como matéria prima em processos de tixoconformação.*

Palavras-chave: *Pastas Reofundidas, Tixoconformação, Agitação Eletromagnética, Reofundição.*

1. INTRODUÇÃO

Posteriormente à descoberta da reofundição por Spencer *et al.* (1972) os primeiros equipamentos utilizados no estudo e produção de lingotes reofundidos envolvia a agitação mecânica do metal durante a solidificação (Vogel, 1978). A finalidade da agitação é interromper o crescimento dendrítico da liga metálica, obtendo-se microestrutura refinada com a fase primária em formato de rosetas e dendritas fragmentadas que aquecidas posteriormente atingem facilmente a forma globular (Garant *et al.* (1998). Atualmente a obtenção de lingotes reofundidos utilizando a técnica da agitação eletromagnética do metal tem se estabelecido como aquela que apresenta maiores vantagens comerciais em relação às demais (Vivés, 1992). Nos últimos anos tem-se observado uma crescente evolução na aplicação da tecnologia de processamento do metal no estado semi sólido (tixoconformação)

para a produção de componentes mecânicos, principalmente na indústria automobilística Nicholas *et al.* (1998) e Idegomori *et al.* (1998). No Brasil esta tecnologia tem sido implantada em pequena escala, há escassez de equipamentos ou processos para fabricação da matéria prima reofundida, mesmo para estudos de laboratório. Visando atender esta demanda, este trabalho propõe o projeto e a construção de um sistema de lingotamento semi-contínuo para produção de materiais reofundidos com ligas de baixo e médio ponto de fusão utilizando o processo de agitação eletromagnética.

2. PROJETO E CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO

O projeto do equipamento pode ser dividido basicamente em quatro partes distintas: um sistema de lingotamento semi-contínuo vertical, um forno de espera para manutenção do metal na temperatura de início do lingotamento, um sistema de indução eletromagnética capaz de prover potência de até 2000 watts para agitação do metal durante a solidificação e um sistema de jatos de água para o resfriamento direto do produto obtido. Na Fig. 1 é mostrado um esquema geral do equipamento projetado (a) e suas dimensões básicas envolvidas (b) . Um sistema de controle e aquisição de dados também foi construído para monitoramento dos parâmetros de controle do processo.

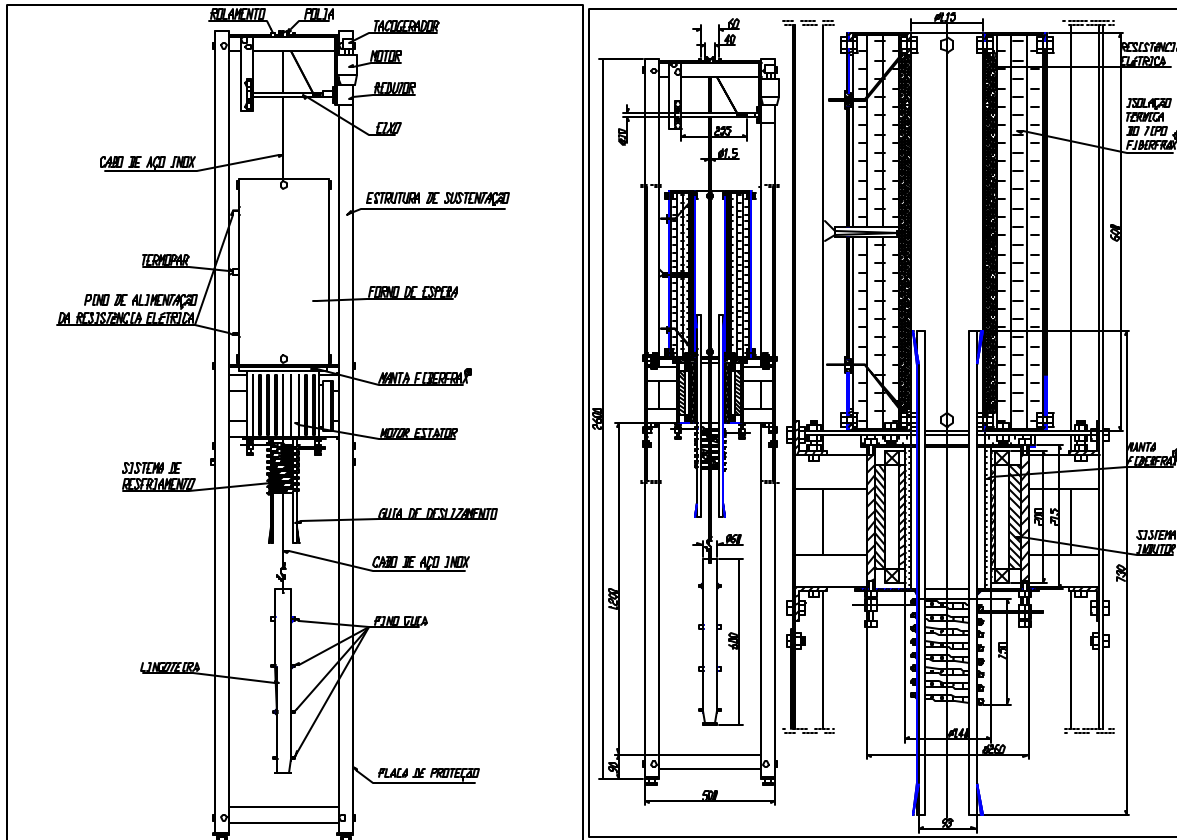
2.1 Sistema de lingotamento semi-contínuo

Este sistema compõe-se de uma lingoteira, duas guias para a lingoteira, e do conjunto posicionador da lingoteira.

Lingoteira. A lingoteira é confeccionada com chapa de 1,5 mm de material não-magnético (para não influir na direção do campo magnético) e resistente a altas temperaturas. É um tubo cônico ($0,7^\circ$) com o diâmetro superior de 60 mm e o inferior com 45 mm, tem altura de 600 mm, uma alça para sustentação e um fundo falso travado com três pinos. Ao longo da lingoteira, no diâmetro externo, são soldados quatro pares de pinos-guias alinhados e distribuídos ao longo do comprimento que servem para o posicionamento dentro do forno de espera e evitar a rotação da lingoteira por ação do campo magnético.

Guias da lingoteira. É um sistema bastante simples, construído com barras de perfil estrutural em U de aço baixo carbono. As pontas das guias são fabricadas de tal forma a facilitar o perfeito encaixe inicial dos pinos da lingoteira no início do movimento na subida e no lingotamento (na descida). Estas guias ainda tem por finalidade evitar a rotação da lingoteira, além de posicioná-la no centro do campo magnético. Na Fig. 1(b) nota-se o posicionamento deste sistema no conjunto montado.

Conjunto posicionador da lingoteira. Este conjunto está montado na parte superior da estrutura de sustentação do equipamento. É ele que faz a movimentação da lingoteira para o posicionamento desta dentro do forno de espera e em seguida controla o movimento de descida da mesma com a velocidade requerida para o lingotamento. O conjunto é formado por um motor de corrente contínua com torque de 3,5 Nm acoplado a um redutor, um cabo de aço inoxidável, um eixo acoplado á saída do redutor e uma roldana em V girando livre em um eixo fixado na parte central e superior da estrutura. Na Fig. 1(a) é possível visualizar o funcionamento do conjunto.



(a)

(b)

Figura 1- Esquema geral do equipamento projetado. a) desenho esquemático do equipamento e b) desenho esquemático com as dimensões básicas envolvidas.

2.2 Forno de espera

O forno de espera atinge potência mínima de 7200 watts e foi projetado para abrigar e manter o aquecimento homogêneo da lingoteira contendo o metal fundido (para ligas de até 1000 °C) até o momento antecedente ao início do lingotamento. É um forno circular, constituído de um tubo vazado de aço inox 316 com parede de 3 mm de espessura e nele é enrolado a resistência elétrica, revestido com uma camada de manta para isolamento térmico e fechado com chapa de aço carbono.

2.3 Sistema de agitação eletromagnética

O sistema de agitação eletromagnética nada mais é do que o conjunto indutor (motor estator) constituído de bobinas elétricas dispostas circularmente na vertical capaz de prover potência de agitação de até 2000 watts. Estas bobinas, quando energizadas, produzem correntes metalostáticas convectivas cuja direção e fluxo é controlada pela interação com o campo magnético produzido. No presente trabalho, a lingoteira, com o metal líquido numa temperatura intermediária à temperatura líquida e sólida, estará de passagem pelo motor estator, no lugar do induzido, e então correntes elétricas serão induzidas no metal líquido e estas, interagindo com o campo magnético, deverão produzir a força necessária para a agitação de mesmo.

2.4 Sistema de resfriamento

O sistema de resfriamento é posicionado logo abaixo do sistema de agitação e se constitui de uma serpentina em espiral, construída de cobre de 5 mm de diâmetro interno. Jatos de água produzidos em pequenos furos feitos ao longo da extensão do tubo resfriam a lingoteira com o metal em solidificação imediatamente após passar pelo sistema de agitação.

2.5 Instrumentação

Na Fig. 2 é mostrado um diagrama em blocos demonstrando os circuitos elétricos e eletrônicos montados para o completo monitoramento dos parâmetros envolvidos a cada operação de lingotamento no equipamento projetado. O sistema de aquisição e controle de dados é formado pela confluência de uma placa multiplexadora analógica com 16 canais, uma placa de aquisição e controle de dados e um microcomputador. A adoção deste sistema permite que o computador, com uma mesma placa de aquisição, possa trabalhar com diferentes tipos de entrada e saída de dados, tais como a análise da voltagem e da amperagem do sistema de indução, dados de temperatura, dados de carga estática ou dinâmica, entre outros, assim como os dados de controle do sistema de potência.

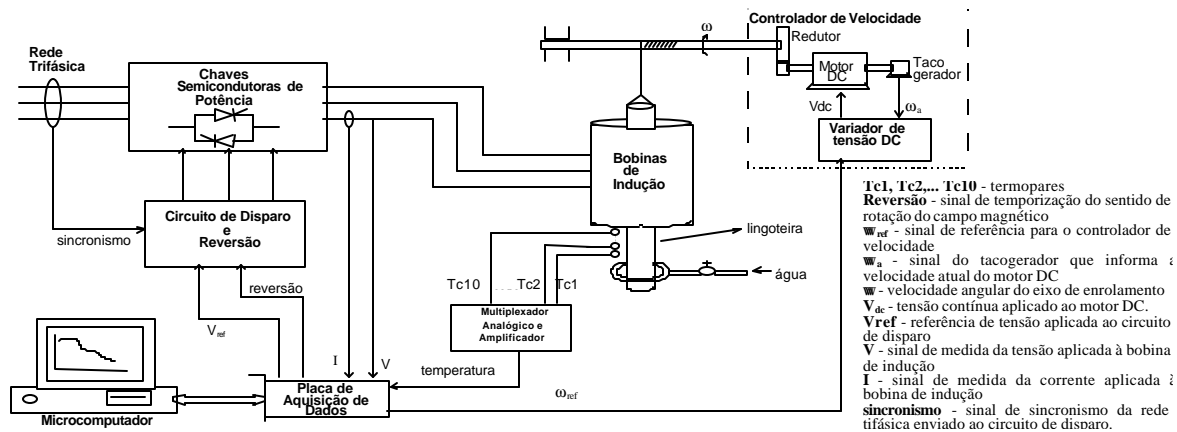


Figura 2- Diagrama em blocos dos circuitos elétricos e eletrônicos do equipamento.

3. OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Inicialmente uma massa da liga é fundida em um forno poço auxiliar. A lingoteira sofre um pré-aquecimento neste mesmo forno que irá evitar a solidificação prévia da liga na parede interna da lingoteira. Procedese o vazamento do metal líquido a partir do forno auxiliar para o interior da lingoteira, esta é içada para dentro do forno de espera através do conjunto posicionador. Os termopares de controle da temperatura são imersos dentro do banho, o sistema de resfriamento é acionado e imediatamente após é iniciado o lingotamento. A sequência do lingotamento é controlada automaticamente pelo computador após o botão iniciar ser manualmente ativado. No computador já estará programado a velocidade do lingotamento, a potência e modo de agitação e a frequência de aquisição dos dados de entrada da temperatura dos termopares.

4. EXPERIMENTAÇÃO

Inicialmente os experimentos no equipamento foram realizados utilizando-se de 2,5 kg da liga porque é previsto a formação de um vórtice decorrente da agitação. O principal objetivo

nos primeiros testes de simulação do lingotamento contínuo foi determinar os parâmetros ótimos de temperatura de início do lingotamento, modo de agitação e velocidade de lingotamento, que irão prover a melhor estrutura interna do fundido, ou seja, produzir a estrutura reofundida. Para efeito comparativo é obtido a estrutura convencional dendrítica (sem agitação) da liga, possibilitando uma análise do grau de globularização da pasta obtida (com agitação) no equipamento.

A liga metálica escolhida para testar a eficiência do equipamento na obtenção de estruturas reofundidas foi a liga AA2011 (Al-4,8%wtCu), o lingotamento é iniciado quando o banho se encontra com aproximadamente 20% da fração sólida já formada. Os parâmetros controlados nos experimentos foi a velocidade de lingotamento (1 cm/s e 3 cm/s), a potência de agitação (1200 watts) e o modo de agitação com inversão cíclica do movimento rotacional da liga metálica (a cada 5 s). Os lingotes obtidos tem altura máxima de 450 mm. As amostras para a análise metalográfica foram retiradas no topo (descartando o vórtice), no meio e no fundo do lingote. Na análise macrográfica observou-se quanto ao tamanho e distribuição da granulação ao longo da secção transversal do lingote. Na análise micrográfica utilizou-se de um analisador de imagens para medir: o espaçamento interdendrítico secundário para as amostras obtidas dos lingotes sem agitação e, a fração de segunda fase, o diâmetro médio e o fator de forma dos cristais da fase sólida primária para as amostras obtidas dos lingotes com agitação..

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Fig. 3 é demonstrado esquematicamente onde foram posicionados os termopares responsáveis pela leitura da temperatura do metal durante o processo de lingotamento com agitação eletromagnética. São termopares de liga Cromel-Alumel encapsulados em bainha de aço inóx, diâmetro de 3mm e erro de leitura de 0,5%. São pintados com tinta refratária, mergulhados no banho e fixados na parte superior do forno. Nota-se que é feita a aquisição da temperatura do metal no momento da entrada, no meio e na saída do sistema de agitação.

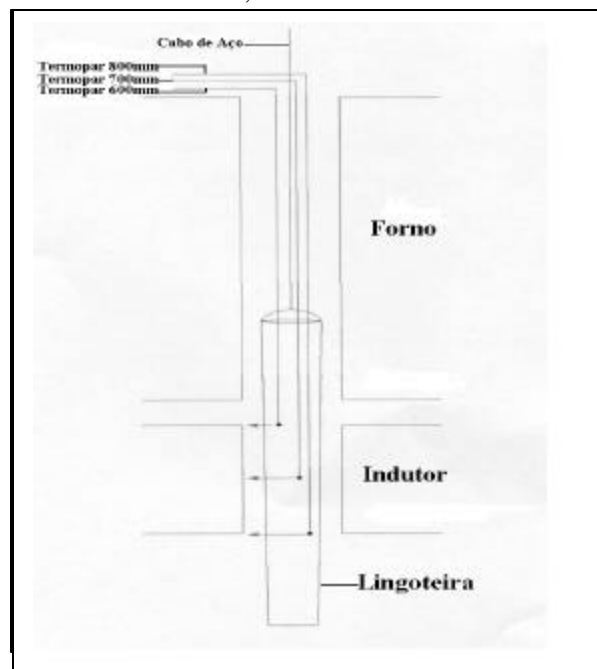


Figura 3- Esquema ilustrativo indicando o posicionamento dos termopares no início do ensaio

Na Figura 4 é mostrado o gráfico com as curvas das temperaturas do lingote, obtidas a partir dos três termopares imersos no banho durante o processamento do lingotamento contínuo com velocidade de 1 cm/s e com agitação eletromagnética. Nota-se que não há

variação significativa da temperatura da pasta ao longo do campo eletromagnético ou de agitação, ou seja, pode-se concluir que o procedimento da agitação ocorre de maneira praticamente isotérmica.

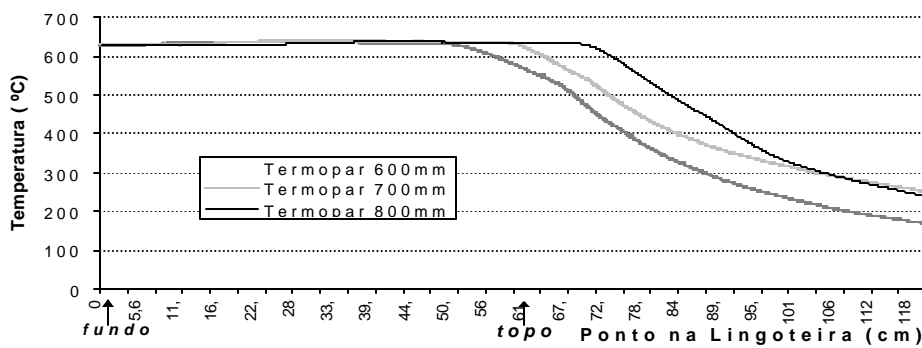


Figura 4- Variação da temperatura da pasta ao longo do lingote durante a agitação eletromagnética.

Na Figura 5 tem-se uma vista geral do equipamento projetado e construído. Na Fig. 5(a) nota-se: a1) o conjunto posicionador da lingoteira, a2) o forno de espera, a3) o computador, a4) o conjunto indutor, a5) o sistema de resfriamento, a6) as guias da lingoteira, a7) a lingoteira, a8) a estrutura de sustentação, a9) o painel de instrumentos, a10) os equipamentos auxiliares utilizados para fusão da liga e a11) as placas de proteção contra respingos. Na Fig. 5(b) tem-se uma vista mais aproximada dos principais componentes elétricos e mecânicos que formam o equipamento projetado e construído: o forno de espera, o sistema indutor, o sistema de resfriamento e as guias da lingoteira e na Fig. 5(c) tem-se uma vista mais aproximada dos principais componentes que formam o conjunto posicionador da lingoteira: c1) roldana em V, c2) motor com redutor, c3) eixo de enrolamento do cabo de aço e c4) cabo de aço.

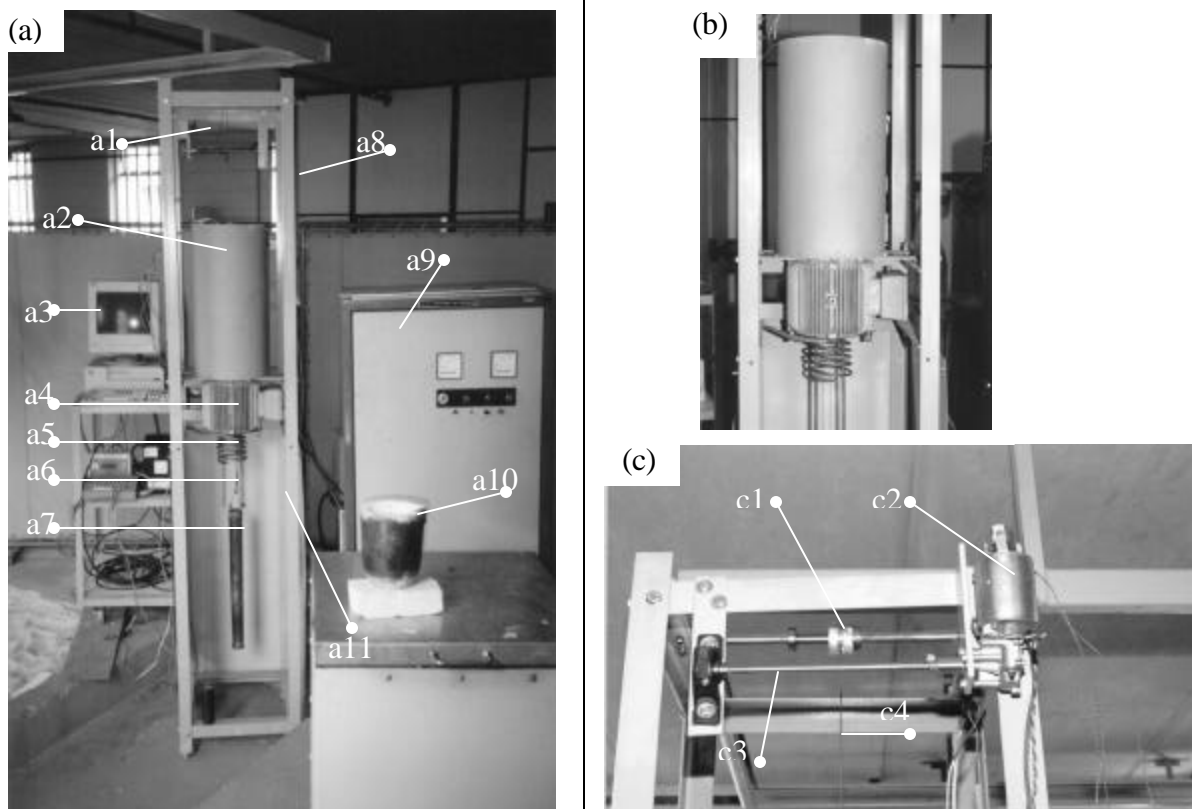


Figura 5- Vista geral do equipamento projetado e construído. a) vista geral; b) vista mais aproximada dos principais componentes elétricos e mecânicos e c) vista mais aproximada dos principais componentes que formam o conjunto posicionador da lingoteira.

Comparando a macroestrutura dos lingotes obtidos no equipamento construído, nas condições sem e com agitação eletromagnética e para velocidade de lingotamento de 1cm/s, nota-se que houve efetivo refinamento na granulação para o lingote obtido com agitação eletromagnética, conforme Fig. 6. É notado também um crescimento maior dos grãos na região periférica, mas no lingote sem agitação (fundição convencional) esta ocorrência é comum, já para o lingote com agitação isto ocorre talvez porque a intensidade da agitação não tenha sido efetiva nesta região.

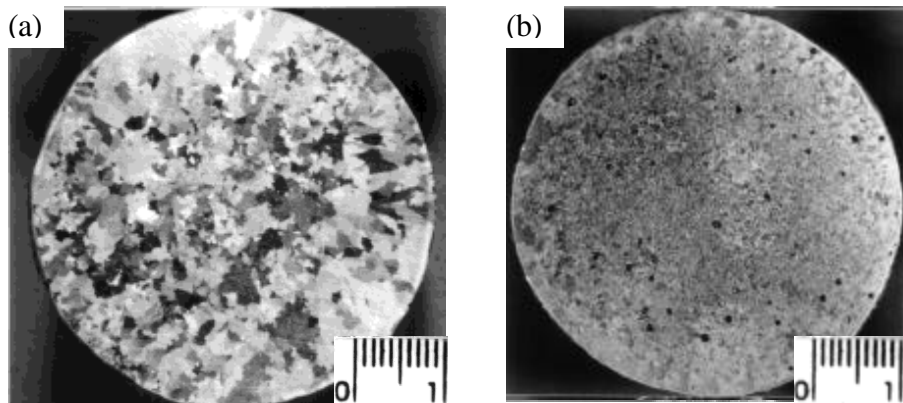


Figura 6- Macroestruturas dos lingotes obtidos com velocidade de lingotamento de 1 cm/s da liga Al-4,8% wtCu testada. a) sem agitação e b) com agitação eletromagnética.

A Figura 7 mostra a microestrutura das amostras retiradas no meio dos lingotes obtidos no equipamento construído, nas condições sem agitação e com agitação e velocidade de lingotamento de 1 cm/s. Nota-se que a microestrutura do lingote obtido com agitação eletromagnética é bem diferenciada daquele obtido sem agitação. Enquanto o lingote sem agitação apresenta microestrutura dendrítica, típica de fundidos em moldes metálicos, o lingote obtido com agitação eletromagnética apresenta microestrutura típica de refundidos obtidos nessa condição, ou seja, não mais dendrítica, apresenta dendritas fragmentadas com morfologia muito próxima da forma globular (semi-globular). Quando reaquecida acima da temperatura *solidus* da liga a fase sólida primária dessa microestrutura em pouco tempo irá adquirir a forma globular necessária nos processos de tixoconformação, conforme GARANT *et al.* (1998).

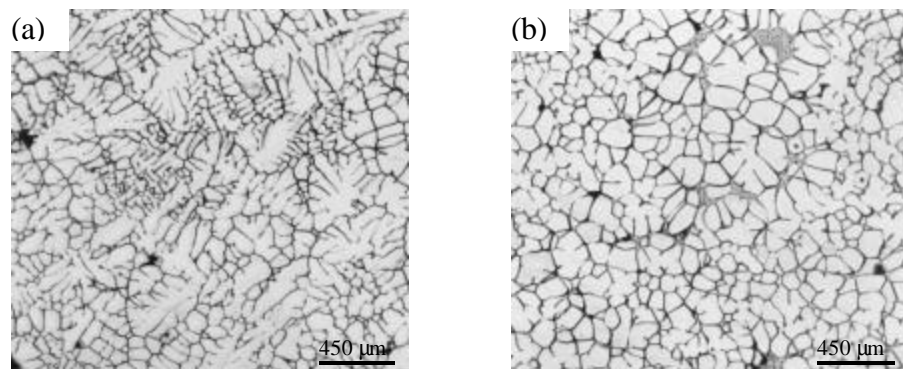


Figura 7- Microestruturas no meio dos lingotes obtidos com velocidade de lingotamento de 1 cm/s da liga Al-4,8% wtCu testada. a) sem agitação e b) com agitação eletromagnética.

Como analisado qualitativamente na macroestrutura, quanto o tamanho de grão em função da velocidade de lingotamento, para $V_L=1\text{cm/s}$ o espaçamento interdendrítico também diminui do fundo para o topo do lingote. Para $V_L=3\text{cm/s}$ os valores são praticamente iguais, conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1- Valores médios dos espaçamentos interdendrítico secundário(μm) e do diâmetro médio (μm) dos glóbulos (ou fragmentos dendríticos) da estrutura dos lingotes obtidos.

CONDIÇÃO	$V_L=1\text{cm/s}$			$V_L=3\text{cm/s}$		
	Topo	Meio	Fundo	Topo	Meio	Fundo
Sem Agitação (Espaçamento)	40,11±5,7	66,00±13,3	80,96±11,7	71,67±12,3	78,18±7,3	74,93±10,4
Com Agitação (T. de Glóbulo)	138,9±38,3	137,4±35,4	140,2±41,3	136,3±38,5	142,5±41,6	150,7±37,4

Para os lingotes obtidos com agitação, observa-se que para $V_L=1\text{cm/s}$ são obtidos os menores valores do tamanho de glóbulos e como visto na microestrutura, o fundo apresenta estrutura mais heterogênea. Para $V_L=3\text{cm/s}$ percebe-se aumento no tamanho médio do diâmetro dos glóbulos do topo para o fundo do lingote, ou seja, este lingote tem uma estrutura mais heterogênea do que aquele obtido com $V_L=1\text{cm/s}$. Como notado na microestrutura, a velocidade de lingotamento influencia diretamente no tamanho dos cristais da fase sólida primária dos lingotes.

Comparando os valores do tamanho médio dos glóbulos com os valores do espaçamento interdendrítico secundário, pode-se notar que os glóbulos tem um diâmetro médio aproximadamente 100 % maior que os braços secundários das dendritas que iriam transformar caso não houvesse a agitação. Isso indica que a agitação não foi suficiente para quebrar todos os ramos secundários das dendritas ou ainda que tenha ocorrido um engrossamento das partículas sólidas desprendidas das dendritas, durante a agitação ou durante o resfriamento.

Na Tabela 2 nota-se que os lingotes obtidos sem agitação e com $V_L=1\text{cm/s}$ tem maior quantidade de eutético do que aqueles obtidos com maior velocidade, isto porque a taxa de resfriamento pelo sistema de resfriamento no primeiro caso é menor.

Tabela 2- Valores médios (em %) da quantidade de eutético existente na estrutura dos lingotes obtidos sem e com agitação, em função da velocidade de lingotamento.

CONDIÇÃO	$V=1\text{cm/s}$			$V=3\text{cm/s}$		
	Topo	Meio	Fundo	Topo	Meio	Fundo
Sem Agitação	14,88±1,3	18,21±4,0	14,89±1,1	10,74±0,6	12,35±2,1	11,86±0,7
Com Agitação	10,15±1,2	10,28±0,4	12,71±0,8	10,13±0,6	11,35±1,8	11,84±1,5

Já para os lingotes obtidos com agitação, a quantidade de eutético praticamente não se altera em função da velocidade de lingotamento. Comparando em $V_L=1\text{cm/s}$ a quantidade de eutético presente na estrutura é menor que para os lingotes obtidos sem agitação, indicando que na condição com agitação a pasta agitada incorpora mais soluto durante a solidificação. Pode-se afirmar portanto que a fase primária globular é mais rica em soluto (cobre) que a fase primária dendrítica. Este fenômeno deve levar a menores tempos de homogeneização nos tratamentos térmicos sequenciais ao processo de obtenção de peças refundidas.

Na Tabela 3, os valores encontrados para o fator de forma ou grau de esfericidade dos cristais da fase sólida na estrutura dos lingotes obtidos com agitação, apresentam uma estreita correlação com o diâmetro médio desses cristais, indicando que quanto menores os cristais desprendidos das dendritas durante a agitação mais globulares serão ao final do processo. Os

resultados refletem aproximadamente o que foi observado na Tabela 1 e na microestrutura desses lingotes:

- com velocidade de lingotamento de 1cm/s eles apresentam a melhor estrutura refundida principalmente no topo e no meio do lingote.
- com velocidade de lingotamento de 3cm/s a estrutura no topo do lingote apresenta-se com menor fator de forma e praticamente igual à estrutura na mesma região do lingote obtido com $V_L=1\text{cm/s}$, no meio e no fundo a estrutura está pouco fragmentada e portanto com maior valor do fator de forma da fase eutética.

Tabela 3 – Valores médios do fator de forma da estrutura dos lingotes refundidos obtidos no equipamento, em função da velocidade de lingotamento.

CONDIÇÃO	V=1cm/s			V=3cm/s		
	Topo	Meio	Fundo	Topo	Meio	Fundo
Refundidos	1,82±1,05	1,81±1,05	2,39±5,02	1,82±1,62	2,01±1,62	2,26±2,77

O fator de forma é calculado no analisador de imagens como sendo o quanto a forma geométrica do cristal sólido em um plano se aproxima da forma geométrica de uma esfera, se o valor é igual a 1 entenda-se que o cristal tem a mesma forma de uma esfera (globular). Quanto menor o valor encontrado para o fator de forma dos cristais que constituem a fase sólida da estrutura de uma liga, mais refundida estará a estrutura e melhor aceita como matéria prima em processos de tixotomização. Na literatura, os valores do fator de forma obtido para as ligas estudadas encontram o valor variando de 1 a 2 (Loué & Suéry, 1995).

6. CONCLUSÕES

- O equipamento projetado e construído mostrou-se capaz de simular um lingotamento contínuo para produzir lingotes fundidos da liga AA2011 com diâmetro médio de 50 mm e submetidos a uma agitação eletromagnética durante a solidificação.
- Os parâmetros ótimos encontrados e utilizados na experimentação do equipamento permitiram a produção de lingotes com estrutura não-dendrítica apresentando a fase primária semi-globular com diâmetro abaixo de 150 microns e o fator de forma abaixo de 2.
- Estes valores atestam que o equipamento é capaz de produzir lingotes refundidos com estrutura apropriada para processamento posterior no estado semi-sólido. Maiores variações dos parâmetros de controle do processo, como a potência de agitação e velocidade de lingotamento podem gerar melhores estruturas refundidas mas isto deverá ser feito em trabalhos futuros.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e da CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), aos Departamentos de Engenharia de Materiais de Engenharia de Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp.

REFERÊNCIAS

- Garant, M., Blais, S., Pluchon, C. and Loué, W.R., 1998, Aluminium semi-solid processing: from the billet to the finished part, Proceedings of the International Conference on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, June 23-25, EUA, pp. xvii-xxxi.
- Idegomori, T., Hirono, H., Ito, O., Kimishima, S. and Mizoue, K., 1998, The manufacturing of automobile parts using semi-solid metal processing, Proceedings of the International Conference on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, June 23-25, EUA, pp. 71-77.
- Loué, W.R. and Suéry, M., 1995, Microstructural evolution during partial remelting of Al-Si7Mg alloys, Materials Science and Engineering A, Lausanne, vol. A203, n. 1, Jan., pp.1-13.
- Nicholas, N.H., Trichka, M.R. and Young, K.P., 1998, Application of semi-solid metal forming to the production of small components, Proceedings of the International Conference on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, June 23-25, EUA, pp. 79-86.
- Spencer, D.B., Mehrabian, R. and Flemings, M.C., 1972, Rheological behavior of Sn-15 Pb in the crystallization range, Metall. Trans., vol. 3, pp. 1925-1932.
- Vives, C., 1992, Elaboration of semisolid alloys by means of new electromagnetic rheocasting processes, Metallurgical Transactions B, vol. 23B, April, pp. 189-206.
- Vogel, A., 1978, Turbulent flow and solidification: stir-cast microstructure, Metal Science, London, vol. 12, n. 12, pp. 576-578.

PROJECT AND CONSTRUCTION OF A SEMI-CONTINUOUS CASTING SYSTEM FOR PRODUCTION OF MATERIAL RHEOCAST

Abstract. *The present work tells the project and construction of a simple equipment, of low cost and easy operation, capable to produce pastes metallic rheocast through the use of electromagnetic stirring during the solidification process in an operation of semi-continuous casting. The main objective is to analyze the possibility to obtain matter it excels with globular structures, adapted for posterior processing in the state semi-solid (tixofforming), of bass leagues and medium coalition point. Basically the equipment is constituted by a system of vertical semi-continuous casting, a system of eletromagnetic induction and a control system and acquisition of data, that allows the computerized control of the equipment. Using the league Al-4,8wt%Cu, ingots were produced with and without agitation of the metal (already begun with 20% of formed solid) using speeds of casting of 1 cm/s and 3 cm/s. Ingots were produced with height of 450 mm and medium diameter of 45 mm presenting the structure of the crystals of the primary phase with globular morphology, with medium diameter of up to $139\pm 38\ \mu\text{m}$, in the best condition. The form factor varied from 1,8 to 2,4. The ingots present typical structure of the rheocast and they can be used as matter it excels in tixofforming processes.*

Keywords: *Rheocast Pastes, Tixofforming, Electromagnetic Stirring, Rheocast.*