

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR José Edenil
Gomes dos Santos E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 16 02 2000

P/ Eugênio José Zoqui
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

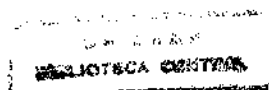
**Projeto e Construção de Um Sistema de
Lingotamento Semi-Contínuo para Obtenção de
Materiais Reofundidos**

Autor : José Edenil Gomes dos Santos

Orientador: Eugênio José Zoqui

28/2000

BIBLIOTECA DA FÁBRIA DE ENGENHARIA
UNICAMP



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

Projeto e Construção de Um Sistema de
Lingotamento Semi-Contínuo para Obtenção de
Materiais Reofundidos

Autor : **José Edenil Gomes dos Santos**

Orientador: **Eugênio José Zoqui**

Curso: Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e Processos

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2000
S.P. - Brasil

UNIDADE BAE/FEM
 N.º CHAMADA:
 T/UNICAMP
 Sa 59p
 V. Ex.
 TOMBO BC/41479
 PROC. 278/00
 C ☐ D ☒
 PREÇO R\$ 11,00
 11-07-00
 SPD

CM-00142425-2

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
 BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Sa59p

Santos, José Edenil Gomes dos

Projeto e construção de um sistema de lingotamento
 semi-contínuo para obtenção de materiais reofundidos /
 José Edenil Gomes dos Santos.--Campinas, SP: [s.n.],
 2000.

Orientador: Eugênio José Zoqui.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Ligas de alumínio. 2. Fundição contínua. 3.
 Microestruturas. 4. Metais - Fundição. I. Zoqui,
 Eugênio José. II. Universidade Estadual de Campinas.
 Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

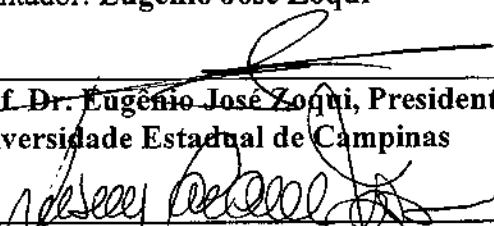
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

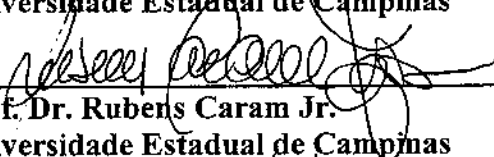
Projeto e Construção de Um Sistema de
Lingotamento Semi-Contínuo para Obtenção de
Materiais Reofundidos

Autor : José Edenil Gomes dos Santos

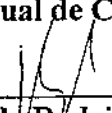
Orientador: Eugênio José Zoqui



Prof. Dr. Eugênio José Zoqui, Presidente
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Rubens Caram Jr.
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. José Ângelo Rodrigues Gregolin
Universidade Federal de São Carlos

Campinas, 16 de Fevereiro de 2000

Dedicatória:

Dedico este trabalho a meus pais, os quais me permitiram com a ajuda de Deus estar aqui neste momento para concluir este trabalho, e especialmente à minha esposa Sheila e ao meu filho Matheus que tanto me amaram nos momentos delicados desta tarefa.

Agradecimentos

Sou eternamente grato ao meu orientador Prof. Dr. Eugênio José Zoqui que me acolheu, foi tolerante e amigo nesses anos de trabalho juntos.

Aos funcionários mais próximos nos Departamentos de Engenharia da FEM por onde passei e fui ajudado nas tarefas desenvolvidas para a conclusão deste trabalho.

Quero agradecer a colaboração dos meus amigos pelo incentivo e confiança em meu trabalho, sendo estas pessoas de espírito paciente, em especial: Prof. Dr. Rodolfo, Prof. Msc. Honório, Roberto e Divanir da Unimep.

Agradeço à FAPESP pelo seu programa de apoio à pesquisa.

*O homem de ciência parece ser a única
pessoa que tem algo a dizer neste
momento e o único homem que não
sabe como dizê - lo.*

JAMES BARRIE

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução e Objetivos.....	1
1.1 – Introdução.....	1
1.2 - Processos de obtenção de pastas reofundidas.....	2
1.3 - Objetivos do trabalho.....	4
 Capítulo 2 - Revisão da Literatura.....	 5
2.1 - Introdução à reofundição.....	5
2.2 - Estado da arte.....	5
2.3 - Aplicações comerciais de pastas semi-sólidas.....	10
2.4 - Características de estruturas reofundidas.....	11
2.5 - Processos de fabricação de pastas reofundidas.....	14
2.5.1 - Por Interferência no processo de solidificação.....	15
A - Por interferência na nucleação.....	15
B - Por interferência no crescimento.....	15
2.5.2 - Por tratamentos térmicos especiais após a solidificação.....	17
2.6 - Métodos de obtenção de pastas envolvendo agitação.....	18
2.6.1 - Agitação mecânica.....	18
2.6.2 - Agitação eletromagnética.....	20
2.7 - Influência dos parâmetros na estrutura obtida por agitação eletromagnética.....	23

Capítulo 3 - Procedimento Experimental.....	26
3.1 - Liga metálica utilizada.....	26
3.2 - Estrutura de referência.....	27
3.3 – Planejamento experimental.....	28
3.4 – Análise Metalográfica.....	30

Capítulo 4 - Projeto e Construção do Equipamento para Agitação Eletromagnética.....	33
4.1- Objetivo.....	33
4.2- Descrição geral do equipamento.....	33
4.3- Descrição das partes constituintes.....	34
4.3.1- Estrutura de sustentação.....	34
4.3.2- Lingoteira.....	39
4.3.3- Guias da lingoteira.....	41
4.3.4 - Conjunto posicionador da lingoteira.....	41
4.3.5 - Forno de espera	45
4.3.6 - Conjunto indutor	47
4.3.7 - Sistema de resfriamento	47
4.3.8 - Sistema de potência	48
4.3.9 - Sistema de aquisição e controle de dados.....	50
4.4 - O equipamento projetado e construído.....	52
4.5 - Testes e ajustes preliminares do equipamento.....	62
4.5.1 - Integridade do movimento da lingoteira.....	63
4.5.2 - Velocidade de lingotamento	64
4.5.3 - Calibração da velocidade de lingotamento.....	65
4.5.4 - Estanqueidade da lingoteira	65
4.5.5 - Desmoldagem do lingote obtido.....	65
4.5.6 - Temperatura mínima de vazamento.....	66
4.5.7 – Variação da temperatura da pasta durante o lingotamento.....	67
4.5.8 – Mapeamento da temperatura do lingote no campo de agitação.....	69

4.5.9 - Proteção do enrolamento do motor estator.....	71
4.6 – Ensaaios finais para produção da pasta reofundida.....	72
4.6.1 – Parâmetros de controle.....	72
A - Temperatura de agitação.....	72
B - Velocidade de lingotamento.....	73
C - Potência de agitação.....	73
D – Modo de agitação.....	74
E – Temperatura do forno de espera.....	74
4.7 – Procedimento do lingotamento.....	75
Capítulo 5 - Resultados e Discussões.....	78
5.1 – Desempenho do equipamento	78
5.2 - Caracterização dos lingotes obtidos.....	81
5.2.1 - Quanto ao aspecto bruto de fusão	82
5.2.2 - Quanto ao aspecto macroestrutural.....	82
5.2.3 – Caracterização microestrutural.....	86
Capítulo 6 - Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	97
6.1 – Quanto aos objetivos propostos.....	97
6.2 – Quanto ao equipamento projetado e construído.....	97
6.3 – Quanto ao lingotes produzidos.....	98
6.4 – Sugestões para trabalhos futuros.....	100
Referências Bibliográficas.....	101

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	Variação da tensão de cisalhamento com a fração sólida: a) liga Al-4Cu agitada após iniciada a solidificação; b) liga Sn-15Pb agita desde o início da solidificação.	7
FIGURA 2.2	Comparação de estrutura dendrítica fundida convencionalmente(a) e semisólida que não formou dendritas(b), microestrutura da liga de alumínio 357 (Al-7Si0,5Mg). Ambas a 200 X	12
FIGURA 2.3	Efeito da taxa de cisalhamento na viscosidade da liga Pb-15Sn em função da fração sólida na pasta reofundida.	14
FIGURA 2.4	Esquema da obtenção de pastas reofundidas por interferência na solidificação: a) processo de agitação contínua; b) processo de agitação isotérmico.	17
FIGURA 2.5	Desenho simplificado de reator para produção de pastas reofundidas por agitação mecânica.	19
FIGURA 2.6	Desenho simplificado de reator para produção de pastas reofundidas por agitação eletromagnética.	21
FIGURA 2.7	Esquema de processamento de pasta semi-sólida por agitação eletromagnética contínua.	22
FIGURA 2.8	Estrutura reofundida obtida por agitação eletromagnética.	23
FIGURA 2.9	Microestrutura da liga Al-Si7Mg0.6 em lingote de 75mm obtido por agitação eletromagnética (a) e (b) após reaquecimento para o estado semi-sólido a 580°C e resfriamento rápido.	25
FIGURA 3.1	Análise Térmica Diferencial da liga Al-4,8wt%Cu. Os valores de temperatura destacados referem-se às temperaturas <i>solidus</i> e <i>liquidus</i> da liga.	27

FIGURA 3.2	Organograma do trabalho a ser executado.	28
FIGURA 3.3	Desenho esquemático do lingote a ser obtido demonstrando onde serão retiradas as amostras para análise metalográfica.	31
FIGURA 4.1	Desenho esquemático do equipamento projetado e construído.	35
FIGURA 4.2	Desenho esquemático com as dimensões básicas do equipamento projetado e construído. (em milímetros)	36
FIGURA 4.3	Diagrama em blocos dos circuitos elétricos e eletrônicos para o equipamento projetado e construído.	37
FIGURA 4.4	Desenho esquemático com as dimensões da estrutura do equipamento projetado e construído. (em milímetros)	38
FIGURA 4.5	Desenho esquemático da lingoteira do equipamento projetado e construído. (em milímetros)	40
FIGURA 4.6	Desenho esquemático do sistema de guias da lingoteira do equipamento projetado construído. (em milímetros)	42
FIGURA 4.7	Desenho esquemático do conjunto posicionador da lingoteira do equipamento projetado e construído. (em milímetros)	44
FIGURA 4.8	Desenho esquemático do forno de espera do equipamento projetado e construído. (em milímetros)	46
FIGURA 4.9	Esquema geral do Sistema de Potência.	48
FIGURA 4.10	Esquema simplificado para exemplificar a forma escolhida para alimentar o Motor Indutor: a) variação original da tensão na rede para apenas uma fase; b) ângulo de disparo $\alpha = 150^\circ$ e consequente voltagem eficaz; c) ângulo de disparo $\alpha = 60^\circ$ e consequente voltagem eficaz.	49
FIGURA 4.11	Esquema ilustrativo do sistema de aquisição e controle de dados	51
FIGURA 4.12	Vista geral do Equipamento Projetado e Construído.	53
FIGURA 4.13	Vista do Forno de Espera, o Sistema Indutor, o Sistema de Resfriamento e as Guias da Lingoteira.	54
FIGURA 4.14	Vista dos principais componentes que formam o Conjunto Posicionador da Lingoteira.	56

FIGURA 4.15	Vista mostrando: o macho utilizado na construção das lingoteiras(a); duas lingoteiras desmontadas e o fundo tampão abaixo (b) e uma Lingoteira Completa (montada) (d).	57
FIGURA 4.16	Vista do Painel de Controle do equipamento.	58
FIGURA 4.17	Placa Multiplexadora.	59
FIGURA 4.18	Circuitos elétricos e eletrônicos que constituem o Sistema de Potência do equipamento. a) Placa responsável pela Base de Tempo (direita) e Placa Variadora do Ângulo de Disparo (esquerda); b) Sequência de tiristores utilizados.	60
FIGURA 4.19	Dispositivos do comando elétrico responsável pelo controle do movimento ascendente e descendente da lingoteira.	61
FIGURA 4.20	Tela de apresentação do Software de Controle do Sistema de Potência, mostrando: as escalas de temperatura utilizada; a potência utilizada; o período de reversão do campo magnético (em segundos); a frequência de aquisição (pontos/segundo) e o número de pontos a ser aquisitados.	62
FIGURA 4.21	Variação da temperatura ao longo do banho dentro da lingoteira nos testes preliminares.	67
FIGURA 4.22	Variação da temperatura da pasta ao longo do lingote na saída do campo de agitação.	68
FIGURA 4.23	Esquema ilustrativo indicando esquema o posicionamento dos termopares no início do ensaio.	70
FIGURA 4.24	Variação da temperatura da pasta ao longo do lingote durante a agitação eletromagnética.	71
FIGURA 4.25	Variação da temperatura do enrolamento do motor durante o lingotamento contínuo.	72
FIGURA 5.1	a) Vista do equipamento projetado e construído no início do processo de lingotamento semi-contínuo para obtenção de lingotes reofundidos por agitação eletromagnética; b) Vista do equipamento projetado e construído mostrando o final de processamento do lingote reofundido.	80
FIGURA 5.2	Produto resultante do lingotamento semi-contínuo e sob agitação eletromagnética no equipamento projetado e construído: um lingote com aproximadamente 450 mm na altura e diâmetro mínimo de 45 mm.	81

FIGURA 5.3	Macroestruturas dos lingotes Fundidos e Reofundidos obtidos no equipamento construído com velocidade de lingotamento de 1cm/s.	83
FIGURA 5.4	Macroestruturas dos lingotes Fundidos e Reofundidos obtidos no equipamento construído com velocidade de lingotamento de 3cm/s.	84
FIGURA 5.5	Microestruturas dos lingotes Fundidos e dos lingotes Reofundidos obtidos no equipamento construído com velocidade de lingotamento de 1cm/s.	87
FIGURA 5.6	Microestruturas dos lingotes Fundidos e dos lingotes Reofundidos obtidos no equipamento construído com velocidade de lingotamento de 3cm/s.	89
FIGURA 5.7	Microestruturas com maior detalhe dos lingotes Reofundidos obtidos no equipamento construído com velocidade de lingotamento de 1 e 3cm/s, respectivamente.	91

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1	Composição química da liga AA2011 utilizada nos testes do equipamento.	26
TABELA 3.2	Variáveis de resposta analisadas nos dois níveis de ensaios realizados.	29
TABELA 3.3	Sequência em que os ensaios foram realizados.	30
TABELA 5.1	Valores médios (em μm) dos espaçamentos interdendrítico secundário da estrutura dos lingotes fundidos e do diâmetro médio (em μm) dos glóbulos da estrutura dos lingotes reofundidos, obtidos no equipamento, em função da velocidade de lingotamento.	92
TABELA 5.2	Valores médios (em %) da quantidade de fração líquida existente na estrutura dos lingotes fundidos e dos lingotes reofundidos obtidos no equipamento, em função da velocidade de lingotamento.	94
TABELA 5.3	Valores médios do fator de forma da estrutura dos lingotes reofundidos obtidos no equipamento, em função da velocidade de lingotamento.	95

Resumo

SANTOS, José Edenil Gomes, *Projeto e Construção de Um Sistema de Lingotamento Semi-Contínuo para Obtenção de Materiais Reofundidos*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 106p. Dissertação (Mestrado).

Este trabalho busca contribuir para o desenvolvimento do campo da reofundição referente à obtenção de pastas reofundidas por agitação eletromagnética em processo de lingotamento semi-contínuo no âmbito nacional, analisando a possibilidade de se obter matéria prima com estruturas globulares apropriadas para processamento posterior no estado semi-sólido de ligas de baixo e médio ponto de fusão. Para tanto foi projetado e construído um equipamento capaz de produzir lingotes com diâmetro de até 80mm, por lingotamento semi-contínuo e promoção de agitação eletromagnética do metal líquido durante a solidificação. A agitação eletromagnética visa a alteração da morfologia de crescimento da fase sólida primária de uma liga, no caso do trabalho para uma liga AA2011. As estruturas dos lingotes obtidos foram caracterizadas macro e microestruturalmente para análise da influência das variáveis de controle do processo (apenas da velocidade de lingotamento e presença de agitação) sobre as variáveis de resposta (espaçamento interdendrítico secundário, teor de segunda fase, diâmetro médio e fator de forma da fase sólida primária). A análise dos resultados obtidos atestam que o equipamento é eficiente em produzir lingotes com estruturas globulares, com diâmetro médio dos glóbulos em torno de 140 μ m e fator de forma em torno de 2. Estes valores indicam que os lingotes obtidos estão reofundidos e apropriados portanto para uso como matéria prima em processos de tixoconformação.

Palavras Chave: - Reofundição; Pastas Reofundidas; Agitação Eletromagnética; Semisólido; Tixoconformação

Abstract

SANTOS, José Edenil Gomes, *Project and Construction of a Semi-Continuous Casting System for Rheocast Materials Production*, Campinas,: Faculty of Mechanical Engineering, State University at Campinas, 2000. 106p. Dissertação (Mestrado).

This work search for contribute for the development of the rheocast production area. It is concerning about obtaining rheocast slurries by electromagnetic stirring in a semi-continuous casting apparatus, with the analysis of the possibility to obtain raw material with globular structures able for posterior processing in the semi solid state for low and medium melting point alloys. For this matter was projected and built an equipment capable of producing ingots with diameter up to 80mm, for semi-continuous casting and a system to produce the electromagnetic agitation of the liquid metal during the solidification. The electromagnetic stirring seeks the alteration of the morphology of the growing solid (the primary solid phase of the alloy - in this particularly case the alloy AA2011). The structures of the obtained ingots were characterised for macro and microstructure to analyse the influence of the control variables of the process (casting speed and agitation presence) on the answer variables (interdendritic secondary arm spacing, quantity of secondary phase, globular medium diameter and roundness in way to characterised of the primary solid phase). The analysis of the obtained results attests that the equipment is efficient to produce ingots with globular structures, with globules medium diameter around 130 μ m and roundness around 2. These values indicate that the obtained ingots are rheocast material and therefore it is appropriate for the usages as raw material in the tixo-conformation processes.

Key-words: Rheocast, Rheocast Material; Electromagnetic Stirring, Semi – Solid Processing Tixo– Conformation, Aluminium Alloys.

CAPÍTULO 1

Introdução e Objetivos

1.1 - Introdução

Em metalurgia é incessante a busca de novos materiais com propriedades melhores do que os atuais. Implementar um novo material para a fabricação de determinados produtos na indústria demanda muita pesquisa para se provar a real vantagem em trocar o antigo pelo novo. Para a indústria atual é interessante que os materiais utilizados para fabricação de seus produtos sejam de baixo custo e de fácil e rápido processamento.

No início da década de 70, em pesquisas feitas no MIT (USA), deu-se a descoberta de que era possível a obtenção de produtos metálicos a partir de processos de conformação do metal em um estado particular semi-sólido ou reofundido FLEMINGS (1976). Até então muita pesquisa tem sido feita para introdução dessa nova tecnologia na indústria mecânica e convencionou-se chamá-la de tixoconformação.

A denominação de reofundição para essa nova área de pesquisa deriva do termo reologia, ou seja, estudo de escoamento de fluidos utilizados para processos de fundição que utilizam matéria prima no estado semi-sólido.

Os materiais reofundidos apresentam características especiais por possuírem fração sólida constituída de glóbulos, envolvidos pela fração de líquido quando à temperatura intermediária entre a *liquidus* e a *solidus*. Nessa condição o metal ou liga metálica apresenta propriedades particulares de escoamento e se comporta como um fluido não newtoniano e tixotrópico. Quando em repouso, a pasta tem consistência sólida, como a manteiga, e apresenta inicialmente uma certa

resistência à deformação, mas depois de certo tempo de aplicação da força esta resistência é vencida (comportamento tixotrópico) e a pasta passa a fluir como um líquido e sua viscosidade, a partir de então, irá depender da taxa de deformação (comportamento não newtoniano) e da fração sólida existente (SPENCER, 1972).

O material nesse estado se presta a diferentes aplicações, já que apresenta alta viscosidade (a pasta se comporta como um sólido), é perfeitamente manuseável, e sendo assim pode ser processada por diferentes processos de fundição, destacando os de compressão e injeção e que podem ser feitos à temperaturas inferiores aquelas convencionais para o metal líquido, além do que o material apresenta escoamento uniforme para o interior das matrizes com menor turbulência e consequentemente o produto final terá menor índice de porosidade (LIM e YOON, 1997). O processo ainda apresenta baixas taxas de desgaste das matrizes pelo aquecimento e pelo atrito, comparando-se com os processos convencionais (ANDERSON *et al*, 1996).

Após obtida a pasta semi-sólida, pode-se processá-la imediatamente ou ainda pode-se armazenar para posteriores processamentos (reprocessamentos). Estes tipos de processos recebem a denominação de tixoconformação e apresentam mais vantagens em relação aos processos convencionais: redução de perdas da matéria prima, maior produtividade, automatização do processo, menor consumo de energia para conformação e entre outros benefícios, torna possível a produção de compósitos com distribuição mais uniforme do reforço (FOGAGNOLO, 1996).

Apesar das potencialidades da aplicação de pastas reofundidas, seu uso ainda é limitado devido às dificuldades ainda existentes para a sua obtenção. A tecnologia necessária à produção destas pastas ainda é deficiente em termos das informações a respeito das variáveis dos diversos processos de obtenção da mesma, associado a isto o valor do produto final é relativamente alto.

1.2 - Processos de obtenção de pastas reofundidas

Todos os processos utilizados para obtenção de reofundidos visam à modificação da morfologia da microestrutura em formação ou já formada de dendrítica para globular, porém os

mecanismos de modificação estrutural são completamente distintos para cada processo, mas o produto final em todos eles servirá de matéria-prima para processamento posterior (tixoconformação).

Um grupo de processos consiste na obtenção de estruturas altamente refinadas e que submetidas a aquecimento posterior à temperatura *solidus* passam por fenômenos naturais de globularização para então serem processadas, mas os processos de obtenção dessa matéria prima são muito pouco explorados porque apresentam complexidade de controle de parâmetros e alguns são de elevado custo.

Outros processos (ROBERT & KIRKWOOD, 1988) sugeridos para obtenção de estruturas reofundidas, são aqueles em que o processamento é posterior à solidificação da liga metálica, ou seja, a obtenção da estrutura reofundida se faz a partir do sólido. Basicamente envolvem a deformação do material a frio e posterior aquecimento à temperaturas superiores à *solidus* promovendo a globularização das fases de mais alto ponto de fusão. Esse método foi denominado pelos autores de fusão parcial controlada, ou FPC. O inconveniente para a utilização desse método em escala industrial reside na necessidade de que o material seja previamente deformado a frio e de equipamento para tempo mínimo de aquecimento.

Atualmente as matérias-primas para processos de tixoconformação são preferencialmente obtidas por processos que envolvem a agitação do líquido em solidificação, onde se destaca a agitação eletromagnética. Nestes, 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.

O processo industrial mais viável e divulgado para produção de pastas reofundidas no momento é o Processo Pechiney (ALUMINIUM PECHINEY, 1996) em que o líquido é agitado continuamente por meio de campos magnéticos. O equipamento permite produção estanque ou contínua de tarugos da ordem de 75 mm de diâmetro para algumas ligas de Al.

O processo de agitação eletromagnética apesar de bastante difundido ainda apresenta

limitações de conhecimentos com relação à influência das diversas variáveis do processo nas propriedades finais das estruturas obtidas e de equipamentos para as experimentações.

1.3 - Objetivos do trabalho

O objetivo principal é o projeto e a construção de um equipamento de laboratório capaz de produzir materiais refundidos de diferentes ligas metálicas por agitação eletromagnética da pasta durante a solidificação em um sistema de lingotamento semi-contínuo. O equipamento a ser construído deverá ser capaz de produzir lingotes refundidos com diâmetro de até 80mm e simular a obtenção desses lingotes em um sistema de lingotamento contínuo.

Para atestar a eficiência do equipamento em produzir lingotes refundidos será utilizada a liga Al-4,8wt%Cu. Nos experimentos será utilizada a potência máxima de agitação gerada por um motor estator adaptado de um motor de 4HP. Será utilizado logo dois valores extremos para a velocidade de lingotamento e somente a influência desse parâmetro será analisado no trabalho. Para avaliar a efetividade da potência de agitação na pasta, os lingotes obtidos nesta condição terão sua estrutura comparada com lingotes obtidos com os mesmos parâmetros, mas sem agitação eletromagnética.

Os lingotes obtidos serão caracterizados macro e microestruturalmente para se avaliar a influência dos parâmetros de processo na estrutura final ao longo do seu comprimento e a potencialidade destes em serem utilizados como matéria prima nos processos de tixotomização.

Objetiva-se portanto, com os resultados deste trabalho, contribuir para a continuidade das pesquisas na área de obtenção de pastas refundidas, visando consolidar a aplicação industrial de metais de baixo e médio ponto de fusão em estado semi-sólido.

Os objetivos específicos são: viabilizar a obtenção de materiais refundidos por processo de agitação eletromagnética contínua; caracterizar micro e macroestruturalmente as pastas refundidas obtidas e analisar os efeitos dos parâmetros de controle no processo.

CAPÍTULO 2

Revisão da Literatura

2.1 - Introdução à reofundição

O termo reofundição surgiu no início da década de 70 no Massachusetts Institute of Technology (MIT-EUA) quando um grupo de cientistas liderados por FLEMINGS (1976), estavam investigando os mecanismos de formação de trincas à quente, em peças fundidas. Submetendo o líquido ao cisalhamento, durante a solidificação de ligas de baixo ponto de fusão, observaram que ligas como a Pb-Sn, solidificadas sob estas condições apresentavam sob cisalhamento durante a solidificação, uma estrutura diferente da esperada. O material se comportava como uma pasta que apresentava elevada viscosidade em repouso mas fluía como a manteiga quando era submetida à tensões de cisalhamento, e surpreendentemente descobriram que a microestrutura revelava a presença de partículas sólidas com tendência à morfologia globular envolvidas pela segunda fase ao invés da estrutura dendrítica típica, resultante da solidificação convencional da maioria das ligas metálicas.

2.2 - Estado da arte

FLEMINGS (1976) foi o precursor para pesquisas e trabalhos publicados até hoje reportando resultados dos avanços para essa nova tecnologia. METZ (1970), um de seus colaboradores, publicou um dos primeiros trabalhos a respeito das propriedades reológicas para ligas de Al-Cu quando estas foram submetidas à tensões externas de deformação para provocar cisalhamento da estrutura durante a solidificação a partir de diferentes frações de sólido presente na pasta. Constataram que a tensão necessária para provocar o cisalhamento da pasta aumentava gradativamente quanto maior fosse a fração de sólido presente, mas a grande surpresa foi que a

tensão de cisalhamento não era proporcional com a deformação para uma mesma fração de sólido presente: aumentando gradativamente a tensão de cisalhamento, aumentava a deformação da pasta mas em determinado instante a tensão de cisalhamento caía abruptamente enquanto a deformação prosseguia para valores mais altos. Estava claro portanto que a pasta apresentava comportamento reológico não newtoniano.

SPENCER (1971), orientado por FLEMINGS em sua tese de doutorado, publicou um trabalho em conjunto com seus colaboradores em que analisaram a influência da agitação, durante a solidificação de líquidos, na estrutura resultante. Desta vez utilizando a agitação desde o início da solidificação da liga Sn-15Pb, observaram que a resistência à deformação é reduzida para pequenas frações de sólido presente, porque os sólidos dendríticos formados ainda estão soltos no líquido e portanto se acomodam facilmente na deformação. A partir de determinados valores de fração sólida, a resistência à deformação cresce subitamente, indicando a formação de uma rede dendrítica, é neste estágio que aparecem trincas a fim de acomodar as deformações. Estes resultados eram esperados de acordo com as experiências de FLEMINGS.

A grande descoberta porém, nas experiências de SPENCER, e foi propriamente àquela que despertou a curiosidade de cientistas da área, foi que as tensões necessárias à deformação da pasta para provocar o cisalhamento eram muito menores (da ordem de até 1000 vezes) em comparação com os valores observados por METZ & FLEMINGS (1970) e que a pasta obtida apresentava alta fluidez mesmo para altas frações sólidas já formadas, conforme demonstrado na FIGURA 2.1 extraída de BUBENIK (1998).

Foi a partir desses experimentos de SPENCER que hoje sabemos que se uma liga metálica é agitada desde o início da solidificação esta irá apresentar tal comportamento reológico, porque sua estrutura será formada por uma fase sólida não-dendrítica com tendência à morfologia globular envolvida pela fase líquida (segunda fase) e que alterações na taxa de resfriamento e tensões de cisalhamento (agitação) resultam em variações na morfologia e nas dimensões das fase sólida primária.

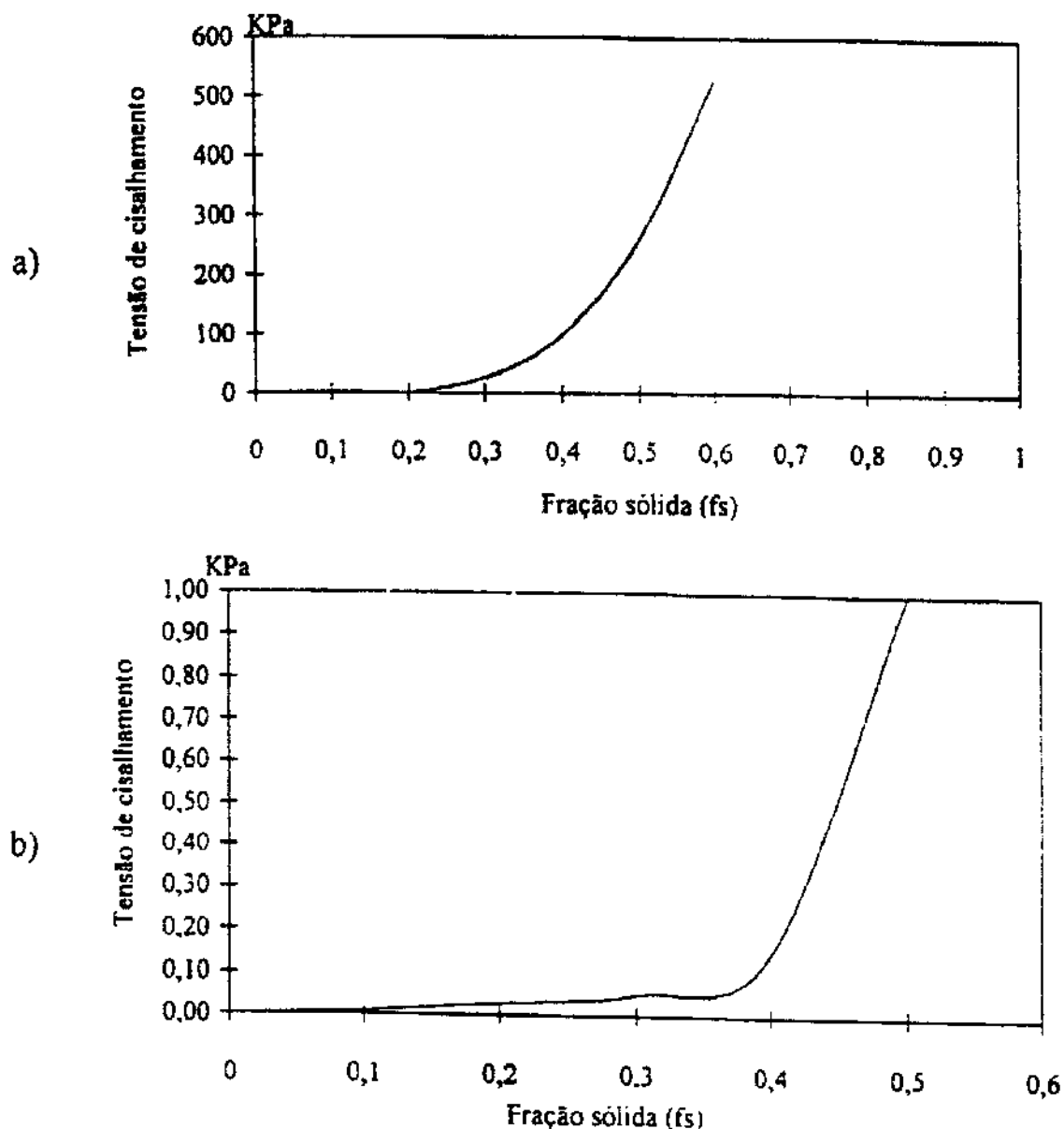


FIGURA 2.1 – Variação da tensão de cisalhamento com a fração sólida:

- a) liga Al-4Cu agitada após iniciada a solidificação;
- b) liga Sn-15Pb agitada desde o início da solidificação.

FONTE: METZ & FLEMINGS (1970) p.457 e SPENCER (1971)

Quanto maiores forem as taxas de cisalhamento, menores serão os valores para a viscosidade aparente da pasta (FLEMINGS, 1977) e esta redução é muito significativa quando a fração sólida é alta (0,3 a 0,5). Resultados semelhantes foram obtidos por KATTAMIS et al (1991) quando este variou a taxa de resfriamento para a liga Al-4,5Cu15Mg, a mesma estudada

por Flemings. SPENCER (1971) já havia determinado que as variações na estrutura final da pasta reofundida é que dita esse fenômeno, ou seja, a viscosidade diminui porque tem-se melhor esfericidade e menores tamanhos para a fase sólida quanto maiores as taxas utilizadas para os parâmetros citados.

Desde o final da década de 70 e início dos anos oitenta, de várias partes do mundo, principalmente da Europa, EUA e Japão, surgiram publicações e centros de pesquisa na área, desenvolvendo vários processos e equipamentos que produzam a pasta estanque ou continuamente (APAYDIN, 1982), caracterizando as propriedades de escoamento (MIWA, 1981 e SECONDE, 1984), os fenômenos metalúrgicos envolvidos na obtenção destas (PRASAD et al, 1987) e reportando o desenvolvimento de métodos e equipamentos para o processamento de pasta reofundidas em produtos por injeção (DECKER, 1989).

Podem ser citados os seguintes centros:

Universidades: de Connecticut em Illinois, EUA; de Leeds em Sheffield e Sussex, U.K.; de Delf, Holanda; de Grenoble, França; Southest University of Nanging em Pequim, China e ainda no Egito e na Índia.

Centros de Pesquisa: AACHEN-Instituto de Fundição, Alemanha; AIST(Agency of Industrial and Science Techonology), Japão; IMRI(Industrials Materials Research Institute), Canadá e Fulmer Institute, U.K..

Empresas: Rheocast Corp.(Dow Chemicals, I.T.T. e Sun Oil Co.); ALUMAX - Engeneering Metal Processes Inc.; AMAX – Research and Development Center; Westinghouse Electric Co.; Suzuki Motors Co.; Sumitomo Metals; Pratt and Whitney Aircraft; Alcan(EUA e Canadá); Wheeldon Processes(U.K.); British Stell Corp, além da junção entre a Kawasaki Steel, Mitsubish Metals, Nippon Steel e Mitsubish Electric para fundarem a Compo Research Corp. e Rheo-Technology Ltda no Japão e da Tixomat no EUA.

A partir da década de oitenta as pesquisas se voltaram principalmente para o aprimoramento de processos de obtenção de pastas e produtos; novos métodos de processamento,

métodos de monitoramento e controle de processos; para a aplicação comercial das pastas, principalmente para ligas de Al e de Mg (injeção); para a obtenção de compósitos; modelamento das propriedades de escoamento e de fenômenos de "coarsening" e finalmente para a análise do comportamento mecânico de ligas com microestruturas contendo glóbulos e de produtos tixo-forjados e tixo-injetados.

Nos anos 90, cinco importantes congressos internacionais apresentaram grande número de trabalhos reportando importantes avanços na área de reofundição, especificamente sobre processamento de ligas e compósitos no estado semi-sólido reofundido. Além dos vários trabalhos reportando a obtenção de pastas reofundidas de ligas não ferrosas por diferentes processos, CAÚ & ROBERT (1992) apresentaram trabalho em que obtiveram estruturas globulares também para o aço ferramenta M-2 e para o aço inoxidável 308-L.

KAPRANOS obteve e caracterizou as propriedades mecânicas de aços ferramentas (1994) e de ferro fundido nodular (1998) na condição reofundida. ZOQUI (1995) em sua tese de doutorado, faz um estudo comparativo das propriedades mecânicas de pastas reofundidas obtidas de uma liga Al-Cu, com estruturas solidificadas convencionalmente.

Os estudos recentes estão concentrados no desenvolvimento de processos e obtenção de pequenos componentes por tixoconformação (Nicholas et al, 1998) principalmente na indústria automobilística (MOSCHINI, 1996) e (IDEGOMORI et al, 1998) e no aprimoramento dos processos de obtenção da matéria prima, principalmente por agitação eletromagnética (PAES & ZOQUI, 1999) para atender a emergente indústria de processamento de ligas na forma de pastas semi-sólidas. Ainda nesse sentido, BUBENIK (1998) projetou e construiu um equipamento, com um certo grau de automatização do processo, para a produção estanque de pastas reofundidas de liga Al-Cu por agitação eletromagnética em trabalho desenvolvido em laboratório da Unicamp e NIEDERMAIER & LANGGARTNER (1998) projetaram e construíram um equipamento para produção de tarugos por agitação eletromagnética em processo contínuo horizontal.

2.3 - Aplicações comerciais de pastas semi-sólidas

A aplicação comercial dessa nova tecnologia sofreu atrasos consideráveis devido a litígios iniciais a respeito de quem iria deter os direitos às patentes, entre a Rheocast Corp., Fulmer Institute e a British Steel. (MARSH, 1982).

Por ser processada em particular estado semi-sólido, a pasta reofundida se presta para diferentes processos de conformação mecânica ou metalúrgica convencionais. Atualmente essa matéria prima é utilizada no processamento por injeção de ligas não ferrosas para a produção de componentes para a indústria aeronáutica e principalmente em tixo-injeção de componentes à base de ligas ALTHIX® da Aluminium Pechiney (IDEGOMORI, 1998) para a indústria automobilística.

KIRKWOOD (1996) apresenta com sucesso a fabricação de componentes mecânicos obtidos por processo de forjamento no estado semi-sólido (tixoforjamento) para metais de alto ponto de fusão (aços ferramentas e inoxidáveis). Para essa condição de tixoforjamento as pastas semi-sólidas são utilizadas em frações sólidas da ordem de 80%..

Uma das principais vantagens do processamento no estado semi-sólido principalmente para ligas não ferrosas é o fato do produto final apresentar excelente propriedade de estanqueidade, daí sua utilidade comercial na produção de tubulação de ar comprimido, válvulas diversas, distribuidor de fluido de freio e componentes do sistema de ar condicionado para automóveis, entre outros.

No Brasil, a reofundição vem sendo implantada na Magnetti Marelli/FIAT (Sumaré-SP) como nova tecnologia na produção de cilindros para injeção eletrônica em liga de à base de Al-Si-Mg, em substituição ao aço utilizado anteriormente e com grandes vantagens em relação ao processo anterior.

Entre outras vantagens do processamento de metais em estado semi-sólido em relação ao convencional destaca-se:

- obtenção de produtos com geometria muito próxima da forma final com redução de etapas no processamento e portanto uma maior produtividade;
- menores desgastes das matrizes por redução de atritos e por uso de menores temperaturas de processamento;
- menor consumo de energia (forças) necessária para conformação;
- redução de defeitos internos (inclusões e poros) e superficiais, porque o preenchimento dos moldes ocorre de maneira uniforme e sem turbulência;
- possibilidade de automatização do processo;
- economia de matéria prima, porque requer menor alimentação em relação à fundição sob pressão.

Outra aplicação dada às pastas reofundidas está na produção de materiais compósitos, uma vez que no estado semi-sólido, e por agitação da pasta, é possível a incorporação de outros materiais. PAI et al (1998), utilizando-se dessa tecnologia, obteve e processou compósitos de melhor qualidade, ou seja, melhor distribuição e reduzida macrosegregação das partículas de reforço utilizadas na composição do produto, na fabricação e redução do grau de porosidade no processo de tixotrofia do produto.

2.4 - Características de estruturas reofundidas

As pastas metálicas reofundidas, tem como principal característica o fato de apresentarem um comportamento viscoso particular. Quanto às suas características estruturais a pasta reofundida quando está entre a temperatura *liquidus* e a temperatura *solidus*, é constituída de uma fase primária sólida de morfologia globular com líquido envolvendo estes glóbulos sólidos (SPENCER, 1971).

A FIGURA 2.2, extraída de METALS HANDBOOK (1988) mostra, para comparação, como se apresenta a estrutura quando a solidificação da liga se dá por meios convencionais e também como ela se apresenta no estado reofundido. No estado sólido a liga reofundida apresenta a fase secundária com estrutura típica e correspondente à composição e à taxa de resfriamento a que ela foi submetida, então ela será composta de estruturas dendríticas finas ou eutéticas de

morfologia semelhante aquela em que a liga é solidificada convencionalmente, porém será refinada devido à velocidade de resfriamento à que ela é submetida. Assim o reofundido sólido típico é constituído de uma estrutura dupla: de glóbulos da fase primária envoltos por uma ou mais fases dendríticas finas.

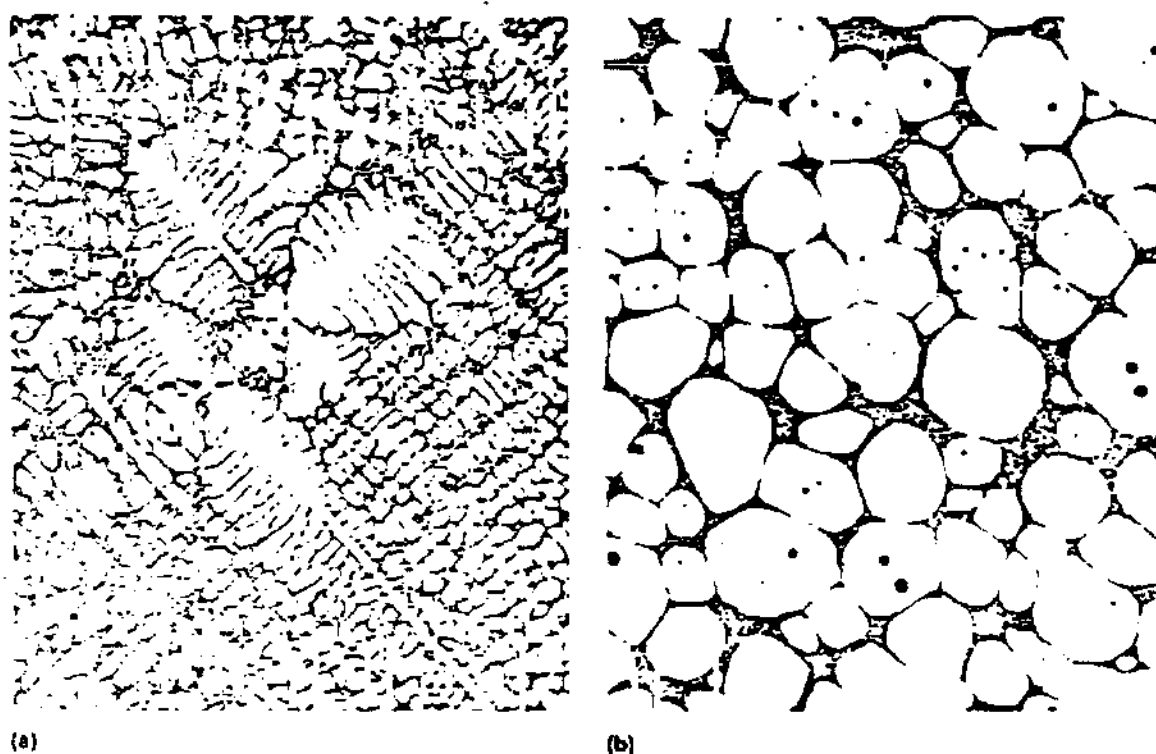


FIGURA 2.2 – Comparação de estrutura dendrítica fundida convencionalmente(a) e semisólida que não formou dendritas(b), microestrutura da liga de alumínio 357 (Al-7Si0,5Mg). Ambas a 200 X.

FONTE: Metals HandBook (1988). p.327

A quantidade relativa de glóbulos/dendritas presentes no reofundido irá depender da temperatura da qual a pasta foi trabalhada, isto é, da temperatura em que ela se encontrava dentro da faixa de solidificação quando então ela é rapidamente resfriada. O grau de esfericidade, o diâmetro médio e a variação dos glóbulos da fase primária, dependem da composição da liga e dos parâmetros envolvidos no processo de obtenção da pasta.

A principal característica dos materiais quando utilizados no estado semi-sólido é o seu comportamento reológico: quando está em repouso apresenta uma consistência sólida e estrutura de glóbulos imersos em líquido e no entanto, apresenta uma viscosidade que lhe confere

propriedades de escoamento não-newtoniano, ou seja, quando é submetido à tensões de cisalhamento esse sólido flui como um líquido viscoso, mas não ideal.

Porém, além do comportamento não-newtoniano, onde a relação tensão aplicada e a consequente deformação não é linear, o material semi-sólido ainda tem a peculiaridade de apresentar uma certa resistência inicial à deformação, isto é, a viscosidade aparente, que é o parâmetro utilizado para medir esse tipo de comportamento, além de depender da tensão aplicada, depende também do tempo decorrido após a aplicação da tensão, ou seja, para uma certa quantidade de tensão aplicada a pasta terá um certo valor de viscosidade aparente mas, se repentinamente esta tensão for modificada, a viscosidade não muda na mesma velocidade, é preciso um certo tempo após a mudança da tensão para que o novo valor da viscosidade aparente seja coerente com o novo valor da tensão aplicada, a este tipo de comportamento para escoamento dar-se o nome de tixotropia.

O valor da viscosidade aparente para estes fluidos está intimamente relacionado ao grau de coesão da estrutura interna do fluido e então, a coesão entre as partículas sólidas globulares é responsável pelo alto valor de viscosidade para o reofundido e esta é rompida somente para determinadas tensões aplicadas (KUMAR, 1994).

SPENCER (1972) em seu trabalho, relacionou valores de viscosidade aparente com a fração sólida presente na pasta para diferentes taxas de cisalhamento aplicadas, mostrados na FIGURA 2.3, extraída de ZOQUI (1995). Nela observa-se que para baixas frações sólidas a viscosidade é muito baixa, mas não ocorre proporcionalidade nesta distribuição, ou seja, para determinado valor atingido de fração sólida e para uma mesma taxa de cisalhamento, ocorre aumento significativo da viscosidade.

Observa-se também que para uma mesma fração de sólido presente no líquido, a viscosidade é fortemente dependente da taxa de cisalhamento aplicada, já que ocorre um decréscimo significativo nesta, quando há incremento da taxa de cisalhamento, provando também que estas pastas apresentam comportamento de escoamento para fluidos não-newtoniano.

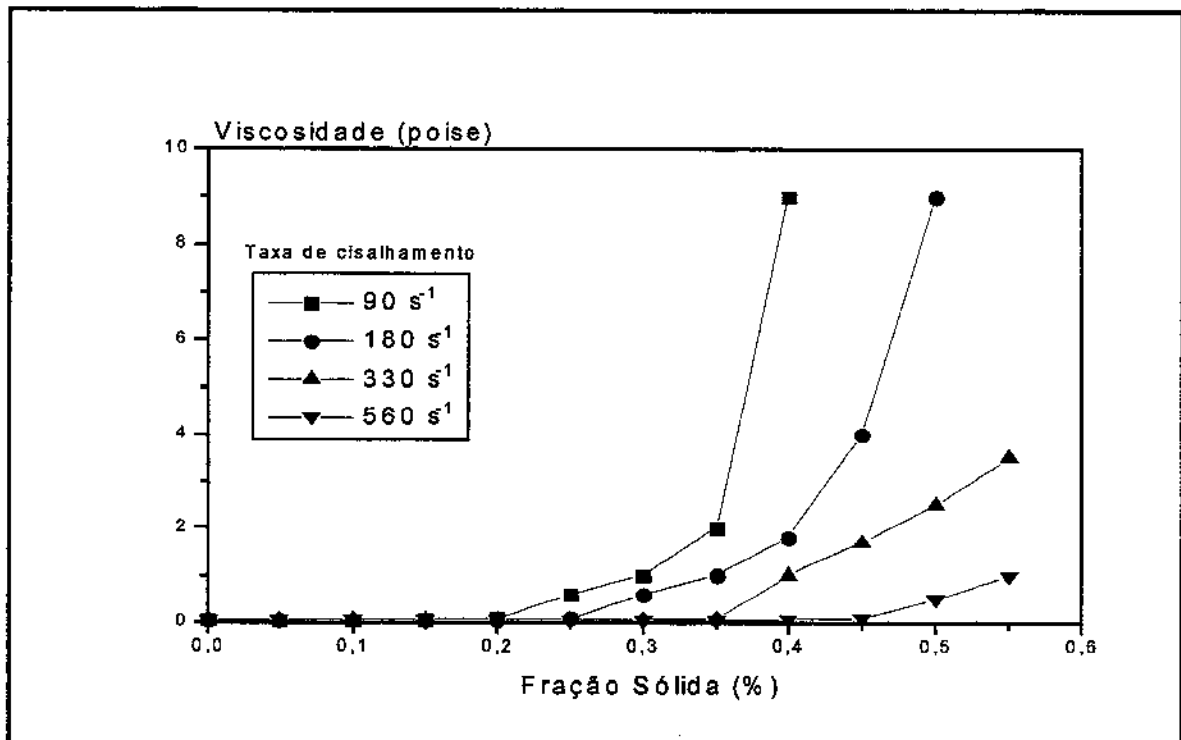


FIGURA 2.3 – Efeito da taxa de cisalhamento na viscosidade da liga Pb-15Sn em função da fração sólida na pasta reofundida.

FONTE: SPENCER (1972) p.1925

2.5 - Processos de fabricação de pastas reofundidas

Em resumo, a microestrutura dos materiais semi-sólidos de ligas binárias quando mantidas em uma temperatura entre a *liquidus* e a *solidus* é constituída de uma fase sólida primária globular, com tamanho médio do glóbulos entre 30 μm e 150 μm , envolvidos por uma fase secundária líquida de composição próxima à eutética. Esta estrutura pode ser obtida por interferência na nucleação ou no crescimento durante a solidificação, ou ainda por tratamentos térmicos especiais a partir de estrutura convencional, denominados de fusão parcial controlada. (ROBERT, 1993).

De um modo geral, a estrutura reofundida é obtida por processos que visam alterar a estrutura em formação (ou já formada) a partir do líquido, de dendrítica para globular. Estes processos são basicamente divididos em dois grupos distintos: aqueles em que o processamento se dá durante a solidificação e aqueles em que o processamento é posterior a solidificação. Os

mecanismos envolvidos para a ocorrência dessa mudança de estrutura são distintos para cada grupo.

2.5.1 - Por Interferência no processo de solidificação

Os processos envolvidos nesse grupo são aqueles em que a interferência pode ser na nucleação (quantidade de núcleos sólidos formados durante a solidificação do líquido a partir do repouso) e aqueles em que a interferência se dá no crescimento dos núcleos sólidos já formados.

A - Por interferência na nucleação

A interferência na nucleação consiste em aumentar a taxa de nucleação inicial por estímulos artificiais, isto é, aumentar a quantidade de núcleos formados, em função do tempo, para todo o volume do líquido, dessa forma o crescimento de dendritas é freado resultando uma estrutura de grãos muito finos e globulares. Esta estrutura ainda pode não apresentar fases sólidas secundárias, uma vez que o processo está associado à altas taxas de resfriamento e o soluto poderá ficar dissolvido na matriz supersaturada. Não é possível a obtenção de pastas portanto, porque ocorre a solidificação total do líquido: são obtidos tarugos ou lingotes que, se reaquecidos para posterior processamento tixotrópico, terá sua microestrutura super refinada transformada em uma pasta reofundida por difusão da fase secundária e ou parte da primária.

Exemplo para a estimulação da formação de núcleos se obtém reduzindo a energia necessária para formar esses núcleos, colocando-se refinadores de grão ou se promovendo a formação de núcleos em canais.

B - Por interferência no crescimento

A interferência no crescimento consiste em deixar a nucleação ocorrer normalmente e, quando a estrutura formada estiver evoluindo para a formação e crescimento de dendritas, entra-se com mecanismos que quebram a estrutura em formação para torná-la globular. São processos que de alguma forma irão interferir na formação dendrítica convencional durante a solidificação

do líquido, rompendo a estrutura em formação (dendrítica), tornando-se os fragmentos dendríticos globulares por mecanismos de engrossamento naturais ou forçados.

De acordo com as condições de processamento da pasta a partir do sólido em crescimento, poderá a estrutura resultante para o reofundido obtido, apresentar morfologia de transição dendrita-glóbulo ou ainda irregularidades na morfologia da fase sólida ao longo do volume, ou seja, regiões em que a estrutura é totalmente globular e regiões em que ela será constituída de dendritas grosseiras não totalmente transformadas.

Essas técnicas de interferência basicamente consistem em agitação do líquido durante determinados estágios da sua solidificação. Conforme ilustra a FIGURA 2.4, a agitação pode ser contínua: a partir da temperatura *liquidus* até que a solidificação é interrompida e a pasta vazada a uma temperatura dentro da faixa de solidificação, ou ainda, poderá ser isotérmica: a agitação é feita à uma temperatura constante e por um determinado tempo dentro da zona *solidus/liquidus* seguido do vazamento da pasta.

As frações de sólido e líquido presentes na pasta serão função da temperatura em que foi feita ou interrompida a agitação. Logo após o vazamento a pasta deverá sofrer um rápido resfriamento evitando-se o crescimento dendrítico da fase sólida globular formada.

Para esses processos é permitido o controle da fração líquida desejada, pois é possível interromper o processo e vazar a pasta a qualquer temperatura dentro da zona pastosa; produz-se tarugos ou lingotes para posterior reaquecimento e tixo-conformação ou ainda poderá ser a pasta imediatamente utilizada após o vazamento; esse tipo de produção de pastas pode ser de maneira contínua ou estanque; todos esses processos implicam em modificar a estrutura por quebra das dendritas em formação incentivando a multiplicação cristalina (FLEMINGS, 1977).

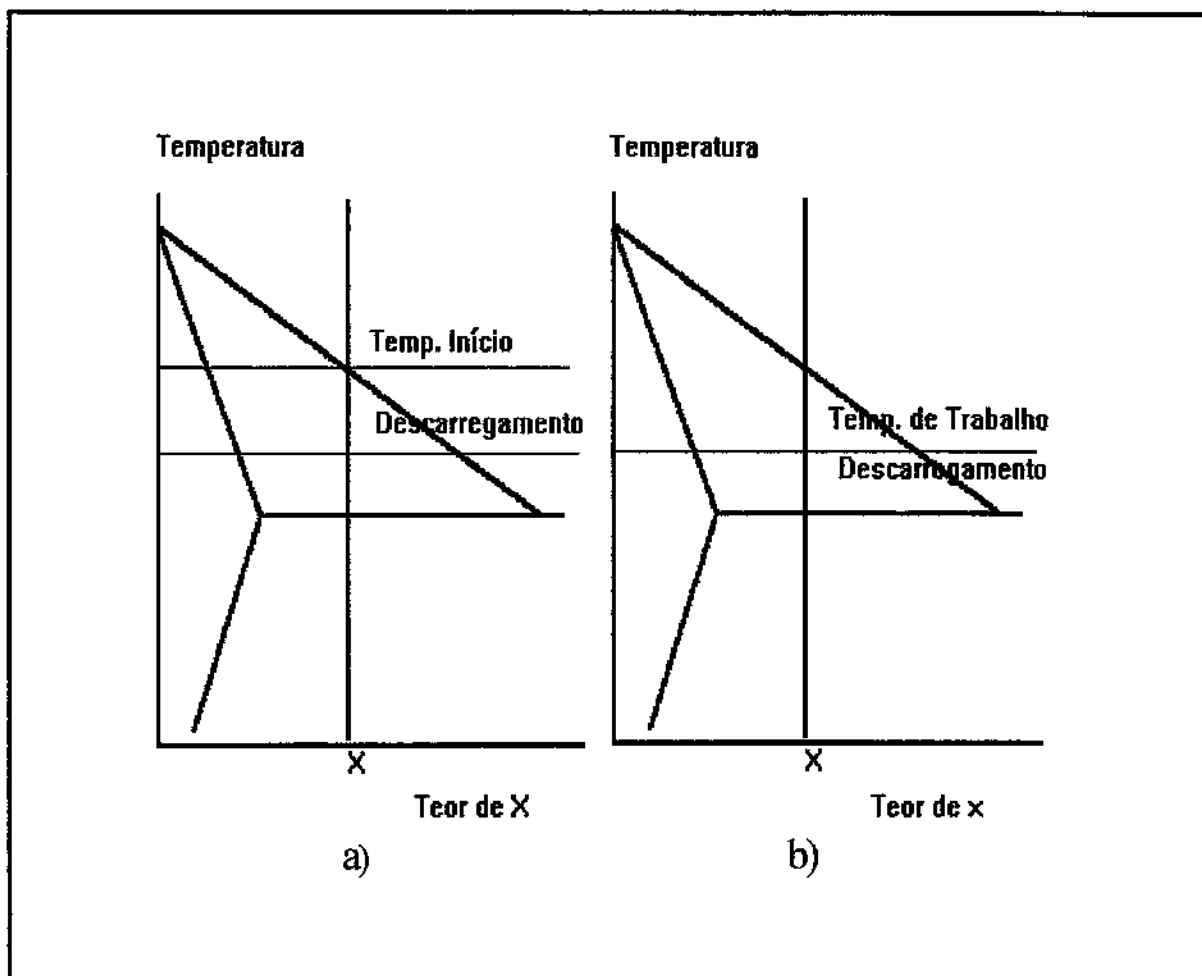


FIGURA 2.4 – Esquema da obtenção de pastas reofundidas por interferência na solidificação:
a) processo de agitação contínua;
b) processo de agitação isotérmico.

FONTE: ZOQUI (1995). p.84.

2.5.2 - Por tratamentos térmicos especiais após a solidificação

Estes processos, também conhecidos como por fusão parcial controlada, tem o princípio básico em alguns dos mecanismos responsáveis pela formação da estrutura reofundida em processos envolvendo a agitação, quais sejam: dobramento de ramos secundários, separação e engrossamento desses ramos por fenômenos de coalescência ou de Ostwald ripening. Consiste basicamente em deformar previamente a frio a estrutura do metal fundido convencionalmente e durante a recristalização esta dará lugar uma estrutura de grãos dendríticos refinados que então

quando reaquecidos numa temperatura acima da *solidus*, resulta numa pasta composta por partículas sólidas esferoidizadas numa matriz líquida.

2.6 - Métodos de obtenção de pastas envolvendo agitação

Conforme foi exposto anteriormente (item 2.1), SPENCER (1972) obteve pastas reofundidas utilizando-se da técnica de agitação do líquido desde o início da solidificação. Constatou que o movimento convectivo do metal líquido durante o resfriamento da liga, resultava no refino e na alteração morfológica dos cristais sólidos formados. Os primeiros equipamentos projetados serviam para agitação da pasta por meios mecânicos (WINTER & TILER, 1980). Hoje são conhecidos diversos processos e equipamentos utilizados para a agitação do líquido em solidificação principalmente por agitação eletromagnética (VIVES, 1992) de ligas de baixo e médio ponto de fusão (BUBENIK, 1998). Atualmente a produção de pastas reofundidas é basicamente por meio de agitação eletromagnética .

2.6.1 - Agitação mecânica

O Viscosímetro de Coutte foi o primeiro equipamento utilizado para a obtenção de pastas reofundidas de ligas Pb-Sn nos trabalhos iniciais, utilizado por SPENCER (1972) quando este estudava o comportamento viscoso dessas ligas, e em seguida utilizado por muitos outros pesquisadores. Na FIGURA 2.5 é mostrado um esboço simplificando do equipamento.

Consiste basicamente em um cadinho refrigerado contendo em seu interior um cilindro, concêntrico com seu próprio eixo, de modo que apenas um estreito espaço anelar poderá ser ocupado pelo metal líquido. O líquido é vazado no viscosímetro à temperatura adequada, sendo iniciada a rotação no cadinho com o eixo central mantido em estado fixo. Devido ao pequeno espaço existente entre o cadinho e o eixo central (3–9mm), as forças cisalhantes atuando no líquido são quase que uniformes provocando consequentemente modificação completa da estrutura resultante do líquido solidificado (FLEMINGS, 1976); o cadinho e o cilindro são revestidos internamente com materiais refratários e ainda apresentam chanfros usinados verticalmente que previne a ausência de atrito durante a rotação aumentando significativamente o

cisalhamento; a velocidade de cisalhamento ideal e já testada está entre 700 e 1100RPM; a partir deste equipamento muitos outros foram inventados à sua semelhança na busca de melhorar a operacionalidade e aumento da produtividade.

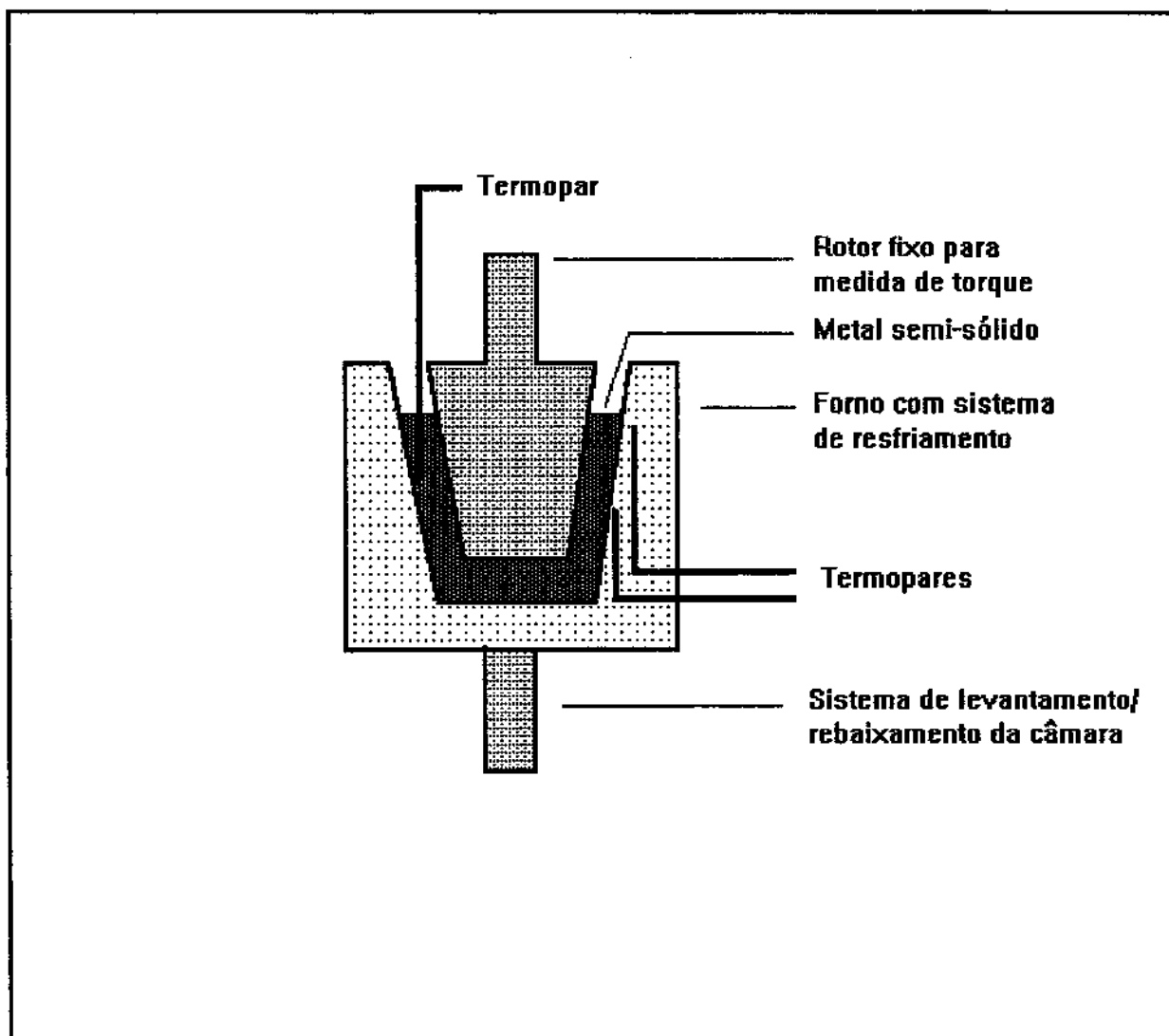


FIGURA 2.5 – Desenho simplificado de reator para produção de pastas reofundidas por agitação mecânica

FONTE: SPENCER (1972), p.1926.

FOGAGNOLO (1996) projetou e construiu um agitador mecânico com a finalidade de produzir compósitos por inserção de partículas não metálicas na pasta semi-sólida que não é possível nos agitadores com rotores por causa da pequena espessura da região preenchida por líquido. O uso de pás como meio de agitação se mostrou mais eficiente para este caso. As pás são

acopladas em um eixo, este acoplado a um motor com velocidade controlada, são imersas no banho líquido e iniciado a agitação pelo tempo e a velocidade desejada enquanto é adicionado o reforço durante a solidificação do metal.

Entre as desvantagens da produção de pastas reofundidas por meio de agitadores mecânicos está a deficiência de controle dos parâmetros envolvidos, necessidade de revestimentos nas paredes de contato com o metal em agitação para prevenir a erosão, contaminação do metal pelo contato com o agitador, baixo volume de processamento e, normalmente, tem-se heterogeneidade da estrutura final da pasta obtida.

2.6.2 - Agitação eletromagnética

O sistema de agitação eletromagnética vem sendo preferido para a produção de pastas reofundidas porque apresenta vantagens significativas em relação aos sistemas por agitação mecânica utilizados anteriormente. A principal vantagem é a ausência de contato entre o metal líquido e o meio de agitação, além de que a produção é estanque ou poderá ser contínua com pouca alteração na estrutura do equipamento. A limitação do processo reside na obtenção de tarugos de grandes diâmetros.

Nesse tipo de processo a agitação do líquido em solidificação é promovida por ação de um campo magnético produzido após a energização de bobinas dispostas em torno do eixo de simetria do cadinho de modo que correntes elétricas são induzidas em toda a secção do metal líquido gerando forças magnéticas que promovem forte agitação do líquido, rompendo a estrutura dendrítica em formação, estimulando dessa forma a multiplicação cristalina seguida de globularização e conseqüentemente obtendo-se uma pasta reofundida.

O movimento do líquido é regido pela força de *Lorentz* (*F*): GRIFFITHS & McCARTNEY (1997).

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

(1)

onde:

J = densidade de corrente

B = intensidade do campo magnético

Na FIGURA 2.6 é mostrado um esboço simplificando do equipamento patenteado por WINTER & TILER (1980) e utilizado para obtenção de pastas reofundidas por agitação eletromagnética do líquido. Basicamente ele é constituído de uma câmara superior, onde é mantido o metal líquido, e uma câmara inferior refrigerada, onde é vazado o líquido à temperatura desejada e é processada a reofundição. A câmara inferior é refrigerada para que se possa fazer o controle da temperatura de modo a se obter a fração sólida desejada na saída do reator além do que deverá ser construída em material não magnético (cobre, aço inoxidável não magnético ou materiais cerâmicos). A refrigeração também irá retirar o calor gerado pela passagem de corrente elétrica no metal, eliminando o risco de se fundir a pasta além da fração sólida estipulada. O campo magnético deve ser mantido em toda a extensão da zona de solidificação, para impedir o crescimento convencional dos núcleos formados.

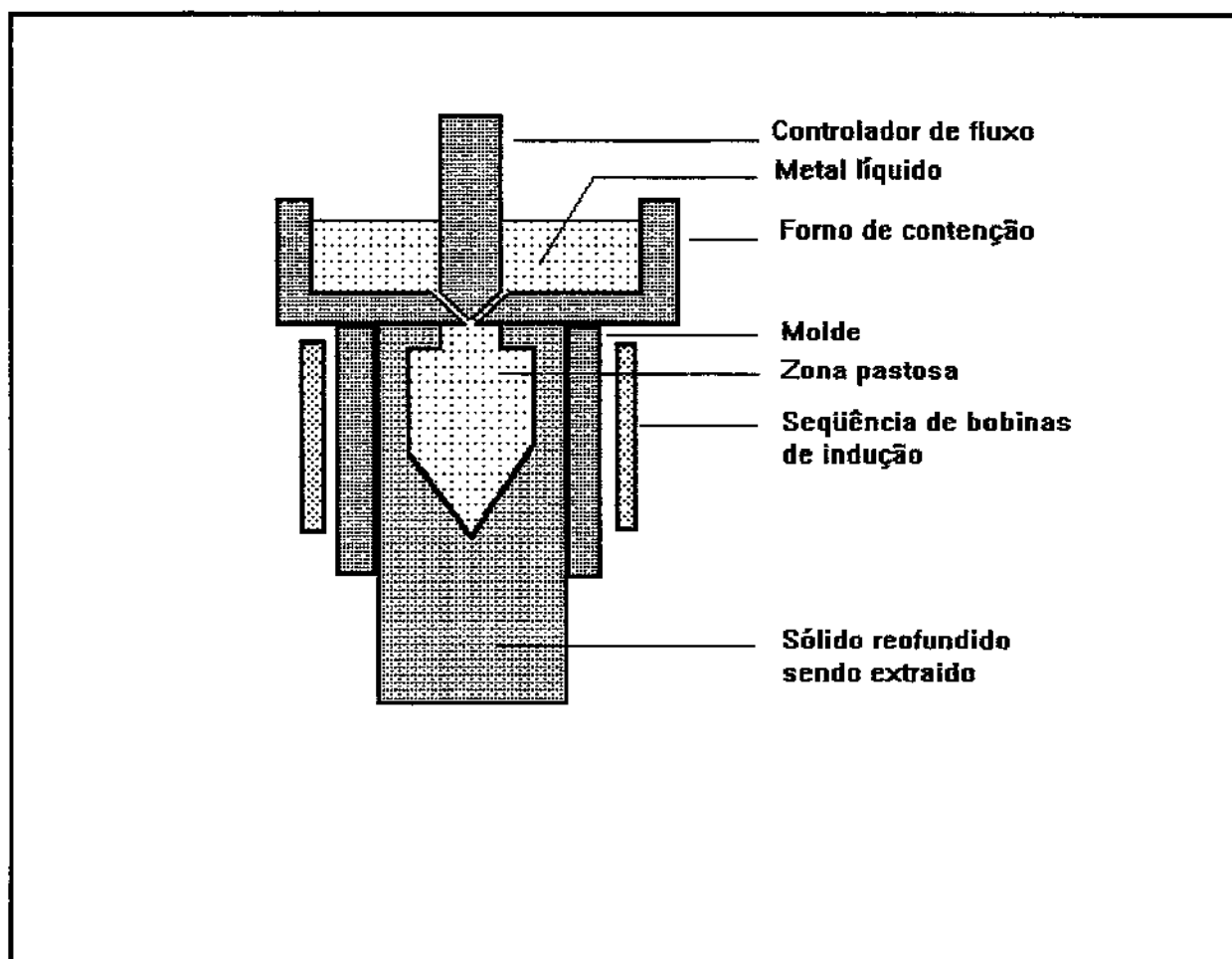


FIGURA 2.6 – Desenho simplificado de reator para produção de pastas reofundidas por agitação eletromagnética.

FONTE: WINTER & TILER (1980) p.1

Na FIGURA 2.7 é mostrado o esquema de agitação eletromagnética para processamento contínuo de pasta semi-sólida. O princípio de funcionamento do sistema é semelhante ao de WINTER, a diferença é que o metal líquido já está contido em um cadinho que é movimentado para baixo para processamento da reofundição. A temperatura do metal fundido é mantida por um forno colocado na parte superior do equipamento e a velocidade de descida do cadinho passando pelas bobinas de indução é que irá determinar o tempo de agitação do líquido e o controle da taxa de resfriamento durante a agitação. A temperatura de agitação ou de descarregamento poderá ser determinada a partir do diagrama de equilíbrio da liga a processar, pela regra da alavanca ou pela Equação de Scheil e esta temperatura é que irá determinar a fração sólida final da pasta. Logo abaixo do motor de indução é posicionado um eficiente sistema de resfriamento para interrupção instantânea da fração de líquido restante da solidificação.

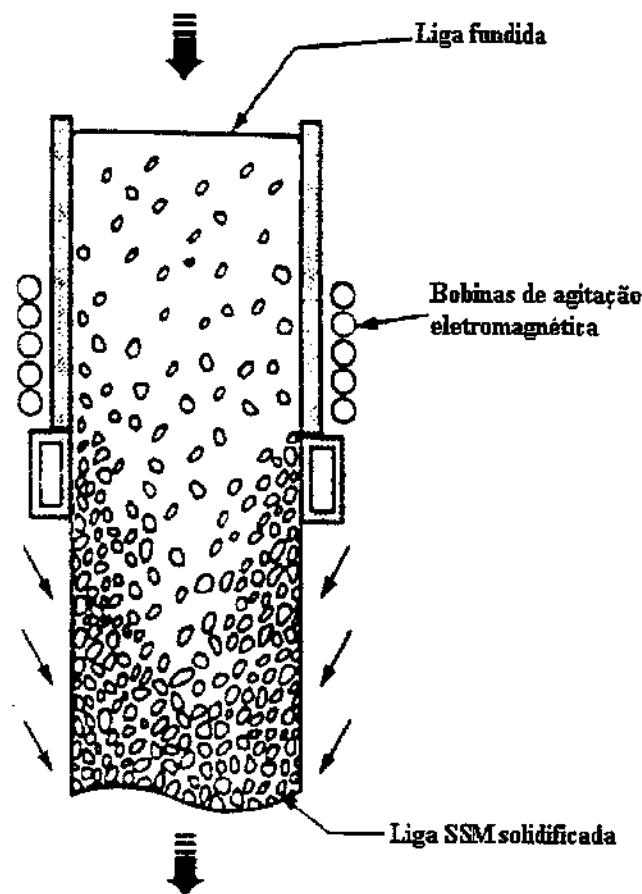


FIGURA 2.7 – Esquema de processamento de pasta semi-sólida por agitação eletromagnética contínua.

FONTE: STUART & FLEMINGS (1993) p.38

O processo, de aparente facilidade operacional, apresenta limitações quanto ao volume de material a ser produzido porque a agitação vigorosa só ocorre para uma estreita faixa de líquido próxima às paredes do molde já que ocorre uma rápida queda das correntes induzidas, da periferia para o centro do lingote, portanto se não houver um controle adequado do procedimento operacional, ao final do processamento esse lingote apresentará estrutura reofundida apenas na sua periferia. Porém o reduzido volume produzido é compensado pela possibilidade do processamento contínuo.

2.7 - Influência dos parâmetros na estrutura obtida por agitação eletromagnética

A FIGURA 2.8 apresenta estrutura da liga AA2011 obtida após agitação eletromagnética em processo estanque para agitação normal por um tempo de 230s e taxa de resfriamento de 18,6°C/min por BUBENIK (1998). O autor obteve estrutura parcialmente reofundida com dendritas bastante fragmentadas e diâmetro médio da ordem de 115µm.

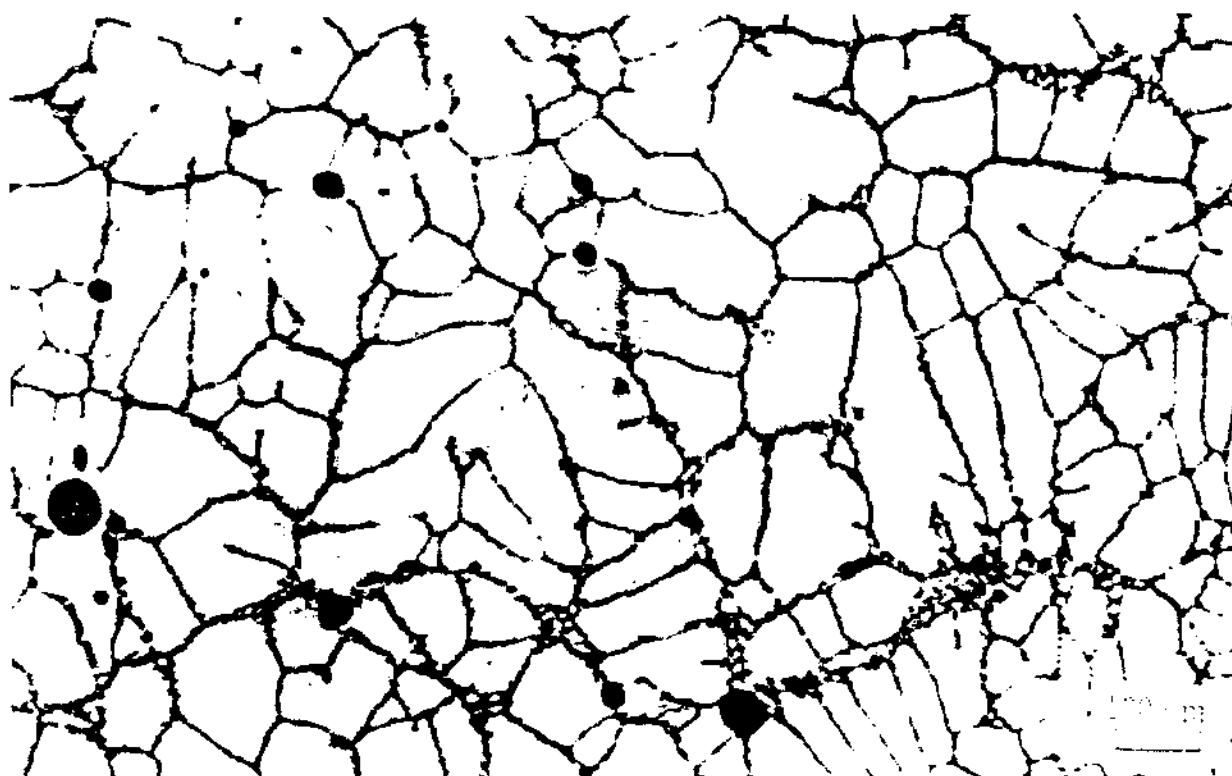


FIGURA 2.8 – Estrutura parcialmente reofundida obtida por agitação eletromagnética.

FONTE: BUBENIK (1998), p.105

A taxa de resfriamento pode ser considerada como o principal parâmetro de influência no tamanho médio das partículas da fase primária. WAN & SAHM (1990) em seus experimentos, constataram que aumentando-se o tempo de agitação e diminuindo-se a taxa de cisalhamento e a taxa de resfriamento para a liga Pb37Sn, resulta em aumento do tamanho médio das partículas sólidas da fase primária. Os autores explicam essa ocorrência como sendo o resultado dos fenômenos de engrossamento promovidos por choques entre partículas sólidas, uma vez que baixas taxas de cisalhamento provocam maiores aglomerações das partículas sólidas, seguido de coalescência e por mecanismos de Ostwald “ripening”, ambos incentivados pelo aumento de interações entre partículas com o aumento do tempo, mas os autores reforçam que a taxa de resfriamento é o parâmetro de maior influência no tamanho final da fase sólida primária da pasta reofundida obtida em processos envolvendo agitação.

MURAKAMI et al (1992) observou que altas frequências significam alta densidade de corrente na periferia do lingote, gerando altas velocidades de aquecimento nesta região e portanto, baixa eficiência de agitação, formando-se uma estrutura reofundida não homogênea. Para baixas frequências tem-se uma maior homogeneidade de temperaturas através do lingote originando estruturas mais homogêneas.

VIVES (1992) observou que para baixas velocidades de agitação o tempo de resfriamento durante a solidificação da liga Sb21Sn é diminuído em comparação ao resfriamento sem agitação e que aumentando-se a velocidade de agitação o fenômeno ocorre inversamente: o tempo de resfriamento aumenta significativamente comparado ao tempo de resfriamento da liga sem a presença de agitação.

A forma geométrica das partículas da fase sólida presentes na pasta reofundida governa o seu comportamento reológico. Portanto a morfologia da fase primária na matéria prima para a reofundição ou tixotrofia deve ser tal que forneça rápida globularização quando do aquecimento para obtenção do estado pastoso. LOUÉ & SUÉRY (1995) constataram que a estrutura inicial da pasta, para uma liga Al-Si7Mg obtida por agitação eletromagnética, necessita de um tempo mínimo de 5 minutos para a completa globularização da estrutura inicial quando submetida ao tratamento térmico de fusão parcial controlada. Na FIGURA 2.9 é mostrado a

estrutura da liga Al-Si7Mg0.6 em um lingote de 75mm de diâmetro obtido por agitação eletromagnética contínua no estado como obtida e, após curto tempo de reaquecimento ao estado semi-sólido à uma temperatura de 580°C e resfriado rapidamente, obtido na Aluminum Pechiney por GARANT et al (1998).

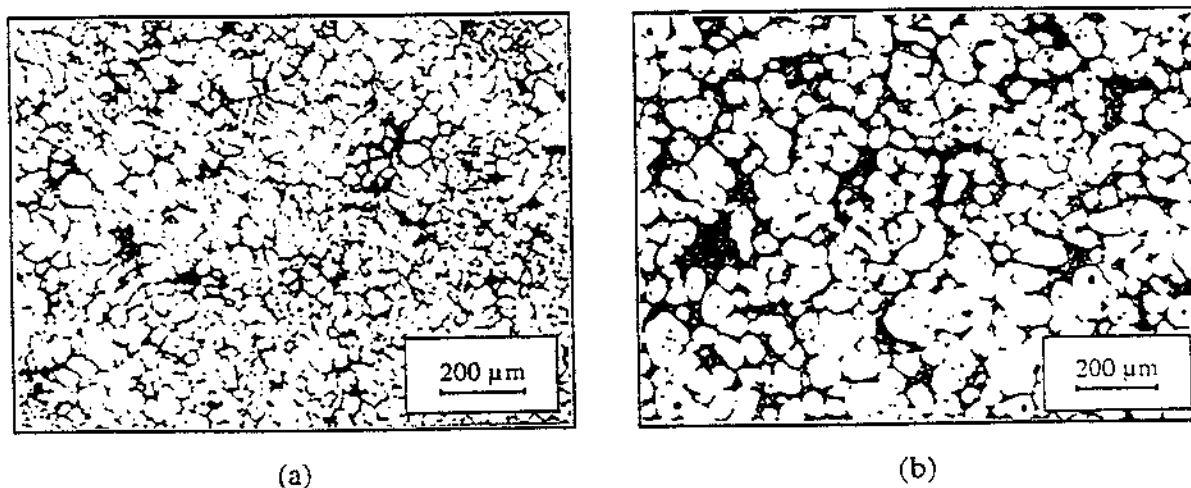


FIGURA 2.9 – Microestrutura da liga Al-Si7Mg0.6 em lingote de 75mm obtido por agitação eletromagnética (a) e (b) após reaquecimento para o estado semi-sólido a 580°C e resfriamento rápido.

FONTE: GARANT et al (1998), p.201

Outro aspecto interessante é que a matéria prima para tixoconformação tenha as menores dimensões para as partículas da fase primária para que ao final do processamento a estrutura final do produto tenha a fase primária globular e com menores diâmetros. Este fator é determinante para implementação da reofundição na obtenção de produtos antes obtidos por processos convencionais, porque tem muita influência nas propriedades mecânicas do produto tixoconformado.

A manipulação dos parâmetros envolvidos no processo de obtenção de pastas reofundidas por agitação eletromagnética se faz necessária para obtenção de matéria prima reofundida com melhores características microestruturais e propriedades mecânicas para posterior tixoprocessamento e obtenção de produtos competitivos.

CAPÍTULO 3

Procedimento Experimental

3.1 - Liga metálica utilizada

A liga metálica escolhida para atestar a eficiência do equipamento projetado e construído na obtenção de estruturas pré-reofundidas será a liga AA2011 (American Aluminium Association) adquirida no mercado e já disponível no laboratório onde os testes serão realizados. A composição química da liga escolhida é apresentada na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 - Composição química da liga AA2011 utilizada nos testes do equipamento.

Elemento	Al	Cu	Mg	Zn	Cr	Si	Mn	Fe	Ti
% wt	95,043	4,806	0,002	0,001	0,003	0,040	0,002	0,074	0,002

É uma liga com bastante utilização em diferentes trabalhos científicos dentro da reofundição. Tem sido muito utilizada por ser uma liga de baixo ponto de fusão (facilidade de operação/manipulação) e com grande potencial de aplicação em processos industriais de conformação no estado semi-sólido, principalmente na indústria aeronáutica e automobilística (EISEN, 1998).

A faixa de solidificação da liga utilizada foi determinada utilizando-se um equipamento marca Netzsch-Gerätebau de Análise Térmica Diferencial onde, em função da curva de aquecimento e da curva de resfriamento do material, apresentadas na FIGURA 3.1, ficou estabelecido como sendo a temperatura *liquidus* a 633°C e a temperatura *solidus* a 617°C.

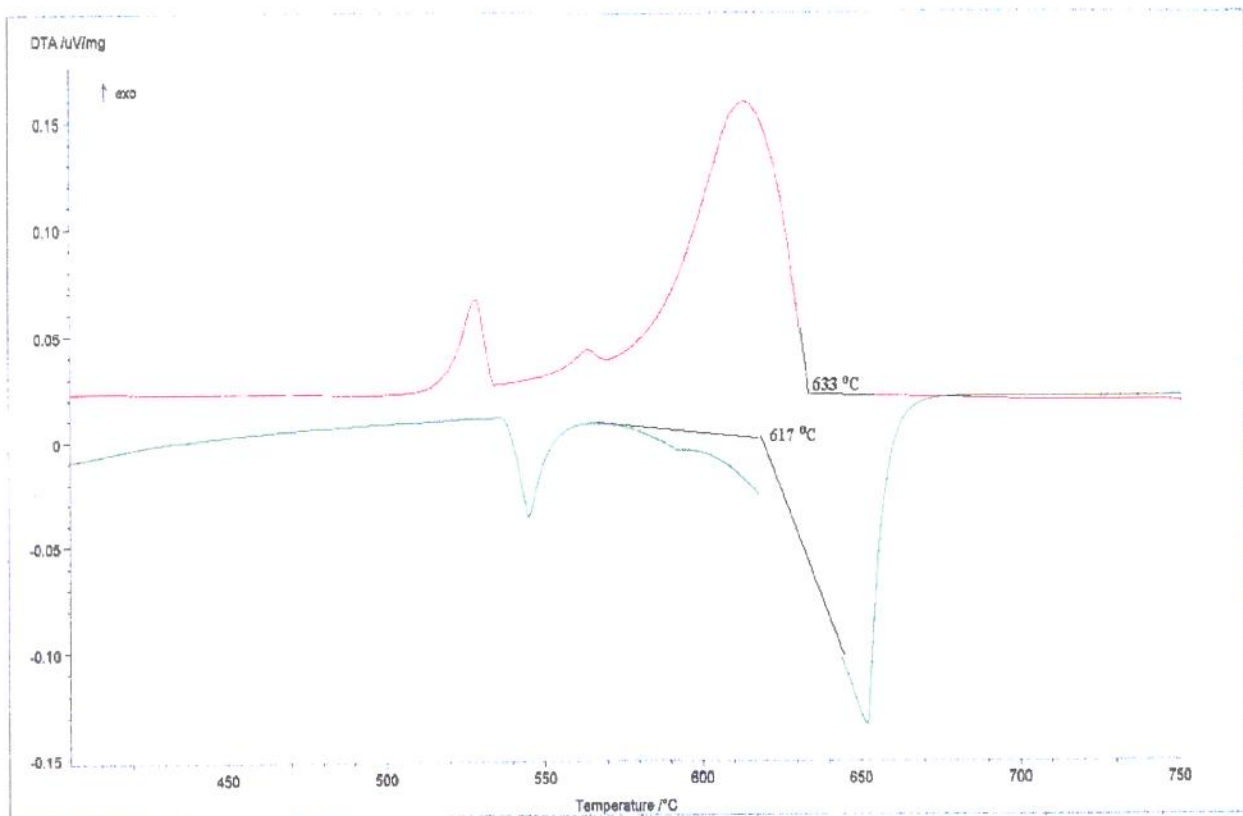


FIGURA 3.1 – Análise Térmica Diferencial da liga Al-4,8wt%Cu. Os valores de temperatura destacados referem-se às temperaturas *solidus* e *liquidus* da liga.

A liga utilizada é denominada hipoeutética e a microestrutura esperada à temperatura ambiente em condições de equilíbrio é, para o caso das ligas fundidas convencionalmente, dendritas contínuas da fase primária Al- α envoltas por uma rede descontínua do eutético.

Na condição reofundida essa microestrutura deverá apresentar a fase primária α com morfologia tendendo a forma globular.

3.2 - Estrutura de referência

Para atestar a real eficiência do equipamento na produção de lingotes com estrutura apropriada para o uso em processos de conformação no estado semi-sólido, é preciso comparar a estrutura da pasta obtida após a agitação eletromagnética com a estrutura obtida após a solidificação convencional da liga.

O procedimento utilizado para se conhecer a estrutura resultante da solidificação convencional da liga será o mesmo utilizado para obtenção da estrutura reofundida: a liga é fundida em forno auxiliar, é vazada na lingoteira que é içada para posicionamento dentro do forno de espera e se procede o lingotamento contínuo. A diferença é que neste caso o sistema de agitação não é acionado, mas a liga é resfriada nas mesmas condições da pasta resultante após a agitação eletromagnética. Dessa forma será possível analisar o grau de globularização da pasta obtida no equipamento projetado e construído.

3.3. – Planejamento experimental

A FIGURA 3.2 mostra o organograma das condições de processo que serão utilizadas para avaliação do desempenho do equipamento em produzir pasta reofundidas.

Nota-se que os ensaios serão realizados em duas etapas distintas: na primeira etapa serão obtidas as amostras com estrutura dendrítica, que a partir desse momento serão denominadas de “Fundidas”, e na segunda etapa serão obtidas as amostras com estrutura resultante da agitação eletromagnética, que serão denominadas de “Reofundidas”. A primeira etapa será realizada ainda quando o sistema de potência estiver sendo implantado na construção do equipamento.

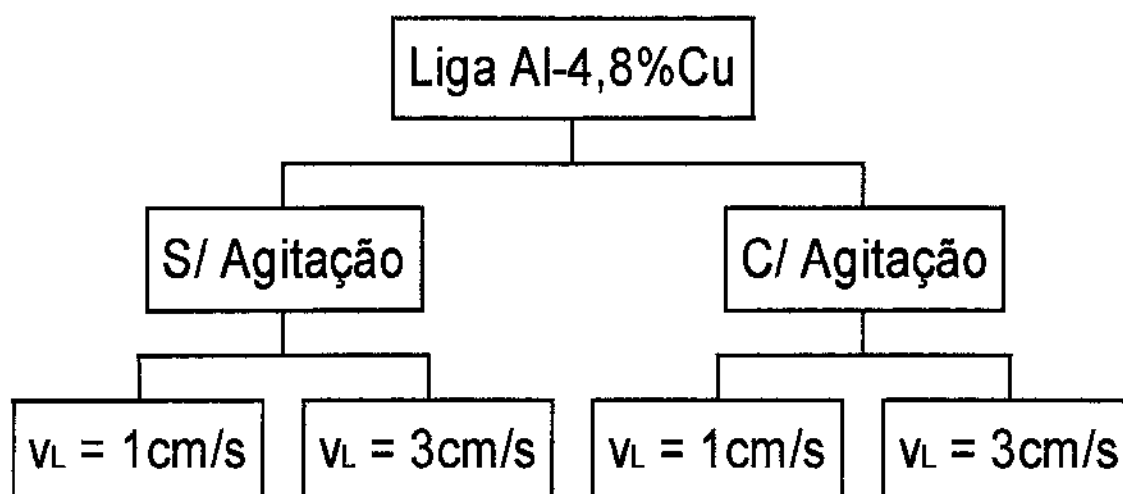


FIGURA 3.2 – Organograma do trabalho a ser executado.

Para ter certa validade estatística dos resultados obtidos nos ensaios, estes serão realizados em uma sequência definida após o sorteio das condições envolvidas (velocidade de lingotamento) em cada condição (com e sem agitação), desta forma têm-se uma completa aleatorização na obtenção das amostras.

O planejamento experimental adequado para o trabalho proposto é o PAN (planejamento aleatorizado por níveis) onde têm-se dois níveis de ensaios (sem agitação e com agitação) e apenas uma variável de influência (velocidade de lingotamento). A TABELA 3.2 demonstra quais serão as variáveis de resposta analisadas para os dois níveis de ensaios realizados.

TABELA 3.2 – Variáveis de resposta analisadas nos dois níveis de ensaios realizados.

	Fundidas	Reofundidas
Tamanho de glóbulo		X
Espaçamento interdendrítico secundário	X	
Fator de forma		X
Fração sólida	X	X

Em função do equipamento ser novo e da faixa de erro de leitura que é tolerada nos instrumentos de medição a serem utilizados na construção do equipamento, fica estabelecido um intervalo de confiança em 85% para os resultados das medições feitas das variáveis de resposta.

Para cada condição (4 no total) de experimento serão ensaiadas três réplicas, totalizando 12 experimentos. As réplicas são numeradas de 1 a 6 dentro de cada condição, sendo:

- 1, 2 e 3 para $V_L=1\text{cm/s}$ e
- 4, 5 e 6 para $V_L=3\text{cm/s}$.

A TABELA 3.3 demonstra a sequência em que os ensaios serão realizados, após o sorteio da réplica, nas duas condições.

TABELA 3.3 – Sequência em que os ensaios serão realizados.

Condição	Sequência
Fundidas	3 – 6 – 2 – 5 – 1 – 4
Reofundidas	3 – 5 – 2 – 1 – 4 – 6

3.4. – Análise Metalográfica

Os lingotes produzidos com agitação e sem agitação deverão apresentar altura máxima em torno de 450mm. Serão seccionados em três pontos distintos para a retirada de amostras que possam ser utilizadas para análises macrográficas e micrográficas e que representem a estrutura ao longo do comprimento do lingote. Aqui deverá haver o cuidado em descartar o efeito provável do rechupe originado pelo vórtice da agitação, então as amostras foram retiradas em posições conforme indicadas na FIGURA 3.3.

As amostras retiradas dos lingotes terão altura de 1,5cm e serão cortadas em policorte com disco metalográfico para metais não ferrosos e sob intensa refrigeração. Em seguida todas elas serão preparadas na face transversal referente ao lingote e em toda a secção do diâmetro. Esta face será lixada inicialmente em lixa d'água com grana 180 e utilizando a técnica de lixamento convencional as amostras serão lixadas para obtenção de uma superfície plana até 600 mesh.

Em seguida todas as amostras serão lavadas com detergente e atacadas com reativo para ligas Al-Cu na faixa de 1 a 10%Cu (15ml de HF; 4,5ml de HNO₃; 9ml de HCl e 271,5ml de água destilada) e então serão fotografadas para análise macroestrutural quanto à morfologia, tamanho e distribuição dos grãos ao longo dos lingotes obtidos na condição sem agitação e dos lingotes obtidos na condição com agitação.

Na mesma face em que será feita a macrografia nas amostras, será feita, em seguida, a micrografia. Para tanto as amostras serão relixadas em lixa de grana 180, para retirada da camada corroída pelo reagente químico no ataque da macrografia e prosseguirá o lixamento dessa face até

1200 mesh seguindo o polimento eletrolítico com eletrólito II (800ml de etanol; 140ml de H₂O e 60ml de HClO₄) sob uma corrente de 1A e por um tempo determinado de 17 segundos.

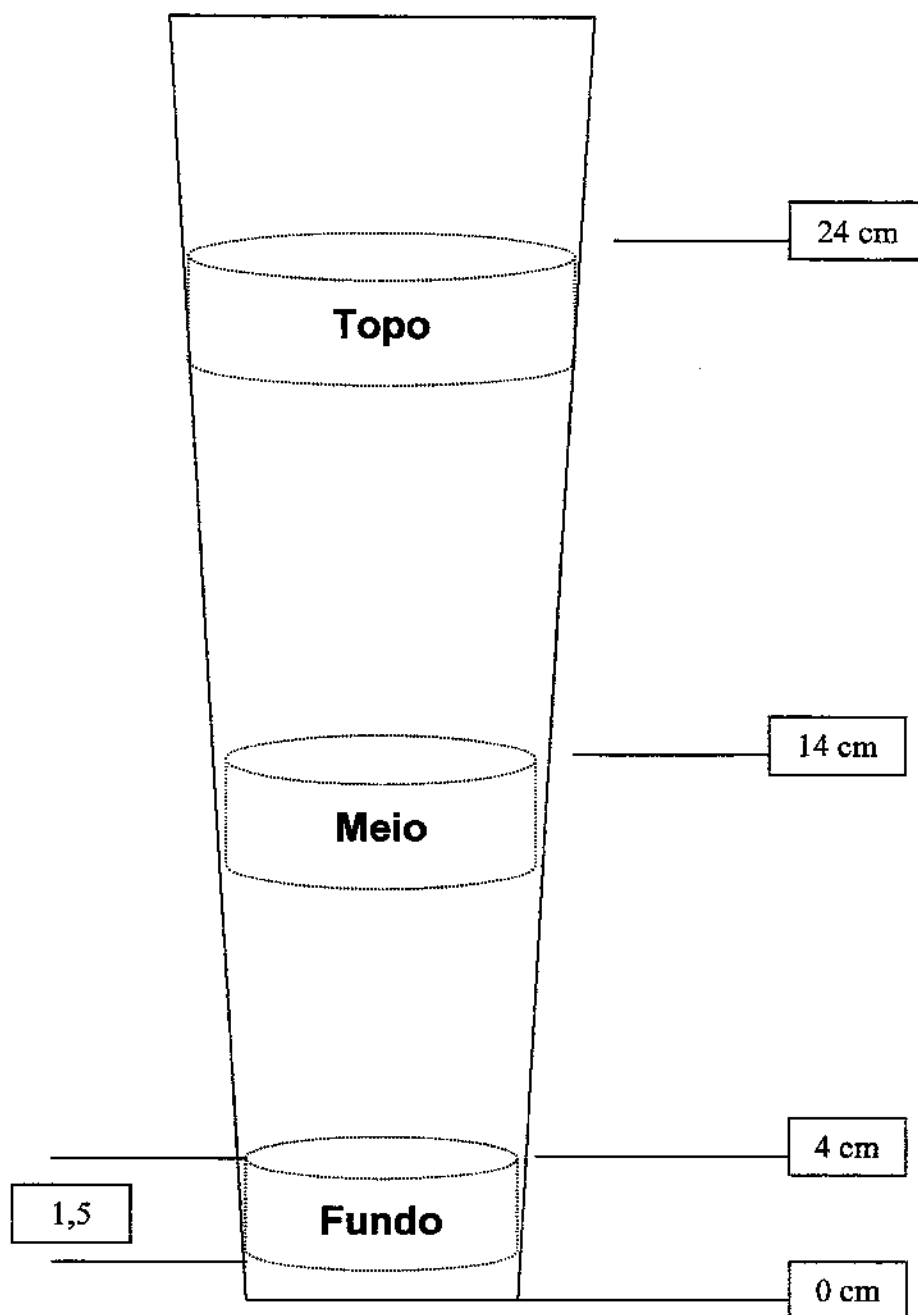


FIGURA 3.3 – Desenho esquemático do lingote a ser obtido demonstrando onde serão retiradas as amostras para a análise metalográfica.

Um sistema automático de análise de imagens acoplado com um microscópio metalográfico do tipo Neophot será utilizado para aquisição de fotomicrografias de todas as amostras e para caracterização microestrutural da estrutura dos lingotes obtidos sem agitação (espaçamento interdendrítico secundário) e da estrutura dos lingotes obtidos com agitação (fração de líquido, diâmetro médio e fator de forma dos cristais da fase sólida primária).

O espaçamento interdendrítico secundário será medido ao microscópio óptico, com o auxílio do software do analisador de imagens. Manualmente (com o mouse) é traçada uma reta interceptando pelo menos 3 ramos secundários, no analisador é obtido o comprimento médio e o desvio padrão das retas traçadas e manualmente esse valor é dividido pelo número de ramos incluídos obtendo-se um valor médio para o espaçamento entre eles. O procedimento será repetido 7 vezes ao longo da estrutura na região analisada do lingote.

A quantidade de segunda fase presente na estrutura dos lingotes será calculada diretamente pelo analisador de imagens que separa esta fase por diferenciação do tom de cinza no aspecto da imagem da microestrutura captada pela câmara digitalizadora do sistema, no entanto o analisador não diferencia a segunda fase dos poros existentes na estrutura, mascarando em alguns casos os valores obtidos.

O tamanho médio dos glóbulos será obtido pelo método da intersecção linear em segmentos de 100mm vistos em baixo aumento ao microscópio óptico (25,6X a 72X). Serão efetuadas 7 contagens para os três segmentos gravados na lente, totalizando 21 contagens por amostra.

O fator de forma é calculado no analisador de imagens como sendo o quanto a forma geométrica da partícula no plano se aproxima da forma de uma esfera, ou seja, se o valor encontrado for igual a 1 significa que a partícula tem a mesma forma globular de uma esfera mas se o valor vai se distanciando de 1 significa que a partícula tem forma geométrica cada vez menos parecida com a de uma esfera. No analisador de imagens esse valor estará um tanto comprometido se os glóbulos não apresentarem seu contorno definido, explicando melhor: se um cristal tiver comunicação com o vizinho por falha no contorno que os separa, o analisador conta estes como sendo apenas um cristal, mascarando o resultado final.

CAPÍTULO 4

Projeto e Construção do Equipamento para Agitação Eletromagnética

4.1- Objetivo

O principal objetivo a ser alcançado é o desenvolvimento e a construção do equipamento de agitação eletromagnética com a finalidade de se ter um sistema completo e operacional para a produção de pastas reofundidas por agitação eletromagnética, simulando um processo de lingotamento semi-contínuo para ligas de alumínio. O equipamento deverá ser eficiente na produção de tarugos com diâmetro médio de até 80mm e com estruturas pré-reofundidas.

4.2- Descrição Geral do Equipamento

O equipamento construído é constituído por uma lingoteira cilíndrica em perfil cônico, um forno de espera para manutenção do metal no estado líquido dentro da lingoteira, um conjunto indutor (sistema de bobinas de indução), um sistema de jatos de água para o resfriamento direto do produto reofundido obtido, além do sistema de acionamento da subida/descida e sustentação da lingoteira composto por: guias em perfil U, cabo de aço inoxidável acoplado ao eixo de um redutor movimentado por um motor de corrente contínua e passando por uma polia posicionada na parte superior do conjunto.

Também fazem parte do equipamento controladores de temperatura para o forno de espera, um sistema elétrico/eletrônico que controla a potência induzida no conjunto indutor, um sistema elétrico/eletrônico que controla a velocidade do motor de acionamento do movimento ascendente e descendente da lingoteira e um sistema de aquisição de dados para se determinar a temperatura de início do lingotamento bem como monitorar as temperaturas ao longo do lingote durante a

processo de agitação.

A FIGURA 4.1 ilustra o esquema geral do equipamento projetado e construído e a FIGURA 4.2 ilustra as dimensões básicas envolvidas. Na FIGURA 4.3 é mostrado o esquema geral dos circuitos elétricos e eletrônicos montado em diagrama de blocos.

4.3- Descrição das partes constituintes

O equipamento projetado e construído é constituído dos seguintes componentes:

- Estrutura de sustentação;
- Lingoteira;
- Guias da lingoteira;
- Conjunto posicionador da lingoteira;
- Forno de espera;
- Conjunto indutor;
- Sistema de resfriamento;
- Sistema de potência;
- Sistema de aquisição e controle de dados.

4.3.1- Estrutura de sustentação

A estrutura de sustentação suporta todo o sistema de lingotamento semi-contínuo e foi construída com cantoneiras do tipo perfil estrutural em aço carbono 1020 e dimensões 50x55x5mm. Basicamente, esta estrutura constitui-se de 4 barras (cantoneiras) de 2,7m de altura fixadas em forma quadrada por cantoneiras de 0,5m e pés reguláveis para nivelamento do conjunto. Os componentes (forno de espera e conjunto indutor) são suportados em prateleiras construídas na altura correspondente à posição destes e na parte inferior da estrutura foi montado uma saia feita com chapas de aço carbono 1020, com medidas de 0,5m de largura por 1m de altura, para garantir a proteção do(s) operador(es) contra eventuais vazamentos de metal líquido

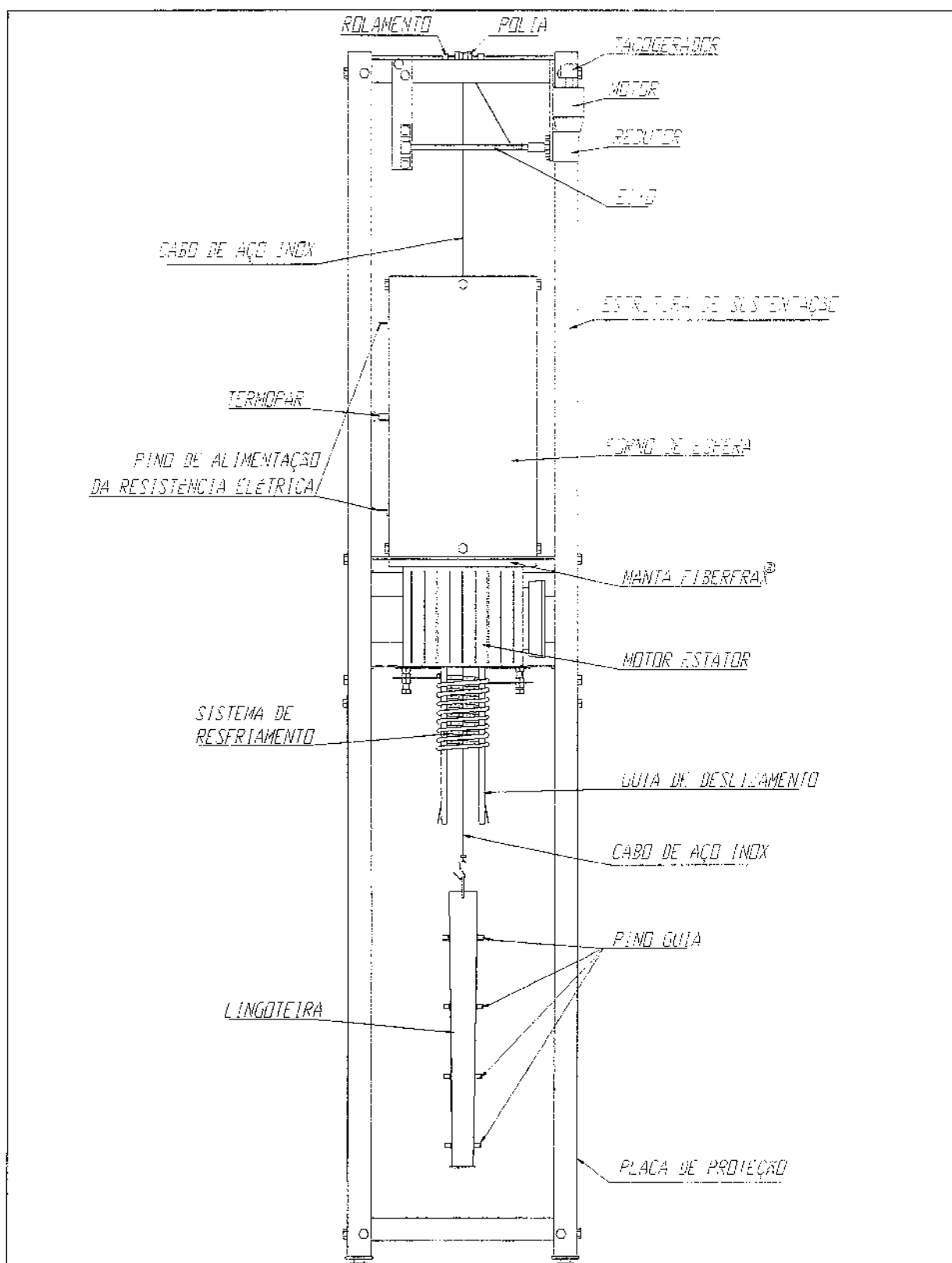


FIGURA 4.1 –Desenho esquemático do equipamento projetado e construído.

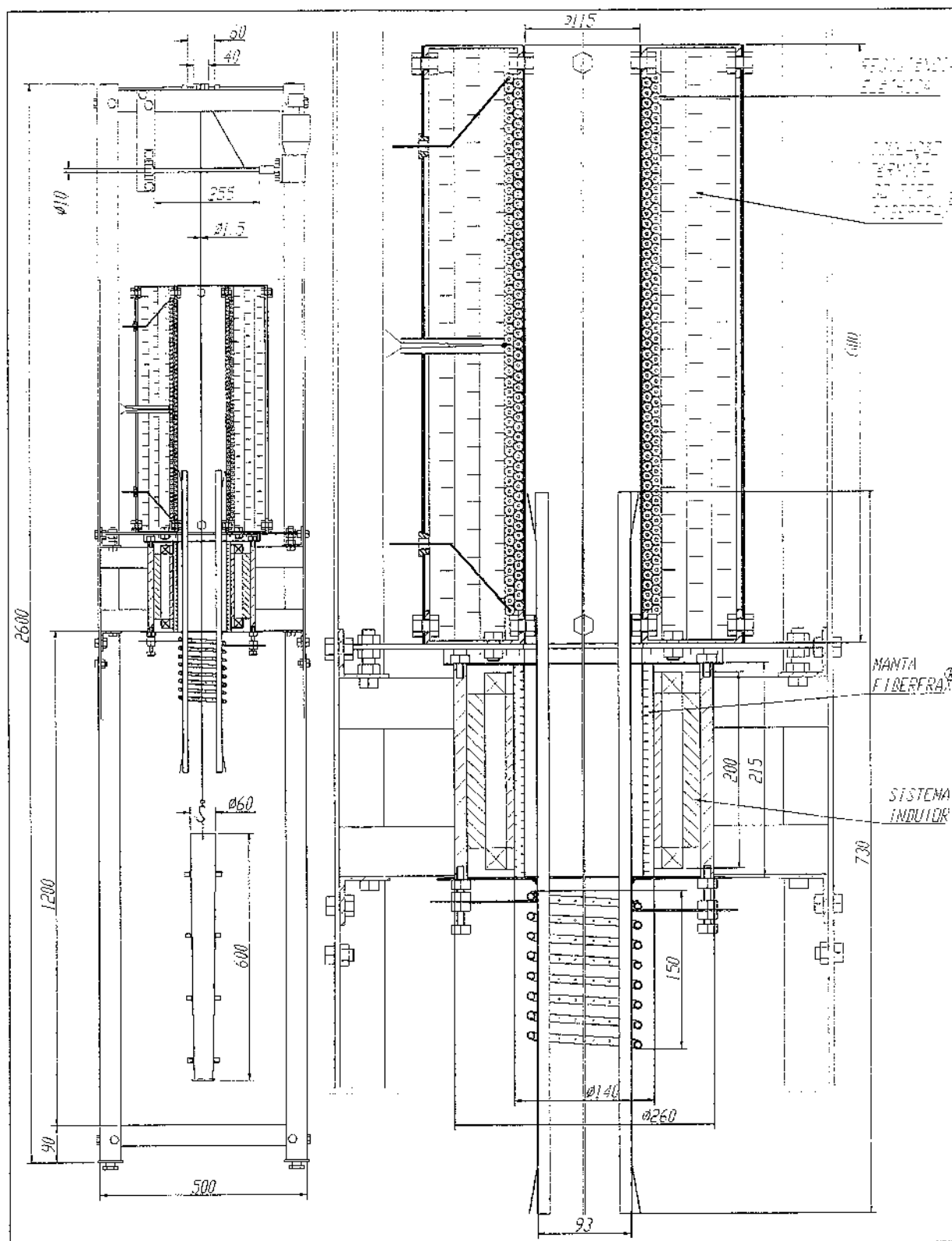


FIGURA 4.2 – Desenho esquemático com as dimensões básicas do equipamento projetado e construído.
(em milímetros).

durante a agitação e respingos de água durante o resfriamento. Em nenhum momento na montagem desta estrutura de sustentação utilizou-se de soldagem para junção das partes, ou seja, todas as fixações foram feitas com parafusos de rosca métrica M20 em furos passantes nas junções das cantoneiras e assim sendo torna-se fácil e prático a desmontagem e ou adaptações a serem feitas no equipamento.

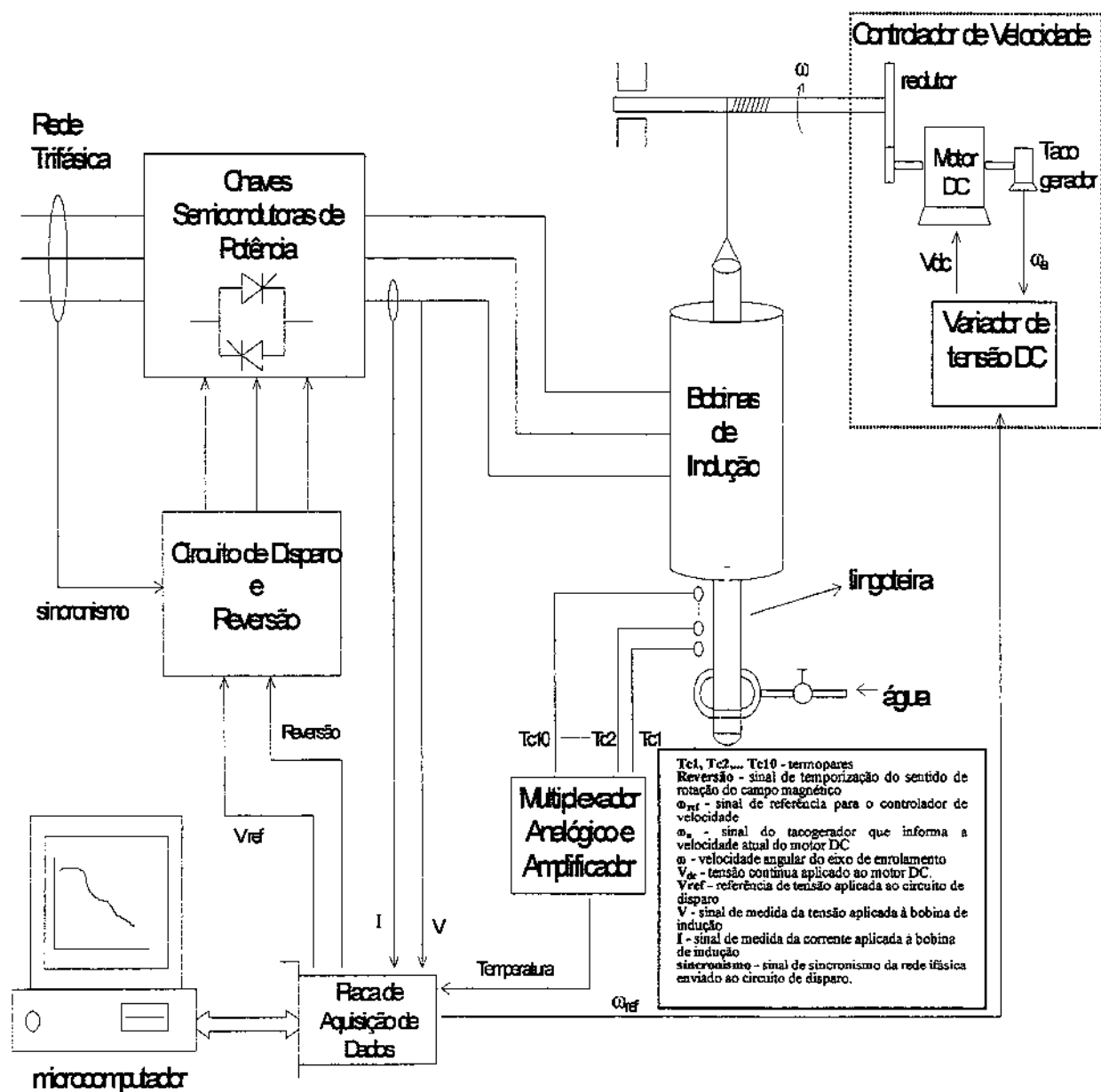


FIGURA 4.3 – Diagrama em blocos dos circuitos elétricos e eletrônicos para o equipamento projetado e construído.

A FIGURA 4.4 demonstra esquematicamente a estrutura do equipamento, conforme descrita anteriormente, com suas dimensões características.

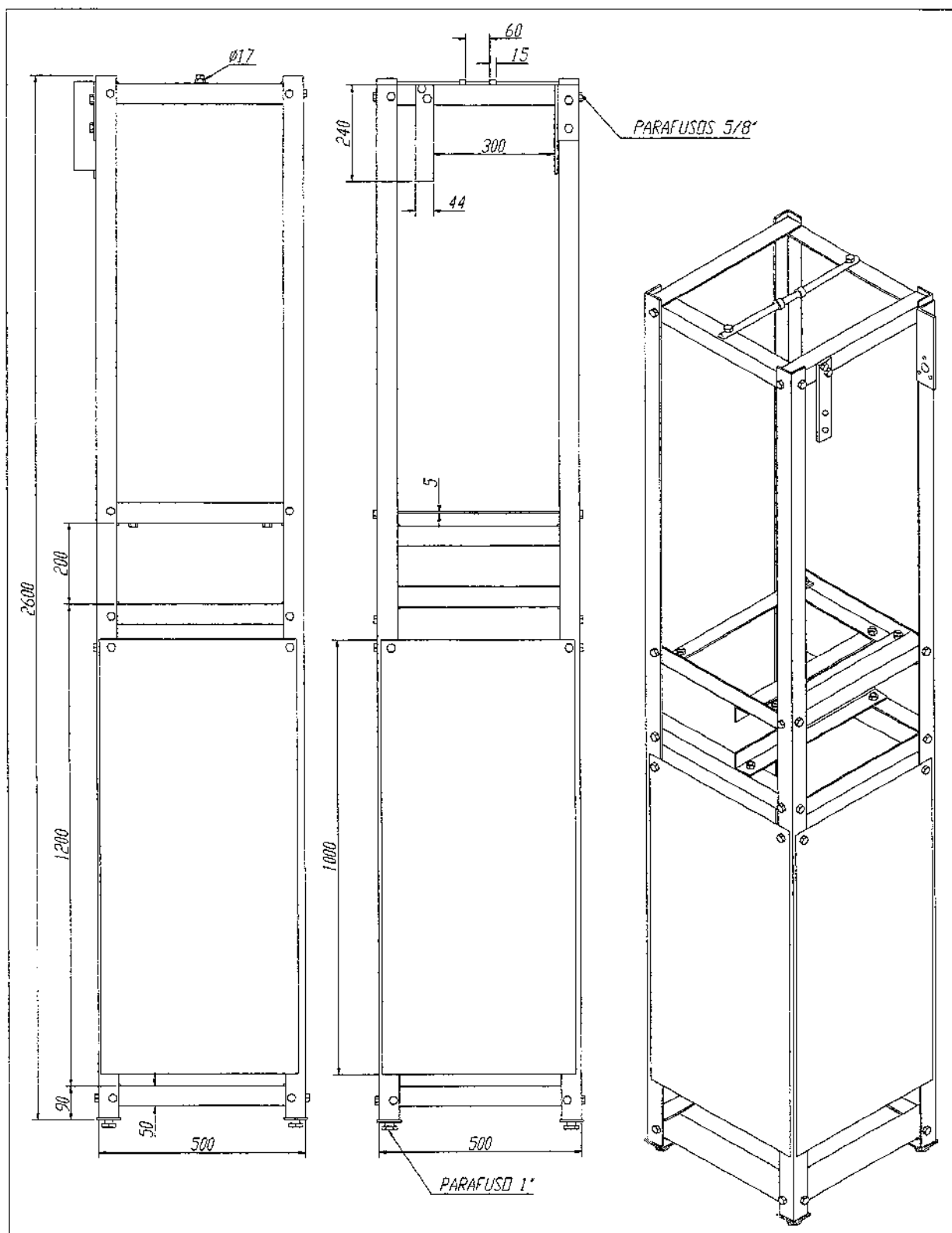


FIGURA 4.4 – Desenho esquemático com as dimensões da estrutura do equipamento projetado e construído. (em milímetros).

4.3.2- Lingoteira

A lingoteira foi projetada com um comprimento mínimo (600mm) para simular um lingotamento contínuo e conter uma quantidade mínima de metal líquido (1400cm^3). Após vários testes iniciais quanto a estanqueidade do metal líquido (alumínio) contido e a desmoldagem do lingote fundido, optou-se pela construção de uma lingoteira cônica confeccionada com chapa de aço inóx austenítico 304 (não-magnético) de 1,5mm de espessura. A utilização do aço inóx austenítico se deu pelo fato de que o material da lingoteira deveria resistir até altas temperaturas e não interferir nas direção das forças geradas pelo campo magnético. A construção se deu a partir da calandragem da chapa para a obtenção de um tubo com o diâmetro mínimo estipulado de 45mm e dentro do tubo obtido é inserido um macho cônico maciço fabricado em aço carbono 1010 com $0,7^\circ$ de conicidade e 700mm de altura, resultando o diâmetro máximo possível de 60mm para a lingoteira. A secção do diâmetro na área superior, que fica faltando na calandragem, é retirada de um outro tubo com diâmetro maior feito na calandra com a mesma chapa e então o fechamento é feito, no lado externo, com solda TIG. 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 e evitar a rotação da lingoteira. A FIGURA 4.5 mostra o desenho esquemático da lingoteira projetada e construída.

O diâmetro máximo da lingoteira é limitado pelo diâmetro livre de 80mm no sistema indutor. Na parte superior da lingoteira foi feito dois furos paralelos e opostos onde é passado um cabo de aço para formação de uma alça para sustentação da mesma. Na parte inferior, a lingoteira é fechada com um fundo do tipo tampão, fabricado também em aço inóx austenítico, e travado com pinos metálicos, não magnéticos, em três posições opostas, desta forma, na extração do lingote fundido, basta a retirada dos pinos travas e do fundo para que se tenha acesso ao fundo do lingote e, eventualmente, utilizar-se de forças externas em auxílio à desmoldagem.

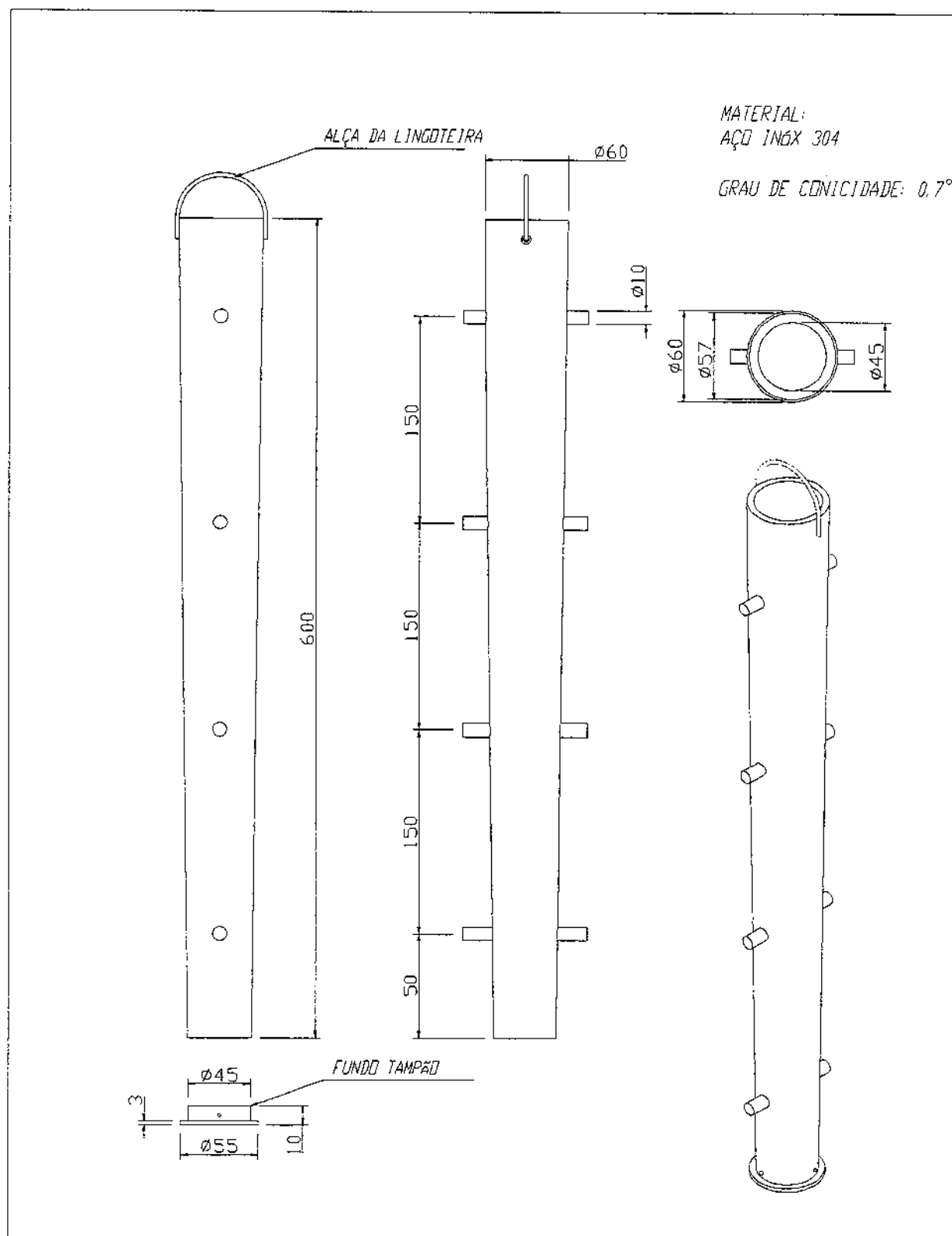


FIGURA 4.5 – Desenho esquemático da lingoteira do equipamento projetado e construído.
(em milímetros).

A confecção da lingoteira a partir de chapa se justifica em razão de que a usinagem de um perfil cônico interno em um tubo ou barra de aço vai encarecer o projeto devido ao maquinário exigido, dado o grau de dificuldade para a usinagem em máquinas convencionais. O macho fabricado, posteriormente pode ser utilizado para conferir a forma cônica original da lingoteira, já que esta sofre alterações dimensionais e geométricas decorrentes do superaquecimento durante o processamento.

4.3.3- Guias da lingoteira

Quando é acionado o sistema de agitação, há uma tendência lógica de que a lingoteira, em movimento descendente, venha a girar no sentido do campo magnético induzido. A FIGURA 4.6 mostra o desenho esquemático do sistema projetado e construído utilizado como guia que impede o movimento de rotação da lingoteira e ainda funciona para o perfeito posicionamento central da mesma no campo magnético. Este sistema é bastante simples, sendo construído com barras de perfil estrutural em U de aço baixo carbono e sua fixação e regulagem é feita por duas chapas finas soldadas na própria guia e presas na parte inferior e superior do sistema de agitação. As pontas das guias são fabricadas da tal forma a facilitar o perfeito encaixe inicial dos pinos da lingoteira no início do movimento na subida e na descida.

4.3.4 - Conjunto posicionador da lingoteira

O conjunto posicionador nada mais é do que um sistema composto de um motor de corrente contínua acoplado a um redutor, um cabo de aço inoxidável (para evitar a oxidação) com diâmetro de 1,2mm, um eixo de comprimento 400mm e diâmetro de 10mm acoplado à saída do redutor, para enrolamento do cabo de aço e uma roldana com perfil em V girando livre em um eixo fixado na estrutura. O motor, adquirido no mercado, tem tensão máxima de 24volts/DC, corrente de 6A, rotação máxima de 300RPM e torque de 3,5Nm (suficiente para levantar e baixar a lingoteira com 2,5kg da liga).

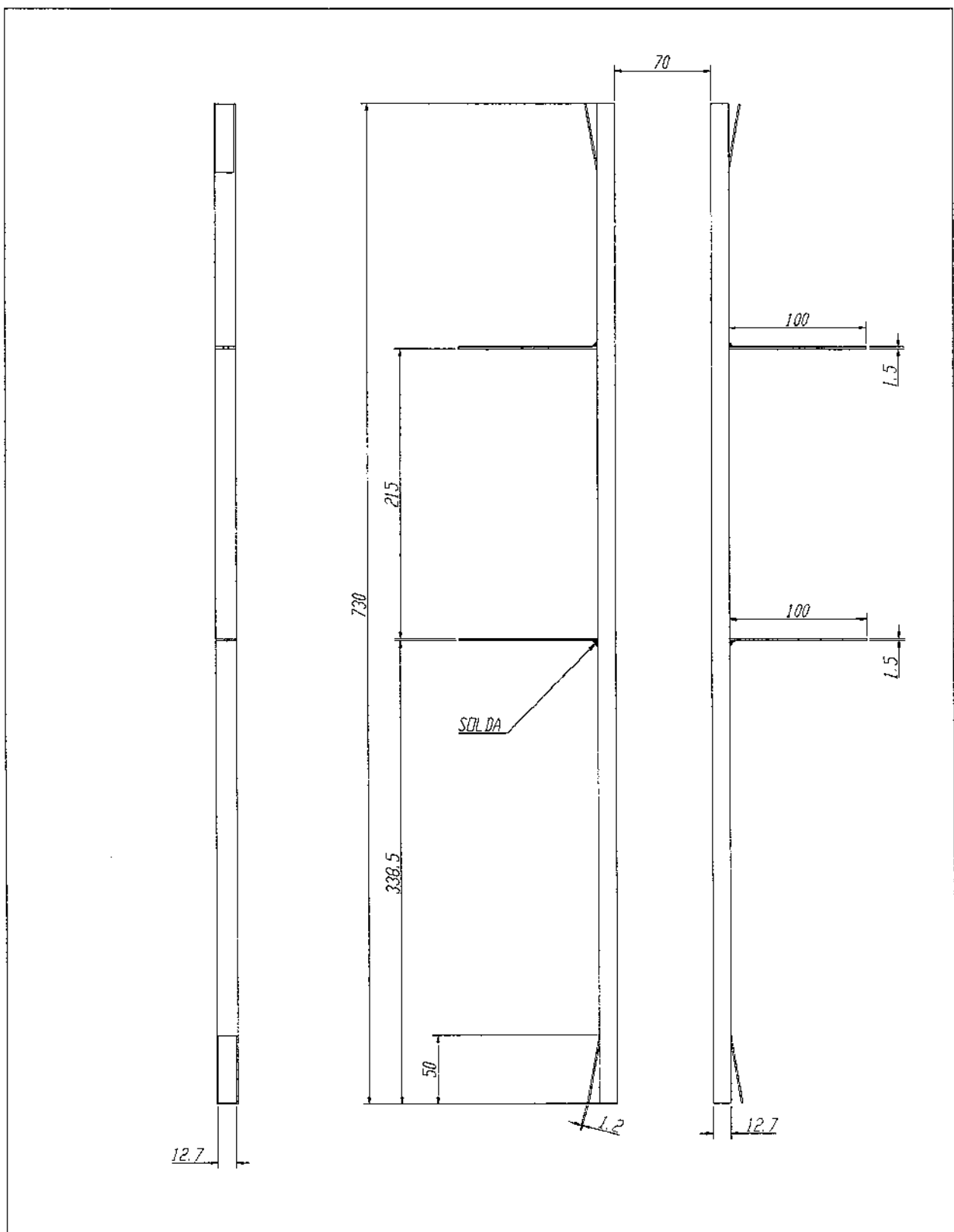


FIGURA 4.6 – Desenho esquemático do sistema de guias da lingoteira do equipamento projetado construído. (em milímetros).

O cabo de aço, tem uma extremidade presa no eixo de enrolamento, na extremidade próxima ao acoplamento com o eixo de saída do redutor, passa pela polia e é suspenso verticalmente, no centro do equipamento e, transpassando todo o conjunto e mais abaixo do que as guias, é mantido esticado por uma massa de 2,5kg, ou a própria lingoteira, presa por um gancho fixo à outra extremidade do cabo. A FIGURA 4.7 demonstra o esquema descrito acima. Esta é a posição de repouso do conjunto.

Quem controla o motor é uma placa especialmente desenvolvida para esta aplicação que pode receber o set-point de velocidade manualmente ou via micro computador. Através de um variador, por pontos, da tensão é permitido ao operador variar imediatamente a velocidade de rotação do motor para a máxima, necessária no momento da subida e posicionamento da lingoteira dentro do forno de espera, e controlar com precisão a velocidade do movimento descendente da lingoteira (desde 5 até 30mm/s), permitindo dessa forma que seja propiciado tempos diferentes de agitação do metal em solidificação na passagem pelo sistema indutor. Portanto é necessário que o motor seja passível de funcionamento também no sentido contrário da rotação normal, ou seja, o funcionamento do eixo da saída do redutor deverá ser tanto no sentido horário quanto no sentido anti-horário, sendo que o cabo de aço é enrolado no mesmo no movimento de subida e desenrolado no movimento de descida da lingoteira.

Quanto à polia utilizada no sistema, esta serve apenas para guiar o cabo de aço quando este estiver sendo enrolado no eixo do redutor e permitir que o motor/redutor seja posicionado em outra posição fora do alinhamento central do conjunto. Esta polia deverá ter abertura em V suficiente para permitir o movimento do cabo de aço quando este é enrolado no eixo do redutor e não comprometer a precisão da velocidade de descida da lingoteira que dependerá se o cabo de aço estiver enrolado como espiral ao longo do eixo.

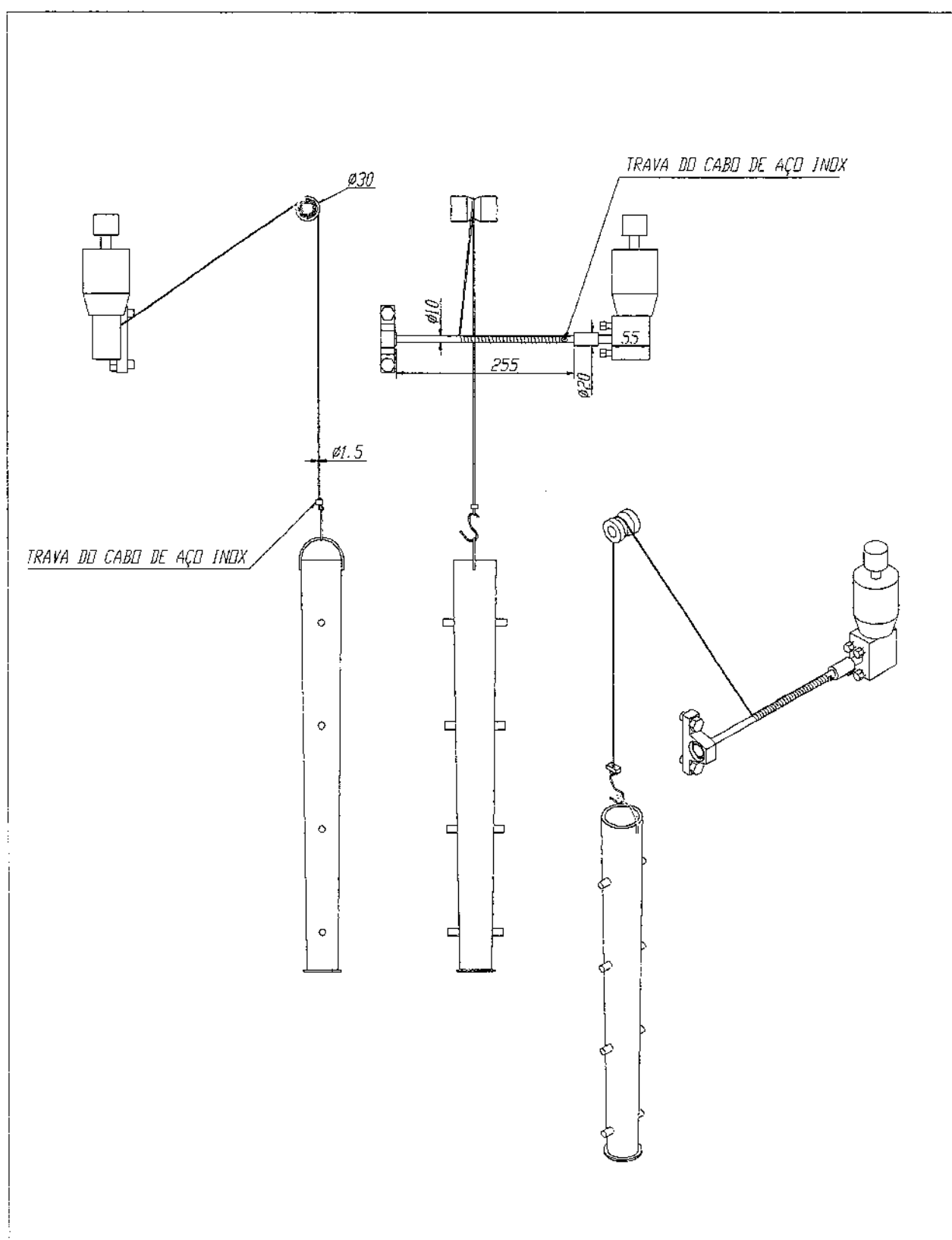


FIGURA 4.7 – Desenho esquemático do conjunto posicionador da lingoteira do equipamento projetado e construído. (em milímetros).

4.3.5 - Forno de espera

Foi projetado um forno circular, cujo desenho esquemático é apresentado na FIGURA 4.8.

O dimensionamento do forno foi realizado levando-se em conta que a altura do mesmo fosse suficiente para abrigar e manter o aquecimento homogêneo da lingoteira, que o diâmetro interno permitisse a montagem das guias e a passagem livre da lingoteira, que tivesse capacidade de fusão de ligas de Al e outras de baixo ponto de fusão (até 800°C) e que apresentasse boa estabilidade térmica para manutenção do banho, apesar das perdas térmicas pela passagem de ar da atmosfera em seu interior.

O forno é constituído de um tubo em aço inóx 316 com parede de 3mm de espessura e nele é enrolado a resistência elétrica, revestido com uma camada de manta para isolamento térmica do tipo Fiberfrax® (lã de rocha) e fechado com chapa de aço carbono 1010.

Baseando-se em cálculos efetuados por MARTINS, A.C. (1996) e BUBENIK, R.L. (1998) foi dimensionado que o forno de aquecimento teria que atingir uma potência mínima de 7200watts para temperatura limite de 1000°C (para uso em trabalhos futuros). A resistência do forno foi construída utilizando-se de 80m de elemento resistivo do tipo Kanthal A1 (liga Cr-Ni) de 3mm de diâmetro e resistência de 0,25Ohms/m. O fio da resistência foi inteiramente isolado com miçangas refratárias e disposto ao longo do comprimento na parte externa do tubo, em duas seqüências de enrolamento com as duas extremidades ligadas à rede elétrica bifásica 220V.

A fixação do tubo foi feita utilizando-se quatro braços de ligação, fabricados a partir de chapa de aço carbono 1020 de 3mm de espessura, que são parafusados no tubo e na chapa que fecha o forno em posições cruzadas na parte superior e inferior do forno. Na parte inferior do forno são estes braços que servem como base para a sustentação da manta refratária e também para a fixação do forno na estrutura do equipamento, como pode ser visto no desenho esquemático apresentado na Figura 4.1.

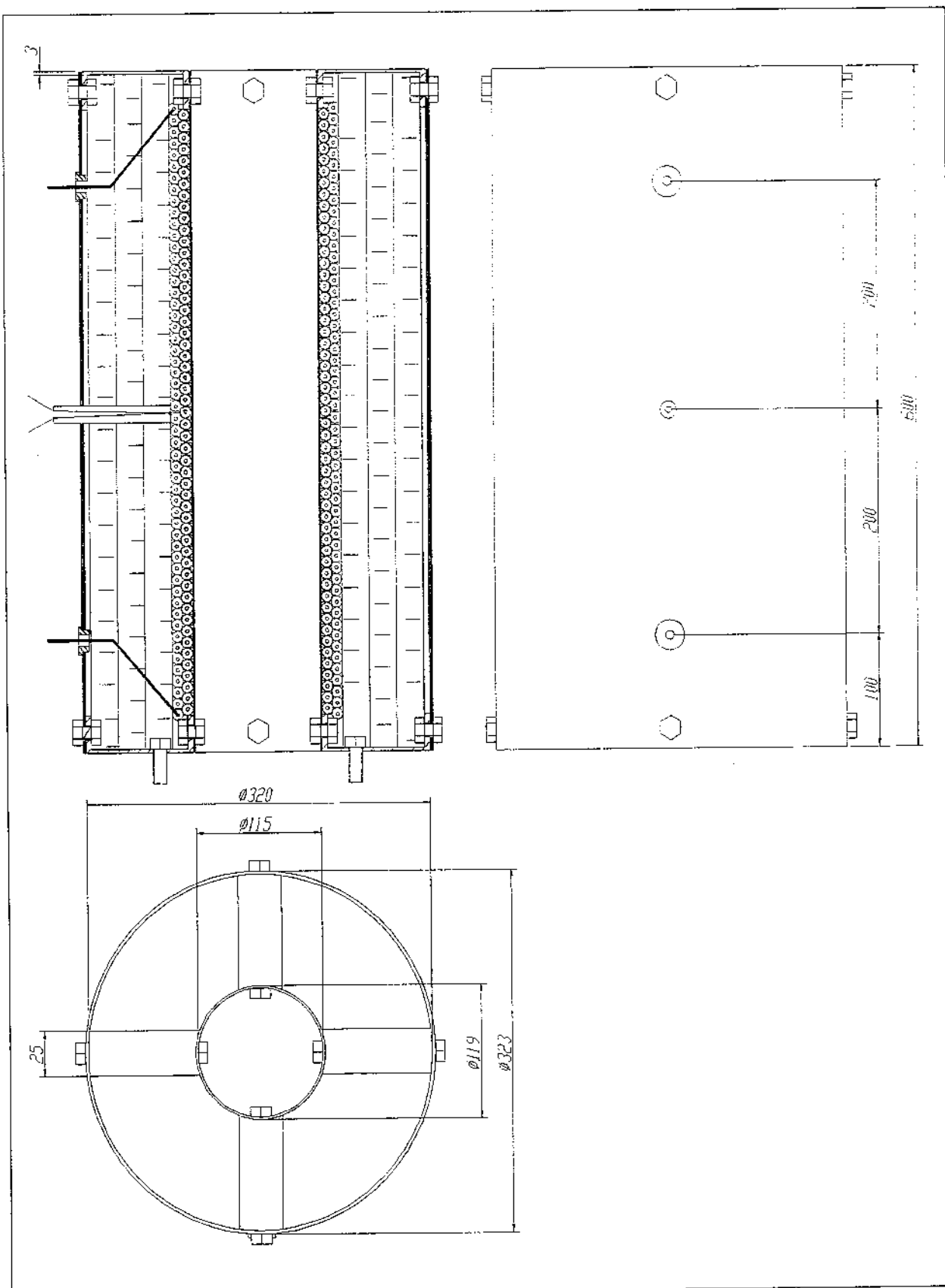


FIGURA 4.8 – Desenho esquemático do forno de espera do equipamento projetado e construído.
(em milímetros).

Para o controle da temperatura do forno foi utilizado um controlador e indicador de temperatura do tipo liga/desliga marca OMRON, modelo EBX05 ligado a um termopar de liga Cromel-Alumel posicionado próximo à resistência elétrica no centro do forno.

4.3.6 - Conjunto indutor

O conjunto indutor foi construído a partir de um motor trifásico de 4HP, disponível no mercado, de onde foi retirado o induzido (rotor) e utilizado apenas o indutor (motor estator) constituído de bobinas elétricas dispostas circularmente na vertical. 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, deverá produzir a força necessária para agitação do mesmo (força de *Lorentz*).

Na Figura 4.1 observa-se o conjunto indutor montado logo abaixo do forno de espera. Para proteger o enrolamento do motor estator do aquecimento gerado pela passagem da lingoteira com o metal em solidificação, foi montada uma camada de manta para isolamento térmica utilizando Fiberfrax® (lã de rocha) no interior do motor estator. Esta camada de isolamento térmica é sustentada por uma fina chapa de aço baixo carbono presa na parte inferior do conjunto indutor.

4.3.7 - Sistema de resfriamento

Como pode ser visto no desenho esquemático do equipamento projetado e construído (Figura 4.1), o sistema de resfriamento é posicionado logo abaixo do sistema de agitação e se constitui de uma serpentina em espiral, construída com tubo de cobre de 5mm de diâmetro interno, conectada à uma mangueira através da qual circula água e a outra extremidade é vedada à saída da água. Jatos de água produzidos em pequenos furos feitos ao longo da extensão do tubo, no diâmetro interno da serpentina, resfriam a lingoteira com o metal em solidificação, após passar pelo sistema de agitação.

4.3.8 - Sistema de potência

O esquema geral do Sistema de Potência pode ser visto na FIGURA 4.9. É um sistema elétrico/eletrônico que controla a potência induzida no Sistema de Lingotamento Semi-Contínuo (motor indutor trifásico). É composto pela Unidade de Potência (um variador tiristorizado de corrente alternada), que nada mais é do que um conjunto de chaves semicondutoras (SCR) que permitem a variação da potência trifásica entregue à uma carga (no presente caso o motor de 4HP). Para isto recebe sinais de entrada de uma Unidade de Disparo, esta unidade é formada por um variador de ângulo de disparo que recebe o sinal de sincronismo da rede trifásica (ABC) e gera sinais de disparo para a Unidade de Potência. Quando em modo manual, a referência externa permite variar a tensão aplicada à carga e a Base de Tempo ajusta o período de inversão do sentido de agitação/rotação. Quando no modo automático estas funções (ou ajustes) são implementadas através do Microcomputador. O Condicionador de Sinais adequa os níveis de tensão e corrente do barramento de alimentação (0 a 220volts entre fases) aos exigidos pela Placa de Aquisição de Dados.

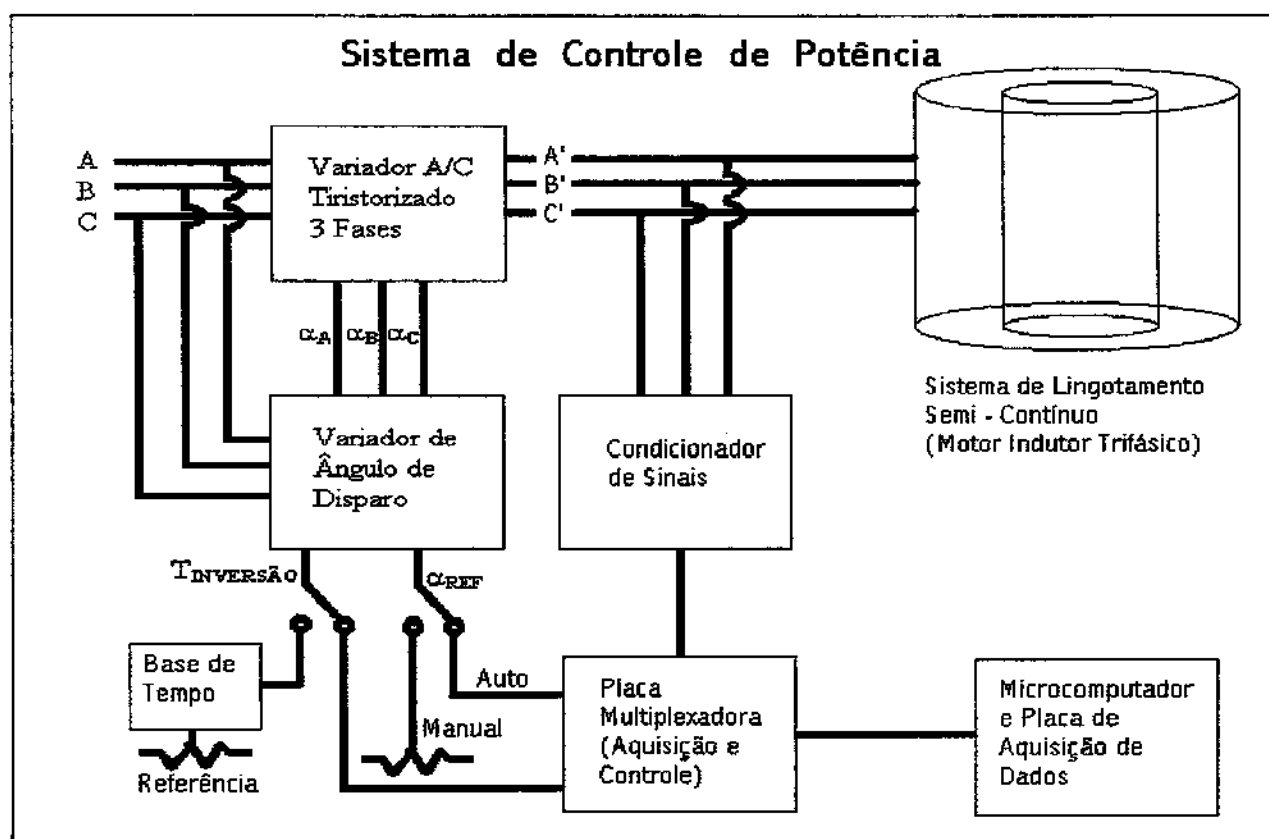


FIGURA 4.9 – Esquema geral do Sistema de Potência.

A Placa de Aquisição de Dados em conjunto com a Placa Multiplexadora são responsáveis pela aquisição dos sinais externos relativos à temperatura, tensão e corrente no Sistema de Ligotamento Semi-Contínuo pelo microcomputador. Ela permite ainda o controle manual da potência aplicada ao Motor Indutor Trifásico. A FIGURA 4.10 ilustra as formas de onda aproximadas da tensão neste motor, considerando-se apenas uma fase, onde pode ser observada a influência do ângulo de disparo α , o objetivo aqui é demonstrar como é aplicada a potência no motor e como a placa multiplexadora atua: em última instância ela determina o momento de disparo. O sistema de funcionamento é simples: através do modo manual ou automático é escolhido um ângulo α de disparo que determinará a potência trifásica induzida.

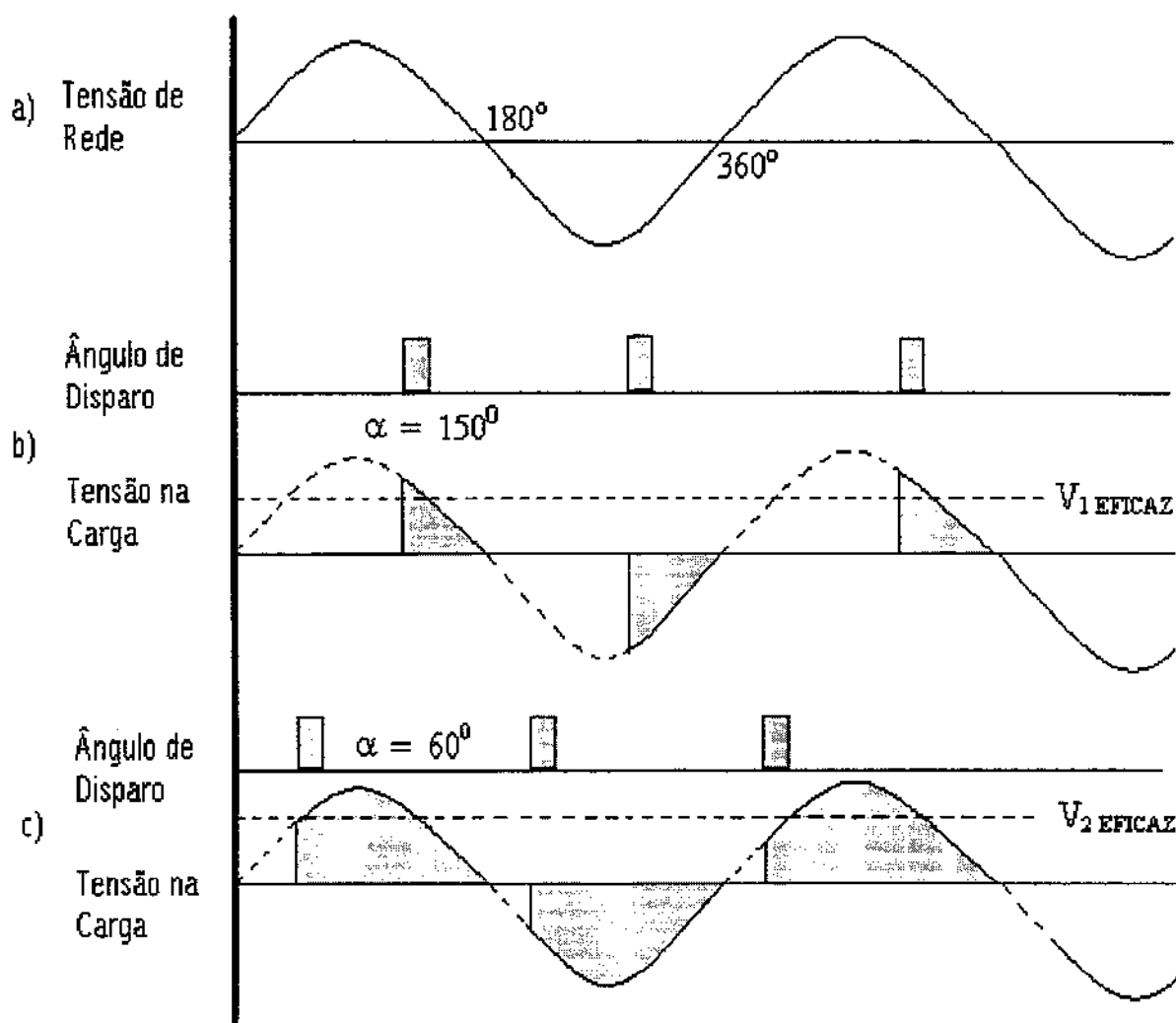


FIGURA 4.10 – Esquema simplificado para exemplificar a forma escolhida para alimentar o Motor Indutor:
a) variação original da tensão na rede para apenas uma fase;
b) ângulo de disparo $\alpha = 150^\circ$ e consequente voltagem eficaz;
c) ângulo de disparo $\alpha = 60^\circ$ e consequente voltagem eficaz.

Como pode ser visto no exemplo dado na Figura 4.10, para dois ângulos α de 150° e 60° , respectivamente, o tempo de aplicação da carga e portanto maior voltagem eficaz ocorre para o ângulo $\alpha = 60^\circ$, ou seja, quanto menor o ângulo escolhido maior a voltagem eficaz aplicada ao sistema. O que o sistema faz na realidade é escolher o período, ou melhor, o tempo de aplicação da corrente à carga, desta maneira pode-se variar a tensão de 0 a 60volts e, conseqüentemente a potência, implicando em potência variando de 0 a 2000watts, ou seja, é possível controlar a potência induzida.

4.3.9 - Sistema de aquisição e controle de dados

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 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. A FIGURA 4.11 mostra o esquema do Sistema de Aquisição de Temperatura

A Placa Multiplexadora permite a entrada dos dados de milivoltagem de até 16 Termopares e transformação destes em sinais digitais. Ela é composta de um conjunto de módulos que permitem a seleção do canal a ser utilizado, um Sensor LM 35 para a determinação da temperatura ambiente e de um Amplificador. O amplificador permite a adequação do sinal dos termopares (milivolts) até os níveis da placa de aquisição (volts). A Placa de Aquisição e Controle seleciona o tipo e o canal de entrada e o tempo de aquisição e através da linha de controle, executa a leitura da temperatura ambiente e corrige a leitura dos termopares. Deve-se salientar que a placa é responsável pela entrada de dados e também pela saída de dados analógicos de controle.

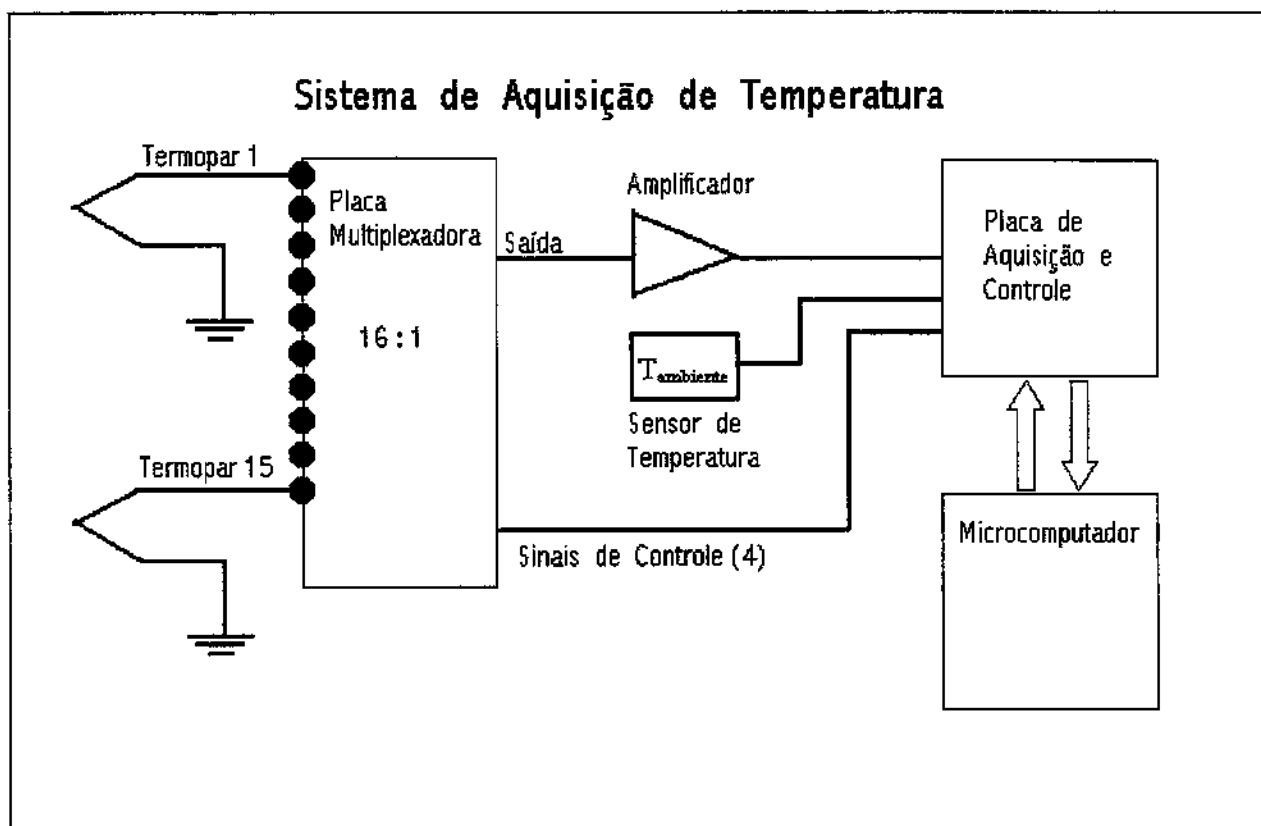


FIGURA 4.11 – Esquema ilustrativo do sistema de aquisição e controle de dados

A utilização desta placa, integrada ao sistema de potência, ainda permite o controle computadorizado do sistema de controle de velocidade de descida do lingote, além de controlar a potência induzida, ou seja, esta placa é a interface que permite ao computador executar as medições e controles.

Um software foi especialmente desenvolvido para esta aplicação (utilizando-se o programador Microsoft Visual Basic 5.0) e é ele que proporciona a geração dos sinais de controle para o multiplexador, realiza a leitura da tensão amplificada do termopar, seleciona e aplica o polinômio de correção do termopar e determina a temperatura, traçando uma curva Temperatura x Tempo para todo o experimento.

4.4 - O equipamento projetado e construído

Nas figuras que seguem são mostradas fotografias tiradas do equipamento quando finalizado sua construção:

Na FIGURA 4.12 tem-se uma vista geral do Equipamento Projetado e Construído, onde pode-se ver as partes constituintes: a estrutura de sustentação, as placas de proteção contra respingos, a lingoteira, as guias da lingoteira, o sistema de resfriamento, o conjunto indutor, o forno de espera, os termopares de monitoramento da temperatura do lingote, o conjunto posicionador da lingoteira, o painel de instrumentos e o computador onde está instalado o software do sistema de potência e a placa de aquisição e controle de dados da temperatura. Percebe-se também os equipamentos auxiliares utilizados para fundição da liga: forno-poço para fundição de ligas de baixo ponto de fusão e o cadinho de carboneto de silício.

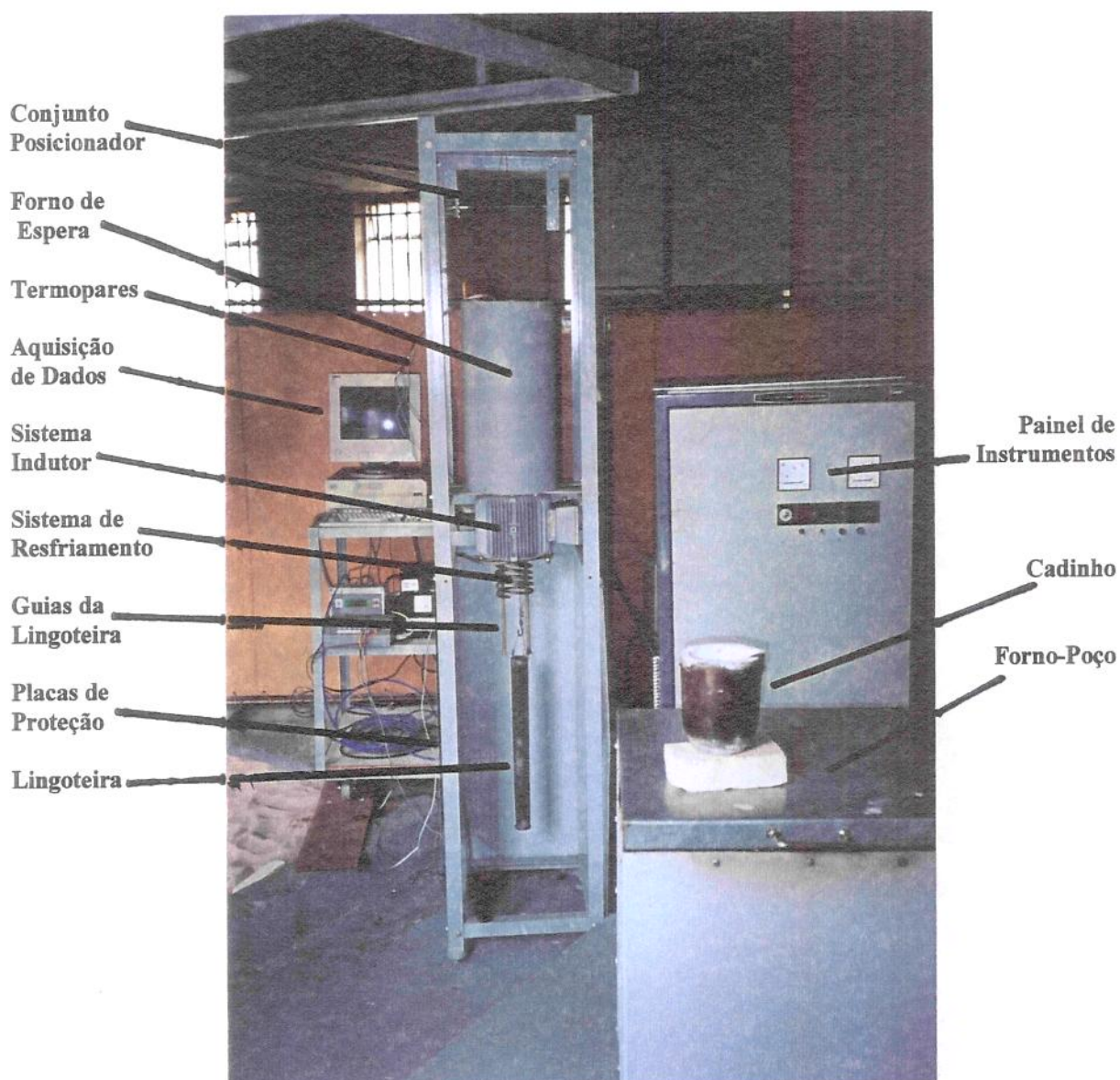


FIGURA 4.12 – Vista geral do Equipamento Projetado e Construído.

As FIGURAS 4.13 e 4.14 mostram uma vista mais aproximada dos principais componentes elétricos e mecânicos do equipamento.

Na Figura 4.13 nota-se que o Forno de Espera é montado sobre duas chapas medindo 55x5 mm, retiradas do perfilado utilizado na montagem da estrutura de sustentação, sendo que essas chapas são presas sobre contra-porca nos parafusos fixos na estrutura de sustentação para

permitir a regulação da altura do forno em relação ao motor estator, ou seja, é possível distanciar o forno para evitar um superaquecimento do enrolamento do motor estator (em casos de aquecimento prolongado do forno de espera) apesar da proteção anti-térmica existente entre ambos. Nota-se ainda que o conjunto do forno de espera é facilmente desmontável do equipamento, para eventuais manutenções ou regulagens da abertura e alinhamento das guias da lingoteira por exemplo.

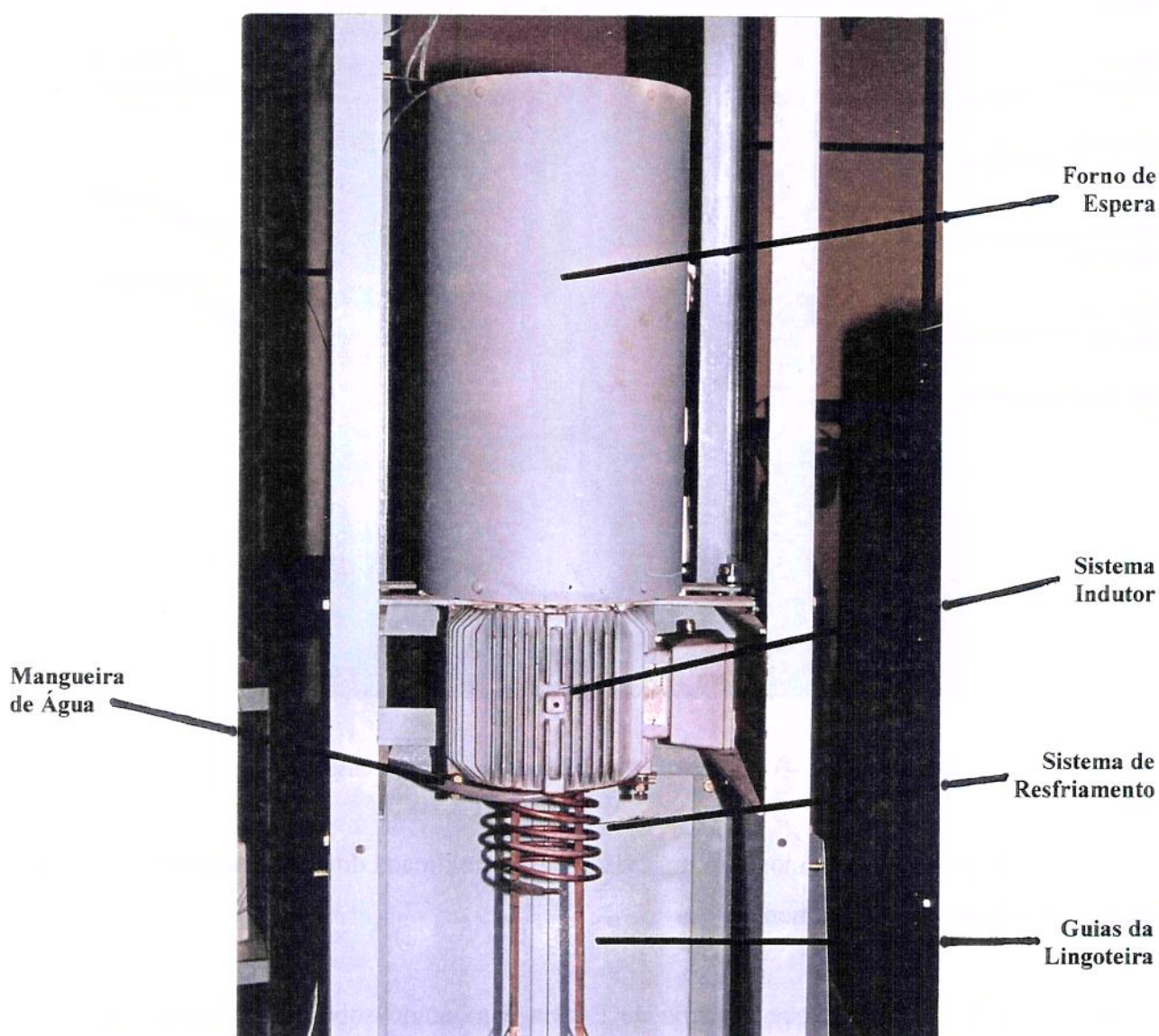


FIGURA 4.13 – Vista do Forno de Espera, o Sistema Indutor, o Sistema de Resfriamento e as Guias da Lingoteira.

Logo abaixo do forno de espera está montado o Sistema Indutor (motor estator) responsável pela promoção da agitação eletromagnética da pasta semi-sólida quando da passagem da lingoteira que a contém (lingotamento semi-contínuo). O motor estator é dotado de aletas externas para rápida troca de calor com o ambiente e no seu diâmetro interno está montado uma camada de isolante térmico para proteção do enrolamento na passagem da lingoteira com o metal em solidificação (como descrito no item 4.3.6).

Ainda pode-se notar claramente o Sistema de Resfriamento composto de uma serpentina feita de um tubo de cobre conectada à uma mangueira. A altura dessa serpentina é passível de regulagem para um maior ou menor campo de resfriamento do lingote, mas tem-se também maior ou menor taxa de resfriamento em pontos localizados do lingote. No presente trabalho utilizou-se as especificações do desenho esquemático da figura 4.2 para a altura da espiral que forma a serpentina.

Pôr fim é notado as duas Guias da Lingoteira, que são fixas por chapas soldadas e presas na parte superior e, na parte inferior do motor estator com contra-porcas, assim é possível a manutenção ou regulagens independentes desses conjuntos. A extremidade inferior das guias são abertas de tal forma a facilitar a entrada imediata da lingoteira no movimento ascendente.

Na FIGURA 4.14 é mostrado com maior aproximação os principais componentes que formam o Conjunto Posicionador da lingoteira. Pode ser visto o motor com redutor responsável pela movimentação do eixo onde está enrolado o cabo de aço e que na parte superior deste motor está acoplado o tacogerador, que funciona como um sensor de velocidade e emite sinais para a placa de controle de velocidade que monitora a velocidade do motor. Nota-se que a área onde a polia desliza sobre o seu eixo é lubrificada com graxa do tipo “grafitada” para diminuir o atrito e, interferência na velocidade de lingotamento. Quando o conjunto está em repouso, um pêndulo com massa de 2,5kg é colocado no lugar da lingoteira para manter o cabo de aço enrolado no eixo.

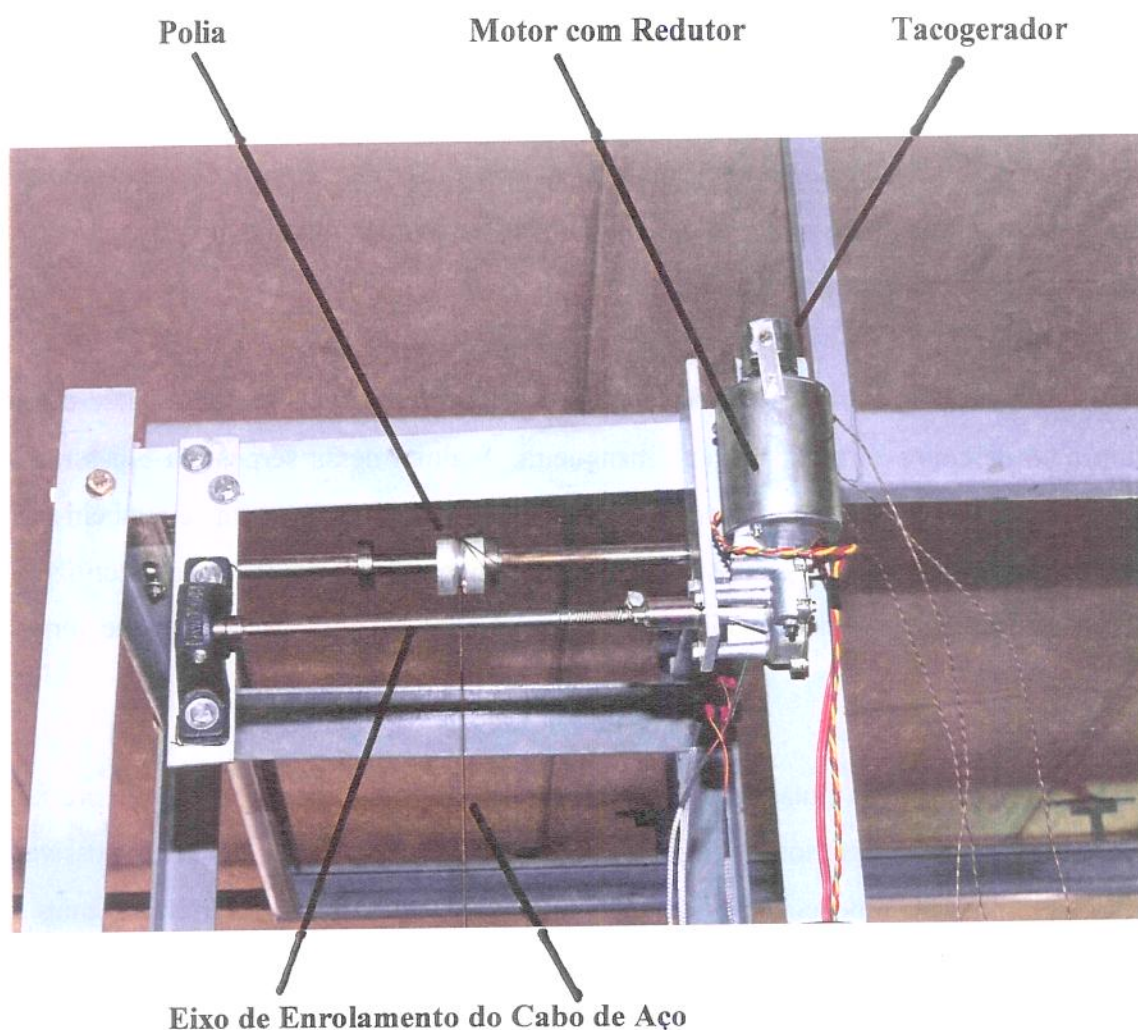


FIGURA 4.14 – Vista dos principais componentes que formam o Conjunto Posicionador da Lingoteira.

A FIGURA 4.15 mostra a Lingoteira projetada e construída. Nota-se que tem o perfil cônico acentuado pelo comprimento da mesma (600mm), o fundo tampão, a alça para sua sustentação e que os pinos-guia, na parte inferior, são soldados mais próximos da base para permitir que a lingoteira quando posicionada dentro da câmara do forno de espera ainda mantenha-se alinhada dentro das guias, porque devido ao problema da dilatação térmica (citado no item 4.5.1) essas guias tem pequeno curso para dentro do forno de espera. Para efeito de ganho de tempo e maior produção consequentemente, foram fabricadas seis lingoteiras. Na foto pode ser visto três dessas lingoteiras e o macho utilizado na construção e para correção da forma geométrica das mesmas.



FIGURA 4.15 – Vista mostrando: o macho utilizado na construção das lingoteiras (a); duas lingoteiras desmontadas e o fundo tampão abaixo (b) e (c) e uma Lingoteira Completa (montada) (d).

A FIGURA 4.16 mostra o Painel de Controle do equipamento. Já na porta desse painel estão montados os instrumentos analógicos de controle da velocidade de descida e subida da lingoteira, da potência induzida no motor estator e do tempo de reversão do campo magnético. Na parte interna do painel estão montados todos os dispositivos de comandos elétricos e eletrônicos (placas) do equipamento, inclusive o comando elétrico do forno de espera.

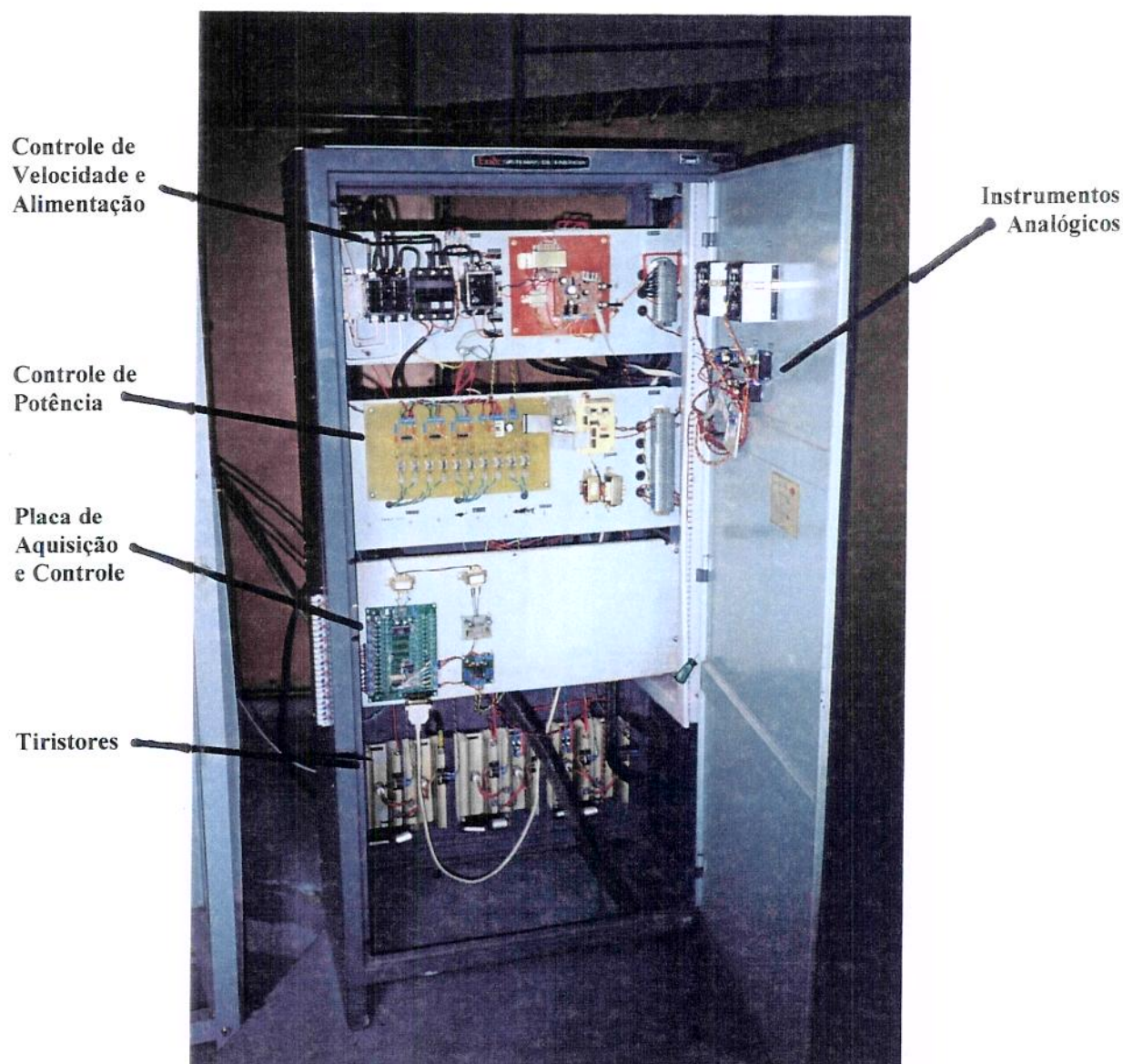


FIGURA 4.16 – Vista do Painel de Controle do equipamento.

A FIGURA 4.17 mostra uma vista aproximada da Placa Multiplexadora (de Aquisição e Controle). É um circuito eletrônico composto de um sensor LM 35, um amplificador e um conjunto de módulos que permitem a seleção de um entre 16 termopares (multiplexação) e transformação destes em sinais digitais, ou seja, é esta placa que permite a entrada e saída de dados dos termopares de controle da temperatura do lingote e do motor estator para a placa de aquisição e controle de dados acoplada ao microcomputador.

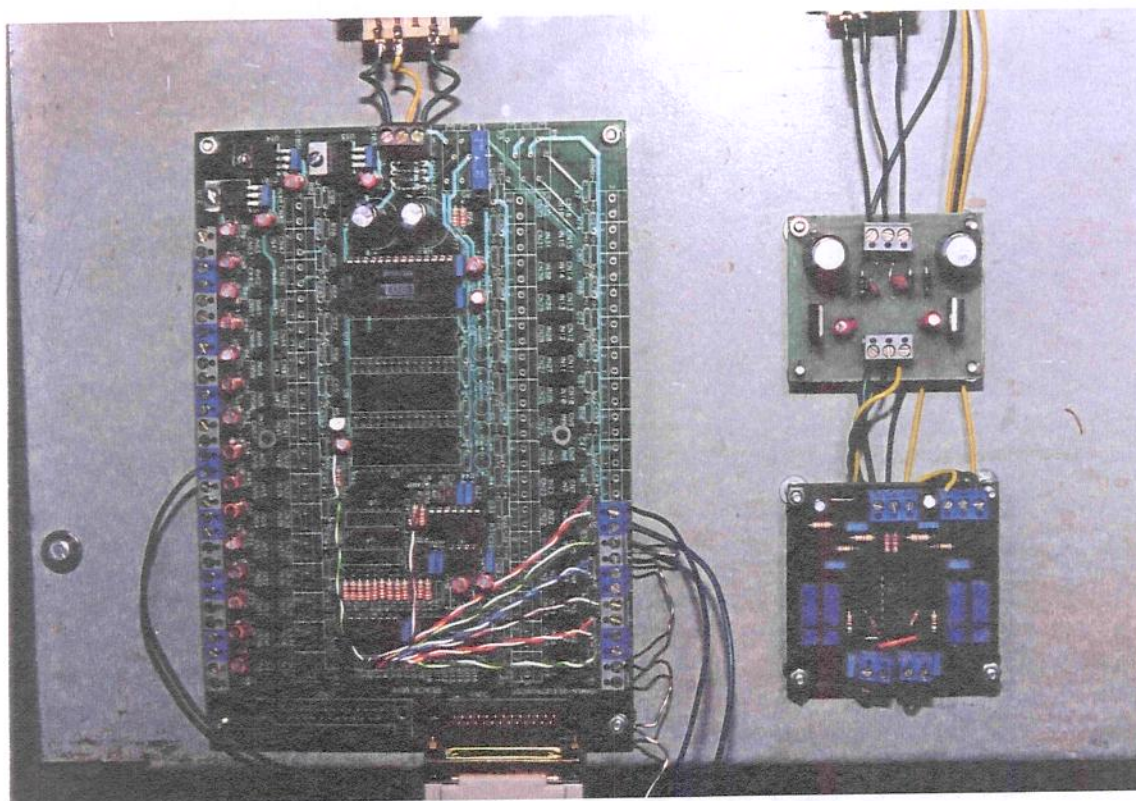
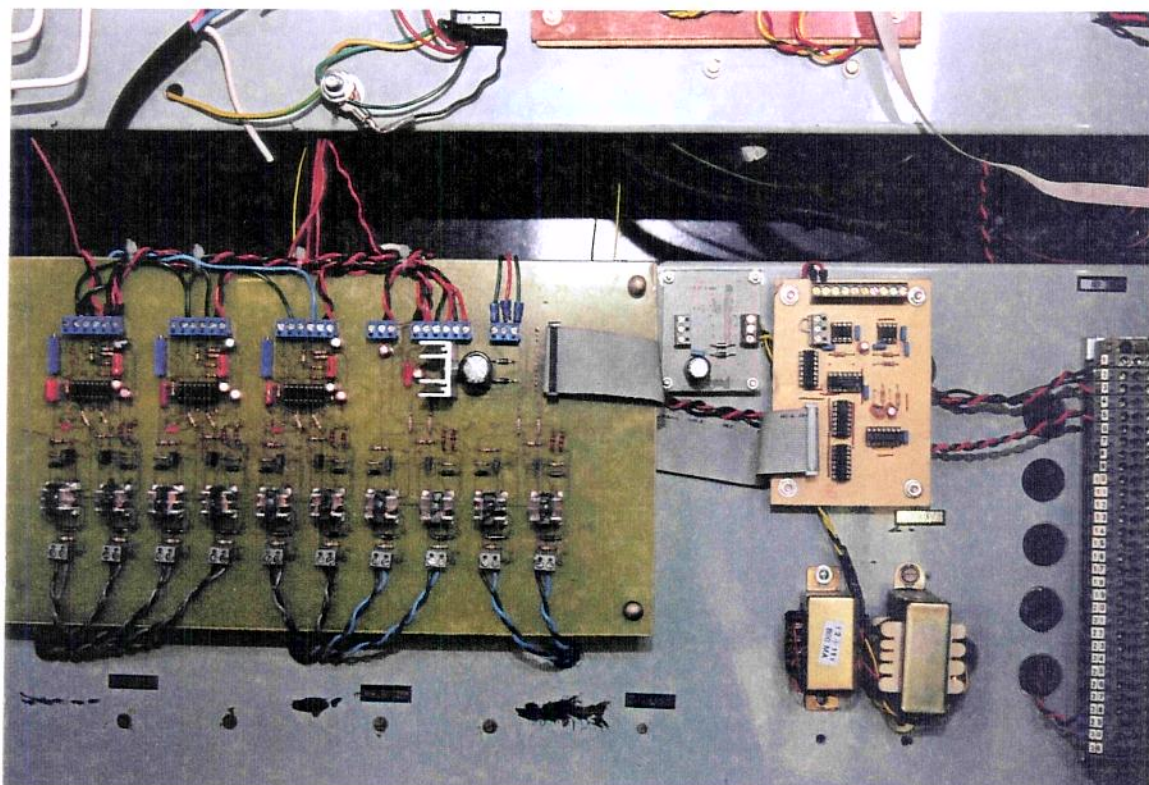


FIGURA 4.17 – Placa Multiplexadora.

A FIGURA 4.18 mostra os circuitos elétricos e eletrônicos que constituem o Sistema de Potência. Na Figura 4.18a, a placa da direita é a placa responsável pela Base de Tempo e a da esquerda é a Placa Variadora do Ângulo de Disparo. Estas duas placas ainda são responsáveis pelo sistema de reversão do campo magnético. O circuito na realidade utiliza oito circuitos tiristorizados (um conjunto mantém-se sempre ativo e as outras duas fases são disparadas alternadamente, consegue-se assim uma reversão no sentido de rotação do campo magnético. A Figura 4.18b mostra a sequência de tiristores utilizados, dois montados no primeiro conjunto e 4 montados nos conjuntos subsequentes.

a)



b)

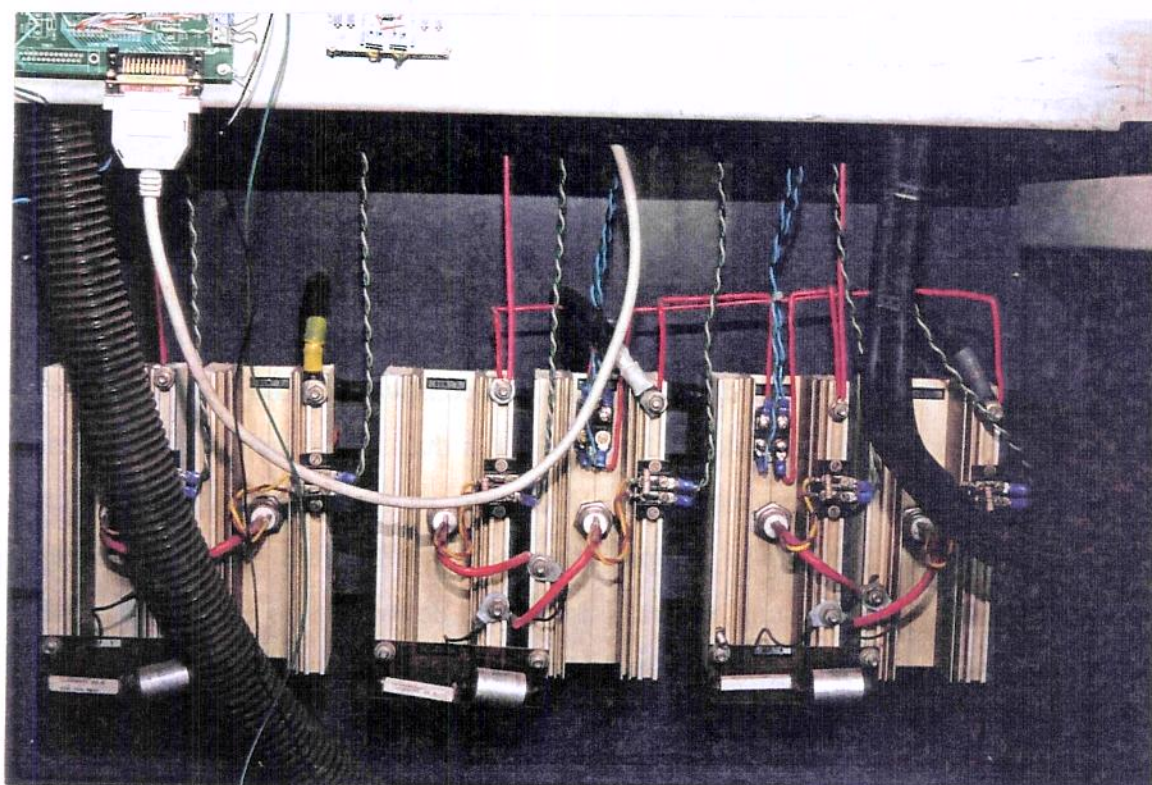


FIGURA 4.18 – Circuitos elétricos e eletrônicos que constituem o Sistema de Potência do equipamento.

- a) Placa responsável pela Base de Tempo (direita) e Placa Variadora do Ângulo de Disparo (esquerda);
- b) Sequência de tiristores utilizados.

A FIGURA 5.8 mostra uma vista aproximada dos dispositivos do comando elétrico e eletrônico (placa de controle da velocidade) responsável pelo controle do movimento ascendente e descendente da lingoteira. Lembrando que é esta placa que: recebe os sinais emitidos pelo tacogerador e faz a correção da corrente emitida ao motor de acionamento do movimento da lingoteira (onde ele está acoplado), para manter a velocidade constante de lingotamento, ou de descida da lingoteira.

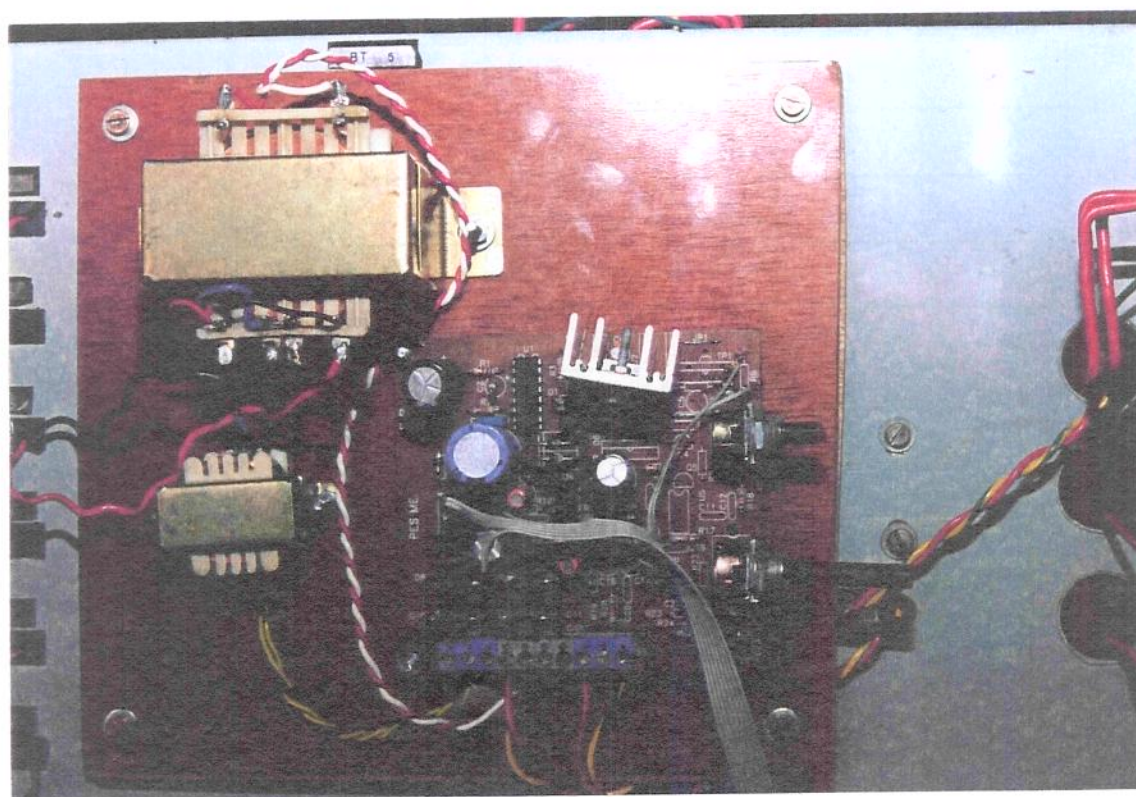


FIGURA 4.19 – Dispositivos do comando elétrico responsável pelo controle do movimento ascendente e descendente da lingoteira.

A FIGURA 4.20 mostra a tela de apresentação do Software de Controle do Sistema de Potência especialmente desenvolvido para este trabalho. O software foi desenvolvido de tal maneira a ser de simples operação e ainda permitir o total controle do sistema de lingotamento semi-contínuo. Executada uma experiência, o software salva todos os dados adquiridos na forma

de ASCII de tal maneira a poder-se trabalhar estes dados e qualquer planilha existente, tais como Origin 5.0 ou Microsoft Excel 97. Desta maneira é possível manipular os resultados de tal forma a se conjugar as curvas de resfriamento para o sistema com os dados de potência.

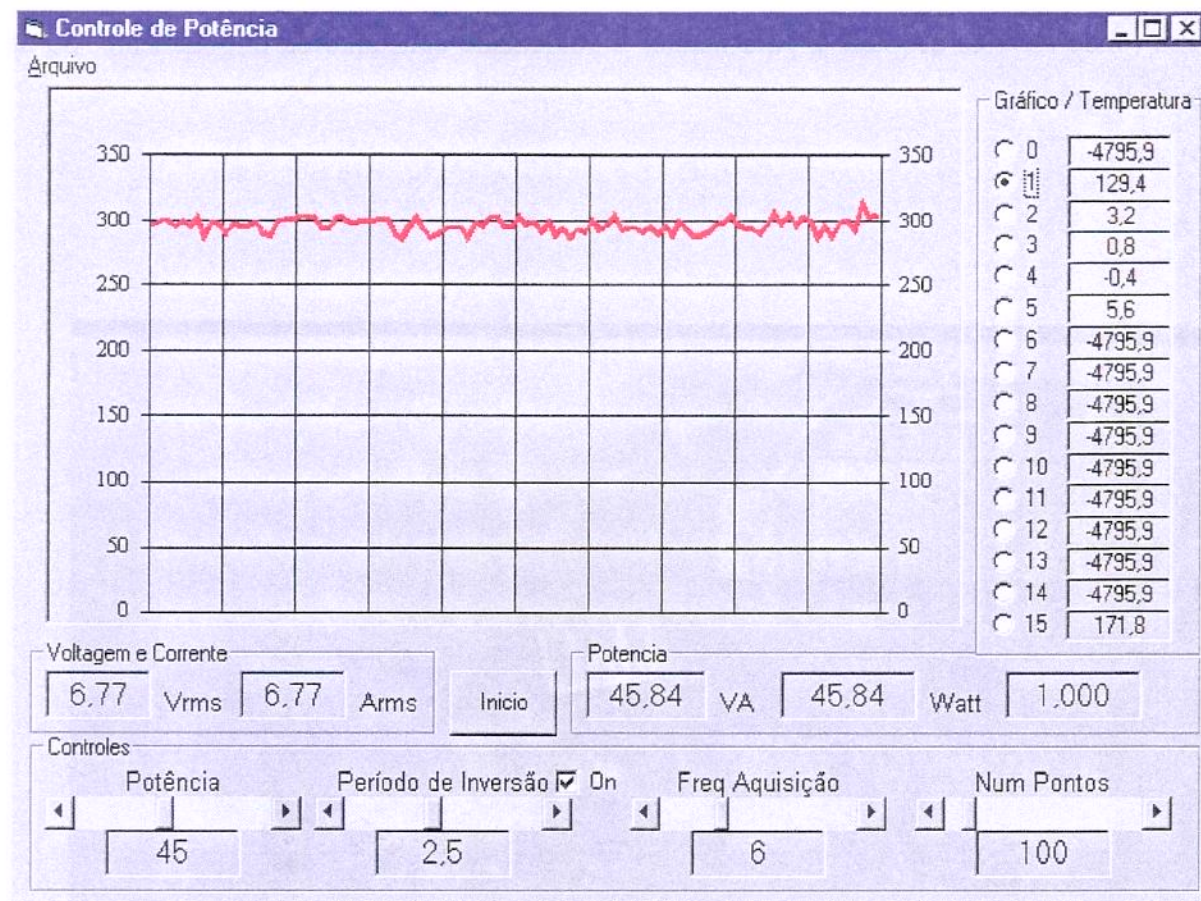


FIGURA 4.20 – Tela de apresentação do Software de Controle do Sistema de Potência, mostrando: as escalas de temperatura utilizada; a potência utilizada; o período de reversão do campo magnético (em segundos); a frequência de aquisição (pontos/segundo) e o número de pontos a ser aquisitados.

4.5 - Testes e ajustes preliminares do equipamento

Alguns testes preliminares foram necessários para observação quanto ao desempenho geral do equipamento projetado e construído para anteceder os possíveis problemas nos ensaios finais para obtenção da estrutura reofundida:

- integridade do movimento da lingoteira;
- velocidade de lingotamento;

- calibração da velocidade de lingotamento;
- estanqueidade da lingoteira;
- desmoldagem do lingote obtido;
- temperatura mínima de vazamento;
- variação da temperatura da pasta durante o lingotamento;
- mapeamento da temperatura do lingote no campo de agitação e
- proteção do enrolamento do motor estator.

4.5.1 - Integridade do movimento da lingoteira

Como já colocado antes (item 4.3.2), a lingoteira foi projetada com altura de 600mm para que fosse possível simular um lingotamento contínuo, ou seja, enquanto o cabo que faz sua sustentação dentro do forno de espera é liberado pelo eixo do redutor a lingoteira deverá iniciar, por ação da força da gravidade, o movimento de descida, passando por dentro do indutor e do sistema de resfriamento até atingir o solo. A integridade do movimento de descida da lingoteira depende de que o cabo esteja desenrolando normalmente do eixo do redutor e do atrito entre os pinos-guia soldados nela e as guias laterais em perfil U. Nesse sentido, houve necessidade de mudança do projeto anterior porque a roldana por onde deslizava o cabo de aço era fixa no centro do seu eixo-suporte e apesar da abertura em V projetada, o cabo de aço tinha tendência em deslizar para fora da mesma ou remontava quando estava sendo enrolado no eixo do redutor na subida da lingoteira, e se isso ocorre a velocidade de descida da lingoteira não será uniforme porque a quantidade de cabo desenrolando do eixo também não é uniforme. Para sanar este problema, no projeto atual do equipamento construído a roldana é livre e efetua um movimento lateral no seu eixo-suporte para acompanhar o deslocamento do cabo de aço enquanto este está sendo enrolado no eixo do redutor, além do que, a quantidade de cabo que é enrolado é restrito ao necessário para o deslocamento da lingoteira no processamento.

Ainda neste item, houve necessidade de diminuir o curso superior das guias da lingoteira e o material do cabo de aço utilizado, porque devido ao aquecimento gerado pelo forno de espera nestes componentes, as guias sofriam deformações laterais por causa da dilatação térmica comprometendo o alinhamento da lingoteira nas guias e o cabo de aço carbono sofria oxidação

demasiada por perda superficial de carbono (descarbonetação) e consequente redução de sua propriedade mecânica de resistência à tração comprometendo a segurança no aspecto geral.

4.5.2 - Velocidade de lingotamento

A velocidade do lingotamento é um dos principais parâmetros de controle do equipamento. O tempo em que o líquido é agitado depende do tempo em que ele permanece, ou passa, dentro do campo magnético, ou seja, o tempo de permanência do líquido é que vai determinar a efetiva globularização da estrutura dendrítica em crescimento. Se o tempo de agitação for insuficiente a estrutura final poderá ser intermediária entre a dendrítica e a globular. No entanto, se o tempo de agitação for alto poderá ocorrer mecanismos de engrossamento da estrutura levando ao crescimento das partículas sólidas já formadas (JOLY & MEHRABIAN, 1976).

No equipamento projetado e construído para se conseguir a menor velocidade de descida da lingoteira em função da mínima velocidade possível de rotação do motor, foi diminuído ao máximo o diâmetro do eixo acoplado na saída do redutor, onde o cabo é enrolado, caso contrário seria necessário a troca do redutor acoplado ao motor ou do conjunto.

A velocidade de descida da lingoteira é dependente da quantidade de corrente com que o motor responsável pelo movimento é alimentado. Para garantir velocidade constante de descida da lingoteira foi acoplado tacógrafo pequeno na ponta traseira do eixo do induzido do motor de acionamento. Então quando o motor de acionamento está em funcionamento o tacógrafo é feito girar na mesma rotação portanto, e emite impulsos elétricos para a placa multiplexadora que faz a correção da corrente que é induzida ao motor para este girar em velocidade constante.

A menor velocidade de descida da lingoteira que se consegue, com a mínima velocidade de rotação do motor de acionamento escolhido na construção do equipamento é de 0,5cm/s e qualquer outro valor acima é facilmente conseguido pela simples regulação da quantidade de corrente induzida ao motor.

4.5.3 - Calibração da velocidade de lingotamento

A calibração da velocidade de descida da lingoteira fez-se com a própria lingoteira e contendo a mesma massa (areia por exemplo) que será utilizada nos ensaios (2,5kg) e de forma bem simples: tem-se um seletor com sete canais de saída de corrente para o motor de acionamento e cada canal é dotado de um potenciômetro; uma escala em milímetros é fixada em uma das guias da lingoteira e o tempo em que esta percorre uma distância de 150mm é cronometrado, é feito a correção para mais ou para menos da corrente induzida no motor pelo canal em uso do seletor e o procedimento é repetido até que se obtenha a velocidade desejada. Esse procedimento é realizado para os outros seis canais no seletor de corrente, obtendo-se dessa forma sete diferentes velocidades de descida da lingoteira. Por exemplo: pode-se obter velocidades variando a cada 0,5cm/s tendo a mínima de 0,5cm/s e a máxima de 3,5cm/s.

4.5.4 - Estanqueidade da lingoteira

Apesar de o fundo-tampão entrar com interferência no diâmetro menor da lingoteira, o aquecimento gerado no processo, provoca dilatação térmica de todas as partes metálicas da mesma, sendo maior no diâmetro da lingoteira do que no diâmetro do fundo-tampão que tem maior área, e por esta folga há possibilidade de escoamento do metal fundido, comprometendo a segurança do operador e das partes componentes do equipamento.

Para prevenir o vazamento do metal líquido pelo fundo-tampão da lingoteira, após a montagem das partes que a compõem é jogado uma quantidade de cimento refratário do tipo Carbolane® no interior da lingoteira para criar uma camada de vedação no fundo da mesma.

4.5.5 - Desmoldagem do lingote obtido

Devido ao comprimento da lingoteira e às deformações que esta sofre devido à dilatação térmica, é de esperar uma certa dificuldade na extração do lingote produzido. Para facilitar a desmoldagem o interior da lingoteira deverá ser pintado por spray com o mesmo cimento refratário do tipo Carbolane®, diluído em água, para impedir a aderência do metal líquido, e

periodicamente essa lingoteira terá que passar por correção de sua forma geométrica. A correção é feita com o próprio macho utilizado na fabricação da lingoteira (item 4.3.2), para tanto ele é forçado a introduzir na lingoteira que deverá estar aquecida o suficiente para facilitar a introdução e evitar a abertura da solda de fechamento da chapa com que ela foi fabricada.

4.5.6 - Temperatura mínima de vazamento

Testes foram realizados para determinar qual era a perda de temperatura do banho desde o vazamento até o posicionamento da lingoteira, já com o metal fundido, dentro do forno de espera.

Inicialmente a liga é fundida dentro de um cadinho de carboneto de silício, em um forno auxiliar na temperatura de 800°C, e logo em seguida é vazada dentro da lingoteira, pré-aquecida nesse mesmo forno auxiliar à uma temperatura aproximada de 650°C. Após o vazamento do metal líquido a lingoteira é posicionada na guia e içada até a posição de espera, dentro do forno, que já deverá estar na temperatura de início do ensaio (de agitação). Um termopar é imerso no banho até tocar o fundo da lingoteira e se faz a leitura da temperatura nesse momento. É calculado então a variação da temperatura do banho, desde o vazamento a 800°C até esse momento.

Ficou determinado que para o tempo transcorrido desde o vazamento da liga até o posicionamento da lingoteira no forno de espera, a perda de temperatura do banho é de aproximadamente 100°C (no caso da liga utilizada para o experimento). Então a temperatura de vazamento da liga deverá ser de 100°C acima daquela desejada para o início da agitação.

A importância deste teste consiste em determinar a mínima temperatura de vazamento para se evitar dois problemas: primeiro para garantir que a liga não vai solidificar dentro da lingoteira antes que ela seja posicionada dentro do forno e segundo, ao contrário do primeiro, para se evitar que a liga ainda esteja à uma temperatura muito acima daquela necessária para o início da agitação. Se a liga solidificar irá, acarretar danos na pintura (refratária) interna da lingoteira, e requerer um tempo muito grande para ser refundida pelo forno de espera.

Por outro lado, se a temperatura do banho ainda estiver muito alta quando tudo estiver pronto para o início do ensaio, terá que se esperar a temperatura baixar e o tempo de espera cria também um gradiente térmico considerável ao longo do lingote. A medida desse gradiente térmico foi obtida fazendo a lingoteira descer e mantendo-se o termopar fixo e suspenso numa posição (a saber 600mm), o termopar é feito percorrer todo o banho desde o fundo até sair do banho e da lingoteira. A FIGURA 4.21 apresenta a curva de variação da temperatura ao longo do lingote obtida em um dos testes preliminares, para velocidade de lingotamento de 1cm/s, quando houve necessidade de esperar que a temperatura abaixasse até a temperatura de início do ensaio.

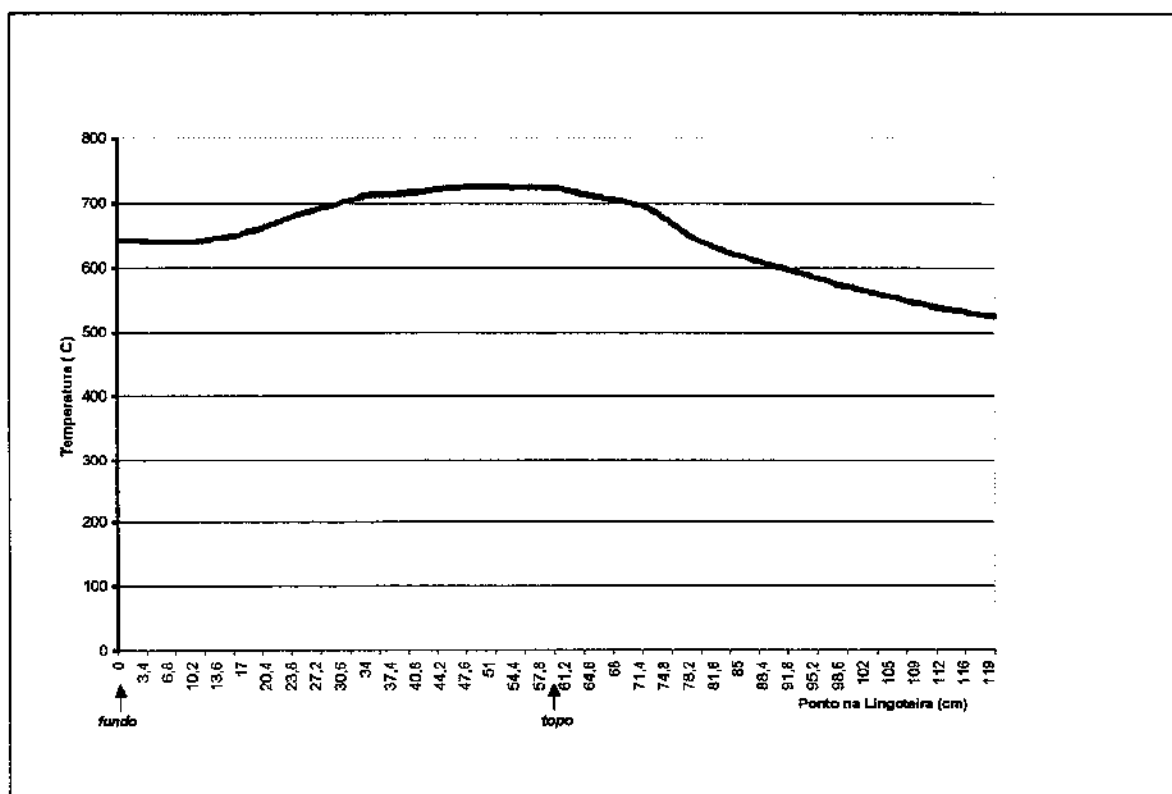


FIGURA 4.21 – Variação da temperatura ao longo do banho dentro da lingoteira nos testes preliminares.

4.5.7 – Variação da temperatura da pasta durante o lingotamento

Quando a temperatura do banho no fundo da lingoteira atinge aquela escolhida para o início da agitação, dá-se início então ao lingotamento contínuo. Mas considerando a velocidade de descida da lingoteira e a faixa de temperatura para solidificação da liga, é preciso constatar que não vai ocorrer a solidificação total ou demasiada do metal até a saída dos termopares de

monitoramento da temperatura de dentro da pasta, porque assim ocorrendo o sistema é travado, ou seja, a liga solidifica e o(s) termopar(es) fica(m) preso(s) no lingote e a lingoteira é impedida no movimento de descida.

Nos ensaios finais serão utilizados três termopares imersos no banho para monitoramento da temperatura do lingote durante a agitação, mas o teste para determinar a taxa de resfriamento do metal durante a agitação foi realizado com o termopar mais longo (800mm) porque este será o último a sair da pasta e com a menor velocidade de lingotamento (1cm/s) que será utilizada. A FIGURA 4.22 apresenta a variação da temperatura da pasta ao longo do lingote após a agitação eletromagnética, ou seja, na saída do metal do campo magnético.

Nota-se que a temperatura da pasta ao longo do lingote e logo após passar pelo campo de agitação permanece praticamente constante, ou seja, pode-se notar que o procedimento da agitação ocorre de maneira praticamente isotérmica.

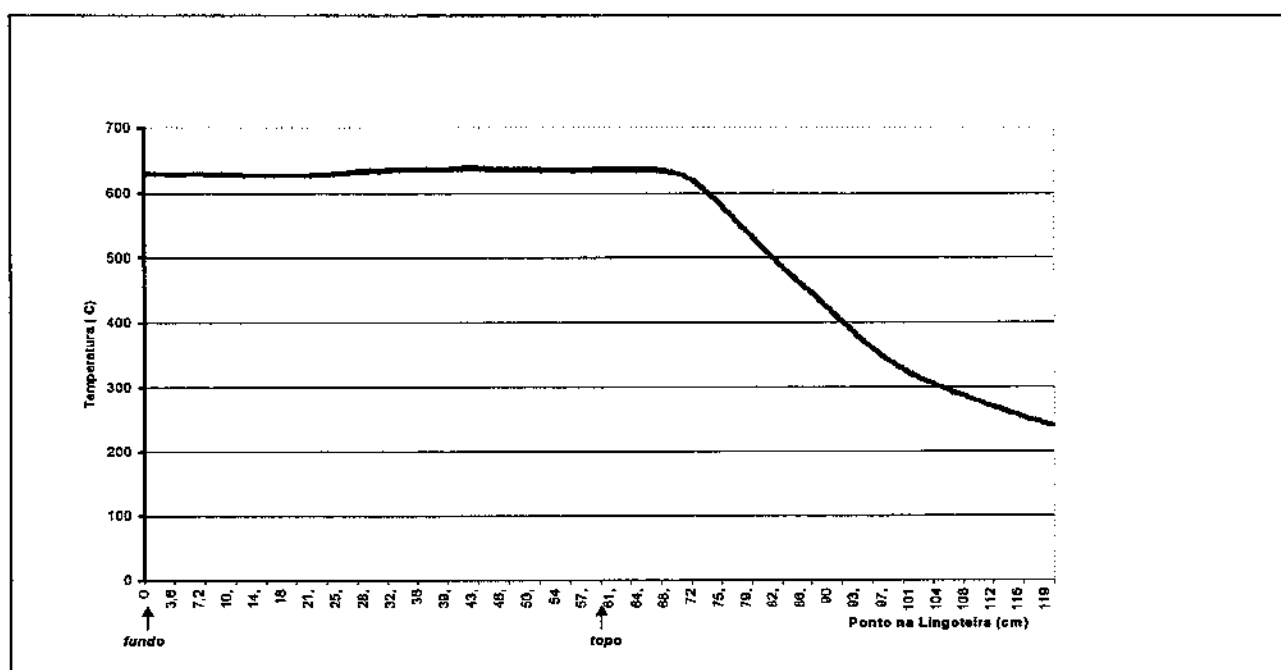


FIGURA 4.22 – Variação da temperatura da pasta ao longo do lingote na saída do campo de agitação.

4.5.8 – Mapeamento da temperatura do lingote no campo de agitação

Quando a lingoteira é posicionada no forno de espera, imediatamente após três termopares são imersos no banho. Estes termopares é que vão monitorar a temperatura do metal em solidificação no momento em que a lingoteira estiver passando pelo campo magnético. São termopares de liga Cromel-Alumel encapsulados em bainha de aço inox, diâmetro de 3mm e erro de leitura de 0,5%.

Um termopar tem curso de 600mm, outro de 700mm e o último é de 800mm. Para limitar o curso do termopar, um recurso simples pode ser utilizado: tendo um termopar mais comprido, faz-se uma curva a 90° no comprimento desejado e desta forma seu movimento será limitado quando a ponta dobrada assentar na parte superior do forno de espera.

Inicialmente os três termopares estarão tocando o fundo da lingoteira e a medida que o lingotamento contínuo é iniciado, ou seja, quando a lingoteira começa o movimento de descida, o termopar de 600mm estará medindo a temperatura que o metal entrou no campo magnético, logo abaixo do forno de espera, o termopar de 700mm estará medindo a temperatura do metal exatamente no centro do campo magnético e o termopar de 800mm estará medindo a temperatura do metal na saída do campo magnético, ou seja, na saída do indutor eletromagnético. Na FIGURA 4.23 é mostrado um esquema ilustrando o posicionamento dos termopares no início do ensaio.

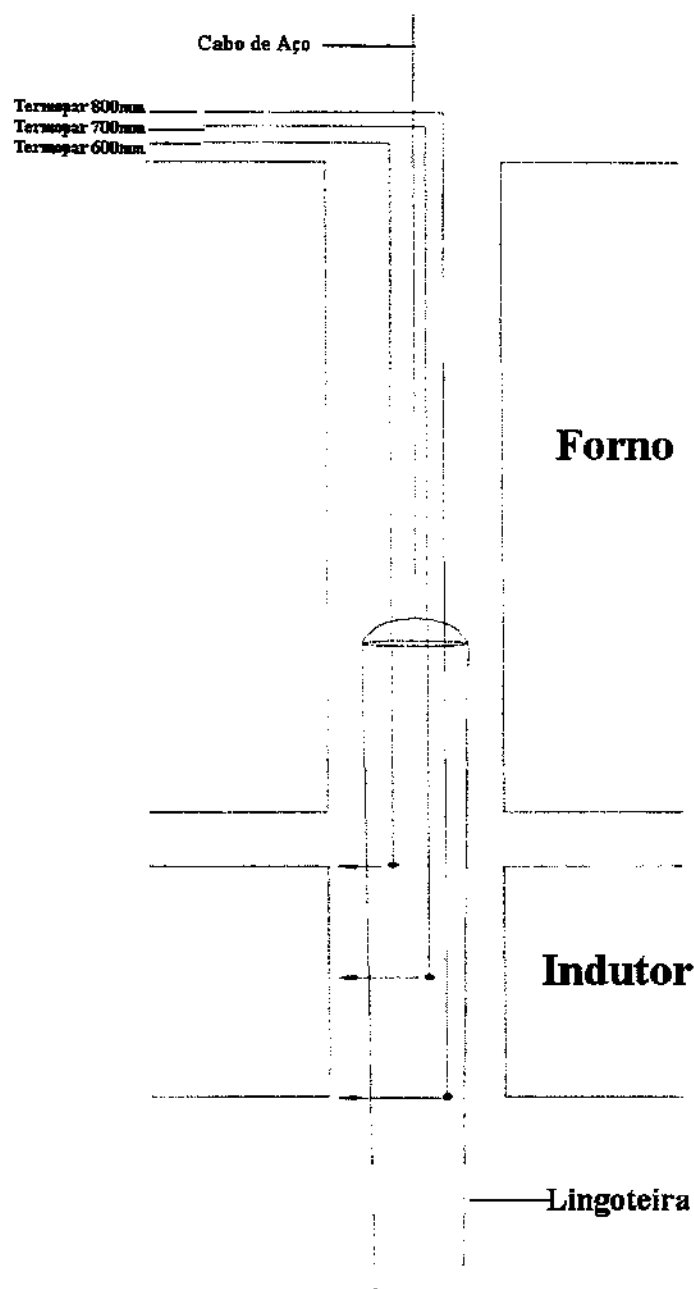


FIGURA 4.23 – Esquema ilustrativo indicando esquema o posicionamento dos termopares no início do ensaio.

Desta maneira é possível saber a temperatura quando o metal entrou, quando esteve e quando saiu do campo de agitação e em qualquer ponto ao longo do comprimento do lingote. Realizou-se um teste com velocidade de lingotamento de 1cm/s e o resultado é mostrado na FIGURA 4.24. Constatou-se que não há uma variação significativa ($< 5^{\circ}\text{C}$) da temperatura da pasta ao longo do campo eletromagnético ou de agitação.

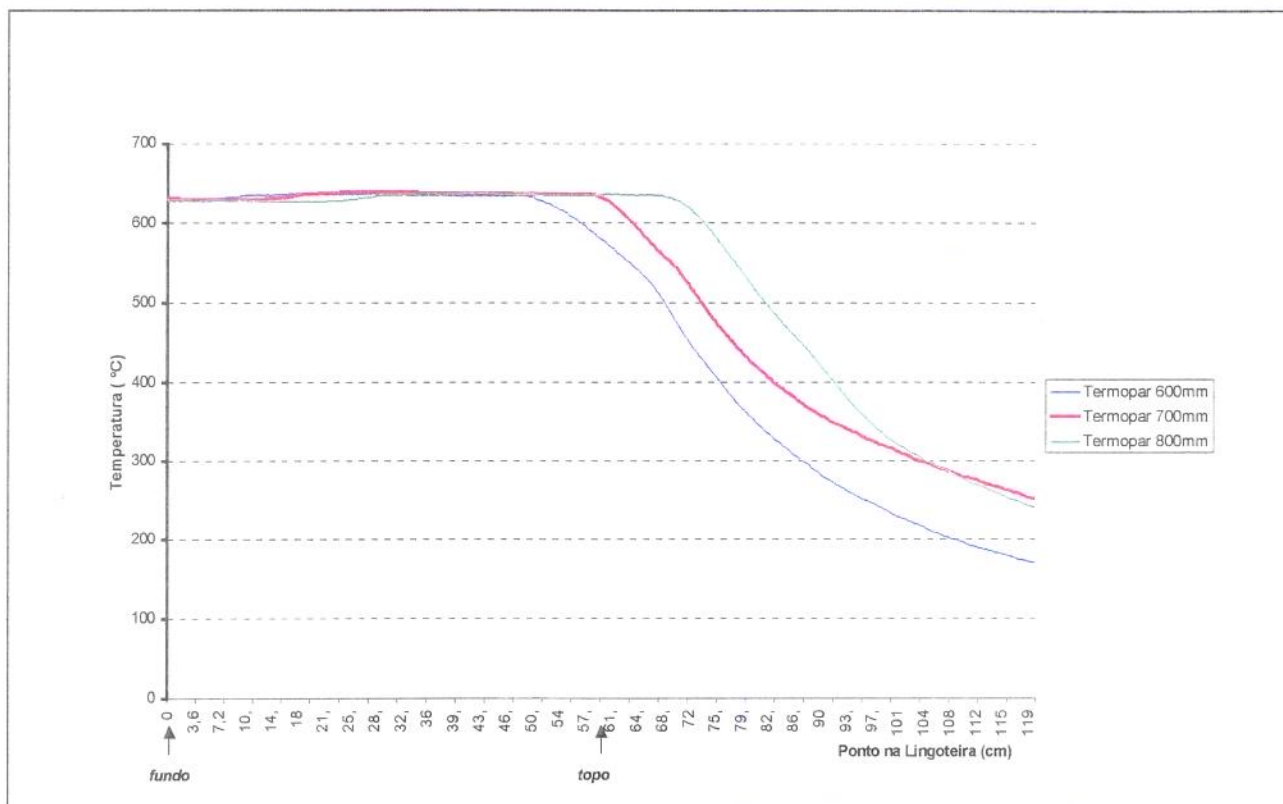


FIGURA 4.24 – Variação da temperatura da pasta ao longo do lingote durante a agitação eletromagnética.

4.5.9 - Proteção do enrolamento do motor estator

Para efeito de segurança do enrolamento do motor estator contra o aquecimento demasiado, um termopar estará permanentemente acoplado a este, para monitoramento do aumento da sua temperatura em testes de potência máxima induzida no campo magnético e principalmente enquanto a lingoteira estiver de passagem durante o lingotamento contínuo e pela proximidade do forno de espera, sendo que a isolamento térmica efetuada para prevenir tal aquecimento (item 4.3.6) não deverá permitir um aquecimento superior a 100°C porque pode acarretar danos ao isolante (verniz) dos fios do enrolamento. A FIGURA 4.25 demonstra qual é a variação da temperatura do enrolamento do motor estator para o maior tempo em que os ensaios serão realizados ($V_L=1\text{cm/s}$) e a potência máxima induzida de 1200watts.

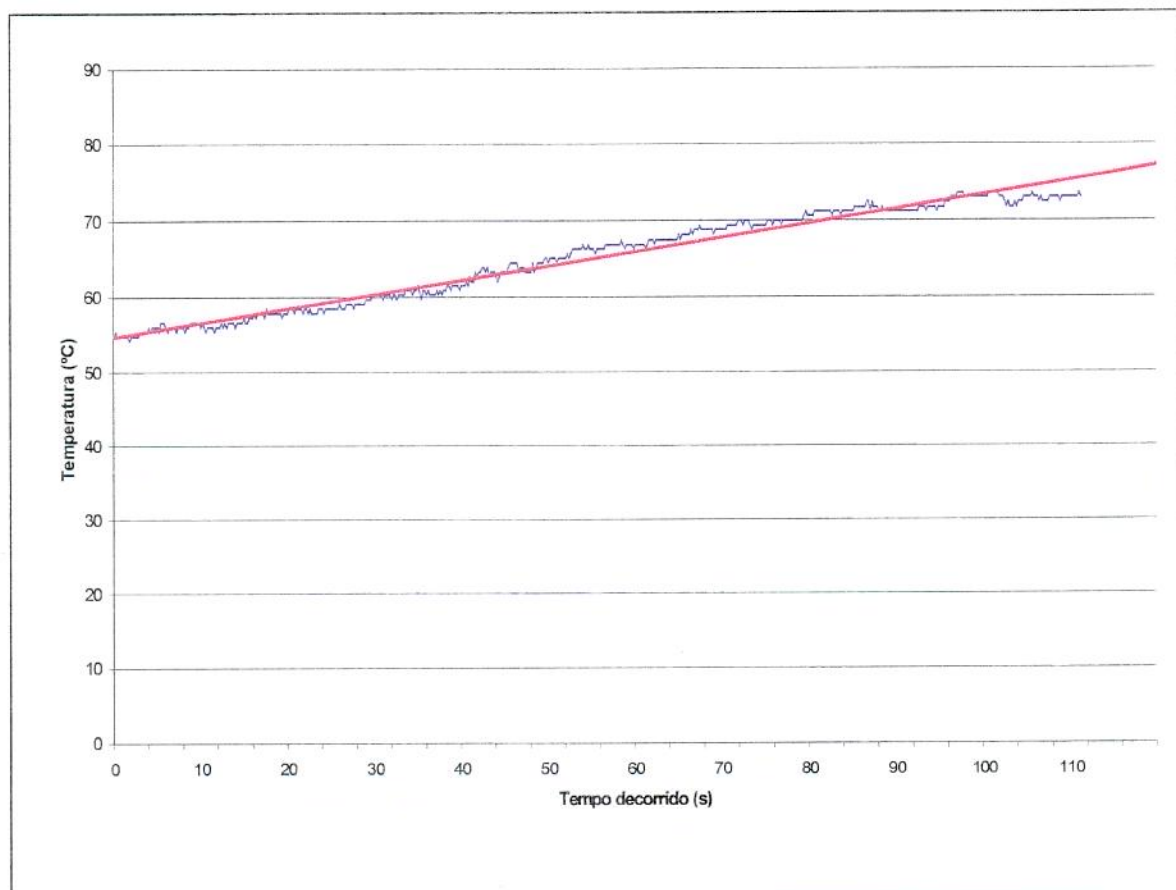


FIGURA 4.25 – Variação da temperatura do enrolamento do motor durante o lingotamento contínuo.

Concluído as baterias de testes para os ajustes finais do equipamento, chegou-se à conclusão que o desempenho do equipamento projetado e construído, tanto no aspecto do seu comportamento mecânico quanto no aspecto do seu comportamento térmico, é satisfatório e seguro para a tentativa de se obter pastas reofundidas.

4.6 – Ensaios finais para produção da pasta reofundida

4.6.1 – Parâmetros de controle

A - Temperatura de agitação

Nos testes preliminares ficou comprovado que a temperatura da pasta praticamente não se altera durante a agitação eletromagnética. Definiu-se portanto que a agitação deverá ocorrer de

maneira isotérmica, ou seja, a agitação deverá ser iniciada a uma temperatura definida entre a temperatura *liquidus* e *solidus* da liga utilizada (633 a 617°C).

Estabelecido portanto a faixa de temperatura disponível para se processar a reofundição da liga em estudo (item 3.1), definiu-se uma temperatura de trabalho entre a temperatura *liquidus* e *solidus* de 630°C. Essa temperatura corresponde a uma fração sólida já formada da ordem de 20%, calculada pela equação de Scheil (FLEMINGS, 1974).

$$fs = 1 - ((T_M - T_L) / (T_M - T))^{1/1-K}$$

onde:

T_M = Temperatura de fusão do metal puro

T_L = Temperatura *liquidus* da liga

K = Coeficiente de partição da liga

B - Velocidade de lingotamento

A velocidade de lingotamento ou de descida da lingoteira irá implicar diretamente no tempo de permanência do material dentro do campo de agitação e consequentemente na estrutura final da pasta obtida.

Neste trabalho, serão utilizadas duas velocidades de lingotamento distintas: $V_L=1\text{cm/s}$ e $V_L=3\text{cm/s}$. Onde a primeira, é a menor velocidade disponível (por questão de ajustes) do equipamento projetado e construído e a segunda, é considerada uma velocidade extrema porque a lingoteira passa totalmente pelo campo de agitação em apenas 27s.

C - Potência de agitação

A potência trifásica induzida ao motor estator utilizado no equipamento projetado e construído pode variar desde 0 até 2000Watts, como demonstrado no item 4.3.8, mas em testes preliminares constatou-se que para potência requerida maior do que 1500watts ocorre um

superaquecimento do enrolamento do motor estator e em curto intervalo de tempo.

Então a potência máxima induzida ao motor estator será de 1200watts, garantindo tempo suficiente para processamento da reofundição do lingote e proteção do enrolamento do motor estator.

D – Modo de agitação

Como demonstrado em trabalhos anteriores (BUBENIK, 1998), a inversão cíclica do movimento rotacional da liga metálica durante a solidificação resulta em estrutura com menores tamanho de grãos.

Então neste trabalho optou-se por utilizar esse modo de agitação. Para tanto é ajustada uma frequência de periodicidade da potência trifásica induzida ao motor estator que resulta em inversão do sentido do campo magnético a cada 5 s.

E – Temperatura do forno de espera

Durante os testes preliminares notou-se que o forno de espera não precisa ser utilizado, porque a variação da temperatura desde o vazamento da liga até o momento que possa ser iniciado o lingotamento contínuo não ultrapassa 100°C. Portanto se a liga for vazada a uma temperatura mínima com 100°C acima daquela estipulada para o início do lingotamento contínuo, não haverá necessidade de que o forno de espera seja acionado para manutenção da temperatura do banho. Mas se o forno de espera está aquecido, e a liga for vazada com 100°C acima daquela estipulada para o início do lingotamento contínuo, terá que se esperar baixar a temperatura do banho. O tempo de espera nesse caso será maior, acarretando um gradiente térmico ao longo do lingote, como descrito anteriormente (item 4.5.6).

Nos ensaios finais portanto, o forno de espera não será utilizado, ficando desligado porém servindo como uma câmara para evitar a rápida troca de calor da lingoteira com o ambiente.

Vale ressaltar que se o forno de espera não está acionado também não se pode correr o risco de que o metal venha a solidificar dentro da lingoteira. Para tanto é preciso estar seguro do movimento livre na subida e na descida da lingoteira pelas guias, não haver perda de tempo no posicionamento dos termopares no interior do banho e que o sistema de aquisição de dados foi programado com antecedência. Também vale ressaltar que sem o uso do forno de espera o tempo de processamento é menor e portanto maior a produção.

4.7 – Procedimento do lingotamento

Inicialmente uma massa de 2,5kg da liga é fundida em cadinho de carboneto de silício, pintado com cimento refratário do tipo Carbolane®, dentro de um forno poço auxiliar aquecido a 800°C por resistência elétrica. Enquanto a liga é fundida no forno auxiliar, é providenciado a montagem da lingoteira:

- pintura do interior da lingoteira com cimento refratário do tipo Carbolane®;
- colocação do fundo-tampão da lingoteira que é travado com três pinos metálicos;
- vedação do fundo com cimento refratário;
- colocação da alça da lingoteira.

Os termopares que serão imersos no banho deverão também ser pintados com o cimento refratário para evitar o contato com a liga de alumínio líquida e contaminação do banho por reação química.

Antecedendo o vazamento da liga, a lingoteira é colocada dentro do forno poço auxiliar, junto ao cadinho, para um pré-aquecimento da mesma em torno de 650°C. Esse pré-aquecimento é necessário para evitar um choque térmico nas paredes da lingoteira e que o metal venha a sofrer solidificação prévia no contato com a lingoteira.

Nesse momento, o Sistema de Potência (item 4.3.8) e o Sistema de Controle e Aquisição de dados (item 4.3.9) já estão programados e prontos no Microcomputador através do Software que foi especialmente desenvolvido para esta aplicação:

- quanto ao sistema de potência é escolhido um ângulo de disparo (voltagem x amperagem) que determinará a potência trifásica induzida de 1200watts ao motor estator e é ajustado o período de inversão do sentido de agitação/rotação do campo magnético na Base de Tempo;
- quanto ao Sistema de Aquisição e Controle de Dados são determinados os canais de entrada de dados da temperatura dos termopares imersos no banho (item 4.5.8) e daquele no motor estator (item 4.5.9) e estipula-se o tempo e a frequência em que os dados serão coletados (5 pontos por segundo para um tempo total de 120 segundos, totalizando 600 pontos de aquisição). Aqui também é determinada a velocidade de lingotamento a ser utilizada no experimento (1 ou 3cm/s) a partir da sequência sorteada para a realização dos ensaios (Tabela 3.3).

Finalmente o cadinho com o metal fundido é retirado do forno, e enquanto é retirado a escória do banho e se espera atingir a temperatura de 740°C para o vazamento na lingoteira, esta é retirada do forno (pré-aquecimento) e posicionada sobre tijolos refratários.

Quando atinge a temperatura desejada, a liga é vazada na lingoteira que imediatamente após, é içada pelo sistema de levantamento (item 4.3.4) para o posicionamento dentro da câmara do forno de espera. A quantidade de líquido dentro da lingoteira não é suficiente para o total enchimento da mesma, mas é proposital para prevenir um provável vórtice gerado pela rotação/agitação da pasta.

A etapa seguinte é a imersão dos três termopares que irão monitorar a temperatura do banho (item 4.5.8) dentro da lingoteira e abertura da passagem de água para o Sistema de Resfriamento (item 5.3.7).

Finalmente é acionado o sistema para o lingotamento contínuo: em modo manual, é acionado a chave da alimentação de energia elétrica para a placa multiplexadora que distribui a tensão que foi pré-programada para alimentar o motor estator e também a tensão necessária para o motor que aciona a descida da lingoteira na velocidade desejada. No microcomputador é acionado o software para aquisição de dados da temperatura dos termopares.

A pasta agitada é imediatamente resfriada quando termina o lingotamento contínuo, ou seja, quando a lingoteira já passou completamente pelo sistema de agitação, o sistema que movimenta a lingoteira é desligado de tal forma que a lingoteira ainda permaneça dentro do sistema de resfriamento até atingir a temperatura ambiente.

A última etapa consiste em extrair o lingote obtido da lingoteira e seccioná-lo para análise metalográfica (micrografia e macrografia) ao longo do seu comprimento, conforme descrito no item 3.4 do capítulo anterior. Os resultados das análises serão apresentados no próximo capítulo.

CAPÍTULO 5

Resultados e Discussões

De acordo com o projeto apresentado anteriormente foi construído um equipamento para obtenção de pastas metálicas reofundidas por processo de agitação eletromagnética acoplado a um sistema de lingotamento semi-contínuo. A seguir é mostrado os resultados obtidos da construção do equipamento (quanto ao seu desempenho) e da caracterização do produto obtido, além de comentários ou discussões pertinentes à análise dos resultados.

5.1 – Desempenho do equipamento

No capítulo anterior já foram apresentados os resultados relativos aos testes e ajustes mecânicos e térmicos (item 4.5) necessários ao bom funcionamento do equipamento e a partir dos resultados obtidos concluiu-se que o equipamento era apto para experimentos para produção de lingotes reofundidos simulando um lingotamento contínuo. Algumas observações a respeito do desempenho geral do equipamento durante os ensaios finais podem ser acrescentadas ao resultados já obtidos:

- apesar da altura (2,70m) e de pouca área transversal ($0,5\text{m}^2$) o equipamento apresenta boa estabilidade durante funcionamento e total segurança com relação à possibilidade de inclinação por esforços laterais involuntários;
- no aspecto operacional o equipamento se mostrou de fácil operação, exigindo dois operadores apenas no momento do vazamento da liga fundida e para acoplar a lingoteira no gancho da extremidade do cabo de aço, para ser içada;
- o conjunto responsável pela movimentação da lingoteira se mostrou íntegro: o motor é capaz de imprimir alta velocidade na subida da lingoteira (ganho de tempo e menor perda de temperatura do banho) e conferir baixa e constante velocidade do lingotamento, e quanto ao

cabo de aço utilizado não houve necessidade de trocá-lo durante os experimentos;

- a lingoteira apresenta perfeita estanqueidade em um primeiro experimento. Se por algum inconveniente a liga solidificar antes do início do lingotamento, é preciso extrair o lingote para a refusão no forno auxiliar e reparo da pintura e vedação interna da lingoteira. A refusão do lingote poderá ser feita dentro da própria lingoteira mas a segurança quanto à estanqueidade da mesma já estará comprometida. O lingote é facilmente extraído e somente oferece maior resistência quando a lingoteira apresenta alterações em sua forma geométrica;
- como descrito na letra E do item 4.6.1, o forno de espera não foi utilizado para manter a temperatura do banho durante os experimentos;
- o tempo total de um experimento realizado no equipamento não ultrapassa 5 minutos. A realização de um novo experimento na sequência, somente irá depender de que haja outra quantidade (2,5kg) da liga fundida em outro cadinho no forno auxiliar de fundição;
- a temperatura de vazamento da liga a 740°C foi adequada para a realização dos experimentos sem haver risco da liga solidificar antes do início do experimento;
- pode-se observar na Figura 4.22 do item 4.5.7 que não há variação significativa da temperatura da pasta no momento da agitação. Os três termopares imersos na pasta apresentam praticamente a mesma temperatura desde o início até o término da agitação de todo o volume contido na lingoteira. Os resultados obtidos nas curvas dos três termopares sugere que não há efeito da agitação eletromagnética na temperatura da pasta sendo agitada e também que apesar do lingote já está sofrendo resfriamento logo abaixo do campo de agitação a temperatura da pasta ainda se mantém a mesma até esse ponto. Provavelmente é o volume de metal contido na lingoteira que por ser relativamente alto não está sofrendo um grau de severidade de resfriamento suficientemente alto por parte do sistema de resfriamento a ponto de alterar a temperatura do lingote mesmo antes de sair do campo de agitação, ou seja, pode se afirmar que o posicionamento do sistema de resfriamento não está interferindo na temperatura do lingote antes da agitação eletromagnética. Convém salientar que o fenômeno também foi observado para aqueles lingotes obtidos sem agitação para a estrutura de referência.

A FIGURA 5.1a mostra o equipamento no início do processo de lingotamento e a FIGURA 5.1b mostra o equipamento no final de processamento semi-contínuo. Na Figura 5.1a nota-se o sistema de resfriamento já ativado, os termopares imersos dentro do banho na lingoteira

posicionada dentro da câmara do forno de espera, dobrados a 90° para assentar na parte superior do forno, e o momento em que é acionado o computador para o monitoramento do processo. Na Figura 5.1b percebe-se que o lingote já transpassou todo o sistema de agitação eletromagnética e finalmente, está sofrendo a ação do sistema de resfriamento.

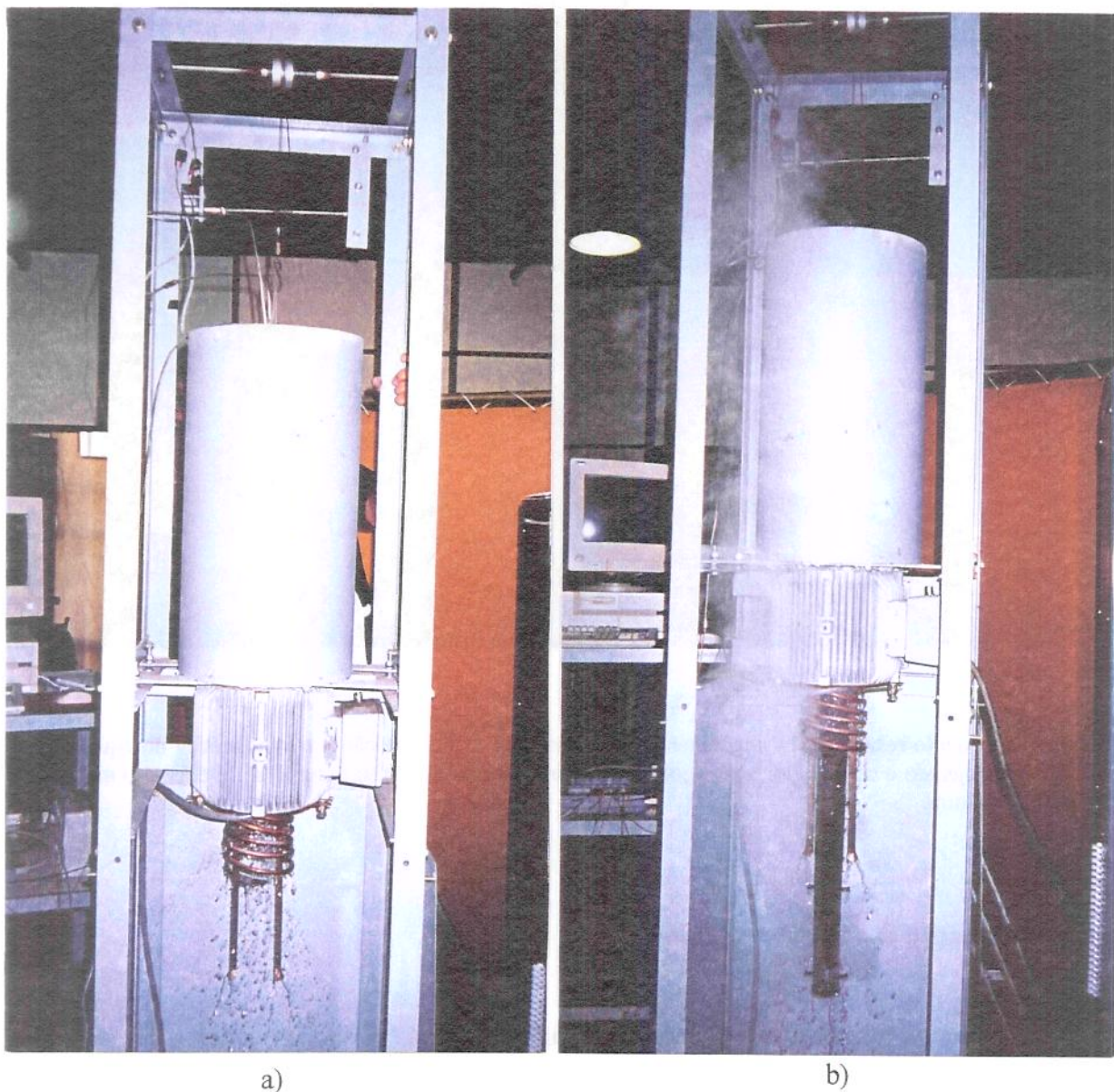


FIGURA 5.1 – a) Vista do equipamento projetado e construído no início do processo de lingotamento semi-contínuo para obtenção de lingotes refundidos por agitação eletromagnética;
b) Vista do equipamento projetado e construído mostrando o final de processamento do lingote refundido.

Na FIGURA 5.2 é mostrado o produto resultante do lingotamento semi-contínuo: um lingote com aproximadamente 450mm na altura e diâmetro mínimo de 45mm. É possível notar as posições onde este e todos os lingotes obtidos foram seccionados e as respectivas amostras tiradas para ensaios de metalografia.



FIGURA 5.2 – Produto resultante do lingotamento semi-contínuo e sob agitação eletromagnética no equipamento projetado e construído: um lingote com aproximadamente 450 mm na altura e diâmetro mínimo de 45 mm.

5.2 - Caracterização dos lingotes obtidos

Como descrito anteriormente, em uma primeira etapa foram produzidos lingotes por fundição convencional utilizando-se apenas variação na velocidade de lingotamento do equipamento projetado e construído e numa segunda etapa foram produzidos lingotes utilizando-se a potência máxima de agitação do equipamento (1200watts), um tempo médio de reversão do sentido da agitação (5s) e dois casos extremos de velocidade de lingotamento

(1 e 3cm/s). Os resultados da caracterização macro e microestrutural dos lingotes obtidos é que vão indicar a real eficiência do equipamento em produzir matéria prima para o uso posterior em processos de tixoconformação.

Para facilitar a comparação das estruturas dos lingotes obtidos com agitação eletromagnética (reofundidos) estas serão comparadas com as estruturas dos lingotes obtidos por fundição convencional (fundidos) para as duas velocidades de lingotamento experimentadas.

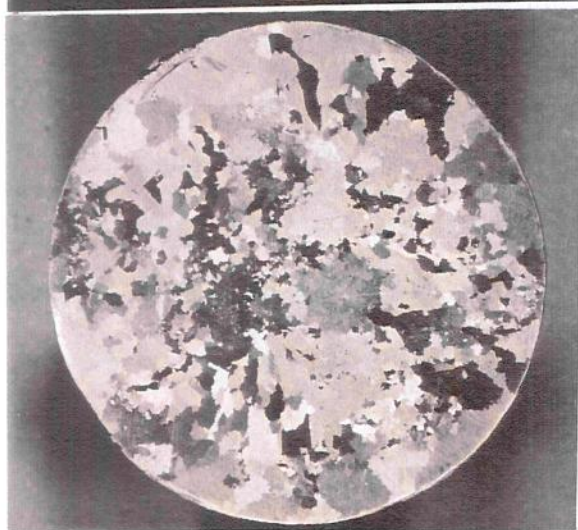
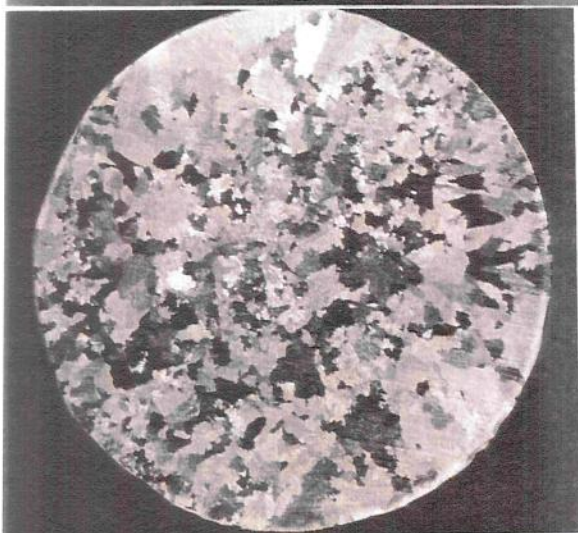
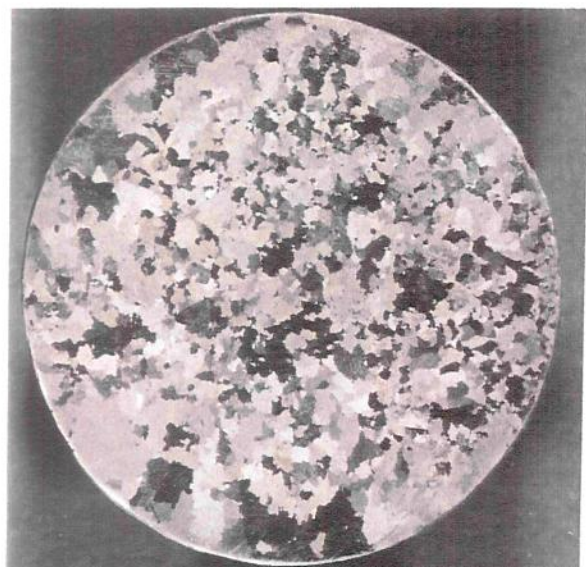
5.2.1- Quanto ao aspecto bruto de fusão

Os lingotes obtidos nas duas condições (com agitação e sem agitação) apresentam bom acabamento bruto de fusão, característico de peças ou lingotes obtidos em moldes metálicos. Os lingotes obtidos sem agitação apresentam indícios de rechupes característicos da solidificação convencional em moldes de coquilha, já os lingotes obtidos com agitação eletromagnética não apresentam indícios de rechupe, apresentam sim características geométricas que indicam a formação de um vórtice durante a solidificação, ou seja, indícios de que a massa foi agitada. Em todos eles é possível perceber um furo no local da saída dos termopares, indicando que nesse momento a massa no topo do lingote ainda estava em estado pastoso mas não o suficiente para colapsar o furo.

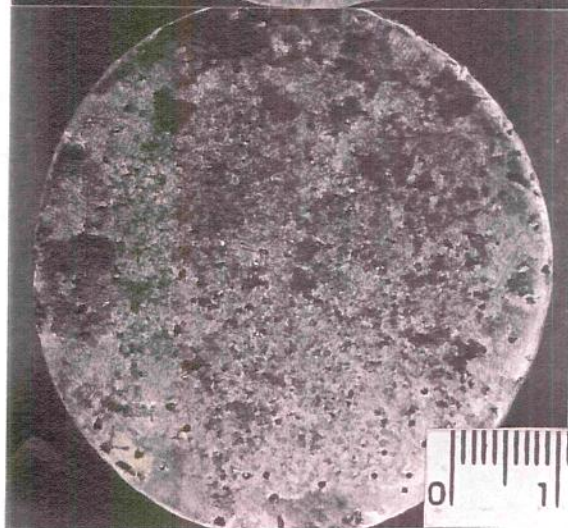
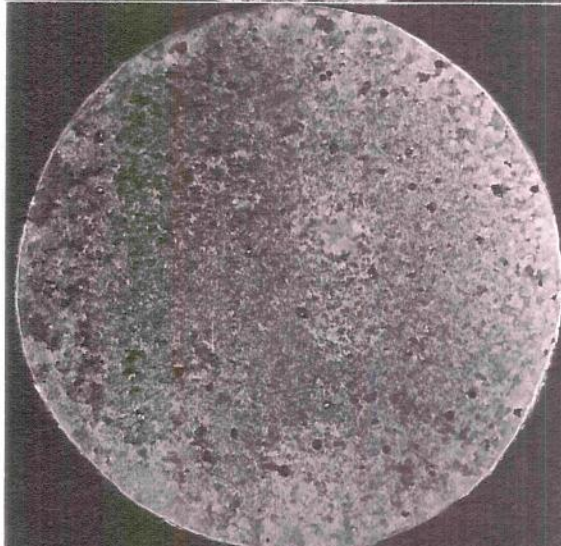
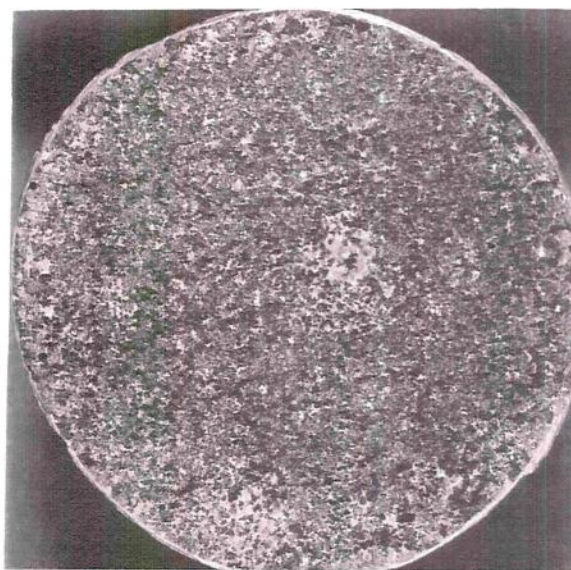
5.2.2 - Quanto ao aspecto macroestrutural

As FIGURAS 5.3 e 5.4 apresentam a macroestrutura nas três posições analisadas: topo, meio e fundo dos lingotes obtidos no equipamento construído, nas condições sem agitação e com agitação e velocidade de lingotamento de 1 e 3cm/s, respectivamente.

Fundidos



Reofundidos



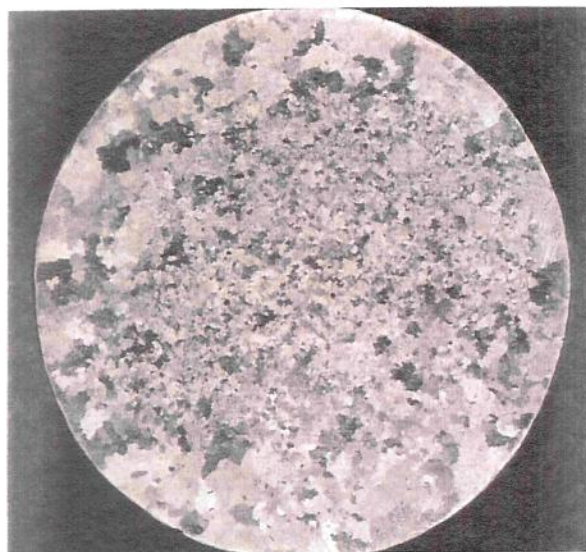
T
o
p
o

M
e
i
o

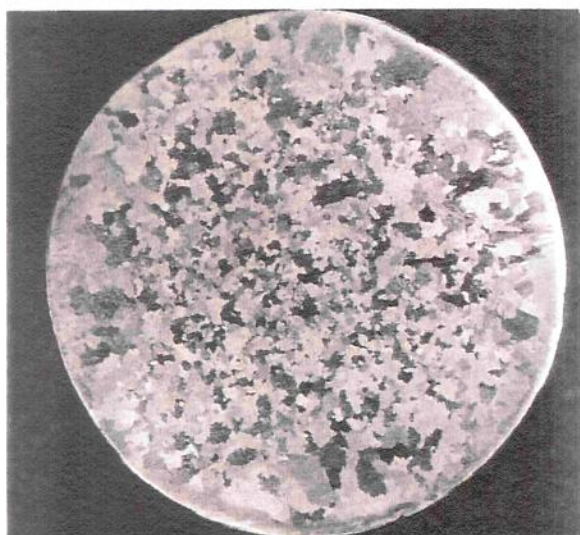
F
u
n
d
o

FIGURA 5.3 – Macroestruturas dos lingotes Fundidos e Reofundidos obtidos no equipamento construído com velocidade de lingotamento de 1cm/s.

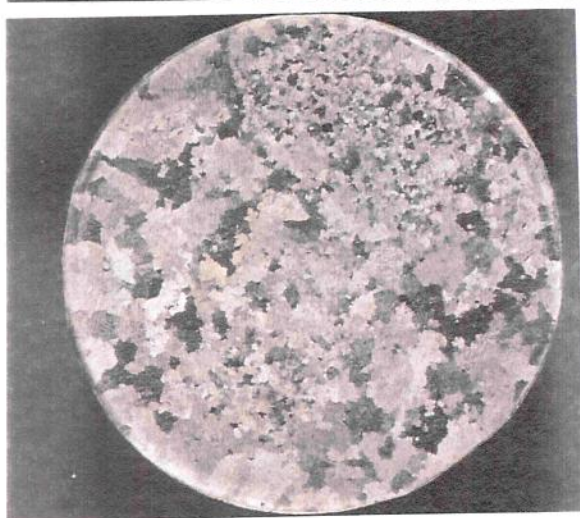
Fundidos



T
o
p
o



M
e
i
o



F
u
n
d
o

Reofundidos

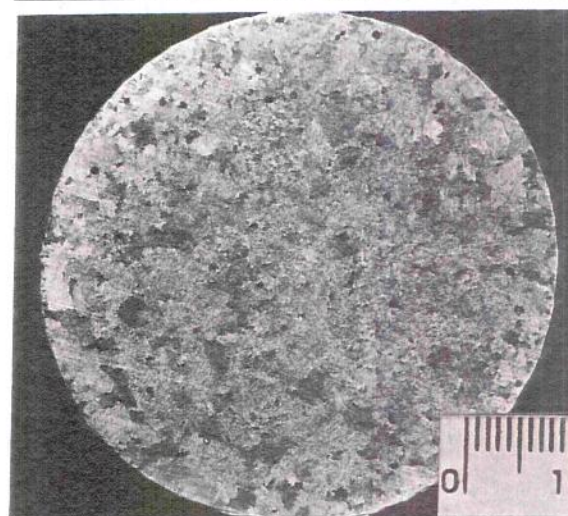
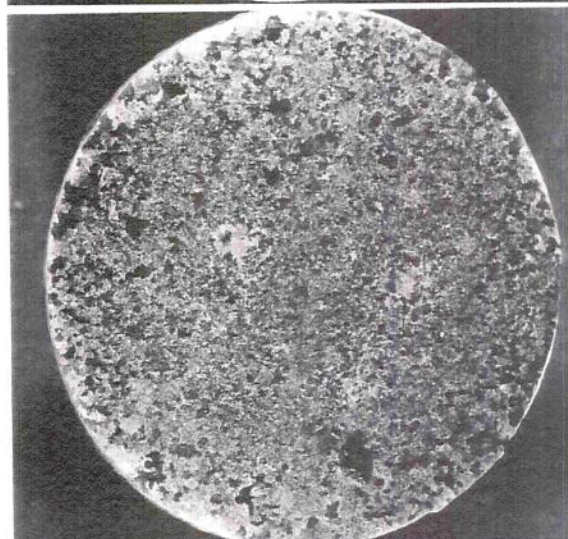
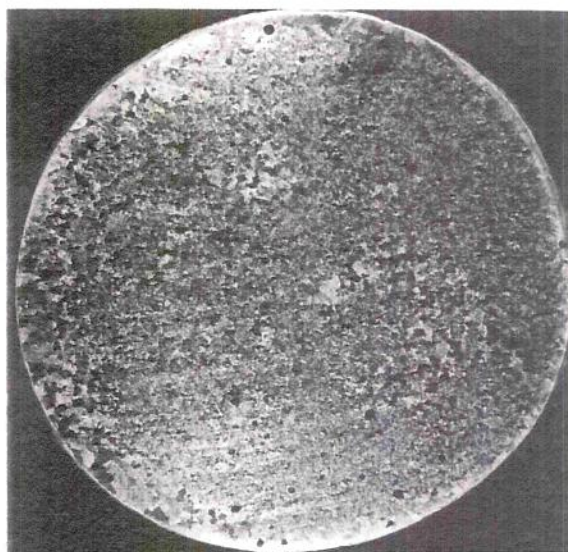


FIGURA 5.4 – Macroestruturas dos lingotes Fundidos e Reofundidos obtidos no equipamento construído com velocidade de lingotamento de 3cm/s.

Primeiramente nota-se para todas as condições que a estrutura é de grãos equiaxiais com ligeira tendência em apresentar alguns grãos colunares apenas na região do fundo nos lingotes fundidos. De maneira geral os lingotes fundidos e reofundidos apresentam a estrutura um tanto heterogênea já que é possível perceber um crescimento maior dos grãos na região da periferia dos lingotes, sendo mais acentuado nos lingotes reofundidos. Está visível que os grãos apresentam-se muito maiores para os lingotes fundidos em relação aos reofundidos e que há um ligeiro aumento do tamanho desses grãos quando a análise é feita do topo para o fundo do lingote sendo este efeito mais acentuado nos lingotes fundidos. O motivo para isto é que o fundo do lingote é resfriado anteriormente, porém com uma taxa de resfriamento menor uma vez que a solidificação é iniciada ao ar. Somente quando o lingote passa pelo sistema indutor a refrigeração tem início, fazendo com que haja um fluxo de extração de calor do fundo para o topo do lingote. Este fluxo faz com que a taxa de resfriamento aumente em direção ao topo, acarretando o maior refinamento da estrutura.

Para a velocidade de lingotamento de 3cm/s o tamanho de grão nos lingotes fundidos é um tanto menor, visualmente, que o tamanho de grão dos lingotes obtidos com velocidade de lingotamento de 1cm/s, uma vez que a maior velocidade causa uma maior taxa de extração de calor. Nos lingotes reofundidos o efeito da velocidade de lingotamento não está característico na macroestrutura dos lingotes obtidos, e o que sobressai é o efeito da agitação eletromagnética.

Nota-se também nos lingotes reofundidos, que a estrutura apresenta regiões isoladas onde o ataque químico deixa os grãos com aspecto diferenciado na cor em relação aos demais. Mais à frente ficou demonstrado que essas regiões apresentam grãos equiaxiais com dendritas em seu interior, originados provavelmente do deslocamento de grãos ou dendritas formadas na parede do lingote em direção ao centro. Nota-se ainda incidência maior de poros nos lingotes reofundidos indicando que a turbulência provocada pela agitação permite maior formação e retenção de bolhas de gás na estrutura, a localização preferencial no fundo dos lingotes induz à conclusão que a turbulência provocada no momento do vazamento gera maior quantidade de bolhas de ar nessa região e a eliminação das bolhas pela superfície do banho é dificultada pela altura do lingote.

Quanto à estrutura de grãos equiaxiais em todos os lingotes, já é esperado quando os

lingotes são obtidos em moldes metálicos, ainda mais com alta taxa de extração de calor durante a solidificação. A presença de grãos com maiores dimensões na periferia dos lingotes é devido ao diâmetro dos lingotes, ou seja a periferia é a primeira região onde ocorre a solidificação da pasta e enquanto ela prossegue para o núcleo do lingote, ocorre o fenômeno de crescimento dos grãos já formados na periferia. Nos lingotes reofundidos os grãos periféricos são muito maiores do que aqueles no núcleo dos lingotes, provavelmente porque a pasta restante no núcleo tenha sofrido o efeito da agitação por maior tempo consequentemente.

O efeito da agitação no tamanho final do grão macrográfico é bastante acentuado já que os lingotes reofundidos apresentam granulação bastante refinada em relação aos lingotes fundidos. Esses resultados já eram esperados, de acordo com as colocações feitas por autores que já estudaram o efeito da agitação eletromagnética na macroestrutura para o tipo de liga em estudo (VIVÉS, 1992).

Os resultados obtidos até aqui atestam que o equipamento provocou eficiente agitação eletromagnética da pasta em solidificação já que é notado uma sensível modificação na estrutura dos lingotes reofundidos em comparação com a estrutura dos lingotes fundidos.

5.2.3 – Caracterização microestrutural

A FIGURA 5.5 apresenta a microestrutura nas três posições analisadas: topo, meio e fundo dos lingotes obtidos no equipamento construído, nas condições sem agitação e com agitação e velocidade de lingotamento de 1cm/s.

Como já demonstrado na análise da macroestrutura, pode-se observar que o lingote reofundido apresenta também a microestrutura diferenciada da microestrutura do lingote fundido. O lingote fundido apresenta, nas três posições analisadas, microestrutura típica da liga Al-Cu solidificada convencionalmente, constituída da fase primária dendrítica Al- α circundada por uma rede do eutético constituído por Al- α e CuAl₂ com os ramos dendríticos afinados. Enquanto no lingote reofundido observa-se que a agitação da pasta durante sua solidificação produz alteração da morfologia da microestrutura em crescimento.

Fundidos

Reofundidos

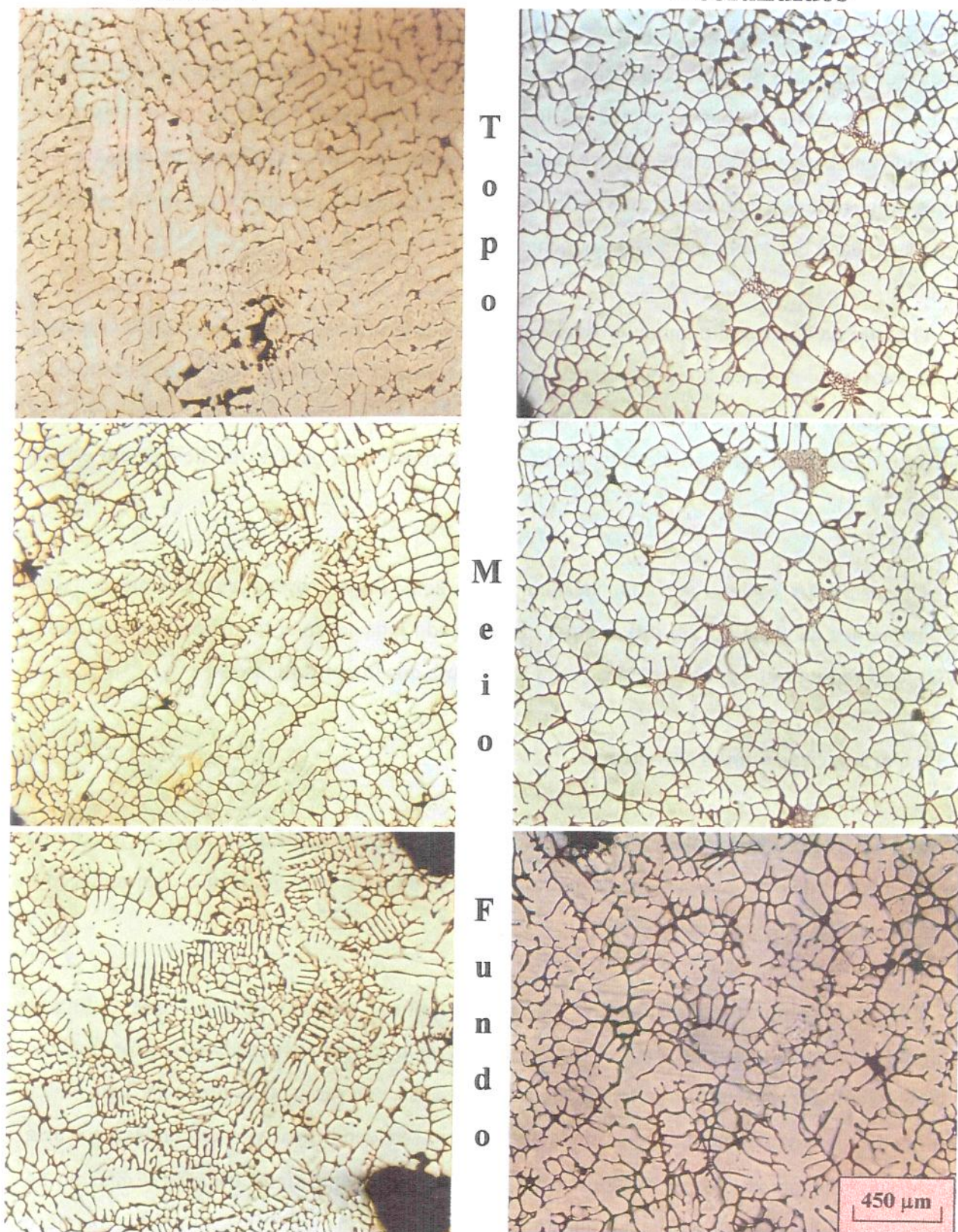


FIGURA 5.5 – Microestruturas dos lingotes Fundidos e dos lingotes Reofundidos obtidos no equipamento construído com velocidade de lingotamento de 1cm/s.

A nova microestrutura formada apresenta a fase sólida primária α na forma de cristais isolados com morfologia semi-globular (não mais dendrítica) característica em processos de obtenção de pasta reofundida por agitação eletromagnética como as obtidas por PAES & ZOQUI (1999).

A microestrutura obtida para os lingotes reofundidos é típica da reofundição, provavelmente se reaquecida acima da temperatura solidus da liga a fase sólida primária em pouco tempo irá adquirir a forma globular necessária em processos de tixotrofia.

Nota-se que a microestrutura no fundo do lingote reofundido ainda apresenta a fase primária com morfologia semi-dendrítica, com alguma semelhança à estrutura na mesma posição do lingote fundido, já a microestrutura no meio e no topo apresenta-se no estado reofundido e razoavelmente homogênea no aspecto morfológico, dimensional e de segunda fase. Observa-se a presença de pequenos poros, como já notados na macroestrutura, mas com menor intensidade no lingote reofundido.

Observa-se também pequenas regiões isoladas entre os glóbulos constituídas de fase α dendrítica ultra-refinada e fases secundárias, essas regiões provavelmente era líquido restante entre os glóbulos após a agitação e que a taxa de resfriamento final imposta à pasta não foi suficientemente alta para suprimir o crescimento dendrítico a partir desse líquido.

A FIGURA 5.6 apresenta a microestrutura nas três posições analisadas: topo, meio e fundo dos lingotes obtidos no equipamento construído, nas condições sem agitação e com agitação e velocidade de lingotamento 3cm/s.

Primeiramente, nota-se maior incidência de poros nos lingotes obtidos com essa velocidade de lingotamento, provavelmente porque a taxa de resfriamento final da pasta seja maior, em função da maior velocidade de lingotamento, e não há tempo suficiente para eliminação das bolhas de gás formadas pela superfície do lingote. Novamente o lingote reofundido conta menor incidência de poros em relação ao lingote fundido e neste a incidência de poros também é maior na região do fundo do lingote.

lingotes são obtidos em moldes metálicos, ainda mais com alta taxa de extração de calor durante a solidificação. A presença de grãos com maiores dimensões na periferia dos lingotes é devido ao diâmetro dos lingotes, ou seja a periferia é a primeira região onde ocorre a solidificação da pasta e enquanto ela prossegue para o núcleo do lingote, ocorre o fenômeno de crescimento dos grãos já formados na periferia. Nos lingotes reofundidos os grãos periféricos são muito maiores do que aqueles no núcleo dos lingotes, provavelmente porque a pasta restante no núcleo tenha sofrido o efeito da agitação por maior tempo consequentemente.

O efeito da agitação no tamanho final do grão macrográfico é bastante acentuado já que os lingotes reofundidos apresentam granulação bastante refinada em relação aos lingotes fundidos. Esses resultados já eram esperados, de acordo com as colocações feitas por autores que já estudaram o efeito da agitação eletromagnética na macroestrutura para o tipo de liga em estudo (VIVÉS, 1992).

Os resultados obtidos até aqui atestam que o equipamento provocou eficiente agitação eletromagnética da pasta em solidificação já que é notado uma sensível modificação na estrutura dos lingotes reofundidos em comparação com a estrutura dos lingotes fundidos.

5.2.3 – Caracterização microestrutural

A FIGURA 5.5 apresenta a microestrutura nas três posições analisadas: topo, meio e fundo dos lingotes obtidos no equipamento construído, nas condições sem agitação e com agitação e velocidade de lingotamento de 1cm/s.

Como já demonstrado na análise da macroestrutura, pode-se observar que o lingote reofundido apresenta também a microestrutura diferenciada da microestrutura do lingote fundido. O lingote fundido apresenta, nas três posições analisadas, microestrutura típica da liga Al-Cu solidificada convencionalmente, constituída da fase primária dendrítica Al- α circundada por uma rede do eutético constituído por Al- α e CuAl₂ com os ramos dendríticos afinados. Enquanto no lingote reofundido observa-se que a agitação da pasta durante sua solidificação produz alteração da morfologia da microestrutura em crescimento.

Fundidos

Reofundidos

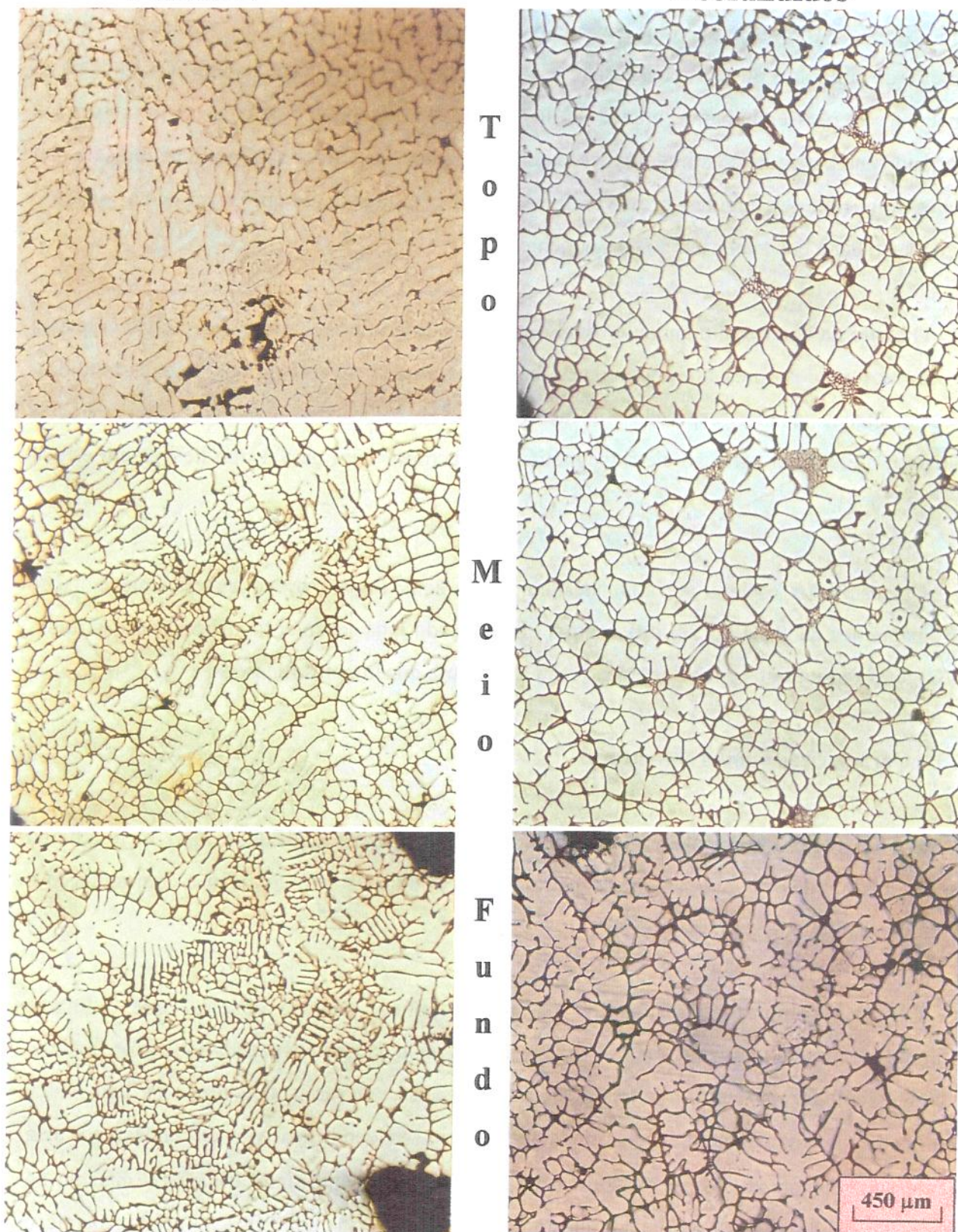


FIGURA 5.5 – Microestruturas dos lingotes Fundidos e dos lingotes Reofundidos obtidos no equipamento construído com velocidade de lingotamento de 1cm/s.

A nova microestrutura formada apresenta a fase sólida primária α na forma de cristais isolados com morfologia semi-globular (não mais dendrítica) característica em processos de obtenção de pasta reofundida por agitação eletromagnética como as obtidas por PAES & ZOQUI (1999).

A microestrutura obtida para os lingotes reofundidos é típica da reofundição, provavelmente se reaquecida acima da temperatura solidus da liga a fase sólida primária em pouco tempo irá adquirir a forma globular necessária em processos de tixoconformação.

Nota-se que a microestrutura no fundo do lingote reofundido ainda apresenta a fase primária com morfologia semi-dendrítica, com alguma semelhança à estrutura na mesma posição do lingote fundido, já a microestrutura no meio e no topo apresenta-se no estado reofundido e razoavelmente homogênea no aspecto morfológico, dimensional e de segunda fase. Observa-se a presença de pequenos poros, como já notados na macroestrutura, mas com menor intensidade no lingote reofundido.

Observa-se também pequenas regiões isoladas entre os glóbulos constituídas de fase α dendrítica ultra-refinada e fases secundárias, essas regiões provavelmente era líquido restante entre os glóbulos após a agitação e que a taxa de resfriamento final imposta à pasta não foi suficientemente alta para suprimir o crescimento dendrítico a partir desse líquido.

A FIGURA 5.6 apresenta a microestrutura nas três posições analisadas: topo, meio e fundo dos lingotes obtidos no equipamento construído, nas condições sem agitação e com agitação e velocidade de lingotamento 3cm/s.

Primeiramente, nota-se maior incidência de poros nos lingotes obtidos com essa velocidade de lingotamento, provavelmente porque a taxa de resfriamento final da pasta seja maior, em função da maior velocidade de lingotamento, e não há tempo suficiente para eliminação das bolhas de gás formadas pela superfície do lingote. Novamente o lingote reofundido conta menor incidência de poros em relação ao lingote fundido e neste a incidência de poros também é maior na região do fundo do lingote.

Fundidos

Reofundidos

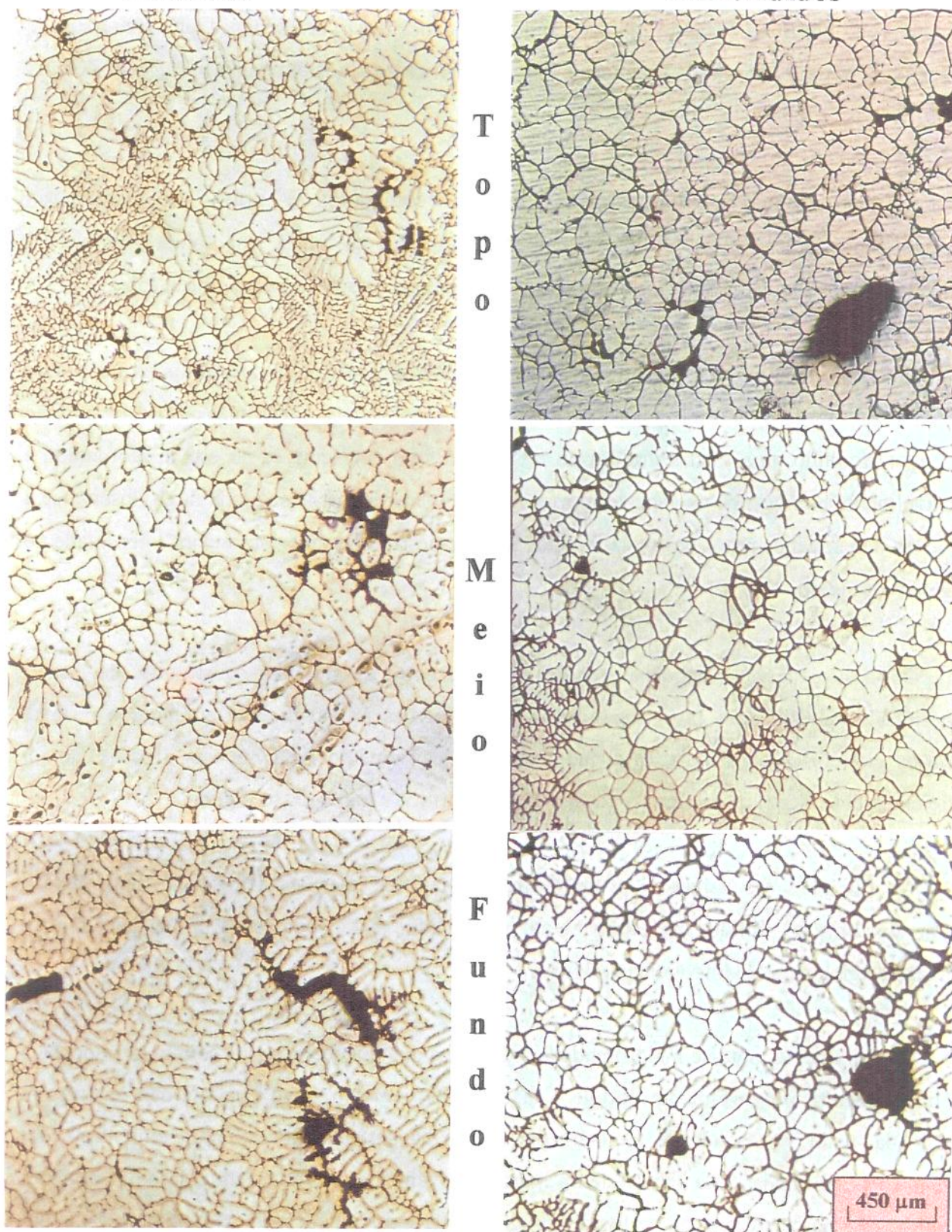


FIGURA 5.6 – Microestruturas dos lingotes Fundidos e dos lingotes Reofundidos obtidos no equipamento construído com velocidade de lingotamento de 3cm/s.

O lingote fundido obtido não apresenta alterações notáveis na microestrutura em relação ao lingote obtido com velocidade de lingotamento de 1cm/s. Quanto ao lingote reofundido pode ser observado que a microestrutura, assim como para a macroestrutura também apresenta mudança morfológica com relação à microestrutura do lingote fundido, no entanto essa alteração não é tão distinta como observado nas figuras anteriores, ou seja, percebe-se que a agitação eletromagnética provocou quebra da estrutura dendrítica durante a solidificação da pasta, mas não com a mesma intensidade provocada na velocidade de lingotamento de 1cm/s.

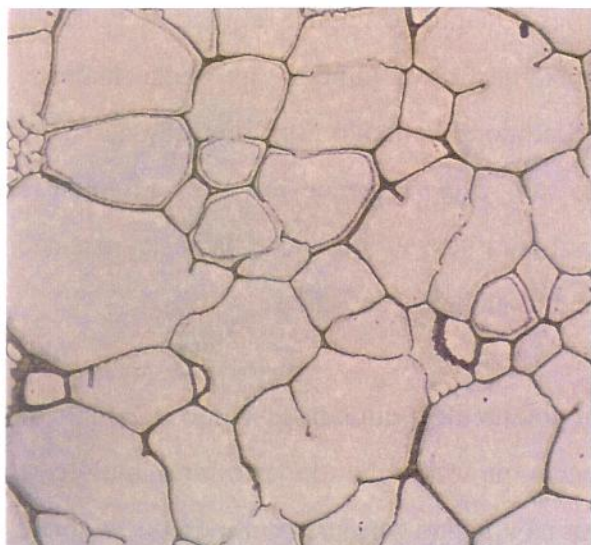
Observa-se claramente que a velocidade de lingotamento (entenda-se como o tempo de residência da pasta no campo de agitação) influencia na obtenção de estrutura totalmente reofundida em toda a secção do lingote. O que se nota na amostra retirada do fundo do lingote é que a microestrutura ainda é muito similar àquela obtida na mesma região do lingote fundido, é notado porém que as dendritas foram fragmentadas, principalmente em seus braços primários.

A diferença na estrutura do lingote reofundido, em relação à do lingote fundido, é mais notada quando a análise é feita para as amostras retiradas no meio e no topo do lingote, nestas regiões já pode ser notado a microestrutura dita como reofundida (semi-globular). Inclusive a microestrutura no topo do lingote tem mais semelhança com a microestrutura obtida na mesma região nos lingotes reofundidos obtidos com velocidade de lingotamento de 1cm/s.

Há uma nítida melhora no aspecto morfológico (globular) da fase primária α quando a análise é feita a partir do fundo para o topo do lingote indicando que a pasta ainda restante antes da total solidificação do lingote, por ter menor volume, é agitada com maior intensidade em função da potência máxima utilizada no equipamento. Maior agitação da pasta implica que mecanismos de rompimento dendrítico devem estar mais fortemente ativados levando à formação de estruturas globulares mais diretamente portanto.

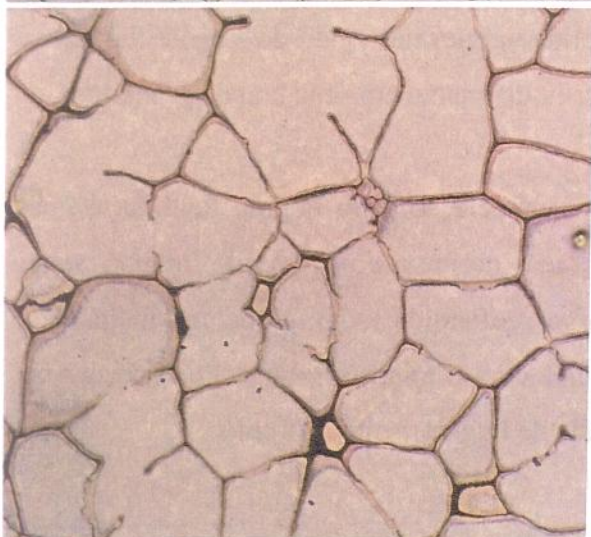
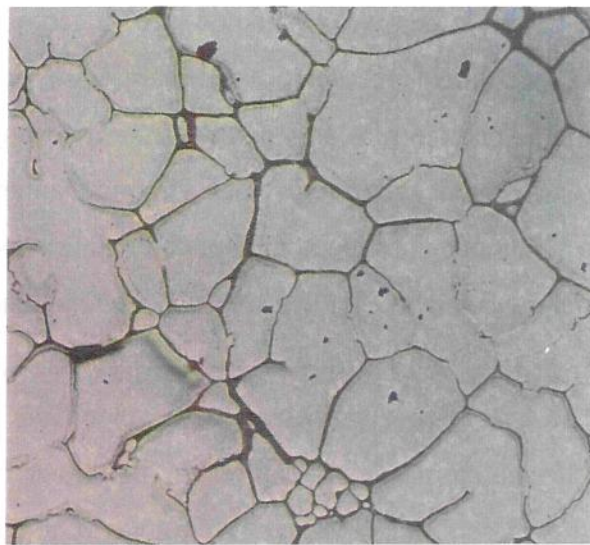
A FIGURA 5.7 apresenta com maior detalhe a microestrutura nas três posições analisadas: topo, meio e fundo dos lingotes obtidos no equipamento construído, na condição com agitação e velocidade de lingotamento de 1 e 3cm/s respectivamente.

1 cm/s

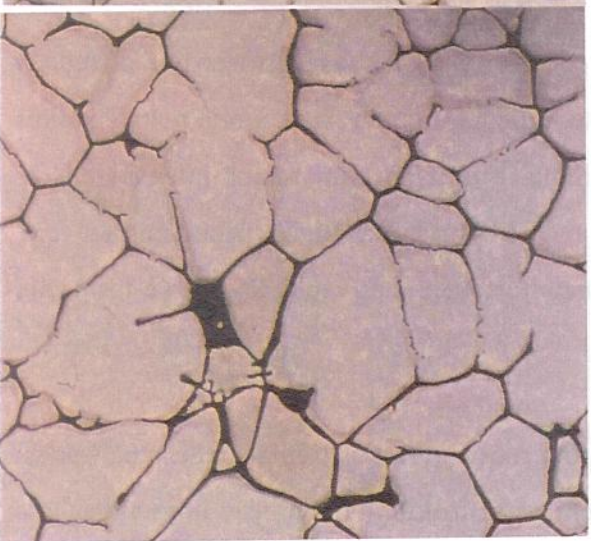
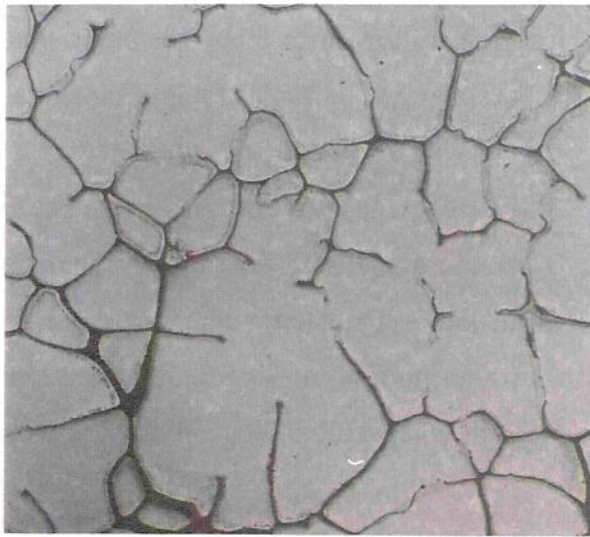


T
o
p
o

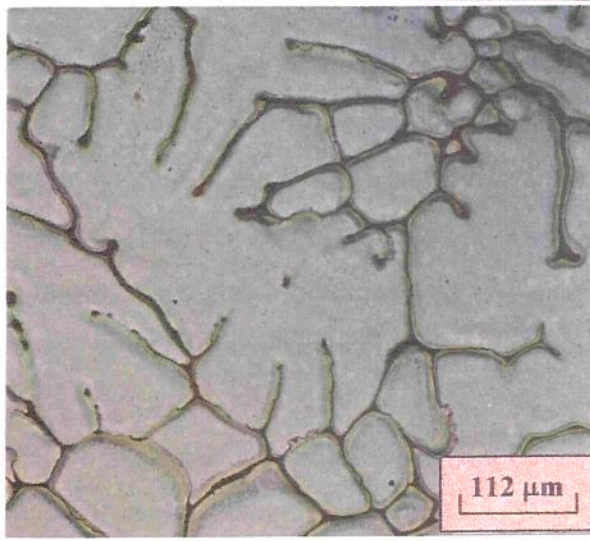
3cm/s



M
e
i
o



F
u
n
d
o



112 μm

FIGURA 5.7 – Microestruturas com maior detalhe dos lingotes Reofundidos obtidos no equipamento construído com velocidade de lingotamento de 1 e 3cm/s, respectivamente.

Para confirmar as observações feitas até aqui e complementar a caracterização microestrutural dos lingotes fundidos e reofundidos, a seguir são apresentados os resultados das medições efetuadas na microestrutura destes lingotes nas três posições analisadas.

A TABELA 5.1 apresenta o valor médio dos resultados das medições feitas com o auxílio do analisador de imagens para o espaçamento interdendrítico secundário da estrutura dos lingotes fundidos e para o diâmetro médio dos glóbulos (ou fragmentos dendríticos) da estrutura dos lingotes reofundidos, nas três posições analisadas, obtidos nas duas velocidades de lingotamento experimentadas.

TABELA 5.1 – Valores médios (em μm) dos espaçamentos interdendrítico secundário da estrutura dos lingotes fundidos e do diâmetro médio (em μm) dos glóbulos da estrutura dos lingotes reofundidos, obtidos no equipamento, em função da velocidade de lingotamento.

CONDIÇÃO	V=1cm/s			V=3cm/s		
	Topo	Meio	Fundo	Topo	Meio	Fundo
Fundidos (Espaçamento)	40,11 $\pm$ 5,69	66,00 $\pm$ 13,34	80,96 $\pm$ 11,75	71,67 $\pm$ 12,28	78,18 $\pm$ 7,26	74,93 $\pm$ 10,45
Reofundidos (T. de Glóbulo)	138,9 $\pm$ 38,3	137,4 $\pm$ 35,4	140,2 $\pm$ 41,3	136,3 $\pm$ 38,5	142,5 $\pm$ 41,6	150,7 $\pm$ 37,4

Para os lingotes fundidos, os resultados refletem as avaliações qualitativas feitas anteriormente na macroestrutura desses lingotes. Em função do tamanho dos grãos o valor do espaçamento interdendrítico secundário aumenta quando a análise é feita a partir da estrutura do topo para a estrutura do fundo do lingote. Para $V_L=3\text{cm/s}$ os valores indicam maior homogeneidade da estrutura, mas a heterogeneidade observada na estrutura ao longo do diâmetro do lingote não permite afirmar se há diferença no valor do espaçamento interdendrítico secundário para os lingotes obtidos com velocidade de lingotamento de 1 e 3cm/s, apesar que os valores obtidos é referente à regiões nas proximidades do núcleo do diâmetro do lingote.

Para os lingotes reofundidos, observa-se que os menores valores do tamanho de glóbulos são encontrados para velocidade de lingotamento de 1cm/s sendo que o fundo apresenta maiores valores e maior o desvio padrão, indicando maior heterogeneidade no tamanho dos cristais da

fase sólida primária nessa região. Com velocidade de lingotamento de 3cm/s o diâmetro médio dos cristais sólidos aumentam do topo para o fundo do lingote e precisamente no topo eles são praticamente iguais aqueles na mesma região do lingote obtido com $V_L=1\text{cm/s}$. Na região do fundo dos lingotes provavelmente a pasta já apresentava fração sólida muito alta e o efeito da agitação foi reduzido, mesmo porque nessa região há intensa troca de calor da pasta com o fundo da lingoteira. Com velocidade de 3cm/s o lingote apresenta valores crescentes do topo para o fundo, provavelmente porque a pasta que vai restando no momento da agitação já esteja sofrendo os efeitos da turbulência criada no campo de agitação logo abaixo, ou seja, ela é “agitada” por mais tempo e conseqüentemente houve maior quebra da estrutura dendrítica em crescimento. Como notado na microestrutura, a velocidade de lingotamento influencia diretamente no tamanho dos cristais da fase sólida primária dos lingotes, ou seja, para menor velocidade de lingotamento maior o tempo de permanência da pasta dentro do campo de agitação e portanto maior o tempo efetivo de ação das forças ou mecanismos atuando na quebra das dendritas em crescimento durante a solidificação.

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 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. Ainda analisando os resultados obtidos na Tabela, pode-se afirmar que para $V_L=1\text{cm/s}$ a agitação gera maior homogeneidade nas medidas dos glóbulos em relação ao espaçamento interdendrítico da estrutura obtida sem agitação.

A TABELA 5.2 apresenta o valor médio dos resultados das medições efetuadas pelo analisador de imagens para a porcentagem de eutético existente na estrutura nas três posições analisadas dos lingotes fundidos e dos lingotes reofundidos, obtidos nas duas velocidades de lingotamento experimentadas.

Pode-se observar que os valores da quantidade de eutético existente na estrutura dos lingotes fundidos são maiores naqueles obtidos com velocidade de lingotamento de 1cm/s.

TABELA 5.2 – Valores médios (em %) da quantidade de eutético existente na estrutura dos lingotes fundidos e dos lingotes reofundidos obtidos no equipamento, em função da velocidade de lingotamento.

CONDIÇÃO	V=1cm/s			V=3cm/s		
	Topo	Meio	Fundo	Topo	Meio	Fundo
Fundidos	14,88±1,35	18,21±3,96	14,89±1,15	10,74±0,63	12,35±2,10	11,86±0,74
Reofundidos	10,15±1,16	10,28±0,40	12,71±0,76	10,13±0,60	11,35±1,83	11,84±1,55

Nota-se também que há maior quantidade de eutético na região do meio desses lingotes e, no topo e no fundo a quantidade é praticamente igual, para as duas velocidades de lingotamento. Essas diferenças nos resultados não são facilmente visíveis na microestrutura dos lingotes.

Para os lingotes reofundidos a quantidade de eutético praticamente não se altera em função da velocidade de lingotamento. Há uma ligeira tendência em apresentar-se em maior quantidade na região do fundo dos lingotes porque esta região é a primeira a solidificar-se e apartir de uma temperatura maior do que o restante do lingote.

Nos lingotes reofundidos obtidos com a menor velocidade de lingotamento a quantidade de eutético presente na estrutura é menor que para os lingotes fundidos, 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 reofundidas.

A TABELA 5.3 apresenta o valor médio dos resultados das medições efetuadas pelo analisador de imagens para o fator de forma da estrutura nas três posições analisadas dos lingotes reofundidos, obtidos nas duas velocidades de lingotamento experimentadas.

TABELA 5.3 – 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

Como descrito na capítulo anterior 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 tixoconformação.

Os valores encontrados no analisador de imagens para o fator de forma ou grau de esfericidade dos cristais da fase sólida primária na estrutura dos lingotes refundidos obtidos no equipamento, 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 5.1 e na microestrutura desses lingotes:

- com velocidade de lingotamento de 1cm/s eles apresentam a melhor estrutura refundida no topo e no meio do lingote, onde a fase sólida primária apresenta-se com maior grau de esfericidade (menor o fator de forma), já na região do fundo dos lingotes a estrutura está pouco fragmentada apresentando-se com maior fator de forma, como observado na microestrutura, e o desvio padrão chega a ser mais alto que o valor médio encontrado.
- 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 também está pouco fragmentada e portanto com maior valor do fator de forma da fase sólida primária.

Nota-se que quando a estrutura se apresenta com morfologia próxima daquela dita dendrítica (na microestrutura) o desvio padrão do valor médio para o fator de forma, gerado no analisador de imagens, é muito alto indicando grande heterogeneidade na estrutura.

Com velocidade de lingotamento de 3cm/s os lingotes apresentam estrutura que pode-se considerar como reofundida apenas na região do topo.

Com velocidade de lingotamento de 1cm/s são produzidos lingotes que pela morfologia da fase sólida primária podem perfeitamente ser utilizados como matéria prima em processos de tixoconformação. O tipo de estrutura obtida, se reaquescida para processamento posterior, deve atingir morfologia inteiramente globular em curto tempo de aquecimento, conforme GARANT et al (1998).

Portanto, tomando-se por base os resultados das Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, por enquanto a melhor condição para se obter o reofundido no equipamento construído é utilizando a potência de 1200Watts por 5s de reversão do campo magnético e com velocidade de lingotamento de 1cm/s.

CAPÍTULO 6

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

6.1 – Quanto aos objetivos propostos

De maneira geral, após a análise dos resultados obtidos, é possível afirmar que o objetivo principal do trabalho foi alcançado uma vez que o equipamento projetado e construído se mostrou capaz de produzir pastas metálicas reofundidas na forma de lingotes obtidos por agitação eletromagnética da pasta em processo de lingotamento semi-contínuo.

6.2 – Quanto ao equipamento projetado e construído

O projeto mecânico do equipamento é simples, de baixo custo e de fácil construção.

Os componentes elétricos, eletrônicos e mecânicos que comandam o funcionamento do equipamento se comportaram de maneira íntegra e seguros, não requerendo manutenções durante os experimentos.

O sistema de lingotamento semi-contínuo funciona com perfeição, permitindo uniformidade da velocidade de lingotamento e reprodutibilidade dos resultados.

O sistema de agitação se mostrou apropriado e a potência máxima induzida ao motor estator produz um campo magnético capaz de promover a agitação do volume da pasta dentro da lingoteira.

De uma maneira geral o equipamento projetado e construído tem excelente desempenho

mecânico, é de fácil operação e oferece segurança ao operador. O desempenho térmico não foi avaliado, apesar de ter sido projetado e construído um forno para manutenção da temperatura do banho. Foi observado que se o forno de aquecimento for utilizado para estabilizar a temperatura do banho, para o início da agitação e do lingotamento, o tempo total do processo é aumentado e se o forno não é utilizado há um ganho de tempo considerável e maior produção portanto. Para não necessitar do forno de aquecimento deve-se tomar o cuidado de vaziar a liga com 100°C acima da temperatura estipulada para o início da agitação e nesse caso o tempo total do processo até a obtenção do lingote não ultrapassa os 5 minutos. Uma conclusão importante é que se não há necessidade do forno de aquecimento para manutenção da temperatura do banho pode-se então processar ligas de mais alto ponto de fusão sem a dependência da capacidade desse componente.

6.3 – Quanto ao lingotes produzidos

Lingotes com 2,5kg de massa foram facilmente produzidos. Os lingotes obtidos nas duas condições experimentadas apresentam bom acabamento superficial e mínimo de rechupe naqueles obtidos sem agitação, naqueles obtidos com agitação há indícios de formação de um vórtice na pasta.

Os lingotes obtidos por fundição convencional apresentam estrutura de grãos equiaxiais típicos de fundição em coquilha e devido a direção do resfriamento no lingotamento o tamanho diminui em direção ao topo. Nos lingotes obtidos por agitação eletromagnética os grãos são equiaxiais e bem mais refinados e a estrutura é mais homogênea ao longo do lingote. Em ambos os casos os lingotes apresentam heterogeneidade na estrutura ao longo do diâmetro (na periferia os grãos são maiores do que no núcleo) sendo maior na condição com agitação. Em geral a maior velocidade de lingotamento resulta em estrutura mais refinada.

Para velocidade de lingotamento de 1cm/s os lingotes fundidos apresentam microestrutura típica de solidificação convencional com ramificações dendríticas enquanto os lingotes obtidos por agitação eletromagnética apresentam a fase sólida primária α na forma de cristais isolados com morfologia semi-globular típica de estruturas reofundidas, e a taxa de resfriamento imposta à

pasta após a agitação, não é suficiente para suprimir um crescimento de ramificações dendríticas a partir do líquido restante.

Aumento na velocidade de lingotamento dos lingotes obtidos com agitação, resulta em pouco tempo de agitação da pasta e estruturas pouco quebradas ou não reofundidas e com maior incidência de poros. Para $V_L=3\text{cm/s}$ apenas a região do meio para o topo do lingote apresenta estrutura reofundida porque a pasta restante, por ter menor volume, é agitada com maior intensidade.

Os lingotes fundidos com menor velocidade de lingotamento apresentam maior quantidade de eutético, no meio o valor é maior que no topo e no fundo. Já os lingotes reofundidos não apresentam diferença significativa na quantidade de eutético nas duas velocidades de lingotamento e tem menor quantidade que os lingotes fundidos porque neles a fase sólida primária incorpora mais soluto durante a solidificação.

Os lingotes reofundidos obtidos com $V_L=1\text{cm/s}$ tem o diâmetro médio dos cristais da fase primária variando de 137 a 140 μm e nos lingotes obtidos com $V_L=3\text{cm/s}$ o diâmetro médio desses cristais variam de 136 a 151 μm .

A velocidade de lingotamento influencia diretamente no diâmetro médio dos cristais da fase sólida primária, indicando que quanto menor a velocidade de lingotamento menores eles serão. Para maior velocidade de lingotamento, menor é o tempo de permanência da pasta dentro do campo magnético e menor o efeito da agitação na estrutura final da pasta.

Confrontando com o valor médio do espaçamento dos braços dendríticos secundários que se formariam sem a agitação, os glóbulos formados tem um diâmetro médio 100 % maior.

Menores valores para o fator de forma da fase sólida primária são encontrados nos lingotes obtidos com velocidade de lingotamento de 1cm/s. Há uma estreita correlação do fator de forma com o valor do diâmetro médio dos cristais da fase sólida primária, quanto menores os cristais desprendidos das dendritas durante a agitação mais globulares serão ao final do processo.

Com velocidade de lingotamento de 1cm/s são produzidos lingotes que pela morfologia da fase sólida primária podem perfeitamente ser utilizados como matéria prima em processos de tixoconformação.

Enfim pode-se concluir que o equipamento projetado e construído é capaz de produzir lingotes refundidos da liga AA2011 e que pode ser perfeitamente utilizado para outras ligas com temperatura de fusão abaixo de 1000°C ou até superior (sem necessidade de utilização do forno de aquecimento). São obtidos lingotes cônicos (com diâmetro mínimo de 45mm e máximo de 60mm) que podem perfeitamente ser aproveitados como matéria prima em processos de tixoconformação.

O equipamento construído tem grande potencial a ser explorado.

6.4 – Sugestões para trabalhos futuros

É conveniente estudar outros parâmetros de processo na produção de lingotes refundidos no equipamento e possíveis alterações para melhorar a eficiência e automatização do mesmo:

- Exploração do software e dos circuitos eletrônicos para automatização do processo, como acionamento automático do sistema de potência e do lingotamento semi-contínuo em função da temperatura do banho e interrupção e término automático em função do tempo;
- Diminuir a velocidade de lingotamento e estudar o efeito na microestrutura;
- Estudar o efeito da potência e do modo de agitação na estrutura final dos lingotes;
- Estudar a influência do tempo de reversão do sentido do campo de agitação;
- Termopares de leitura da temperatura do banho posicionados na parte externa da lingoteira para eliminar uma possível influência deles na estrutura final dos lingotes;
- Aumentar a eficiência do sistema de resfriamento para congelamento mais rápido da estrutura original imediatamente após a agitação;
- Mapear a influência da agitação na microestrutura ao longo do diâmetro do lingote;
- Enrolamento do motor estator para garantir maior potência de agitação;
- Viabilidade do equipamento em produzir materiais refundidos com outras ligas metálicas;
- Adaptação do equipamento para produção de lingotes em sistema de lingotamento contínuo.

Referências Bibliográficas

ALUMINIUM PECHINEY. Althix® Billets. *Catálogo Técnico*, Compiègne, April, 1996, 8p.

APAYDIN, N. Effect Of Stirring On The Bulk Solidification Of Hypoeutectic And Eutectic Al-Si Alloys. *Journal of Materials Science Letters*, v.1, 1982, p.39-43

BUBENIK, R. *Projeto E Construção De Equipamento Eletromagnético Para A Produção De Matéria Prima Para Tixotomografia De Ligas Metálicas*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 123p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).

CÁU, E.R., and ROBERT, M.H. Obtention of Rheocast Structures of M-2 and 308-L Stainless Steel by S.I.M.A. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PROCESSING OF SEMI-SOLID ALLOY AND COMPOSITES, 2, 1992, Cambridge. *Proceedings....Cambridge: 1992*, p.1-10.

DECKER, R.F. Net Shape Metals And MMC'S Produced By Thixomolding. *Materials Processing Report*, v.5, n.9, p.1-2, Dec.1989.

EISEN, P. Introduction of SSM Cast Safety Critical Components for Automotive Applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PROCESSING OF SEMI-SOLID ALLOYS AND COMPOSITES, 5, 1998, Golden. *Proceedings....Colorado: 1998*, p.ix-xvi.

FLEMINGS, M.C. Solidification Processing. Ed. McGraw Hill, USA., 1974

- FLEMINGS, M.C., RIEK, R.G., and YOUNG, K.P. Rheocasting. *Materials Science and Engineering*, 25, 1976. p.103-107.
- FLEMINGS, M.C. Rheocasting. In: WORKSHOP ON RHEOCASTING, 1977, Army Materials and Mechanics Research Center. *Proceedings....*, Watertown, MA: Feb. 3-4, 1977, R.D. French and Frank S. Hodi, eds, Metals and Ceramics Information Center, Columbus. Oh. p.265-272.
- FOGAGNOLO, J.B. *Contribuição à Análise dos Efeitos de Parâmetros de Processo na Qualidade de Compósitos Obtidos por Comopofundição*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996, 133 p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).
- GARANT, M., BLAIS, S., PLUCHON, C., and LOUÉ, W.R. Aluminium Semi-Solid Processing: From the Billet to the Finished Part. In:INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PROCESSING OF SEMI-SOLID ALLOYS AND COMPOSITES, 5, 1998, Golden. *Proceedings....*Colorado: 1998, p.xvii-xxxi.
- GRIFFITHS, W.D., and McCARTNEY, D.G. The Effect Of Electromagnetic Stirring On Macrostructure And Macroseggregation In The Aluminium Alloy 7150. *Materials Science and Engineering*, v.A222, 1997, p.140-148.
- HIRT, G. SSM Forming of Usually Wrought Aluminium Alloys. In:INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PROCESSING OF SEMI-SOLID ALLOYS AND COMPOSITES, 3, 1994, Tokyo. *Proceedings....*Tokyo: 1994, p. .
- IDEGOMORI, T., HIRONO, H., ITO, O., KIMISHIMA, S. and MIZOUE, K. The Manufacturing of Automobile Parts Using Semi-Solid Metal Processing. In:INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PROCESSING OF SEMI-SOLID ALLOYS AND COMPOSITES, 5, 1998, Golden. *Proceedings....*Colorado: 1998, p.71-77.

- KAPRANOS, P. Semi-solid Metal Processing: an Environmentally Friendly Process. *Materials World*, Sep. 1994, p.465-467.
- KAPRANOS, P., KIRKWOOD, D.H. and MANI, P.H. Semi-Solid Metal Processing of Ductile Iron. In:INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PROCESSING OF SEMI-SOLID ALLOYS AND COMPOSITES, 5, 1998, Golden. *Proceedings....Colorado*: 1998, p.431-438.
- KATTAMIS, T.Z., and PICCONE, T.J. Rheology of Semisolid Al-4.5-PercentCu-1.5-PercentMg Alloy. *Materials Science and Engineering A*, 1991, v.A131, p.265-72
- KIRKWOOD, D.H. Semi-solid Processing of High Melting Point Alloys. In:INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PROCESSING OF SEMI-SOLID ALLOYS AND COMPOSITES, 4, 1996, Sheffield. *Proceedings....London*: 1996, p.320-325.
- KIRKWOOD, D.H., and ROBERT,M.H. Alloy Slurry Formation by Partial Melting. In: CONFERENCE ON THE SOLIDIFICATION OF METALS, 1987, *Proceedings....*,1987, p.405-408.
- KUMAR, P. et al. Predicting the Constitutive flow Behavior of Semi-Solid Metal Alloy Slurries. In:INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PROCESSING OF SEMI-SOLID ALLOYS AND COMPOSITES, 3, 1994, Tokyo. *Proceedings....Tokyo*: 1994, p.37-46.
- JOLY, P.A., and MEHRABIAN, R. The Rheology Of A Partially Solid Alloy. *Journal of Materials Science*, London, v.11, n.8, p.1393-1418, Aug.1976.
- LOUÉ, W.R., and SUÉRY, M. Microstructural Evolution During Partial Remelting Of Al-Si7Mg Alloys. *Materials Science and Engineering A*, Lausanne, v. A203, n. 1, p.1-13, Jan. 1995.
- MARSH, P. The die is Cast in the Metal Making Battle. *New Scientists*, 14 de janeiro de 1982, p.72-74.

MARTINS, A.C. *Projeto e Construção de Equipamento para Produção de Compósitos Particulados de Ligas Não Ferrossas*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996. 85p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).

METALS HANDBOOK. v.XV, 1988, p.327-338

METZ S.A., and FLEMINGS, M.C. *Transaction America Foundrymen's Society.*, v.78, p.453-60, 1970.

MIWA, K. Apparent Viscosity and Structure in Al-Si Alloys Partially Solidified Under Stirring. *J. Japan Inst. Of Metals*, v.45, n.8, 1981, p.853-859.

MOSCHINI, R. Mass Production of Fuel Rails by Pressure Die Casting in the Semi-Sólid State. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES, 4, 1996, Sheffield. *Proceeding...* London: 1996, p.248-250.

MURAKAMI, H., YOSHIKAWA, Y., TAKEBAYASHI, T., MORYA, T. HIRAI, M., and NAMBA, A. Semi-Sólid Metal Making of High Melting Point Alloys by Eletromagnetic Stirring. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SEMI-SÓLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES, 2, 1992, Cambridge. *Proceeding...* Cambridge: 1992, p.67-76.

NICHOLAS, N.H., TRICHKA, M.R. and YOUNG, K.P. Apllication of Semi-Solid Metal Forming to the Production os Small Components. In:INTERNTIONAL CONFERENCE ON THE PROCESSING OF SEMI-SOLID ALLOYS AND COMPOSITES, 5, 1998, Golden. *Proceedings....*Colorado: 1998, p.79-86.

NIEDERMAIER, F., LANGGARTNER, J., HIRT, G. and NIEDICK, I. Horizontal Continuous Casting of SSM Billets. In: INTERNTIONAL CONFERENCE ON THE PROCESSING OF SEMI-SOLID ALLOYS AND COMPOSITES, 5, 1998, Golden. *Proceedings....*Colorado: 1998, p.407-414.

- PAES, M., and ZOQUI, E.J., Obtenção de Estrutura Reofundida da Liga Al-%wtCu: Comparação entre o Ultra-Refino e a Agitação Eletromagnética. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 15, 1999, Águas de Lindóia. *Anais...* São Paulo: 1999 (in press).
- PAI, B.C., PILLAI, R.M. and SATYANARAYANA, K.G. Semi-Solid Processed Aluminium Alloy Matrix Composites. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PROCESSING OF SEMI-SOLID ALLOYS AND COMPOSITES, 5, 1998, Golden. *Proceedings....*Colorado: 1998, p.423-29.
- PRASAD, P.R., RAY, S., GAINDHAR, J.L., and KAPOOR, M.L. Microstructure of Rheocast Al-wt%Cu Alloy. *Z. Metallkunde*, Bs. 78, H.5, 1987, p.376-380.
- ROBERT, M.H. Partial Melting as a Efficient Method to Produce Rheocast Alloys Slurries. *Transactions of the Japan Foundrymen's Society*, V.12, p.45-51, Oct. 1993.
- ROBERT, M.H., and KIRKWOOD, D.H. Alloy Slurry Formation By Partial Melting. In: CONFERENCE ON THE SOLIDIFICATION OF METALS, *Poceedings...*, 1988, p.3737-376.
- SECONDE, J.F., and SUÉRY, M. Effect of Solidification Conditions on Deformation Behavior of Semi-Sólid Sn-Pb Alloys. *J. Materials Science*, v.19, 1984, p.3995-4006.
- SPENCER, D.B. *Ph.D. Thesis*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1971.
- SPENCER, D.B., MEHRABIAN, R., and FLEMINGS, M.C. Rheological Behavior of Sn-15 Pat Pb in the Crystallization Range. *Metall. Trans.* v.3, p.1925-1932, 1972.
- STUART B.B., and FLEMINGS, M.C. Net-Shape Forming Via Semi-Solid Processing. *Advanced Materials & Processes*, Jan. 1993, p.36-40.

- WAN, G., and SAHM, P.R. Particle Growth By Coalescence And Ostwald Ripening In The Rheocasting Of Pb-Sn. *Acta Metall. Mater.*, v.38, n.11, 1990, p.2367-2372.
- WINTER, J., DANTZIG, J., and TYLER, D. *U.K. Patent Application Number GB 2042 386A*, 1980.
- VIVES, C. Elaboration of Semisolid Alloys by Means of New Electromagnetic Rheocasting Processes. *Metallurgical Transactions B*, v.23B, p.189-206, April 1992.
- ZOQUI, E.J. *Obtenção e Caracterização Mecânica e Metalúrgica da Liga Al-4,5wt%Cu no estado reofundido*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1995, 256p. (Tese, Doutorado em Engenharia Mecânica).