

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR Rubens Luiz  
Bubenik E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 18/05/98.

Helena Robert  
Prof.ª MARIA HELENA ROBERT  
ORIENTADOR  
Matr. n.º 09333-0  
FEM - UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Projeto e construção de equipamento  
eletromagnético para a produção de  
matéria-prima para tixotomografia de ligas  
metálicas**

Autor: **Rubens Luiz Bubenik**  
Orientadora: **Maria Helena Robert**

05/98

B85p

35003/BC

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

**Projeto e construção de equipamento  
eletromagnético para a produção de  
matéria-prima para tixotomografia de ligas  
metálicas**

**Autor: Rubens Luiz Bubenik  
Orientadora: Maria Helena Robert**

**Curso: Engenharia Mecânica  
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação**

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

Campinas, 1998  
S.P. - Brasil



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	B85p
V.	Es
TOMBO BC/	35003
PROC.	395/98
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	11/09/98
N.º CPD	

CM-00115957-5

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

B85p Bubenik, Rubens Luiz  
Projeto e construção de equipamento eletromagnético para a produção de matéria-prima para tixoconformação de ligas metálicas. / Rubens Luiz Bubenik.--Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientador: Maria Helena Robert  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Ligas (Metalurgia). 2. Solidificação. 3. Fundição.  
I. Robert, Maria Helena. 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**

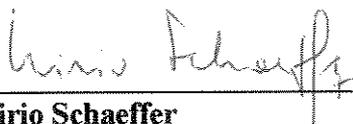
**Projeto e construção de equipamento  
eletromagnético para a produção de  
matéria-prima para tixotomografia de ligas  
metálicas**

Autor: **Rubens Luiz Bubenik**  
Orientadora: **Maria Helena Robert**



---

**Professora Dra. Maria Helena Robert**  
**Instituição - Universidade Estadual de Campinas**



---

**Prof. Dr. Lirio Schaeffer**  
**Instituição - Universidade Federal do Rio Grande do Sul**



---

**Prof. Dr. Paulo Roberto Mei**  
**Instituição - Universidade Estadual de Campinas**

Campinas, 1998

## **Dedicatória:**

Dedico este trabalho a todos.

Dedico também, às pessoas que indiretamente foram responsáveis pela conclusão deste trabalho, pois, sem esse apoio anônimo, certamente as dificuldades ou impossibilidades seriam maiores.

Dedico ainda, a **Augusto Bubenik**, para que no futuro ele possa ler este trabalho e dele extrair algum conhecimento e ainda saber que, no momento da sua edição, seu pai o esperava ansiosamente.

## Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Aos meus pais pelo incentivo e a oportunidade de vida.

À minha orientadora, **Maria Helena Robert**, pelo apoio técnico e principalmente humano que em certas situações muito precisei.

A todos os professores, técnicos de laboratório e colegas do Departamento de Engenharia de Fabricação e também do Departamento de Materiais da FEM, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

## Lista de figuras

### Capítulo 2

- FIGURA 2.1 - Variação da tensão de cisalhamento com a fração sólida da liga Al 4 Cu no estado semi-sólido, cisalhada isotermicamente com uma taxa de deformação de 0,049 mm/s. METZ S.A. e FLEMINGS, M.C. (1970)..... 6
- FIGURA 2.2 - Variação da deformação com a tensão de cisalhamento em estruturas semi-sólidas dendríticas, para a liga Sn 15 Pb cisalhada isotermicamente. SPENCER, D. B., *et al.* (1972). ..... 6
- FIGURA 2.3 - Curva experimental para a liga Sn 15 Pb reofundida obtida nas condições de 0,006°C/s (resfriamento) e 200/s (taxa de deformação) com diferentes frações sólidas. SPENCER, D.B.(1971). ..... 7
- FIGURA 2.4 - Microestruturas da liga Al 4,5 Cu: a) dendritica (vazada a 700 °C em coquilha); b) reofundida (obtida por fusão parcial de material deformado a frio. (ZOQUI, E.J. 1995). ..... 8
- FIGURA 2.5 - Efeito da taxa de resfriamento na viscosidade da liga Al 4,5 Cu 1,5 Mg., cisalhada a 330/s. KATTAMIS, T.Z., PICCONE, T.J. (1991). ..... 10
- FIGURA 2.6 - Efeito da taxa de cisalhamento na viscosidade da liga Al 4,5 Cu 1,5 Mg, enquanto agitada e resfriada a 0,03°C/s. FLEMINGS, M.C., ( 1977 ). ..... 10
- FIGURA 2.7 Comparação esquemática entre as relações tensão de cisalhamento e taxa de deformação nos fluidos Newtoniano e não Newtonianos. VENNARDS-STREET (1978). .... 13
- FIGURA 2.8 - Macroestruturas da liga de Al 2 Cu vazada a 40°C acima da temperatura *liquidus*: a) convecção presente durante a solidificação; b) convecção amortecida por campos magnéticos. UHLMANN D.R., *et al.* (1966) ..... 18

FIGURA 2.9 - Variação de dimensões de a) micro-turbulências e b) diâmetro dos grãos, em função do número de Reynolds no resfriamento sob agitação de liga Al 24 Cu. VOGEL, A. (1978).....	20
FIGURA 2.10 - Cálculo da razão entre a tensão de escoamento do Al, próximo ao ponto de fusão, e a tensão calculada na raiz dos ramos dendríticos, considerando velocidade no líquido de $10^{-2}$ m/s para vários diâmetros do ramo dendrítico. PILLING, J. e HELLAWELL, A. (1996).....	22
FIGURA 2.11 - Efeito do tempo de manutenção da liga Al 4,5 Cu a 635 °C (temperatura equivalente à fração sólida 0,5), no grau de globularização da estrutura (REEVES, J.J. e KATTAMIS, T.Z. 1971).....	24
FIGURA 2.12 - Micrografia da liga Al 7 Si 0,6 Mg obtida por agitação eletromagnética durante a solidificação, em equipamento de BLAIS S. <i>et al.</i> (1996). ....	31
FIGURA 2.13 - Micrografia obtida para agitação eletromagnética durante a solidificação, em equipamento de KAHARMANN W. <i>et al.</i> (1996).....	32

## Capítulo 3

FIGURA 3.1 Desenho esquemático geral dos componentes mecânicos e elétricos do equipamento projetado e construído. ....	35
FIGURA 3.2 - Desenho esquemático geral da lingoteira do equipamento projetado e construído. ....	36
FIGURA 3.3 - Diagrama em blocos dos circuitos elétricos e eletrônicos projetados para o equipamento construído.....	37
FIGURA 3.4 - Desenho esquemático da mesa constituinte da estrutura de sustentação do equipamento construído.....	39
FIGURA 3.5 - Desenho esquemático da estrutura inferior do equipamento construído.....	40
FIGURA 3.6 - Desenho esquemático da estrutura superior do equipamento construído. ....	41
FIGURA 3.7 - Desenho esquemático do canal de alimentação do equipamento construído. ..	42
FIGURA 3.8 - Desenho esquemático da lingoteira do equipamento e construído. ....	44
FIGURA 3.9 - Desenho esquemático do canal de refrigeração do equipamento construído. ..	45
FIGURA 3.10 - Circuito do comando geral do equipamento construído. ....	52
FIGURA 3.11 - Circuito elétrico principal de agitação e aquecimento do equipamento construído. ....	53
FIGURA 3.12 - Esquema da fonte de alimentação utilizando o CI 7812 CT para estabilização do sinal elétrico (barramento 12 V) para controle do equipamento construído.....	55

FIGURA 3.13 - Esquema do circuito multivibrador astável utilizando o CI LM555 para controle da frequência do movimento produzido no metal líquido durante o resfriamento. ....	56
FIGURA 3.14 - Esquema do circuito de reversão do movimento do líquido durante o resfriamento. ....	57
FIGURA 3.15 - Esquema do circuito de estágio amplificador de sinais utilizado para leitura de temperatura na lingoteira. ....	58
FIGURA 3.16 - Fonte simétrica de tensão utilizada para alimentação do circuito amplificador.	59
FIGURA 3.17 - Esquema do filtro tipo RC passa-baixa para redução dos sinais espúrios gerados na malha de leitura da temperatura da lingoteira.....	59

## Capítulo 4

- FIGURA 4.1 - Diagrama em blocos da montagem utilizada para obtenção da constante de tempo de leitura do cartão conversor analógico/digital..... 62
- FIGURA 4.2 - Esquema de medição para avaliação do ganho do amplificador de sinais utilizados no sistema de leitura de temperatura. .... 63
- FIGURA 4.3 - Esquema do diagrama de fases da liga Al-Cu. Posição da liga AA2011 utilizada. (Mondolfo 1975)..... 66
- FIGURA 4.4 - Microestrutura típica da liga AA2011 no estado fundido. .... 67
- FIGURA 4.5 - Esquema de cortes para obtenção de amostras para análise micro e macroestrutural dos lingotes produzidos no equipamento construído; a) corte longitudinal e b) corte transversal. medidas a partir do topo dos lingotes. .... 71

## Capítulo 5

FIGURA 5.1- Vista geral do equipamento projetado e construído. ....	77
FIGURA 5.2 - Vista lateral do equipamento projetado e construído.....	78
FIGURA 5.3 - Detalhe construtivo do conjunto de fundição do equipamento projetado e construído. ....	79
FIGURA 5.4 - Vista de topo do conjunto de fundição, com ênfase abertura para vazamento da liga metálica.....	80
FIGURA 5.5 - Vista frontal da lingoteira projetada e confeccionada. ....	81
FIGURA 5.6 - Vista parcial do equipamento construído destacando parte dos dispositivos de controle e medição. ....	82
FIGURA 5.7 - Vista parcial do equipamento projetado e construído destacando parte do comando elétrico: .....	83
FIGURA 5.8 - Vista parcial do equipamento projetado e construído destacando os circuitos eletrônicos de controle de processo: .....	84
FIGURA 5.9 - Fotografia mostrando o equipamento projetado e construído durante operação: destaque a geração de vapor de água no resfriamento rápido do metal líquido no interior da lingoteira. ....	85
FIGURA 5.10 - Curva típica de resfriamento obtida nos vazamentos realizados, identificando pontos e períodos de interesse. ....	90
FIGURA 5.11 - Lingotes produzidos no equipamento construído, utilizando agitação NORMAL durante: a) 230 s; b) 300 s.....	95

FIGURA 5.12 - Lingotes produzidos no equipamento construído, utilizando agitação REVERSA durante: a) 230 s; b) 300 s.....	96
FIGURA 5.13 - Macroestruturas dos lingotes produzidos no equipamento construído, utilizando agitação NORMAL durante: a) 230 s; b) 300 s.....	97
FIGURA 5.14 - Macroestruturas dos lingotes produzidos no equipamento construído, utilizando agitação REVERSA durante: a) 230 s; b) 300 s.....	98
FIGURA 5.15 - Microestruturas de diferentes regiões do lingote produzido nas condições de agitação NORMAL por 230 s. a) topo; b) centro; c) base.....	101
FIGURA 5.16 - Microestruturas de diferentes regiões do lingote produzido nas condições de agitação NORMAL por 300 s. a) topo; b) centro; c) base.....	102
FIGURA 5.17 - Microestruturas de diferentes regiões do lingote produzido nas condições de agitação REVERSA por 230 s. a) topo; b) centro; c) base.....	103
FIGURA 5.18 - Microestruturas de diferentes regiões do lingote produzido nas condições de agitação REVERSA por 300 s. a) topo; b) centro; c) base.....	104
FIGURA 5.19 - Microestruturas da região central dos lingotes produzidos nas condições de agitação NORMAL durante: a) 230 s; b) 300 s.....	105
FIGURA 5.20 - Microestruturas da região central dos lingotes produzidos nas condições de agitação REVERSA durante: a) 230 s; b) 300 s.....	106

## **Lista de tabelas**

### **Capítulo 3**

TABELA 3.1 - Tempos e potências requeridas para o aquecimento até 550 °C da lingoteira construída.....	50
--	----

## Capítulo 4

TABELA 4.1 - Composição química da liga metálica utilizada nos vazamentos realizados .... 65

TABELA 4.2 - Planificação dos vazamentos realizados ..... 68

## Capítulo 5

TABELA 5.1. Número de leitura para um período de 1 segundo e tempo fundamental de leitura (tempo entre leituras) do cartão conversor utilizado na aquisição de dados de temperaturas, no equipamento construído. ....	86
TABELA 5.2. Ganho de amplificação do sinal elétrico vindo do termopar de leitura inserido na lingoteira. ....	88
TABELA 5.3 - Coeficiente das retas $T \times t$ do metal durante reofundição e taxas de resfriamento, para as diversas condições de processamento. ....	91
TABELA 5.4. - Diâmetro médio de grãos das estruturas produzidas no equipamento construído, obtidas em diferentes condições de processamento. ....	93
TABELA 5.5 - Valores da fração sólida das estruturas produzidas no equipamento construído, em função das condições de processamento. ....	107
TABELA 5.6 - Diâmetro médio das unidades morfológicas da fase primária (dendritas equiaxiais e fragmentos dendríticos) das estruturas produzidas no equipamento construído. ....	108
TABELA 5.7 - Valor médio do fator de forma das unidades morfológicas da fase primária (dendritas equiaxiais e fragmentos dendríticos) das estruturas produzidas no equipamento construído. ....	110

# Índice

## CAPÍTULO 1 - Introdução e Objetivos

1.1. Introdução . . . . .	.1
1.2. Objetivos gerais . . . . .	.3

## CAPÍTULO 2 - Revisão da Literatura

2.1. Introdução à reofundição . . . . .	.4
2.2. Reologia do material pastoso reofundido . . . . .	.11
2.3. Aplicações da reofundição . . . . .	.13
2.4. Obtenção de materia-prima reofundida . . . . .	.17
2.4.1. Efeitos de agitação no líquido em solidificação . . . . .	.18
2.4.2. Evolução da microestrutura na reofundição . . . . .	.23
2.5. Técnicas de reofundição envolvendo agitação . . . . .	.26
2.5.1. Agitação mecânica . . . . .	.27
2.5.2. Agitação eletromagnética . . . . .	.28

## CAPÍTULO 3 - Projeto e Construção do Equipamento

3.1. Introdução . . . . .	.33
3.2. Componentes mecânicos . . . . .	.38
3.2.1. Estrutura de sustentação . . . . .	.38
3.2.2. Canal de alimentação . . . . .	.42
3.2.3. Lingoteira . . . . .	.42
3.2.4. Canal de refrigeração . . . . .	.44

3.3. Componentes elétricos . . . . .	.46
3.3.1. Motor estator . . . . .	.46
3.3.2. Resistência de aquecimento . . . . .	.46
3.3.3. Circuitos elétricos de controle operacional . . . . .	.51
3.4. Dispositivos eletrônicos . . . . .	.54
3.4.1. Fonte de alimentação (barramento 12V) . . . . .	.54
3.4.2. Controle do campo magnético . . . . .	.55
3.4.3. Monitoramento da temperatura da lingoteira . . . . .	.57

## CAPÍTULO 4 - Procedimento Experimental

4.1. Introdução . . . . .	.61
4.2. Calibração do sistema de leitura de temperatura . . . . .	.62
4.2.1. Constante de tempo . . . . .	.62
4.2.2. Ganho do amplificador . . . . .	.63
4.2.3. Ajuste de registradores-controle de temperatura . . . . .	.63
4.3. Obtenção da curva de resfriamento do banho . . . . .	.64
4.4. Produção de pastas refundidas . . . . .	.65
4.4.1. Matéria-prima . . . . .	.65
4.4.2. Planejamento experimental . . . . .	.67
4.4.3. Descrição do procedimento padrão . . . . .	.68
4.5. Análise metalográfica . . . . .	.70
4.5.1. Metalografia quanlitativa . . . . .	.71
4.5.2. Metalografia quantitativa . . . . .	.71

## CAPÍTULO 5 - Resultado e Discussões

5.1. Equipamento construído . . . . .	.74
5.2. Desempenho do equipamento . . . . .	.86
5.2.1. Constante de tempo . . . . .	.86
5.2.2. Ganho do amplificador . . . . .	.87
5.2.3. Obtenção da curva de resfriamento do banho . . . . .	.89
5.3. Lingotes produzidos . . . . .	.92
5.3.1. Caracterização macroestrutural . . . . .	.92
5.3.2. Caracterização microestrutural . . . . .	.99

<b>CAPÍTULO 6 - Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos</b>	
6.1. Conclusões quanto ao equipamento construído . . . . .	.112
6.2. Conclusões quanto ao produto obtido . . . . .	.113
6.3. Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	.114
<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>.116</b>
<b>ANEXO . . . . .</b>	<b>.122</b>

## Símbolos

<b>KPA</b>	Kilo Pascal
<b>fs</b>	Fração sólida
<b>TR</b>	Taxa de resfriamento
<b>Pa.s</b>	Pascal-segundo
<b>Tcis</b>	Tensão de cisalhamento
<b>μm</b>	mícron
<b>rpm</b>	Rotações por minuto
<b>CV</b>	Cavalo vapor
<b>RC</b>	Resistor-Capacitor
<b>A</b>	Ampere
<b>Hz</b>	Hertz
<b>KΩ</b>	Kilo Ohm
<b>F</b>	Farady
<b>Vcc</b>	Tensão de saída
<b>NA</b>	número de atraso
<b>W</b>	Watts
<b>α</b>	Fase primária
<b>⊖</b>	Fase secundária
<b>V</b>	Volt
<b>F<sub>f</sub></b>	Fator de forma
<b>A/D</b>	Analógico-Digital

## **Resumo**

BUBENIK, Rubens Luiz, Projeto e Construção de Equipamento Eletromagnético para a Produção de Matéria Prima para a Tixoconformação de Ligas Metálicas. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 123 p. Dissertação (Mestrado).

Este trabalho trata do projeto e construção de um equipamento capaz de alterar a morfologia da fase primária de ligas metálicas em solidificação, diferenciando-a das estruturas dendríticas produzidas na solidificação convencional. Neste processo uma força externa provoca movimentos no metal líquido com objetivo de alterar a morfologia de crescimento do sólido, resultando em estruturas pré-reofundidas. No equipamento idealizado é utilizado um campo magnético girante para fornecer a força necessária ao movimento. O trabalho envolve projeto, construção e montagem de circuitos elétricos, circuitos eletrônicos e dispositivos mecânicos, bem como testes de eficiência do equipamento na produção de estruturas pré-reofundidas da liga AA 2011. Para testes foram variados o tempo de agitação do líquido (230 e 300 s), e o modo de agitação (normal e com reversão), sendo mantidas constantes a potência (1040 W) e a taxa de resfriamento (20 °C/min.). Os resultados obtidos atestam a eficiência do equipamento na obtenção de lingotes com macroestrutura equiaxial refinada, homogênea em todo o seu volume, e microestrutura apresentando dendritas fragmentadas, com fator de forma de 2 a 3 para todas as condições analisadas. Estes valores de fator de forma podem ser considerados excelentes para materiais a serem utilizados como matéria prima para a conformação no estado pastoso reofundido.

### *Palavras Chave*

Reofundição; Semi-sólido; Agitação Eletromagnética; Tixoconformação; Ligas pastosas.

## **Abstract**

BUBENIK, Rubens Luiz, Design and Development of an Electromagnetic Equipment for the Production of Raw Material for Thixoforming of Metal Alloys. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 123 p. Dissertação (Mestrado).

This work relates the design and development of an equipment capable of modifying the morphology of primary phase during solidification of metal alloys, differentiating such structures from those dendritic obtained in conventional solidification. In this process turbulence is imposed to the liquid metal by means of an external force with the purpose of modifying the morphology of the growing solid, resulting in pre-rheocast structures. In the idealized equipment a rotating magnetic field is used to provide the necessary stirring in the liquid. This work involves design, building and assembling of the equipment, as well as preliminary tests to analyse the efficiency of the equipment to produce ingots of the alloy AA 2011 with pre-rheocast structures. Different stirring times (230 and 330 s) and type of movement (normal or reverted) were utilized in the tests, while power and freezing rate in the material were kept constant (1040 W and 20 °C/min., respectively). Results showed the efficiency of the designed equipment in the production of ingots with fine, equiaxial and homogeneous macrostructure and microstructures presenting highly fragmented dendrites, with values of morphology index varying from 2 to 3 for all operational conditions tested. Those values of morphology index can be considered excellent for a material to be utilized as raw material for forming in the semi-solid state or thixoforming.

### *Key words*

Rheocasting; Semi-solid Alloys; Electromagnetic Stirring; Thixoforming; SSM.

# Capítulo 1

## Introdução e Objetivos

### 1.1. Introdução

Em meados dos anos 70, no Massachusetts Institute of Technology - MIT - USA, surgem as primeiras publicações científicas relatando experiências com ligas metálicas em solidificação capazes de alterar a morfologia estrutural dos materiais. Mais tarde, sugestivamente, o processo referido foi chamado de Reofundição e muitos pesquisadores interessaram-se pelo assunto, permitindo seu rápido desenvolvimento.

Com o objetivo de produzir diretamente artigos *near net shape*, as ligas semi-sólidas reofundidas estão sendo preferidas em processos de conformação por fundição sob pressão ou por conformação mecânica por forjamento, pois suas vantagens, em relação aos estados sólido e líquido, garantem qualidade superior no produto final e economia no processamento.

Nos processos de conformação mecânica clássicos faz-se uso da matéria-prima no estado líquido ou sólido para a manufatura de produtos comerciais. Em peças geometricamente complexas utiliza-se o processo de fundição, onde os moldes são preenchidos por ligas metálicas no estado líquido. Quando a matéria-prima encontra-se no estado sólido, a conformação plástica e a usinagem são responsáveis pela garantia da forma final do produto.

Por mais que se desenvolvam, esses processos sempre conviverão com fatores que influenciam severamente o desempenho do produto. No caso dos processos de fundição (injeção por pressão ou gravidade), podemos citar a macrossegregação e a microporosidade como alguns dos fenômenos indesejáveis, quando se requer estanqueidade e homogeneização a

estrutura. Na conformação por deformação plástica, podemos citar alguns inconvenientes como a restrição à ligas de elevada resistência mecânica, as microtrincas, dentre outros.

Com ligas metálicas refundidas, devido às suas características peculiares, os processos de conformação mecânica por fundição ou por deformação plástica são realizados no estado semi-sólido com grandes vantagens, devido à eliminação substancial, em ambos os casos, dos inconvenientes citados, mas também por possibilitar a obtenção de estruturas constituídas por grãos finos e uniformes, redução de contrações (vazios), melhoria das propriedades mecânicas dos manufaturados e a possibilidade de baixas temperaturas de trabalho, reduzindo assim o consumo de energia no processamento.

A viabilidade dos processos de conformação no estado semi-sólido deve-se ao comportamento característico do material, que possui fluidez suficiente para preencher moldes na fundição e também consistência necessária para ser deformado em processos de extrusão e forjamento.

Há duas maneiras básicas de produzir estruturas refundidas durante a solidificação de uma liga metálica; ambas produzem estruturas não dendríticas que submetidas a aquecimento acima da temperatura *solidus* sofrem globularização, fornecendo a matéria-prima para tixoprocessamento. A primeira maneira refere-se à interferência na nucleação de maneira a incentivar o refino granular e, conseqüentemente, a supressão do crescimento dendrítico. Nesse método faz-se uso de inoculantes à base de Titânio e Boro associados ou não à altas taxas de resfriamento e outras técnicas de refino. A segunda maneira refere-se à interferência no crescimento do grão. Nesse método há necessidade da promoção de eficiente movimento da massa metálica líquida durante a solidificação para promoção de refino; neste caso devido à multiplicação cristalina ocorrida pela fragmentação dendrítica. A liga metálica nesse procedimento pode ser agitada mecânica ou eletromagneticamente.

O primeiro grupo de processos não apresenta tecnologia totalmente dominada e é assunto de pesquisa em andamento. No segundo grupo de processos de produção de pastas refundidas se situa a maioria dos trabalhos na área e da aplicação industrial da conformação semi-sólida atual. Dentre os processos envolvendo agitação do líquido em solidificação, o mais promissor tem sido a agitação eletromagnética. O uso de campos magnéticos como fonte de

forças propulsoras do movimento impede qualquer contato físico entre a fonte de agitação e o metal líquido, evitando contaminações, desgastes por atrito mecânico e propicia produção por lingotamento contínuo. Estes equipamentos são, no entanto, de elevado custo e não estão disponíveis no mercado nacional.

## 1.2. Objetivos do trabalho

Este trabalho tem com objetivo geral o projeto e construção de um equipamento capaz de alterar a morfologia da estrutura de uma liga durante o processo de solidificação. Ao invés das dendritas colunares predominantes em fundidos convencionais, por interferência no crescimento do sólido pretende-se obter dendritas equiaxiais ou fragmentadas, na estrutura final do material. Este tipo de estrutura, ao ser aquecida à temperaturas superiores à *solidus*, facilmente se transforma em material reofundido, isto é, com morfologia interna globular, se constituindo, portanto, em matéria prima para a tixoconformação.

Serão utilizados campos magnéticos gerados por um motor estator em torno de uma lingoteira como elemento fonte das forças propulsoras do movimento do metal líquido na solidificação. Para verificar a eficácia do equipamento projetado e construído, na alteração da morfologia estrutural do metal solidificado, vazamentos serão realizados em diferentes condições operacionais.

O equipamento a ser construído deverá ser constituído dos seguintes elementos básicos: lingoteira com características construtivas específicas que permitam fácil operação nos vazamentos e retiradas de lingotes fundidos, e ainda o controle e monitoração do processo de solidificação; motor estator que forneça o campo magnético necessário e que permita o controle da potência e do tipo de movimento gerado no metal líquido (normal ou reverso); e sistemas elétricos e eletrônicos de controle e monitoração do processo. O equipamento deverá ainda permitir um certo grau de automatização do processo, para evitar as inconveniências e aleatoriedade da operação manual. Para avaliação do equipamento projetado e construído, serão realizados experimentos com a liga AA2011, utilizando quatro diferentes condições de processamento. Os lingotes obtidos serão analisados em termos macroestruturais (morfologia e dimensões de grãos) e microestruturais (fração sólida, morfologia e dimensões da fase primária).

## Capítulo 2

### Revisão da Literatura

#### 2.1. Introdução à reofundição

A diferença fundamental entre um material reofundido e um material fundido de maneira convencional é a morfologia da sua fase primária: globular ao invés de dendrítica. Uma estrutura de solidificação do tipo globular foi primeiramente apresentada por SPENCER, D.B. (1971), em sua tese de doutorado. O autor constatou então alterações na morfologia da microestrutura da liga Sn 15 Pb solidificada em condições particulares de turbulência e conseqüentes mudanças no comportamento reológico do material no estado pastoso, quando comparado com semi-sólidos dendríticos. Tal comportamento apresentava certas peculiaridades até então nunca observadas.

Surge, desta forma, a *reofundição* (o nome sendo atribuído, portanto, ao particular comportamento reológico do material), uma descoberta tecnológica que nos anos subsequentes foi tema central de inúmeras publicações em todo o mundo, e assunto de congressos internacionais bianuais.

A reofundição, como todos os desenvolvimentos e progressos da Ciência, não consiste em uma descoberta isolada, e sim, uma conseqüência natural de trabalhos anteriores. Na época, como ainda hoje, há grande interesse no estudo dos fenômenos envolvidos durante a solidificação de ligas metálicas, com o intuito de melhorar a qualidade de produtos metalúrgicos pelo controle de tais fenômenos, via manipulação de parâmetros operacionais.

Neste sentido, muitos estudos eram realizados na década de 60 e início de 70 referentes à solidificação de ligas metálicas. Neste campo podem ser destacados trabalhos de METZ S.A. e FLEMINGS, M.C. (1970), trabalhos de JACKSON, K.A., *et al.* (1967), TILLER, W.A. e O'HARA, S. (1967), CHALMERS, B. (1963) entre outros.

FLEMINGS, M.C., hoje considerado o pai da reofundição, na época desenvolvia trabalhos relacionados à formação de trincas a quente em ligas não ferrosas. Para tanto, submetia ligas Al-Cu e Sn-Pb à deformações contínuas, por ação de forças externas, em diferentes frações sólidas (mistura de sólido dendrítico e líquido), com o intuito de provocar movimento relativo entre camadas adjacentes de material, isto é, cisalhamento interno durante a sua solidificação, e determinar o momento de aparecimento de trincas de contração.

Os resultados obtidos, publicados juntamente com seu colaborador METZ, S.A, mostram a influência da fração sólida sobre a magnitude da força de cisalhamento e, concomitantemente, a relação funcional complexa não linear entre a tensão aplicada e a taxa de deformação, ambas apresentadas nas figuras 2.1 e 2.2 respectivamente, para as ligas Al 4 Cu e Sn 15 Pb. A figura 2.2 refere-se aos resultados obtidos por SPENCER, D.B., *et al.* (1972), qualitativamente semelhantes aos de FLEMINGS, M.C e METZ, S.A.

Tal comportamento reológico pode ser classificado como não Newtoniano e fluidos desta natureza são classificadas como pseudo-plásticos (vide item 2.2.). É visível a não proporcionalidade entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento, como pode ser facilmente verificado pela observação da curva obtida pelos autores (figura 2.2).

As experiências realizadas, adicionalmente, forneceram dados conclusivos à respeito da influência das dimensões dos grãos solidificados sobre a força de cisalhamento, ou seja, os autores determinaram que tensões de cisalhamento crescentes são necessárias para a deformação da liga semi-sólida dendrítica com crescentes diâmetros de grãos.

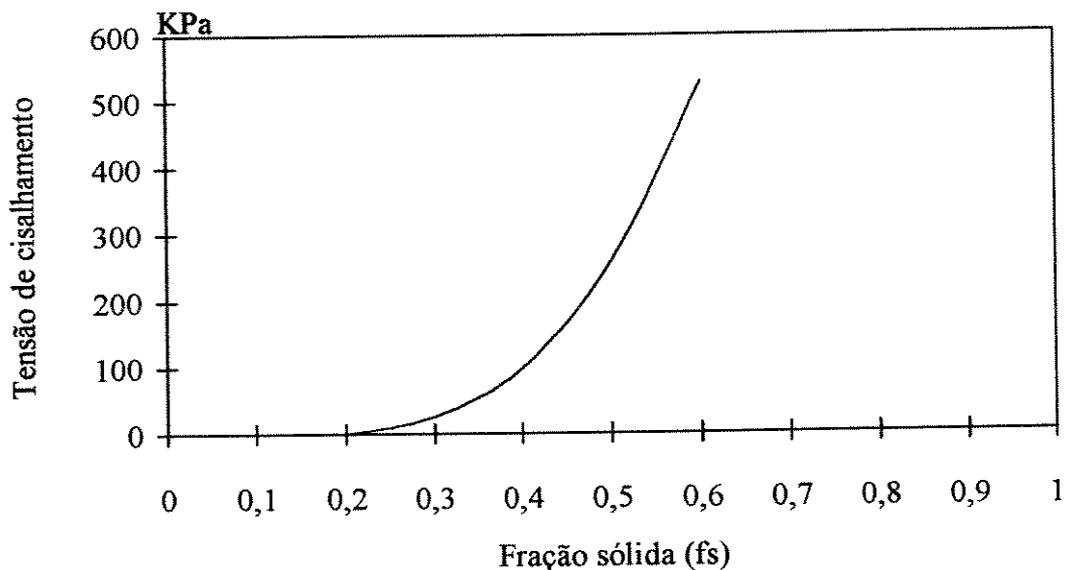


FIGURA 2.1 - Variação da tensão de cisalhamento com a fração sólida da liga Al 4 Cu no estado semi-sólido, cisalhada isotermicamente com uma taxa de deformação de 0,049/s. METZ S.A. e FLEMINGS, M.C. (1970)

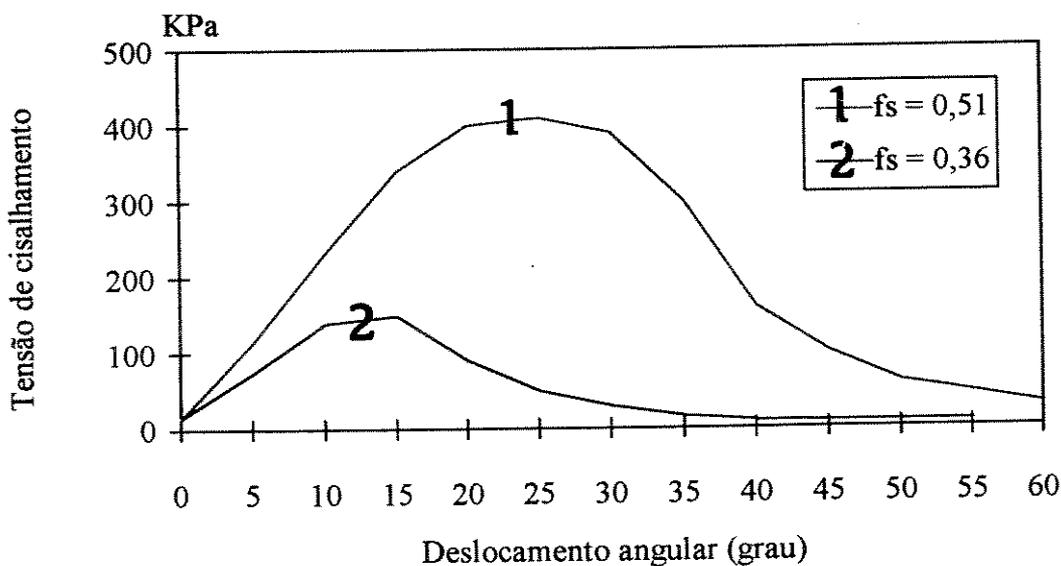


FIGURA 2.2 - Variação da deformação com a tensão de cisalhamento em estruturas semi-sólidas dendríticas, para a liga Sn 15 Pb cisalhada isotermicamente. SPENCER, D. B., *et. al.* (1972).

SPENCER, D.B. (1971) ainda submeteu uma liga de Sn-Pb à varias taxas de deformação durante a solidificação. Para tanto, utilizou um aparato mecânico provido de dois

cilindros metálicos concêntricos e de diâmetros diferenciados, sendo um estático e o outro animado com velocidades angulares variáveis, a fim de promover uma intensa corrente convectiva na massa líquida.

A experiência realizada por SPENCER, D.B. diferenciava-se da de FLEMINGS, M.C. pelo fato de iniciar a agitação do metal já no estado líquido, ou seja, antes da temperatura *liquidus* ser atingida e, portanto, da formação dos primeiros núcleos sólidos. Essa providência de SPENCER foi fundamental para a constatação das mudanças das propriedades reológicas ocorridas na pasta semi-sólida, quando comparadas com as amostras obtidas por METZ S.A. e FLEMINGS, M.C. (1970).

Os resultados então obtidos foram surpreendentes: as tensões necessárias para deformação, para diferentes frações sólidas presentes no material, são substancialmente inferiores às conhecidas até então. Para exemplificar, uma liga de Sn-Pb com uma fração sólida (com morfologia dendrítica) um pouco acima de  $f_s=0,40$ , necessita de uma tensão de 200 KPa para deformar-se, enquanto que semelhante liga, em condições impostas por SPENCER, D.B. não necessita mais que 0,2 KPa, conforme pode ser observado na figura 2.3.

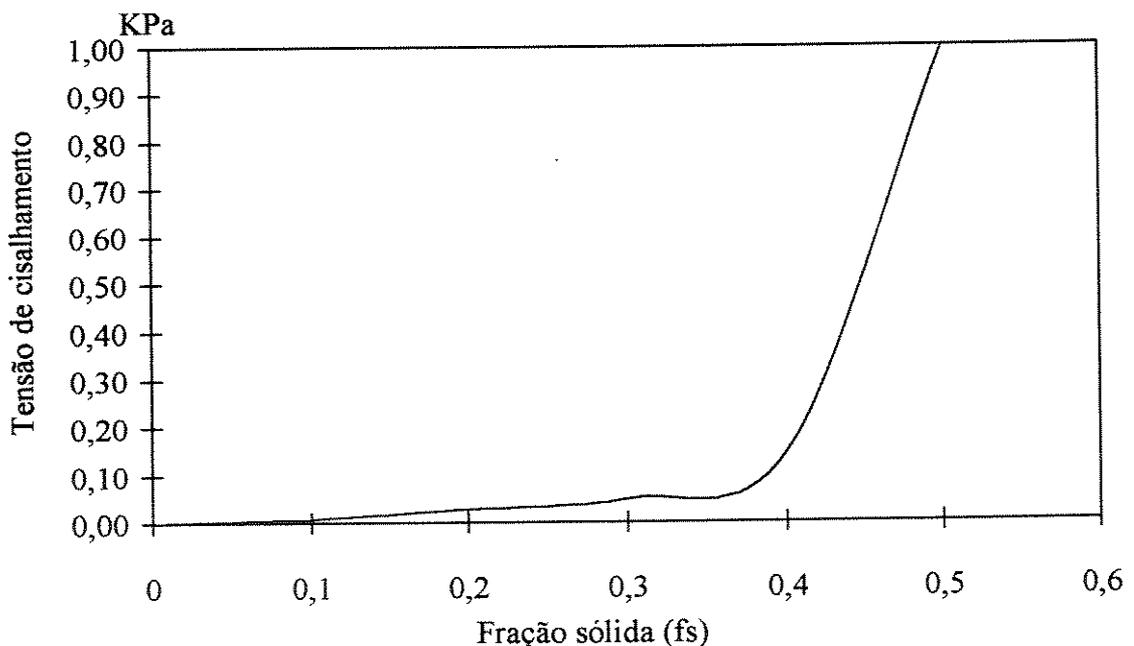
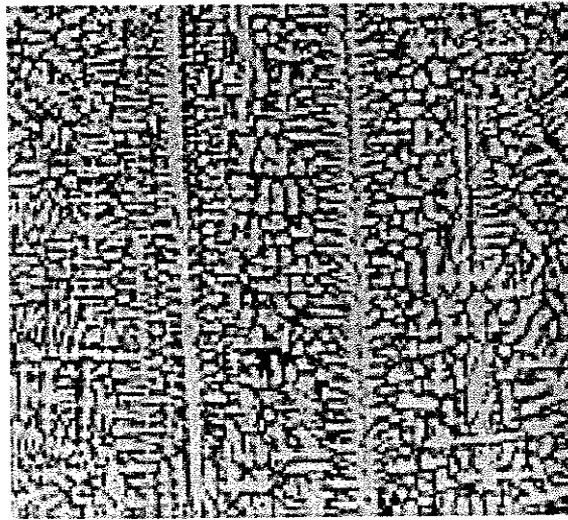
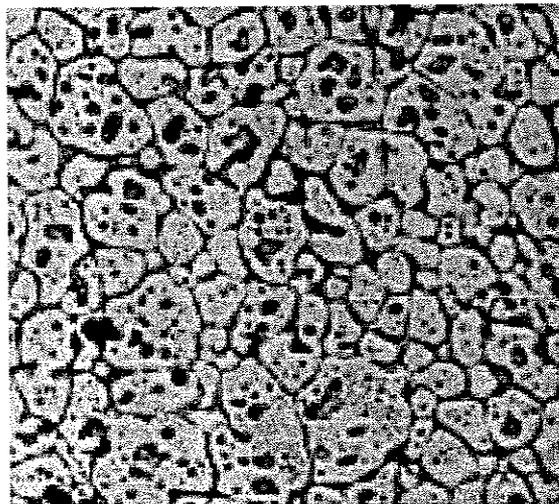


FIGURA 2.3 - Curva experimental para a liga Sn 15 Pb refundida obtida nas condições de  $0,006^{\circ}\text{C/s}$  (resfriamento) e  $200/\text{s}$  (taxa de deformação) com diferentes frações sólidas. SPENCER, D.B.(1971).

As amostras extraídas dos experimentos de SPENCER, D.B. foram micro e macro estruturalmente analisadas para a observação de mudanças que explicassem o comportamento viscoso apresentado pela liga no estado semi-sólido. A macroestrutura revelou que as amostras foram intensamente refinadas, e a microestrutura apresentou uma completa ausência de estrutura dendrítica. A microestrutura apresentou, conforme as condições de ensaio, a fase primária com morfologia semelhante à rosetas ou glóbulos aproximadamente esféricos. As figuras 2.4 a) e b) apresentam, para efeitos comparativos, microestruturas dendríticas e reofundidas da liga binária Al 4,5 Cu, respectivamente.



a)



b)

FIGURA 2.4 - Microestruturas da liga Al 4,5 Cu: a) dendrítica (vazada a 700 °C em coquilha); b) reofundida (obtida por fusão parcial de material deformado a frio). ZOQUI, E.J. 1995.

Comparando-se os resultados de propriedades reológicas do semi-sólido obtidos por METZ S.A. e FLEMINGS, M.C. e, por outro lado, por SPENCER, D.B. fica evidente a efetividade do movimento convectivo, logo nos primeiros estágios da solidificação, como providencial para alteração das características estruturais e conseqüentes propriedades de escoamento do material.

Alterando as taxas de resfriamento e cisalhamento, SPENCER, D.B. provocou alterações na morfologia e dimensões dos glóbulos solidificados, estudando a seguir as variações promovidas na viscosidade aparente da pasta semi-sólida, agora denominada reofundida. Seus resultados mostram que as pastas reofundidas, constituídas de glóbulos sólidos envoltos por líquido, apresentam fluidez crescente ou tensão de cisalhamento decrescente, à medida que aumenta a esfericidade da fase sólida e decresce seu tamanho.

As taxas de resfriamento e de cisalhamento impostas influenciam a viscosidade aparente da pasta reofundida, reduzindo-a substancialmente, conforme apresentado nas figuras 2.5 e 2.6, segundo resultados de KATTAMIS, T.Z., PICCONE, T.J. (1991) e ainda de FLEMINGS, M.C. (1977).

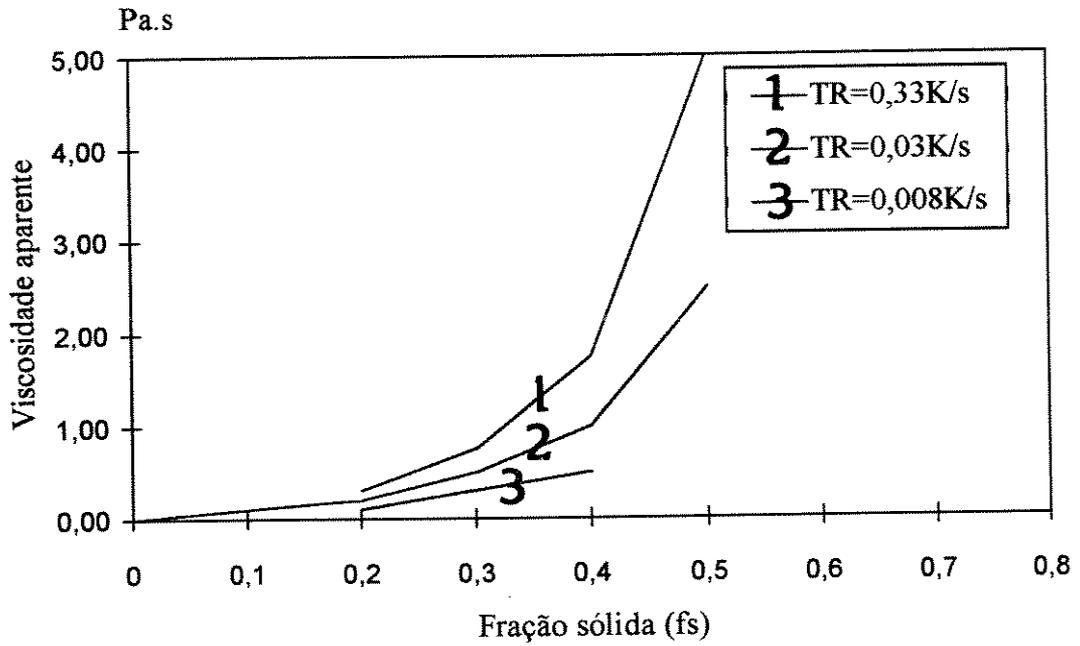


FIGURA 2.5 - Efeito da taxa de resfriamento na viscosidade da liga Al 4,5 Cu 1,5 Mg., cisalhada a 330/s. KATTAMIS, T.Z., PICCONE, T.J. (1991)

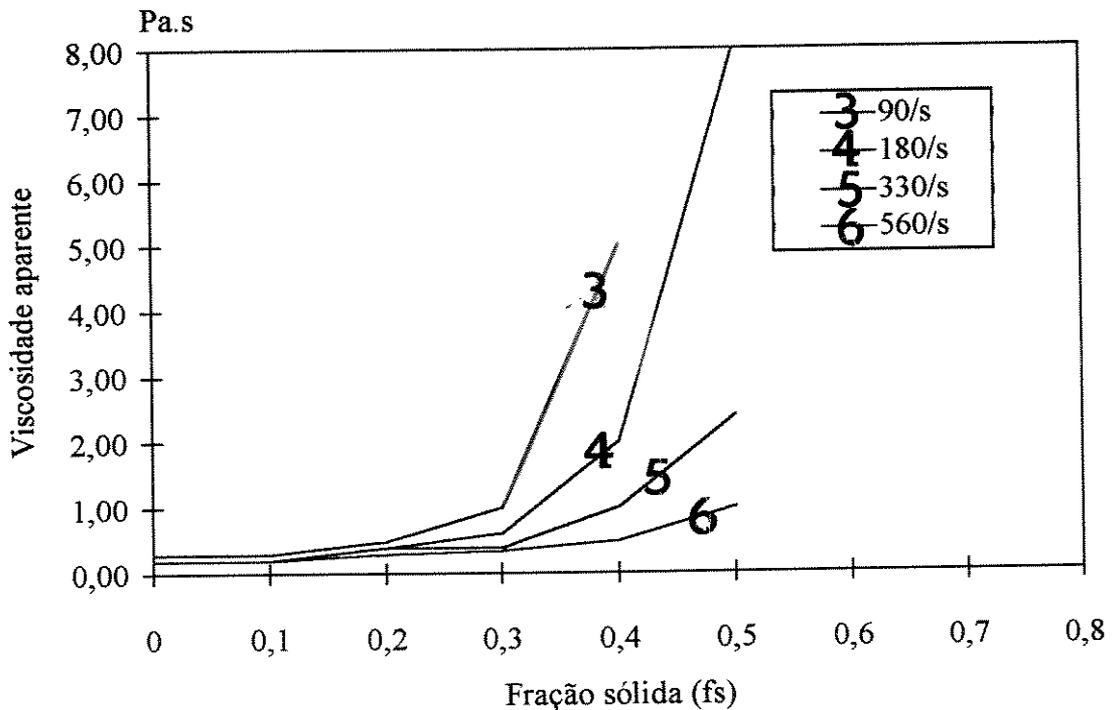


FIGURA 2.6 - Efeito da taxa de cisalhamento na viscosidade da liga Al 4,5 Cu 1,5 Mg, enquanto agitada e resfriada a 0,03°C/s. FLEMINGS, M.C., ( 1977 ).

Define-se, portanto, re fundição como a técnica de obtenção de pastas metálicas de ligas metálicas constituídas de sólido com morfologia globular em meio líquido. Um fluido deste

tipo apresenta um comportamento de escoamento distinto de um fluido contendo sólido dendrítico, onde a morfologia irregular dos cristais promove facilmente interação física entre eles, reduzindo e mesmo impedindo o escoamento. O comportamento reológico das pastas reofundidas lhes fornece potencial interesse em aplicações tecnológicas envolvendo processamento sob pressão.

Os itens a seguir apresentam fundamentos sobre a reologia de materiais pastosos e em seguida suas aplicações tecnológicas.

## **2.2. Reologia do material pastoso reofundido**

O semi-sólido reofundido é definido como fluido não Newtoniano e tixotrópico. Para compreendermos melhor a afirmação acima, serão analisados a seguir alguns aspectos do comportamento de materiais contidos entre duas placas paralelas, uma fixa e outra móvel. No caso de sólidos, com o movimento da placa o material é submetido à uma força paralela ao deslocamento da placa, sofrendo deformação. Se o valor da tensão aplicada for inferior ao limite de ruptura do material, o sistema atinge uma posição de equilíbrio dada pelo nível de deformação imposta ao material. O grau de deformação atingido é proporcional à força externa aplicada. Se tal deformação ficar restrita à zona elástica do material, com o relaxamento da força aplicada o material retornará ao seu estado inicial, ou seja, restabelecerá suas dimensões e propriedades iniciais. No entanto, o evento descrito não é totalmente reversível, pois parte da energia utilizada é perdida e a entropia do universo é implementada.

No caso de fluidos, o seu comportamento com o movimento de uma das placas será distinto do comportamento do sólido: o fluido jamais atingirá a condição de equilíbrio e camadas internas adjacentes deslizarão umas sobre as outras indefinidamente. No entanto, o comportamento de escoamento segue, de maneira semelhante ao caso sólido, uma relação de dependência entre o grau de deformação ou taxa de deslizamento entre os planos adjacentes e a tensão aplicada.

Esta relação de dependência é identificada como a viscosidade do fluido, a qual é por sua vez dependente das variáveis pressão, temperatura e características internas do fluido. Fluidos

que apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento dos planos adjacentes e o grau de deformação produzido são identificados como fluidos Newtonianos, caso típico dos líquidos e os gases de forma geral. A constante de proporcionalidade é definida como a viscosidade do material.

Nos fluidos não Newtonianos, a relação tensão de cisalhamento x deformação não se comporta de maneira linear, portanto a viscosidade não é constante e sim dependente da taxa de deformação imposta ao fluido. O comportamento reológico destes fluidos deve ser descrito pela viscosidade aparente, isto é, a viscosidade para uma determinada condição de escoamento.

Fluidos não Newtonianos podem apresentar diferentes tipos de relação tensão de cisalhamento x deformação, conforme indicado na figura 2.7, podendo ser classificados, de acordo com este comportamento, em: plásticos ideais (Bingham), pseudo-plásticos e dilatantes. Estes fluidos são também tixotrópicos, isto é, o comportamento viscoso depende não só da tensão aplicada como também do tempo.

Os plásticos de Bingham, como por exemplo o sabão, apresentam comportamentos bem distintos em função da tensão de cisalhamento aplicada, ou seja, a partir de um certo valor de tensão ( $T_{cis} = T_1$ ), eles se comportam como fluidos e seguem a relação já descrita, mas para  $T_{cis} < T_1$ , são ditos sólidos e se comportam como tal.

Os pseudo-plásticos (plástico real e fluido com cisalhamento pequeno) e os dilatantes (fluido com cisalhamento grande) diferem quanto à relação da viscosidade com a taxa de deslizamento. Nos primeiros a viscosidade apresenta a tendência decrescente com a crescente taxa de deslizamento, nos segundos, ao contrário, a viscosidade é sempre crescente com o aumento da taxa de deslizamento.

Pastas reofundidas apresentam, como já mostrado por SPENCER, D.B. (1971) e comentado no item anterior, comportamento reológico dependente de maneira não linear da taxa de cisalhamento imposta. Como pode ser observado na figura 2.6, uma pasta submetida à elevada taxa de cisalhamento pode apresentar reduzida viscosidade mesmo para frações sólidas

da ordem de 40 a 50%; enquanto o mesmo material, submetido à reduzidas taxas de cisalhamento pode ter sua fluidez fortemente comprometida para estas mesmas condições de fração sólida.

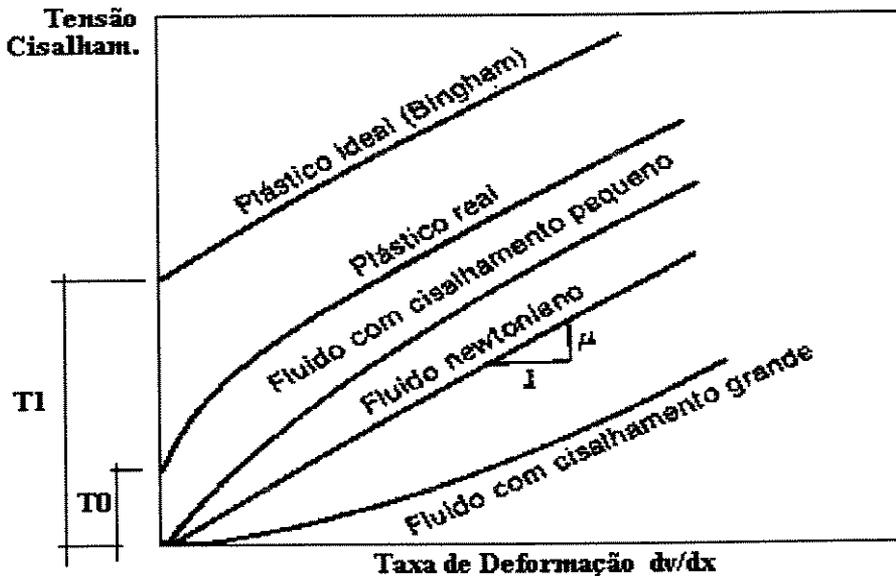


FIGURA 2.7 - Comparação esquemática entre as relações tensão de cisalhamento e taxa de deformação nos fluidos Newtoniano e não Newtonianos. VENNARDS-STREET (1978).

Assim, uma pasta reofundida se caracteriza por apresentar um comportamento reológico bastante peculiar: pode se comportar como um sólido (elevada viscosidade ou reduzida fluidez), quando em repouso ou submetido à baixas pressões, passando a escoar com alta fluidez quando submetida à elevadas pressões. Este comportamento traz potencialidades tecnológicas bastante importantes do ponto de vista de processos de fabricação e de qualidade de produtos metalúrgicos, conforme será apresentado no item que se segue.

### 2.3. Aplicações da reofundição

A pasta metálica reofundida pode ser utilizada como matéria prima em diversos processos de conformação mecânica ou metalúrgica convencionais. Diferentemente do convencional, no entanto, é o estado da matéria prima reofundida: ela é trabalhada a partir do estado semi-sólido e não sólido ou líquido como é o caso dos processos de conformação conhecidos.

Pastas reofundidas contendo frações sólidas da ordem de 40% podem ser conformadas por processos de fundição sob pressão (injeção ou compressão), para a produção de componentes diversos. Aplicações industriais correntes são conhecidas para a produção de peças diversas, como distribuidor de fluido de freio para automóveis, válvulas diversas para, principalmente, a indústria automobilística MOSCHINI, R. (1994), CHIARMETTA, G. (1996), YOUNG, K.P. (1996). Por outro lado, pastas reofundidas contendo frações sólidas mais elevadas, da ordem de 80%, podem ser conformada por forjamento ou extrusão, com vantagens sobre os processos convencionais utilizando o material no estado totalmente sólido.

A conformação por forjamento de pastas reofundidas, também chamada tixoforjamento, é apresentada com sucesso para a fabricação de componentes mecânicos de materiais de elevado ponto de fusão como aços ferramenta e inoxidáveis (KIRKWOOD, D.H., 1996), e de diferentes ligas não ferrosas. (ROVIRA, M.M., *et al.* 1997; NUSSBAUM, A.I. 1996).

Também a conformação por extrusão de pastas reofundidas tem sido testada com sucesso (ROVIRA, M.M., *et al.* 1992; LAPLANTE, S., *et al.* 1996), embora não se tenha notícias até o momento da aplicação comercial da tixoextrusão.

As pastas reofundidas encontram grande aplicação na produção de materiais compósitos devido às suas propriedades reológicas. A idéia de compósito é antiga e simples, ou seja, agregar substâncias dissimilares de forma a produzir novos materiais que possuam propriedades físicas específicas e particulares.

Quando se utiliza uma matriz metálica líquida e reforço sólido para a produção de compósitos, surgem algumas dificuldades que podem influenciar negativamente na qualidade do material produzido, como a macrossegregação durante a solidificação, resultante da rejeição das partículas de reforço para última região a solidificar e a decantação ou flutuação das mesmas por efeito de diferença de peso entre os constituintes.

A grande vantagem de se utilizar pastas reofundidas na obtenção de compósitos se deve ao fato de ser possível eliminar substancialmente esses inconvenientes, pois, no estado semi-sólido os efeitos de macrossegregação são reduzidos: a alta viscosidade oferecida pela pasta

em repouso impede a decantação do reforço sólido. Assim, obtém-se compósitos de melhor qualidade e de características mais homogêneas, FOGAGNOLO, J.B., 1996.

A conformação de materiais no estado semi-sólido traz algumas vantagens sobre os processos convencionais de conformação sólida ou líquida, a saber::

### **Menor consumo de energia**

A tecnologia de processamento de materiais no estado semi-sólido consome menor quantidade de energia do que em outros processos convencionais. Considerando que pastas reofundidas com elevadas frações sólidas podem escoar como líquidos sob pressões relativamente baixas, fica evidente, nesse aspecto, a economia energética, pois, em processos de conformação mecânica no estado sólido o dispêndio de energia para deformação é elevado dado a alta tensão de escoamento dos materiais. ROVIRA, M.M. *et al.* (1997) demonstrou que é possível reduzir substancialmente a tensão requerida para o forjamento semi-sólido: seus resultados mostram a possibilidade da tixoconformação de produtos de Al 4,5 Cu com apenas 1/3 da carga requerida para o forjamento no estado sólido e 1/6 da requerida para a extrusão convencional. Em relação aos processos convencionais de fundição a economia está relacionada às baixas temperaturas utilizadas no estado semi-sólido, com relação às requeridas para conformação no estado totalmente líquido: KENNEY, M.P. *et al.* (1988) estimam ganhos energéticos da ordem de 30% na fundição semi-sólida em comparação com fundição convencional.

### **Produtividade**

Na reofundição o reduzido tempo de solidificação devido as menores temperaturas utilizadas e a possibilidade de obter fundidos com formas e dimensões mais próximas do produto final com conseqüente eliminação de etapas posteriores, e ainda a economia de material (redução de perdas por canais e massalotes), permite a diminuição do tempo padrão na manufatura das peças por fundição.

Também no forjamento é possível o aumento da produtividade ao utilizar matéria prima reofundida, pela redução do número de passes para a conformação de um produto. Conforme observado por ROVIRA, M. M. (1996) o tixoforjamento permite a produção de peças de

ótima qualidade em somente uma etapa, o que pode significar sensível aumento da produtividade.

### **Preenchimento mais uniforme da matriz**

As características reológicas e físicas da pasta reofundida permitem um preenchimento adequado de matrizes, tanto na fundição quanto no forjamento. Na fundição a frente não turbulenta de escoamento evita a formação de vazios, poros, inclusões e, ainda, uma melhor acomodação de tensões internas na solidificação, reduzindo a ocorrência de trincas por contrações. Na conformação mecânica, a alta fluidez da pasta reofundida permite o perfeito preenchimento de moldes de geometria complexa.

ANDERSON P.R.G., *et al.* (1996) ressaltam ainda adicionais vantagens na utilização de semi-sólido em conformação de produtos comerciais:

#### **•Complexidade em projetos**

As propriedades de escoamento de pastas reofundidas permitem a produção de componentes com menores espessuras tanto no forjamento quanto na fundição e, assim, é possível construir conjuntos mecânicos mais compactos e complexos com menor peso.

#### **•Vida dos ferramentais**

A redução no nível do choque térmico e na temperatura de trabalho aumenta consideravelmente a vida dos moldes e ferramentas, no processamento de pastas ao invés de líquidos.

#### **•Impacto ambiental**

As baixas temperaturas no estado semi-sólido e a possibilidade de automação do processo produtivo, em contraste com processos convencionais (fundição), permitem obter um ambiente de trabalho mais salubre, não expondo funcionários a condições adversas. A economia em energia reduz a ação predatória imposta à natureza. O processo semi-sólido é considerado um processo limpo. (KAPRANOS, P. 1994).

## 2.4. Obtenção de matéria prima reofundida

Apesar das vantagens do processamento semi-sólido sobre os processos de conformação convencionais, a utilização mais freqüente desta tecnologia é ainda limitada pela reduzida disponibilidade de matéria prima.

Diferentes técnicas e procedimentos têm sido desenvolvidos para a produção de matéria prima para uso em processos de tixoconformação. O princípio básico de todos eles é a modificação da morfologia da fase primária da liga, de dendrítica para globular. Tal modificação pode ser feita a partir de estruturas previamente solidificadas convencionalmente, via tratamentos termomecânicos, (ROBERT, M. H. 1993); (KIRKWOOD, D.H., e ROBERT, M.H. 1987) ou a partir da interferência durante a solidificação da liga, alterando a morfologia predominante SPENCER, D.B., *et al.* (1972).

No primeiro caso, estruturas perfeitamente globulares podem ser facilmente obtidas em procedimentos que podem ser bastante simples, e o material pode ser imediatamente utilizado no processo de tixoconformação, com excelentes resultados. Os processos envolvem a globularização de estruturas dendríticas submetidas ou não à deformação a frio, seguida de fusão parcial controlada, por incentivo a fenômenos naturais de recristalização ou engrossamento e coalescência de ramos dendríticos. A utilização industrial desses tipos de processos é ainda bastante limitado, aguardando o lugar de destaque que merece.

No segundo caso, mais amplamente utilizado, estruturas não perfeitamente globulares são produzidas, e o material necessita de reaquecimento para melhor globularização e obtenção das melhores propriedades de escoamento. Estes processos envolvem a promoção de intensa turbulência no líquido em solidificação, sob controladas e específicas condições de resfriamento e de cisalhamento interno do material. Processos envolvendo agitação mecânica ou mesmo eletromagnética, em aparatos sofisticados, de elevado custo e difícil controle, podem ser utilizados (ver item 2.5).

Os métodos envolvendo agitação do líquido durante resfriamento apresentam, além do campo de aplicação geral em processos de tixoconformação, como os métodos envolvendo

tratamentos termomecânicos, um campo de aplicação específico, qual seja, na produção de compósitos, por adição de partículas de reforços cerâmicos à ligas metálicas no estado pastoso reofundido. As propriedades viscosas da pasta reofundida, associadas à intensa agitação promovida no material durante o processamento, permitem a incorporação do reforço, minimizando a sua flutuação, sedimentação ou mesmo segregação para a fase líquida, fatores que ocorrem com frequência na produção de compósitos em matrizes líquidas. São os processos de compofundição já mencionados.

### 2.4.1. Efeitos de agitação no líquido em solidificação

UHLMANN D.R., *et al.* (1966) publicaram resultados de investigação do efeito de movimentos convectivos no metal líquido durante a sua solidificação, sobre a estrutura final resultante. A figura 2.8 mostra resultados típicos obtidos, onde se pode observar em a) a presença de grãos equiaxiais finos, isto é, o efeito de refino promovido na estrutura na presença de convecção no líquido, e em b) a anulação de tal efeito pela utilização de campos magnéticos para a amortização da convecção; neste caso estruturas totalmente colunares são produzidas.



(a)



(b)

FIGURA 2.8 - Macroestruturas da liga de Al 2 Cu vazada a 40°C acima da temperatura *liquidus*: a) convecção presente durante a solidificação; b) convecção amortecida por campos magnéticos. UHLMANN D.R., *et al.* (1966)

O borbulhamento gasoso no líquido em solidificação (COPPINI, N.L. e ROBERT, M.H. 1979) e a utilização de geometrias adequadas de canais de alimentação de moldes (OHNO, A. 1976) são dois adicionais exemplos de técnicas que propiciam o refino granular por ação mecânica. O primeiro consiste em provocar a volatilização de substâncias depositadas no fundo ou aplicada no revestimento de moldes, ou ainda, pela injeção de gases inertes no líquido em solidificação. A convecção forçada obtida auxilia a multiplicação cristalina e o arraste de grãos coquilhados para regiões centrais do lingote. No segundo procura-se através de geometrias adequadas de canais de alimentação provocar turbulência no líquido durante o vazamento. De maneira idêntica ao processo anterior, os fenômenos envolvidos na multiplicação cristalina são potencializados de forma a induzir o refino de grão.

Os trabalhos apresentados mostram claramente que a presença de movimento no interior do líquido durante a sua solidificação tem efeito significativo na estrutura resultante. As explicações para o fato de que sob vigorosa agitação a estrutura se apresenta totalmente equiaxial fina são principalmente baseadas em duas possibilidades: a contínua geração e arraste de grãos da superfície do molde para o interior do metal em solidificação, e a fragmentação de ramos dendríticos da zona colunar em crescimento, por ação mecânica ou térmica, seguida do seu transporte para a região central do lingote, onde, em condições favoráveis de dimensões e temperaturas, podem sobreviver e constituir grãos equiaxiais. Ambos os fenômenos são incentivados pela presença de agitação no líquido, a qual, se intensa, resulta em estruturas totalmente equiaxiais por todo o volume do metal.

O mecanismo de refino por fragmentação dendrítica é bastante conhecido e denominado *multiplicação cristalina*, sendo objeto de investigação de vários estudiosos da solidificação de ligas metálicas. A multiplicação cristalina pode ocorrer como consequência de diferentes fenômenos, conforme sugestão de diferentes autores.

GARABEDIAN H. e STRICKLAND-CONSTABLE R.F. (1972) propuseram a possibilidade de ocorrência de fratura nas raízes dos ramos dendríticos secundários durante a solidificação, por ação puramente mecânica do líquido à sua frente, sob ação de forças convectivas. A força necessária para eventual quebra desses ramos provém da colisão do fluido

metálico em movimento com os braços dendríticos, causando momentos fletores suficientes em suas raízes para promover o seu rompimento. Os ramos separados são arrastados para regiões mais avançadas no interior do líquido onde podem sobreviver e se constituir em novos grãos em crescimento livre não direcional.

VOGEL, A. (1978), realizou experiências com ligas Al-Cu, agitando-a mecanicamente com auxílio de pás propulsoras, procurando relacionar a alteração morfológica das partículas solidificadas com parâmetros hidrodinâmicos adimensionais no fluxo da mistura sólida-líquida. Seus resultados, relacionando o refino de grão com as dimensões dos turbilhões gerados próximo ao agitador, são apresentados na figura 2.9. Pode-se observar que a redução do tamanho de grão é obtida para elevados valores do número de Reynolds, quando as dimensões das micro-turbulências geradas são da ordem de grandeza dos próprios grãos. Os resultados mostram, portanto, a necessidade de haver compatibilidade dimensional entre os vórtices formados e as partículas solidificadas.

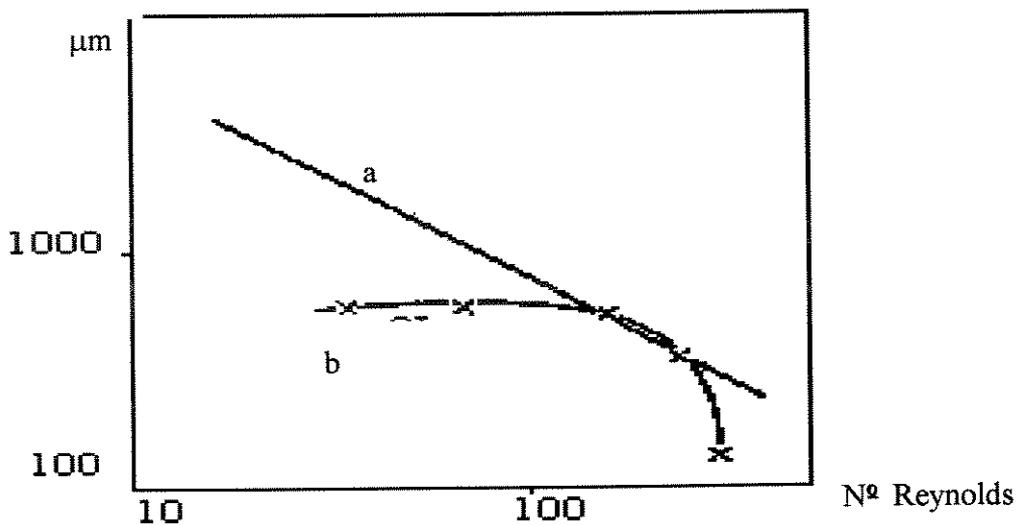


FIGURA 2.9- Variação de dimensões de a) micro-turbulências e b) diâmetro dos grãos, em função do número de Reynolds no resfriamento sob agitação de liga Al 24 Cu. VOGEL, A. (1978).

Os resultados de VOGEL, A. não podem ser explicados à luz de simples ação mecânica de fluxos de líquido como responsável por rompimento dendrítico e multiplicação cristalina. O

autor propõe a atuação de outros mecanismos. Sua teoria propõe que a ação mecânica do fluxo produz dobramento de ramos dendríticos, criando regiões de alta deformação local, seguida de recristalização. Os novos contornos de grão originados podem ser molhados por líquido, acarretando a separação de ramos dendríticos para o líquido adjacente, onde poderá se tornar um novo grão em crescimento independente. A separação de grãos recristalizados depende da relação entre as energias do contorno criado e da tensão superficial sólido/líquido.

Da mesma maneira que VOGEL, A. também PILLING, J. e HELLAWELL, A. (1996) publicaram trabalho contradizendo a possibilidade de fraturas de ramos dendríticos secundários por simples ação mecânica de forças oriundas do fluxo do líquido. Os autores assumiram a geometria cilíndrica para os ramos dendríticos secundários, com comprimentos e diâmetros da ordem de grandeza dos encontrados em grãos fundidos. Partiram também do princípio que todas as fraturas ocorrem nos estágios iniciais de solidificação, onde os sólidos formados possuem grande ductilidade. Em seguida, após a definição de valores para fluxo do fluido metálico interdendrítico, foi elaborado um modelo matemático capaz de calcular as tensões impostas às raízes dos ramos secundários, representados pelos apêndices cilíndricos.

Os resultados foram reproduzidos no gráfico da figura 2.10, onde fica evidente a impossibilidade de ocorrer fraturas ou mesmo deformações generalizadas dos ramos dendríticos secundários, pois, para o caso mais crítico (diâmetro da raiz do ramo secundário  $2,5\mu\text{m}$ ) seria necessário um comprimento de aproximadamente  $200\ \mu\text{m}$  para ocorrer a deformação cristalina; sabe-se que, na prática, os valores de comprimento são inferiores e os diâmetros superiores.

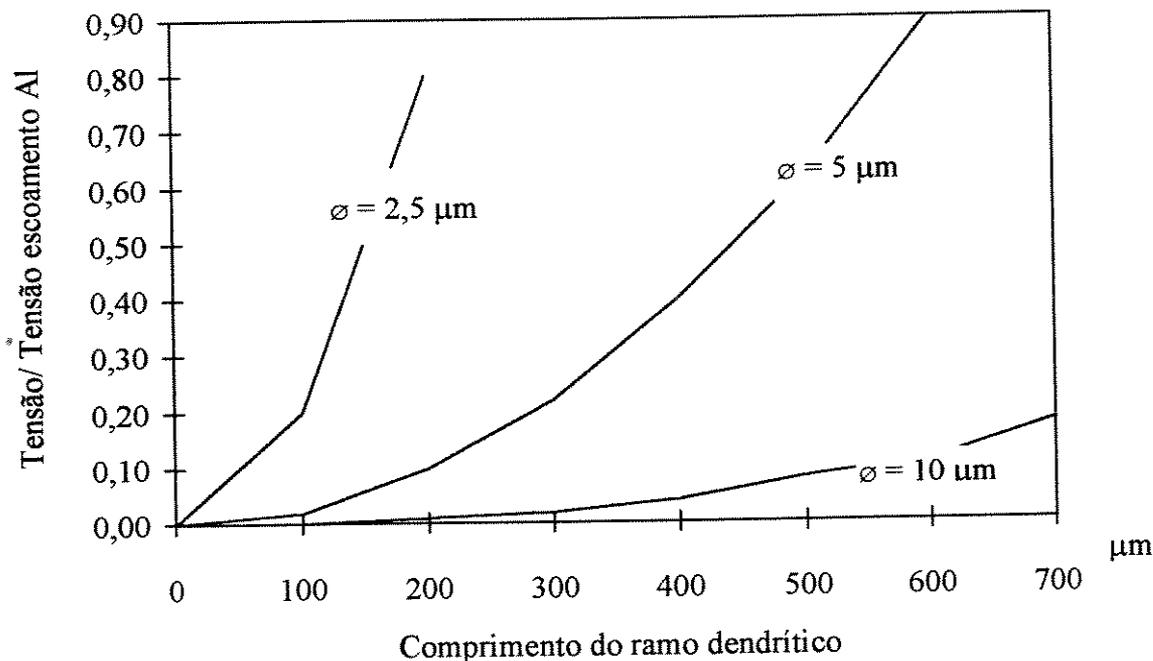


FIGURA 2.10 - Cálculo da razão entre a tensão de escoamento do Al, próximo ao ponto de fusão, e a tensão calculada na raiz dos ramos dendríticos, considerando velocidade no líquido de  $10^{-2}$  m/s para vários diâmetros do ramo dendrítico. PILLING, J. e HELLAWELL, A. (1996).

Ainda um outro mecanismo pode contribuir ou ser responsável pela multiplicação cristalina: a fusão de raízes dos ramos secundários dendríticos foi proposto por alguns pesquisadores JACKSON, K.A., *et al* (1967) e TILLER, W.A. e O'HARA, S. (1967). A hipótese prevê que o movimento convectivo natural do metal líquido em regiões interdendríticas pode levar líquidos superaquecidos a entrar em contato com raízes de ramos dendríticos empescoçados por fenômenos naturais de restrição local ao crescimento. O empescoamento de ramos dendríticos pode ocorrer por restrição à difusão de soluto durante o crescimento do sólido e é fenômeno já descrito na literatura. A fusão de raízes leva ao desprendimento de ramos dendríticos que passam a crescer livremente no líquido, constituindo um novo grão.

## 2.4.2. Evolução da microestrutura na reofundição

A partir dos primeiros trabalhos de SPENCER, D. B. (1971), ficou patente a importância dos aspectos morfológico e dimensional dos grãos reofundidos como variáveis influentes nas propriedades reológicas das pastas semi-sólidas. Quanto mais esféricos e refinados os glóbulos da fase primária melhor serão as propriedades de escoamento da pasta reofundida bem como a qualidade dos produtos tixoconformados.

Com o intuito de obter pastas reofundidas de boa qualidade e conseqüente adequadas condições de tixoprocessamento, estudos têm sido feitos buscando o entendimento da evolução da microestrutura na reofundição.

É certo que a multiplicação cristalina tem fundamental papel na modificação estrutural durante a solidificação em condições de forte turbulência, mas ela sozinha não explica a globularização ocorrida na reofundição: outros fenômenos devem ser levados em conta.

KATTAMIS, T.Z., *et al.* (1967) observaram engrossamento dendrítico levando à globularização da morfologia da fase primária de ligas Al 4,5 Cu durante manutenção à temperaturas no interior da faixa de solidificação, mais precisamente, em misturas contendo fração sólida de 0,5. A modificação da morfologia dendrítica em globular é ocasionada por difusão de soluto e fenômenos de coalescência entre ramos dendríticos secundários, ocorrendo espontaneamente. A força motriz para tal modificação provém da necessidade do sistema em diminuir sua energia superficial total.

Em trabalho posterior, REEVES, J.J. e KATTAMIS, T.Z. (1971), procuram obter uma relação analítica entre o tempo de tratamento e grau de globularização dos ramos dendríticos, para a mesma liga Al 4,5 Cu, submetida a temperaturas correspondentes à 50% de fração sólida. O grau de globularização foi medido em termos da área superficial da interface sólido-líquido por unidade de volume. Seus resultados são mostrados na figura 2.11, onde se pode observar a redução da área superficial com o aumento do tempo de tratamento.

Fenômenos de engrossamento dendrítico (*coarsening*) durante a solidificação de ligas metálicas são ainda amplamente estudados por outros autores, KATTAMIS, T.Z., *et al.* (1967); e são importantes ferramentas para a evolução estrutural durante a reofundição, uma vez que são incentivados pela presença de agitação no líquido.

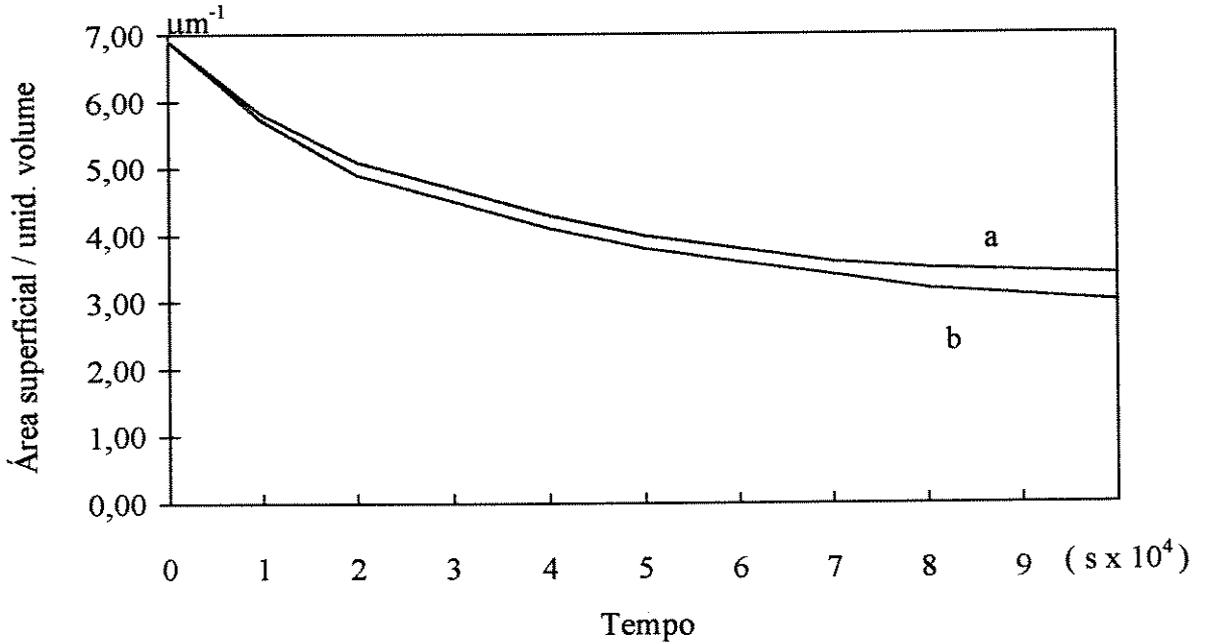


FIGURA 2.11 - Efeito do tempo de manutenção da liga Al 4,5 Cu a 635 °C (temperatura equivalente à fração sólida 0,5), no grau de globularização da estrutura (REEVES, J.J. e KATTAMIS, T.Z. 1971).

KAILASAM, S.K., *et al.* (1996), investigaram o engrossamento da fase primária de uma liga Pb-Sn (alta fração sólida), mantida no estado semi-sólido sob rotação (utilizada para eliminar a influência da força gravitacional sobre as partículas mais densas, impedindo, dessa forma, a aglomeração no fundo do molde e a possibilidade de coalescimento entre as partículas). Os resultados obtidos indicam crescimento dos glóbulos com cinética dependente de tempo e com expoente  $n=4$ , diferente da situação prevista pela clássica fórmula LSW (Lifshitz/Sliozov/Wagner), onde  $n=3$ . Relações do mesmo tipo foram também observadas por ROBERT, M.H. (1993), ao analisar a globularização de diferentes ligas ferrosas e não ferrosas em regime de repouso à temperaturas superiores a  $T_{solidus}$ .

JABRANE, S., *et al.* (1992) analisaram as influências da fração sólida, taxa e o tempo de cisalhamento sobre a distribuição e morfologia das partículas primárias de ligas Al-Si hipoeutéticas submetidas à agitação mecânica durante a solidificação. Os resultados mostraram

que a fração sólida é a variável de maior influência na alteração dimensional e morfológica das partículas solidificadas, seguidas pela taxa de cisalhamento e pelo tempo de agitação. Os autores observaram ocorrência de fragmentação dendrítica nos primeiros estágios de solidificação, seguida por engrossamento por mecanismo de Ostwald; formação ou degradação de aglomerados ocorrem em função das condições de agitação.

APAYDIN, N., *et al.* (1980) conduziram experiências com objetivos de avaliar as alterações das microestruturas da liga Al 10 Mg solidificada sob ação de vigorosa agitação mecânica. Os resultados mostraram o engrossamento de ramos dendríticos nos primeiros estágios da agitação seguidos de fragmentações de ramos secundários pela fusão de raízes. As microestruturas resultantes apresentaram a presença de contornos no interior da fase primária globular, atribuídos à possibilidade de coalescência entre as partículas que colidem durante a agitação.

SALVO, L., *et al.* (1996) analisaram a evolução estrutural e o comportamento reológico da liga Al 7 Si 3 Cu Mg reofundida mantida à temperatura constante no estado semi-sólido por diferentes períodos de tempo. Suas microestruturas apresentaram glóbulos contendo poças de líquido no seu interior, cuja existência é explicada pelos autores como resultado de mecanismo de coalescência em detrimento de mecanismos de engrossamento de Ostwald, durante a evolução da microestrutura. A quantidade de locais líquidos nos glóbulos interfere substancialmente no comportamento reológica da pasta semi-sólida. Os autores observaram, através dos resultados de teste de compressão, que a tensão atinge um valor máximo num determinado tempo de espera, coincidindo ao máximo teor de líquido aprisionado nos glóbulos; para elevados tempos de manutenção do semi-sólido a alta temperatura, tanto a quantidade de poças líquidas quanto a tensão são reduzidas continuamente.

ZOQUI, E.J., e ROBERT, M.H. (1997) ao analisarem a evolução de estruturas dendríticas para globulares reofundidas constataram a atuação preferencial de fenômenos de engrossamento em casos de estruturas originais dendríticas grosseiras e livres de deformação, resultando em reofundidos cujas partículas globulares primárias apresentam grande quantidade de poças de líquido em seu interior. Por outro lado, estruturas dendríticas finas ou submetidas

a tensões internas, evoluem para sólidos livres de líquido retido, por atuação preferencial de mecanismos de recristalização e de engrossamento de Ostwald.

SHIN, D. S., *et al.* (1996) observaram a evolução microestrutural dos cristais primários em ligas Al-Si hipo e hipereutéticos durante o processo de solidificação sob agitação mecânica do fundido. Alterando a fração sólida e a taxa de cisalhamento, os autores observaram comportamentos diferenciados para os cristais primários de Al, nas ligas hipoeutéticas e dos cristais de Si nas hipereutéticas. No primeiro a agitação provoca uma maior esferoidização da partículas e um aumento da densidade das discordâncias e sub-grãos, produzindo aumento da fração sólida. No segundo, as partículas primárias facetadas passam para a forma esférica por um processo de fragmentação e aglomeração de grandes cristais de Si. Para as ligas hipereutéticas agitadas isotermicamente encontrou-se também uma elevação porcentual de deformação do reticulado, promovido pela difusão do Al para o interior dos cristais de Si.

HELLAWEL, A. (1996), publicou artigo apresentando interessante idéia a respeito do efeito de agitação no líquido em solidificação: na ausência de agitação, a taxa de nucleação, ou a máxima densidade de grãos por unidade de volume, é limitada pelo fenômeno de recalescência nos primeiros estágios da solidificação. No caso da presença de agitação as temperaturas locais sofrem grande flutuação e esta instabilidade térmica localizada pode interferir significativamente na recalescência, aumentando a taxa de nucleação e ainda auxiliar na promoção de fragmentação de ramos dendríticos por fusão de suas raízes.

## **2.5- Técnicas de reofundição envolvendo agitação**

A primeira técnica de obtenção de pastas reofundidas que se tem notícia envolve a agitação de uma liga em solidificação (SPENCER, D.B., 1971). O movimento convectivo do metal líquido durante o resfriamento da liga garante o refino e a alteração morfológica dos cristais. Atualmente, produz-se pastas reofundidas por agitação mecânica e eletromagnética.

## 2.5.1- Agitação Mecânica

Um dos primeiros equipamentos utilizados foi o **Viscosímetro de Couette** adaptado para altas temperaturas por SPENCER, D.B. (1971). Basicamente esse equipamento consiste em um cadinho refrigerado contendo em seu interior um eixo fixo, cilíndrico e concêntrico, de modo que apenas um estreito espaço anelar pode ser ocupado pelo líquido. A liga é então vazada na temperatura adequada e o movimento do cadinho durante a solidificação promove a alteração morfológica da estrutura final. É conveniente revestir as superfícies atritantes com camada de proteção à base de materiais cerâmicos. As desvantagens desse equipamento são a baixa taxa de produção de pastas reofundidas e a possibilidade de retenção de ar no semi-sólido, devido às altas rotações empregadas.

Uma versão posterior ao viscosímetro de Couette foi o agitador com rotor central, desenvolvido objetivando maior operacionalidade do processo. Esse tipo de equipamento possui dupla câmara, sendo uma superior contendo o metal líquido e a inferior onde ocorre a produção de pasta reofundida. A principal virtude desse equipamento é a possibilidade de produção contínua de ligas reofundidas e a grande limitação está no controle eficiente da temperatura na câmara inferior, conseqüentemente, a imprecisão na determinação da fração sólida da pasta produzida.

Um outro tipo de agitador mecânico pode ser utilizado: os **equipamentos com propulsores**. Neste tipo de aparato é utilizado agitador tipo pá para promover o movimento convectivo do metal líquido. Esse agitador é acoplado ao eixo rotativo de um motor com velocidade controlada. Os propulsores, podendo ser construídos com mais de uma pá, são mergulhados no banho, onde, com maior efetividade, promovem agitação do metal líquido na velocidade e tempo desejados.

Dadas as suas características, este tipo de equipamento facilita a produção de materiais compósitos pela inserção de partículas não metálicas na pasta semi-sólida durante a agitação. Uma séria limitação deste equipamento é que o inviabiliza economicamente, diz respeito ao baixo volume de processamento; além disso, não se obtém uma adequada agitação do metal

líquido, conseqüentemente, uma má qualidade da pasta reofundida é característica, em geral, para este tipo equipamento.

## 2.5.2- Agitação Eletromagnética

Neste tipo de agitação não ocorre qualquer contato físico entre o metal líquido e a fonte propulsora do movimento. O líquido contido numa câmara de metal não magnético é posto em movimento pela ação de um campo magnético alternado e rotativo gerado por bobinas indutoras, que, estrategicamente, são dispostas em torno do eixo de simetria do equipamento e à uma distância suficiente e adequada do líquido. O estabelecimento do movimento deve-se a ação da força de *Lorentz*  $L$ , a qual é dada por:

$$L = q [ E + ( V \times B ) ]$$

onde:

$q$  = Carga elétrica (escalar)

$E$  = Campo elétrico (vetorial)

$(V \times B)$  = produto vetorial entre a velocidade da carga elétrica e o campo magnético

Assim, pode-se descrever o fenômeno responsável pelo movimento do metal líquido a partir da energização das bobinas indutoras por tensões elétricas trifásicas alternantes. Uma vez energizadas, as bobinas produzem campos magnéticos girantes, que por sua vez, induzem correntes elétricas em toda a seção do metal líquido, as quais interagem com o campo magnético, para produzir a força propulsora do movimento citado acima.

A agitação pode ser tipo horizontal, quando a direção do campo magnético gerado pelas bobinas é perpendicular ao eixo de simetria do equipamento e vertical, para coincidência nas direções acima.

Como desvantagem da agitação eletromagnética, pode-se citar a falta de homogeneidade na força de *Lorentz* em todo o volume líquido, pois esta reduz-se substancialmente à medida que a distância aumenta em relação às bobinas.

As vantagens dos processos de re fundição envolvendo agitação eletromagnética a serem destacadas se constituem na impossibilidade de ocorrer contaminação do metal líquido, pois, diferentemente da agitação mecânica, não existe qualquer contato entre a força propulsora do movimento convectivo e a liga; na baixa deterioração do aparato pela inexistência de atrito mecânico entre as partes; e na maior taxa de produção de pastas re fundidas com a possibilidade de adaptação para um sistema de lingotamento contínuo com maior eficiência.

Estas vantagens têm tornado os processos de obtenção de pastas re fundidas, por agitação eletromagnética, as mais utilizadas industrialmente e tema de vários grupos de pesquisas.

GABATHULER, *et. al.* (1992), fizeram comparações entre alguns processos de manufatura de lingotes com propriedades tixotrópicas, obtidos por diferentes processos; entre os processos considerados (refino granular por ultra-som, agitação eletromagnética e refino químico por adição de Ti e B) a agitação eletromagnética resultou em pastas re fundidas com as melhores propriedades tixotrópicas.

VIVES, C. (1992) , ciente das vantagens descritas, desenvolveu um equipamento capaz de produzir pastas re fundidas com agitação eletromagnética, mas com peculiaridades diferentes dos equipamentos então existentes.

O autor utilizou barras quadradas de magnetos permanentes unidos a um rotor central capaz de desenvolver velocidades angulares até 3000 rpm. A variação de velocidades angulares permitida deve-se ao sistema de relação entre as polias do rotor e do eixo rotativo do motor elétrico utilizado. A lingoteira foi projetada em forma toroidal e, para controlar a taxa de resfriamento do sistema, recebeu isolamento térmica e resistência elétrica. O projeto de VIVES ainda prevê o monitoramento no interior do metal líquido de campos de velocidades, magnéticos, densidade de correntes induzidas quando em movimento durante a solidificação.

Para a coleta de dados foram inseridos sensores específicos em pontos de interesse. Todos os detalhes construtivos e procedimentos de calibração desses sensores estão amplamente documentados na patente de VIVES, C. e RICOU, R. n.º 79818 (1979, França).

Uma das conclusões interessante de VIVES, C. em função dos experimentos realizados, foi a observação da inversão da curva de resfriamento da liga Sb 21 Sn sujeita a crescentes velocidades angulares. Em baixas velocidades o tempo do resfriamento da liga entre as temperaturas *liquidus* e *solidus* é predominantemente inferior ao tempo de resfriamento na ausência de agitação. A partir de certa velocidade ocorre a inversão do fenômeno e o tempo de resfriamento na presença de agitação torna-se excessivamente longo. O autor atribui seus resultados ao aumento da dissipação de energia elétrica no seio do metal líquido, já que as correntes induzidas são proporcionais às frequências do movimento do rotor e as condições de extração de calor são inalteradas durante os experimentos.

A existência de movimento convectivo durante a solidificação do metal líquido provoca alterações substanciais na morfologia do sólido em crescimento, prevalecendo dendritas alongadas na ausência de agitação e dendritas equiaxiais ou fragmentadas na presença de agitação; assim, é interessante conhecer o nível de influência do campo magnético nas velocidades pontuais em toda a massa semi-sólida em resfriamento. SZEKELY, J. e CHANG, C.W. (1976) propuseram o uso da equação de Navier-Stokes com intuito de encontrar a relação entre morfologia da estrutura e nível de agitação imposto. Os autores, no entanto, encontram dificuldades em suas formulações, principalmente relacionadas com a determinação de coeficientes de atrito do fluido semi-sólido de comportamento não-Newtoniano.

Uma versão interessante de agitador eletromagnético foi também apresentada por BLAIS, S., *et al.* (1996), com objetivo de alterar a estrutura morfológica dos cristais primários. O equipamento, um agitador eletromagnético vertical, é composto por um molde cilíndrico para lingotamento contínuo envolto por bobinas elétricas. Com a alimentação dessas bobinas, o metal líquido proveniente da parte superior do molde inicia um movimento característico que favorece a alteração morfológica dos cristais em solidificação. Basicamente, o fluxo de metal líquido arrasta os cristais solidificados da parte inferior do molde, elevando-os à parte superior, onde em temperatura mais elevada, ocorrem a refusão parcial e, em seguida,

o retorno desses cristais à parte inferior. O processo repete-se por diversas vezes até o material se depositar na parte inferior do molde.

Os autores utilizaram para os experimentos a liga Al 7 Si 0,6 Mg e a estrutura resultante apresentada na figura 2.12 se apresenta contendo dendritas fragmentadas, semelhantes às obtidas por outros autores no uso de agitadores eletromagnéticos.

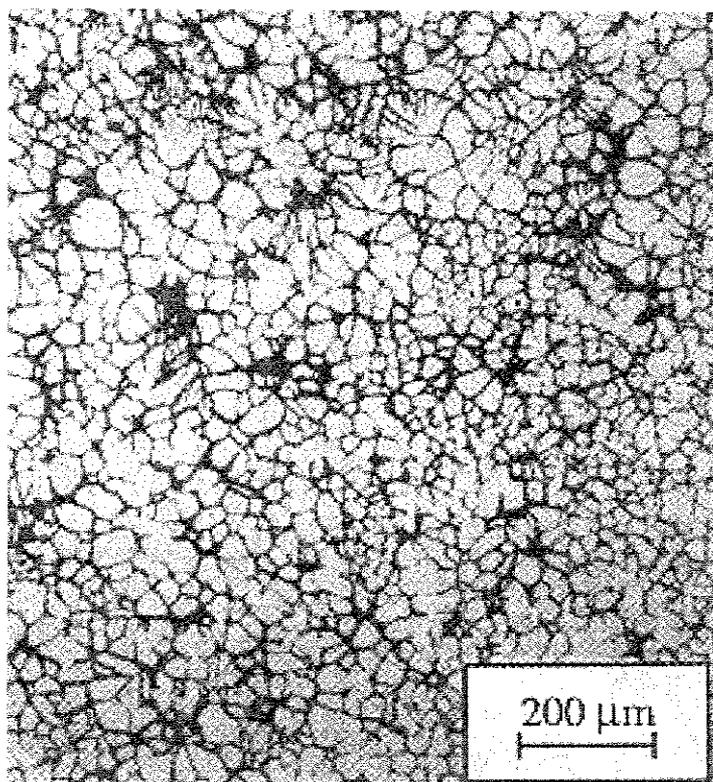


FIGURA 2.12 - Micrografia da liga Al 7 Si 0,6 Mg obtida por agitação eletromagnética durante a solidificação, em equipamento de BLAIS S. *et al.*(1996).

Com o objetivo de diminuir custos na produção de fundidos utilizando a tecnologia SSM, KAHRMANN, S., *et al.* (1996) desenvolveram uma planta piloto na produção de barras cilíndricas com as propriedades tixotrópicas a partir da reciclagem de materiais (massalotes e canais de alimentação). O equipamento construído baseia-se em um sistema com lingotamento contínuo horizontal, no qual o movimento da liga metálica necessário para a globularização da estrutura é produzido pela ação de bobinas elétricas em torno do molde. Tarugos com dimensões de 75 mm de diâmetro e 150 mm são produzidos e, o resultado obtido, em termos

de microestrutura, é apresentado na figura 2.13, onde se pode novamente observar dendritas equiaxiais e ou fragmentadas, típicas do processos de agitação eletromagnética.

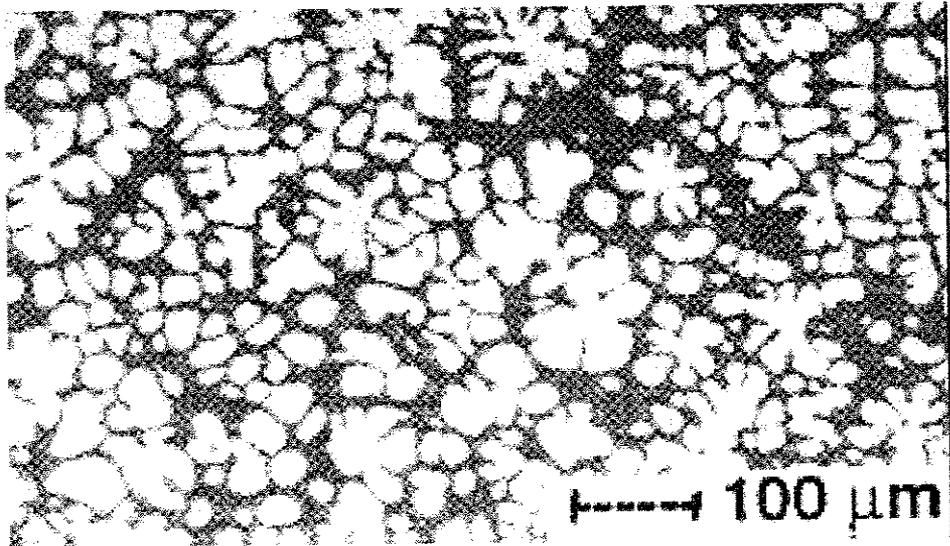


FIGURA 2.13 - Micrografia obtida para agitação eletromagnética durante a solidificação, em equipamento de KAHARMANN W. *et al.* (1996)

## Capítulo 3

### Projeto e Construção do Equipamento

#### 3.1. Introdução

Como diretrizes gerais para o projeto e construção de equipamento para a produção de pastas reofundidas, as seguintes indicações foram assumidas:

- equipamento de reduzido custo de construção e operacional;
- equipamento com maior operacionalidade que equipamentos envolvendo agitação mecânica de ligas em solidificação, por ação de pás imersas no metal líquido;
- capaz de produzir agitação eficiente, de maneira a produzir estruturas pré-reofundidas;
- capacidade de produção de 600 g de material semi-sólido por batelada;
- capacidade para utilização para diferentes tipos de ligas, apresentando diferentes faixas de temperaturas de solidificação.

Com as diretrizes estabelecidas, foi projetado e construído equipamento utilizando como princípio de agitação a promoção de correntes convectivas no líquido por ação de campo magnético externo, fornecido por motor estator cujos enrolamentos envolvem o cadinho contendo o metal líquido.

A agitação eletromagnética envolve a utilização de bobinas acopladas à fontes de potência e transformadores de elevado custo. No presente caso propõe-se a utilização de um motor estator retirado de um motor trifásico de 5 CV como fornecedor de força para movimento do metal líquido. Esse fornecedor, portanto, é constituído de bobinas elétricas

dispostas circularmente ao redor do cadinho de forma a produzir campos magnéticos girantes quando energizadas por tensão elétrica trifásica e alternada.

O equipamento de re fundição projetado e construído é composto de componentes (elétricos e mecânicos) e de circuitos (elétricos e eletrônicos). Os componentes elétricos e mecânicos são: o motor estator, resistência de aquecimento do banho, estruturas de sustentação (superior e inferior), canal de alimentação, lingoteira e canal de refrigeração; os circuitos elétricos são: comando geral e principal (força), circuito de aquecimento do banho; os eletrônicos são: fonte de alimentação, multivibrador astável, circuito de reversão, amplificador, malha resistiva simétrica e filtro RC passa-baixa.

O esquema geral dos componentes elétricos e mecânicos é apresentado nas figuras 3.1 e 3.2., enquanto que o diagrama em blocos dos circuitos elétricos e eletrônicos é apresentado na figura 3.3.

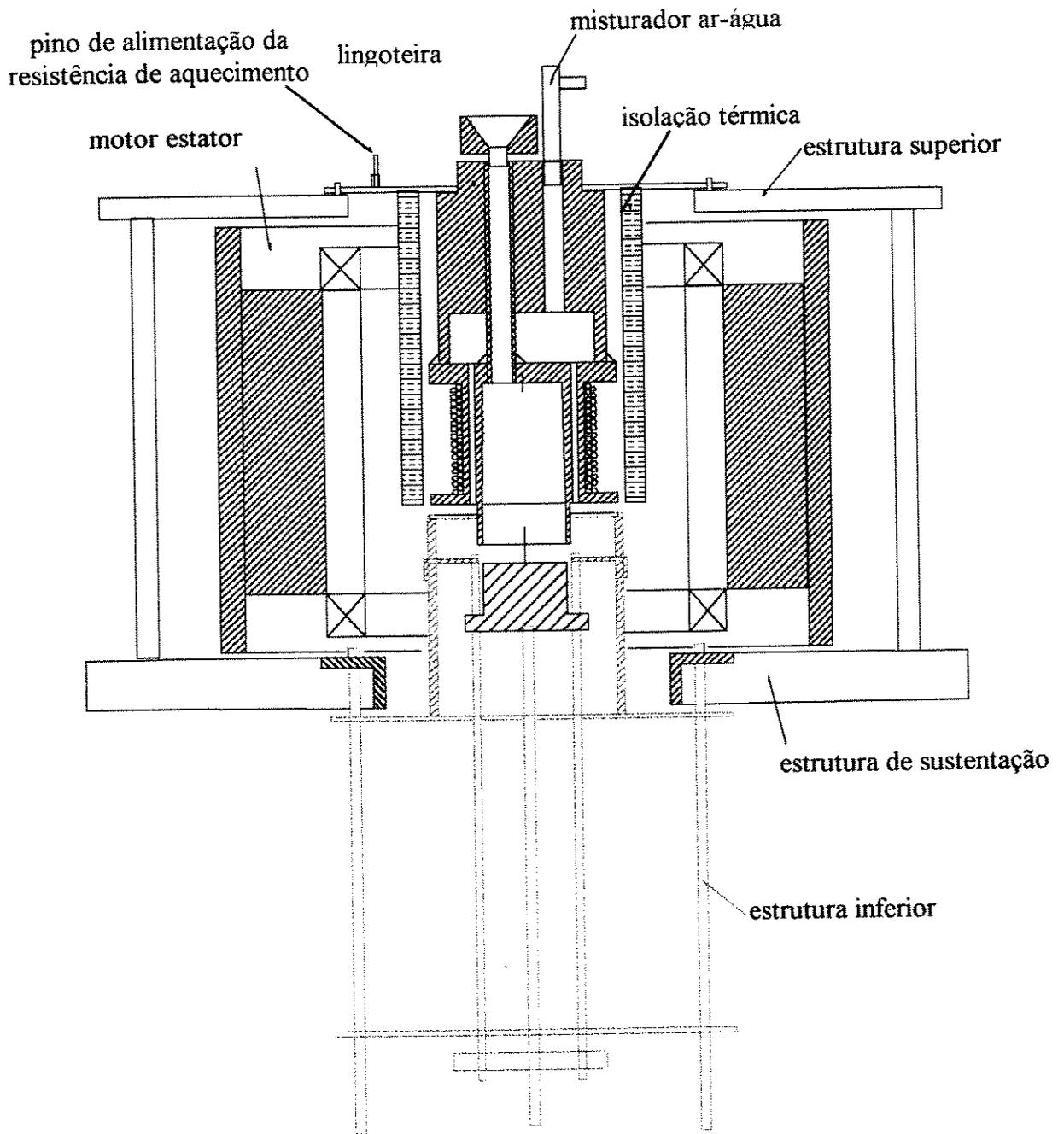
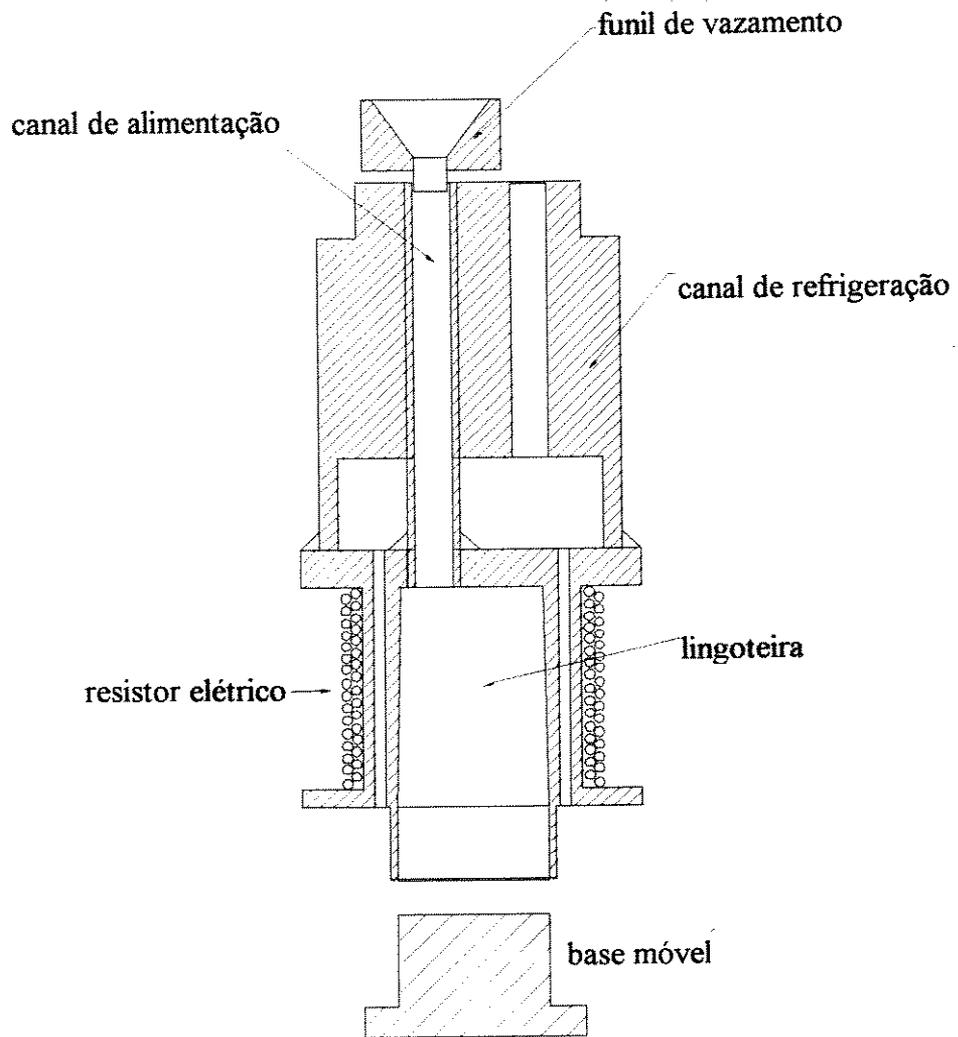


FIGURA 3.1 Desenho esquemático geral dos componentes mecânicos e elétricos do equipamento projetado e construído.



Vista de frente

FIGURA 3.2 - Desenho esquemático geral da lingoteira do equipamento projetado e construído.

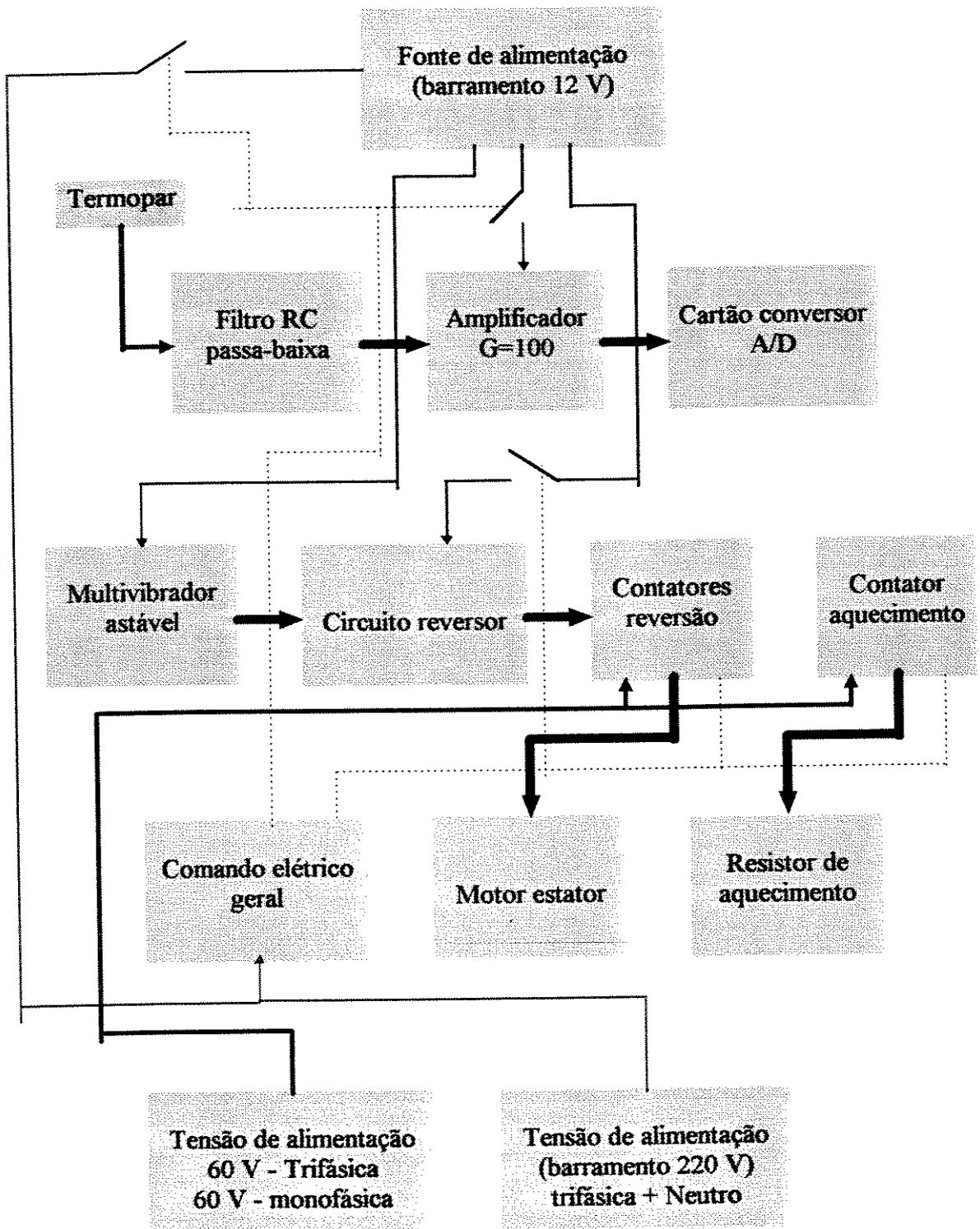


FIGURA 3.3 - Diagrama em blocos dos circuitos elétricos e eletrônicos projetados para o equipamento construído.

A seguir são descritos cada um dos componentes mecânicos e elétricos e circuitos elétricos e eletrônicos isoladamente.

## **3.2. Componentes mecânicos**

Os componentes mecânicos englobam os componentes estruturais que dão sustentação mecânica ao equipamento construído: a estrutura de sustentação (estrutura inferior e estrutura superior), a câmara de reofundição composta pelo canal de alimentação, canal de refrigeração e a lingoteira. Nos tópicos a seguir serão descritos detalhadamente as peculiaridades individuais de cada componente mencionado acima.

### **3.2.1. Estrutura de sustentação**

A estrutura de sustentação do equipamento foi construída por soldagem de perfis de aço estrutural, do tipo cantoneiras de dimensões 50 x 50 x 4,76 mm. Resume-se, basicamente, em uma mesa quadrangular, uma estrutura superior e uma inferior. A figura 3.4 apresenta esquematicamente desenho da mesa quadrangular cuja função é apenas sustentar o equipamento e mantê-lo a uma altura adequada de trabalho.

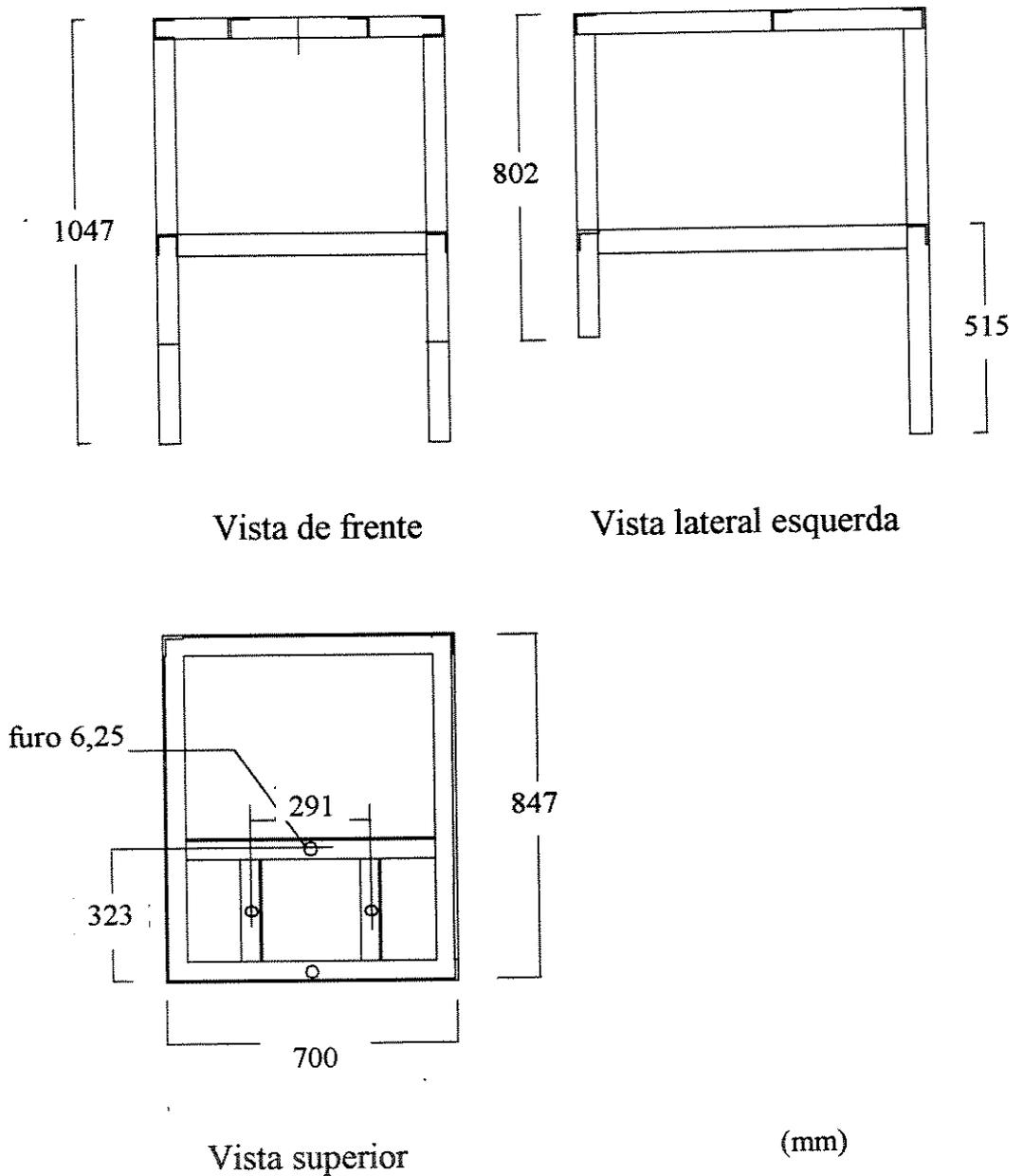
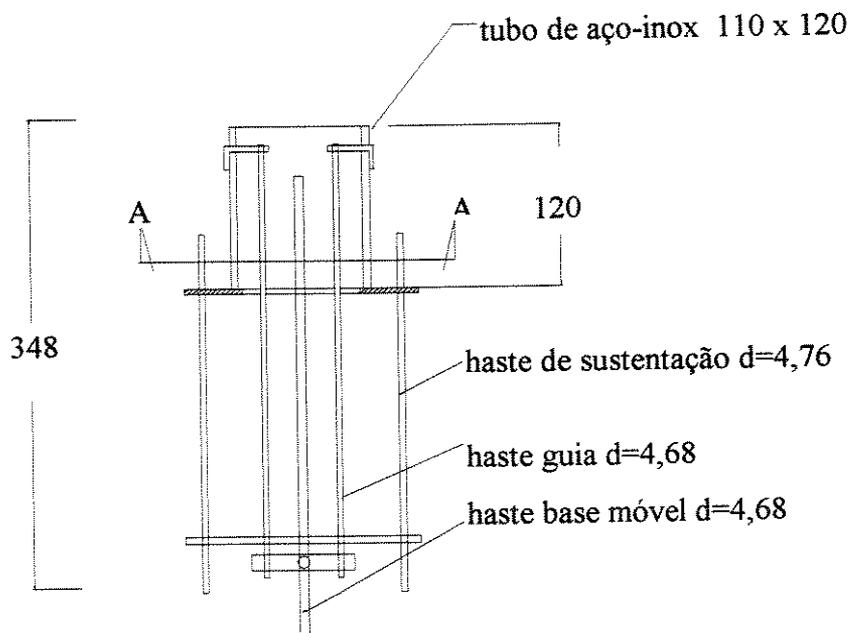


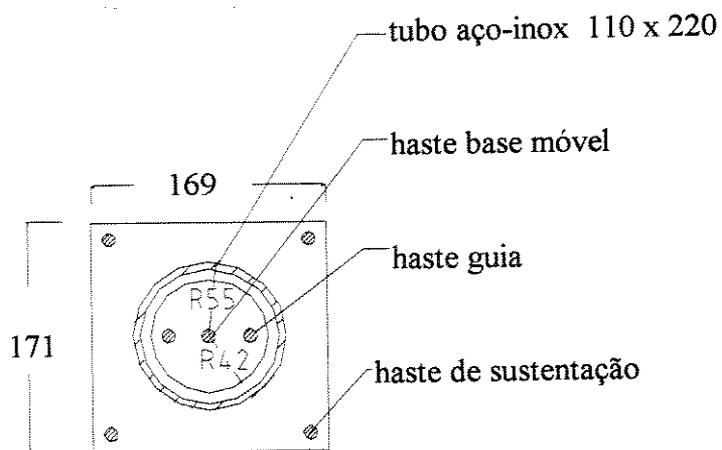
FIGURA 3.4 - Desenho esquemático da mesa constituinte da estrutura de sustentação do equipamento construído.

Dois outras estruturas podem ser identificadas, uma superior e outra inferior. A **estrutura inferior** é destinada a facilitar ou permitir a extração dos lingotes e dar base de fixação aos termopares de leitura e controle. Como pode ser observado na figura 3.5 é formada, basicamente, por hastes de 4,76 mm de diâmetro fixas na **estrutura de sustentação** por meio de porcas e arruelas. Na parte inferior, uma chapa de aço quadrada de 1,5 mm de espessura une as extremidades opostas das hastes de forma a produzir um conjunto rígido.

Nessa chapa foram efetuados furos centrais para introdução de hastes guias do movimento vertical da base móvel da lingoteira e dos termopares.



Vista de frente



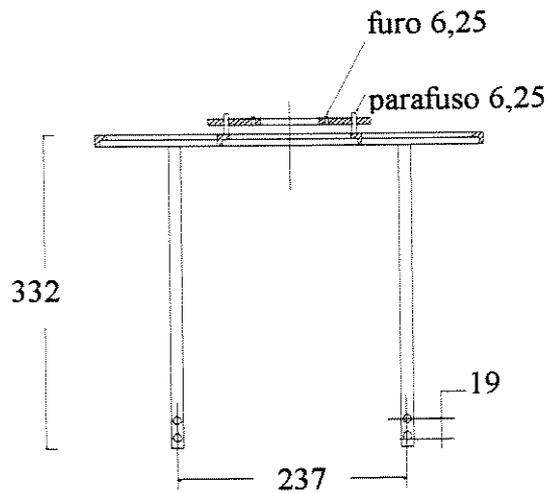
(mm)

Corte A-A

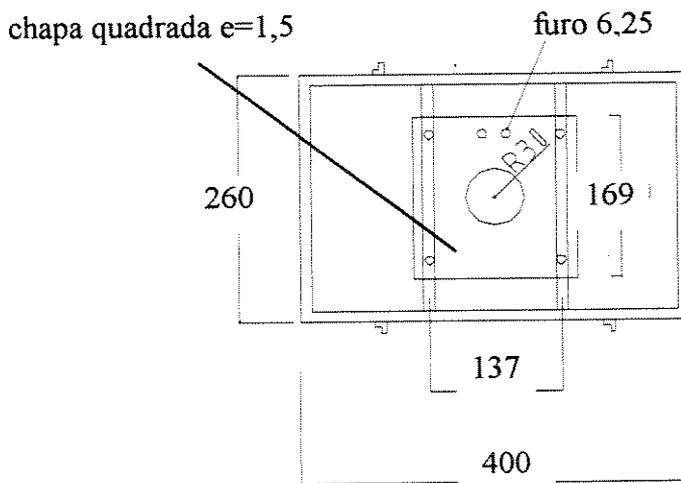
FIGURA 3.5 - Desenho esquemático da estrutura inferior do equipamento construído.

A **estrutura superior**, confeccionada com perfil de aço de 12,5 x 12,5 x 4,76 mm tem como objetivo impedir a possibilidade de movimentos horizontais da lingoteira, quando esta é

submetida à forças oriundas do campo magnético girante. O elo de ligação entre estrutura e a lingoteira dá-se através de uma chapa quadrada de aço de 1,5 mm espessura, que ainda sustenta os pinos de tomada de energia elétrica para os elementos resistivos de aquecimento da lingoteira. A figura 3.6 apresenta desenho esquemático da estrutura superior do equipamento construído.



Vista de frente



Vista superior

(mm)

FIGURA 3.6 - Desenho esquemático da estrutura superior do equipamento construído.

### 3.2.2. Canal de alimentação

O canal de alimentação é apresentado esquematicamente na figura 3.7; foi construído em liga de latão Cu 30 Zn, por usinagem conforme as dimensões assinaladas. Trata-se de um simples condutor do metal líquido até a lingoteira onde se processará a reofundição. Esse dispositivo tem como objetivo eliminar a possibilidade de contato entre o metal líquido e a mistura água-ar de refrigeração.

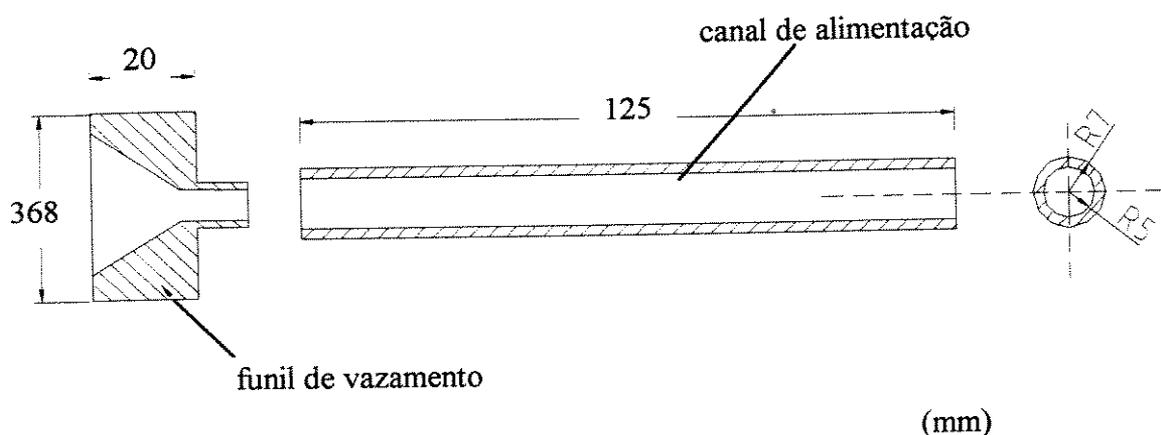


FIGURA 3.7 - Desenho esquemático do canal de alimentação do equipamento construído.

### 3.2.3. Lingoteira

A lingoteira, onde de fato se processa a modificação estrutural, foi também confeccionada em latão Cu 30 Zn, por usinagem. Esse material foi escolhido pela elevada condutividade térmica, com objetivo de acelerar a taxa de resfriamento da pasta após processamento.

O esquema da figura 3.8 apresenta desenho da lingoteira construída, onde pode ser observada a conicidade na cavidade destinada a facilitar a desmoldagem dos lingotes produzidos. Em torno do copo principal, com objetivo de tornar mais eficiente a extração de calor, foram usinados dezesseis furos passantes de 4,76 x 70 mm, detalhados na vista de topo apresentada. A base inferior é móvel para possibilitar a extração dos lingotes produzidos. Esta

base desliza verticalmente para se proceder as operações de vazamento no início do processo e de extração do lingote no final do procedimento.

Entre os furos destinados à refrigeração, foi usinado um furo extra com 1,5 mm de diâmetro para acomodar o termopar responsável pela leitura das temperaturas durante a solidificação da liga metálica. Outros três termopares foram acomodados na base da lingoteira com objetivo de fornecer sinais para o circuito de comando elétrico do processo. Para promover contato adequado entre a extremidade do termopar e o ponto de interesse na superfície da lingoteira, foram utilizados presilhas providas de molas para garantir uma pressão constante de contato.

Na superfície externa da lingoteira, pode ser observado espaço circular destinado a abrigar elementos de resistência elétrica, utilizados para controle de taxa de resfriamento do banho sendo processado. Em todas as dimensões cotadas, exceto a referente à base móvel, não há preocupação em relação a qualquer tipo de tolerância. Para impedir possíveis perdas de metal líquido pela ação da força magnética durante o processo de agitação e também permitir o movimento deslizante necessário na desmoldagem do lingote fundido, o ajuste entre a base móvel e o fundo da lingoteira requer relativa precisão, sendo 39,9h11 e 39,9D11.

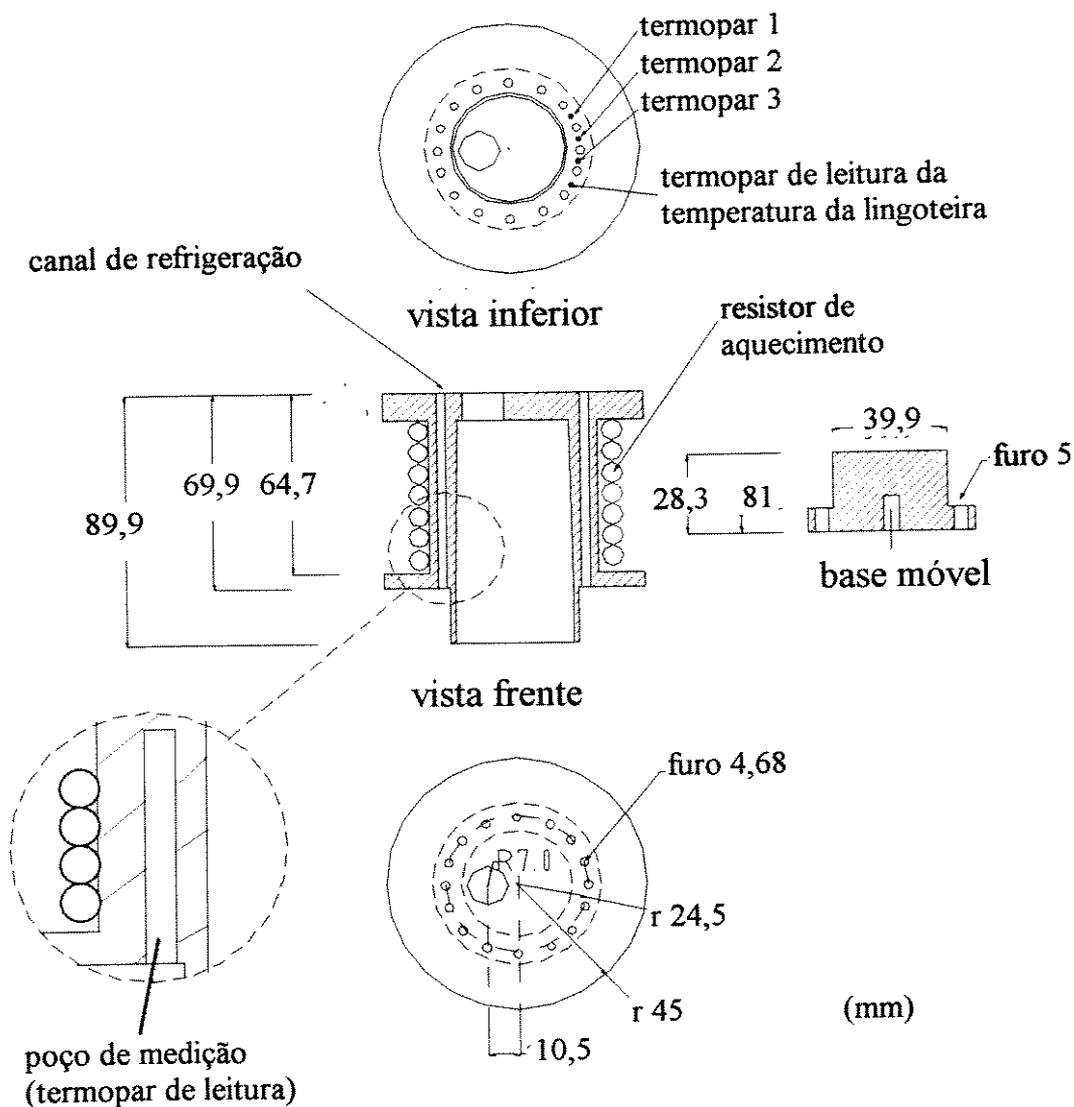


FIGURA 3.8 - Desenho esquemático da lingoteira do equipamento construído.

### 3.2.4. Canal de refrigeração

Um canal de refrigeração, também em Cu 30 Zn, foi construído de modo a permitir a circulação de água e ar ao redor da lingoteira. O canal de refrigeração é apresentado de maneira esquemática na figura 3.9.; pode ser observado que possui em sua extremidade inferior uma cavidade circular para distribuir a mistura de água e ar na parte superior da lingoteira. O acesso faz-se através de um furo de 9,52 mm de diâmetro e 74,8 mm de comprimento, conforme mostrado na figura. Na parte superior da câmara de refrigeração um

rebaixo circular permite a sustentação mecânica da lingoteira, após unida com parafusos à chapa de aço.

Além do furo passante destinado a acessar a cavidade de distribuição circular de água e ar, um segundo furo passante de 14 mm de diâmetro por 74,8 mm de comprimento é necessário para possibilitar a acomodação do canal de alimentação da lingoteira. No desenho esquemático da figura 3.9 podem ser observados os detalhes geométricos e as dimensões de furação efetuados, em relação ao eixo excêntrico da peça.

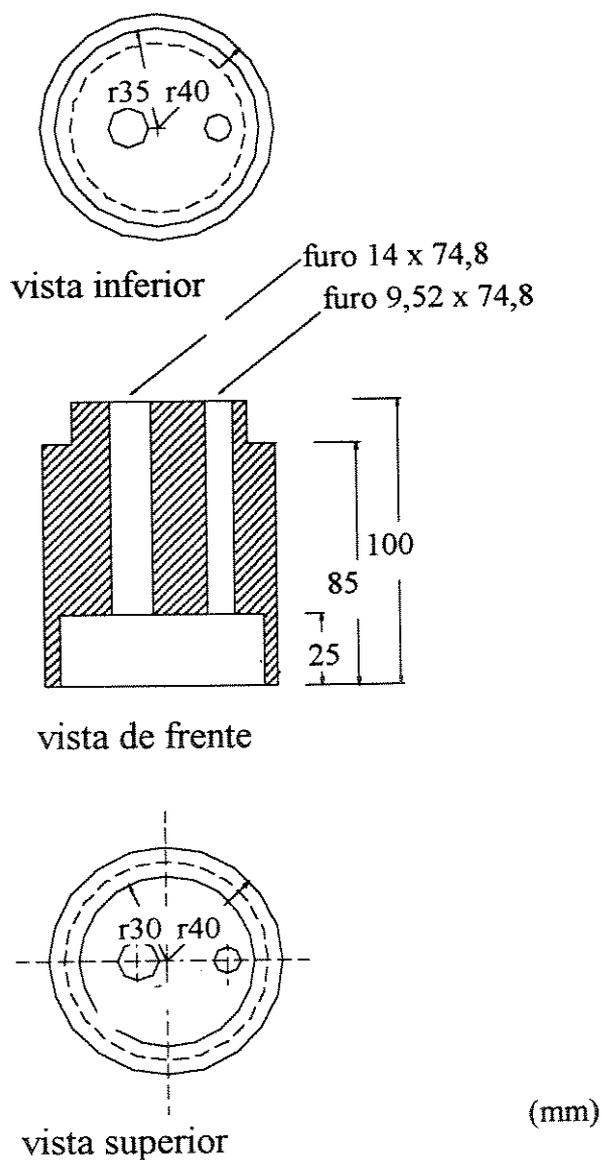


FIGURA 3.9 - Desenho esquemático do canal de refrigeração do equipamento construído.

O canal de alimentação, a lingoteira e a câmara de refrigeração descritos foram unidos através de soldagem, o conjunto foi então fixado nas estruturas **superior e inferior**, conforme visto na figura 3.1. A base da lingoteira está apoiada sobre um tubo de aço inoxidável de 100 mm de diâmetro, o qual é fixado por meio de hastes rosqueadas à parte inferior da **estrutura de sustentação**. A fixação é completada na parte superior onde a chapa de aço, fixada no canal de refrigeração, é presa por porcas e parafusos à **estrutura superior**.

### **3.3. Componentes elétricos**

Os componentes elétricos englobam dispositivos e circuitos elétricos de controle do processo de fundição. A seguir são descritos, individualmente, os dispositivos elétricos como motor estator e resistência de aquecimento e, posteriormente, seguem detalhes sobre os circuitos elétricos de comando geral e de força.

#### **3.3.1. Motor estator**

A fonte de força promotora do movimento do fluido metálico foi obtida pela adaptação de um motor estator retirado de um motor de 5 CV e excentricamente posicionado em relação ao eixo de simetria da lingoteira. O motor estator, com 120 mm de diâmetro interno e enrolamento trifásico, proporciona campo magnético girante em torno da lingoteira, necessário para o movimento do metal líquido.

#### **3.3.2. Resistor de aquecimento**

Com os objetivos de possibilitar o pré-aquecimento da lingoteira antes do vazamento do metal e um maior controle da taxa de resfriamento do líquido durante processamento, foi projetado sistema de aquecimento da lingoteira por ação de um resistor elétrico posicionado ao seu redor.

Para o cálculo da potência elétrica requerida e a determinação da natureza do isolante térmico a ser utilizado, foi considerado o sistema constituído pela lingoteira, de seção circular e de uma camada do material isolante, de espessura limitada pelo espaço entre a lingoteira e o motor estator. Para a simplificação dos cálculos envolvidos, já que se trata de uma avaliação

aproximada, podem ser desconsideradas as influências da resistência elétrica e das miçangas de porcelanas, devido às pequenas massas em relação à lingoteira. Para a efetividade dos cálculos, a fronteira do sistema mantém-se à temperatura constante de 30 °C.

Partindo da primeira lei da termodinâmica, tem-se que:

$$q - W = dU / dt \quad (3.1)$$

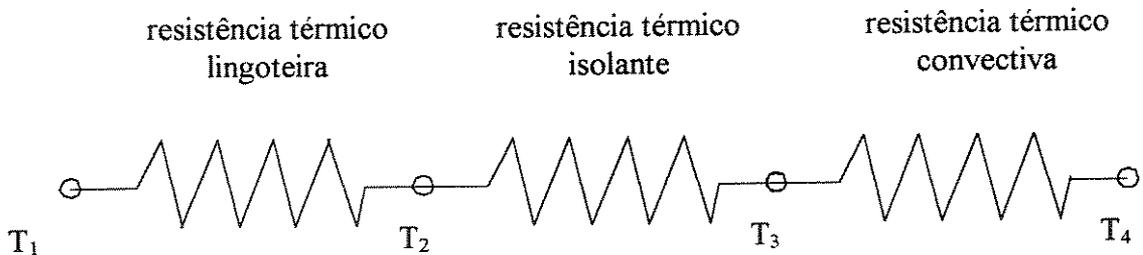
onde:

$q$  = Taxa de extração de calor.

$W$  = Potência elétrica da resistência.

$dU/dt$  = Taxa de variação da energia interna do sistema.

Para  $dU/dt = 0$  tem-se uma igualdade numérica entre a potência elétrica  $W$  e a taxa de extração de calor  $q$ . Essa condição física representa a situação em que o sistema atinge a temperatura de equilíbrio característica e toda a energia provida pela resistência elétrica é transferida na forma de calor para a vizinhança. No esquema abaixo, observa-se o circuito térmico característico do sistema.



onde:

T<sub>1</sub> = T = Temperatura da lingoteira;

T<sub>2</sub> = Temperatura da interface lingoteira-isolante térmico;

T<sub>3</sub> = Temperatura da interface isolante térmico-vizinhança;

$T_4 = T_a =$  Temperatura ambiente.

Foi desconsiderada nos cálculos a resistência térmica de condução na parede da lingoteira em função do seu pequeno valor ( $0,0068 \text{ m } ^\circ\text{C} / \text{W}$  para o latão) em relação aos materiais isolantes que em média apresentam valores superiores a  $25 \text{ m } ^\circ\text{C} / \text{W}$ . A resistência convectiva será desconsiderada pela imprecisão na determinação do coeficiente de transmissão convectivo local e pela baixa contribuição quando comparada ao isolante. Assim, desenvolvendo a equação (3.1) para uma situação de predominância de extração de calor radial, dada a geometria cilíndrica do sistema, na temperatura de equilíbrio, tem-se a equação:

$$V I = [(T - T_a) / \text{Ln}(r_o / r_i)] 2\pi K L \quad (3.2)$$

onde:

$V I =$  Potência elétrica da resistência

$T_a =$  Temperatura ambiente =  $30 \text{ } ^\circ\text{C}$

$r_o =$  Raio externo da isolação =  $55 \text{ mm}$

$r_i =$  Raio externo da lingoteira =  $40 \text{ mm}$

$K =$  Condutividade térmica do material isolante

$L =$  Comprimento da lingoteira =  $170 \text{ mm}$

$T =$  Temperatura de equilíbrio da lingoteira

Substituindo os respectivos valores na equação (3.2) vem:

$$V I = (T - 30 \text{ } ^\circ\text{C}) 3,35 K \quad (3.3)$$

A partir da equação (3.3) e da condutividade do material isolante, pode-se avaliar, com relativa aproximação, a potência necessária para obtenção de uma dada temperatura de equilíbrio na lingoteira. O tempo de aquecimento da lingoteira pode ser determinado retomando à equação (3.1) e mantendo as aproximações anteriores, assim vem:

$$m C_v dT/dt = -\left\{ \frac{(T-T_a) 2\pi K L}{\ln(r_o/r_i)} \right\} - V I \quad (3.4)$$

A equação diferencial (3.4) tem como solução geral a equação abaixo:

$$T = T_a + C_1 \exp\left\{ -\frac{(2\pi K L)}{[\ln(r_o/r_i) m C_v]} t \right\} + \frac{V I \ln(r_o/r_i)}{(2\pi K L)} \quad (3.5)$$

Substituindo os valores conhecidos, vem:

$$T(t) = 30^\circ\text{C} + C_1 \exp\{-0,0015 K t\} + (V I 0,298) / K \quad (3.6)$$

onde:

$C_1$  = Constante ( condição inicial )

$m$  = Massa da Lingoteira = 5,8 Kg

$C_v$  = Calor específico do Latão Cu 30 Zn (Lingoteira) = 92 Cal/Kg/°C

Para a condição inicial do sistema  $t = 0$ ,  $T(0) = T_a = 30^\circ\text{C}$ , tem-se:

$$30 = 30 + C_1 \exp\{-0,0015 K 0\} + (V I 0,298) / K$$

$$C_1 = - (V I 0,298) / K \quad (3.7)$$

Substituindo a equação (3.7) na equação (3.6) e rearranjando os termos, obtém-se a relação funcional que descreve a curva de aquecimento da lingoteira em relação ao tempo para um determinado material isolante:

$$T(t) = 30 + (V 10,298) / K \{ 1 - \exp(- 0,0015 K t) \} \quad (3.8)$$

Observando as equações (3.3) e (3.8), percebe-se a dependência em relação ao coeficiente de condutividade térmica **K** da potência elétrica requerida e do tempo de aquecimento respectivamente. Fazendo uso da equação resultante na substituição da equação (3.3) em (3.8) e do coeficiente de condutividade do isolante térmico lã de rocha, foi construída a tabela 3.1, onde são apresentados resultados de cálculos de tempo de aquecimento até a temperatura de pré-aquecimento 550 °C para diferentes potências requeridas.

TABELA 3.1 - Tempos e potências requeridas para o aquecimento até 550 °C da lingoteira construída.

Isolante lã de rocha K= 0,040 W / m °C (à 32 °C)	
Potência elétrica requerida	Tempo de aquec. até 550 °C
300 W	77 min.
400 W	56 min.
500 W	44 min.
700 W	30 min.

Como pode ser observado na tabela (3.1) há necessidade de elevar a potência elétrica da resistência de aquecimento para obter tempos razoáveis de espera, antes de proceder o vazamento do metal líquido. Seria conveniente reduzir ao máximo o tempo de aquecimento da lingoteira, mas isso implica em espaço relativamente grande em torno da lingoteira para acomodar o elemento de aquecimento, o qual é proporcional à potência requerida. Dada a limitação do espaço existente, adotou-se a potência elétrica de 700 W com tempo de aquecimento da lingoteira até 550 °C de 30 minutos.

A partir destes cálculos, foi possível dimensionar a resistência de aquecimento da lingoteira. Utilizou-se fios Kanthal A1 de 1,5 mm de diâmetro, com temperatura limite de trabalho de 1200 °C. Em função dos valores de resistividade fornecidos pelo fabricante, foi calculado o comprimento de 3 m de fio, necessários para as condições estabelecidas acima. O

elemento resistivo para o aquecimento foi isolado com miçangas de porcelanas e, posteriormente, disposto circularmente em torno da lingoteira. Suas extremidades foram fixadas com porcas cobreadas no pino de tomada de energia elétrica, localizada na placa de ligação da parte superior da lingoteira com a estrutura superior, conforme indicado na figura 3.1. Para alimentar a resistência de aquecimento foi utilizado um variador de tensão acoplado em série com a rede elétrica monofásica de 127 V e 60 Hz. A tensão elétrica disponível na saída deste equipamento e, conseqüentemente, a de alimentação da resistência, foi aproximadamente de 60 V e 60 Hz.

### **3.3.3. Circuitos elétricos de controle operacional**

Com o objetivo de estabelecer um procedimento comum a todos os experimentos e dada a impossibilidade de controle manual de operação do sistema devido a grande quantidade de eventos simultâneos ocorrendo durante o processo, foi desenvolvido um circuito elétrico capaz de comandar automaticamente a seqüência de eventos durante todo o processo de fundição. Neste circuito foram utilizados contadores, relés auxiliares, temporizadores, registradores-controladores de temperatura como elementos atuantes e termopares como sensores. O circuito elétrico geral do equipamento montado é apresentado na figura 3.10.

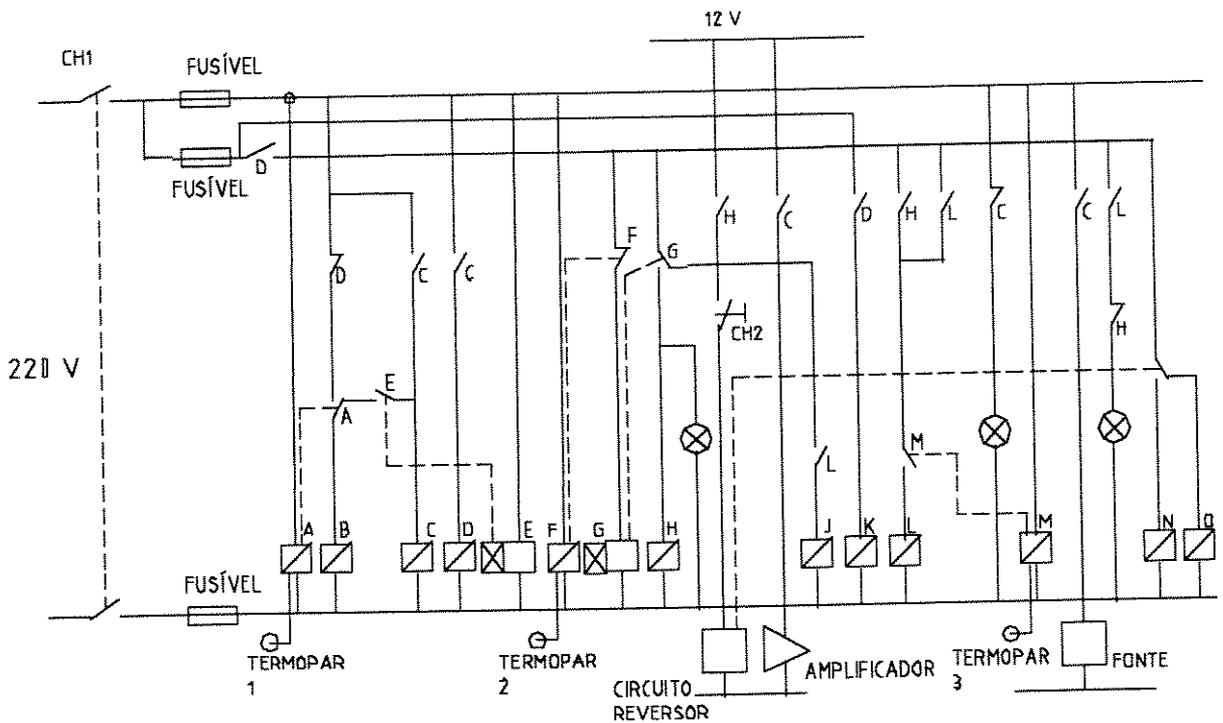


FIGURA 3.10 - Circuito do comando geral do equipamento construído.

O comando elétrico geral do sistema monitora e controla a fonte eletromagnética (motor estator) e, portanto, o movimento provocado no metal líquido; e também a fonte de calor (resistência de aquecimento) e o fluxo de ar comprimido e ou água, portanto, a taxa de resfriamento no líquido durante o processamento.

Para alimentação elétrica do motor estator, utilizou-se um banco de variadores de tensão com seus terminais de entrada fechados em estrela. A redução da tensão aplicada ao motor estator é necessária, uma vez que a eliminação do rotor do motor provoca um rápido aquecimento dos enrolamentos, podendo causar danos permanentes ao isolamento elétrico dos condutores que constituem as bobinas de campo magnético. Na saída dos variadores de tensão somente são consideradas as fases que são levadas até as bobinas do motor estator. Dessa forma, obtém-se uma rede secundária trifásica variável com sinais elétricos defasados em 120 °C, necessários à promoção de campos magnéticos girantes no interior da lingoteira. O circuito principal (força) de agitação e aquecimento são apresentados com mais detalhes na figura 3.11.

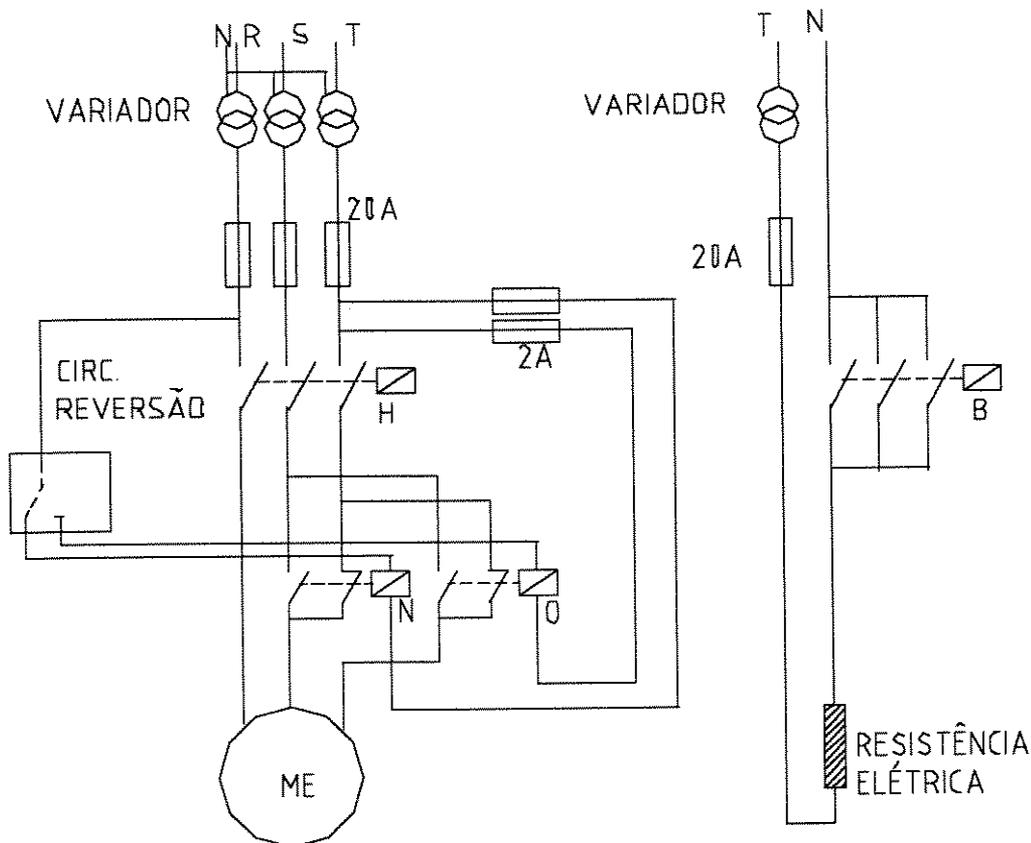


FIGURA 3.11 - Circuito elétrico principal de agitação e aquecimento do equipamento construído.

Os circuitos elétricos de comando e principal são responsáveis pela operacionalidade do sistema. Ao acionar a chave geral CH1 o processo é iniciado com a alimentação elétrica da resistência de aquecimento. A lingoteira atingindo a temperatura de 550 °C, procede-se o vazamento da liga metálica que se encontra no estado líquido a 750 °C. Após um breve tempo de estabilização, a temperatura do conjunto eleva-se gradualmente até a temperatura de início de resfriamento (aproximadamente 660 °C). Nesse instante, automaticamente, cessa o aquecimento, a válvula solenóide de ar é acionada e um fluxo permanente de ar é mantido através da parede da lingoteira com o intuito de resfriar o conjunto.

Numa temperatura próxima à linha *liquidus* da liga utilizada é iniciado o processo de agitação pelo acionamento da fonte magnética que induz movimento circulatório do metal líquido em solidificação. A força de *Lorentz* é responsável pelo movimento do metal líquido no interior da lingoteira. Concomitantemente ao início de agitação, com o relê temporizador

instalado é cronometrado o tempo de agitação pré-estabelecido; expirado o tempo, a válvula solenóide de controle do fluxo de água é acionada e uma mistura água-ar é mantida através da parede da lingoteira, proporcionando um resfriamento rápido, com objetivo de preservar a fração sólida existente no instante final de agitação.

O resfriamento rápido prossegue até atingir a temperatura de aproximadamente 500 °C, quando a válvula solenóide de controle do fluxo de água é bloqueada; o fluxo de ar é mantido por um certo tempo, reduzindo a temperatura do conjunto.

A curva de resfriamento da lingoteira é obtida com o uso de um cartão conversor que lê os sinais elétricos oriundos do termopar de leitura instalado na base da lingoteira conforme detalhe da figura 3.8. Antes desses sinais serem processados, os circuitos de filtro e amplificação são acionados para reduzir o nível de ruído característico e compatibilizar as escalas de sinal e leitura do cartão conversor respectivamente.

Através da chave CH2 controla-se o tipo de movimento do fluxo metálico na lingoteira, podendo ser movimento circular simples ou com reversão cíclica.

### **3.4. Dispositivos eletrônicos**

Uma série de dispositivos eletrônicos foram projetados e construídos com o objetivo de possibilitar o controle operacional do sistema e melhorar o seu desempenho. Estes circuitos eletrônicos são a fonte de alimentação, multivibrador astável, circuito de reversão, amplificador e o filtro passa baixa, que constituem: a) a fonte de alimentação propriamente dita; b) o sistema de controle do campo magnético e c) o sistema de monitoramento da temperatura da lingoteira. Estes sistemas são descritos a seguir.

#### **3.4.1. Fonte de alimentação (barramento 12 V)**

A fonte de tensão projetada tem a capacidade de suprir energia elétrica para os circuitos eletrônicos no limite de potência de 12 W, mantendo, independente da carga acoplada, uma tensão fixa de 12 V nos terminais de saída. A baixa flutuação do nível de tensão na saída deve-

se à utilização do circuito integrado tipo 7812 CT, apresentado na figura 3.12, que possui a capacidade de transferência limite de 1A.

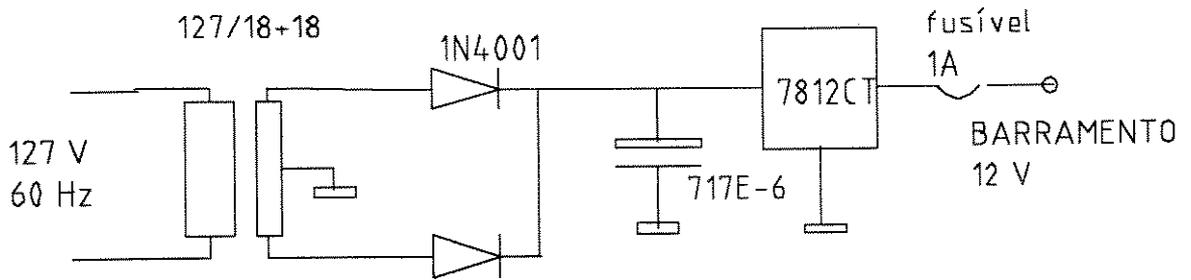


FIGURA 3.12 - Esquema da fonte de alimentação utilizando o CI 7812 CT para estabilização do sinal elétrico (barramento 12 V) para controle do equipamento construído.

### 3.4.2. Controle do campo magnético

Para provocar a reversão cíclica do movimento do fluido metálico no interior da lingoteira foi projetado um multivibrador astável utilizando como componente básico o circuito integrado tipo LM555. O circuito, apresentado na figura 3.13, permite realizar experimentos variando a frequência do ciclo entre 1/6 Hz até 1Hz. A fonte de tensão estabilizada fornece a tensão de referência isolada de 12 V aos pinos 8 e 4 do circuito integrado, enquanto que o pino 1, como os demais na mesma referência, é levado à referência zero através do condutor neutro da rede elétrica. O ajuste da frequência do oscilador é feita através do potenciômetro de 100 K $\Omega$ .

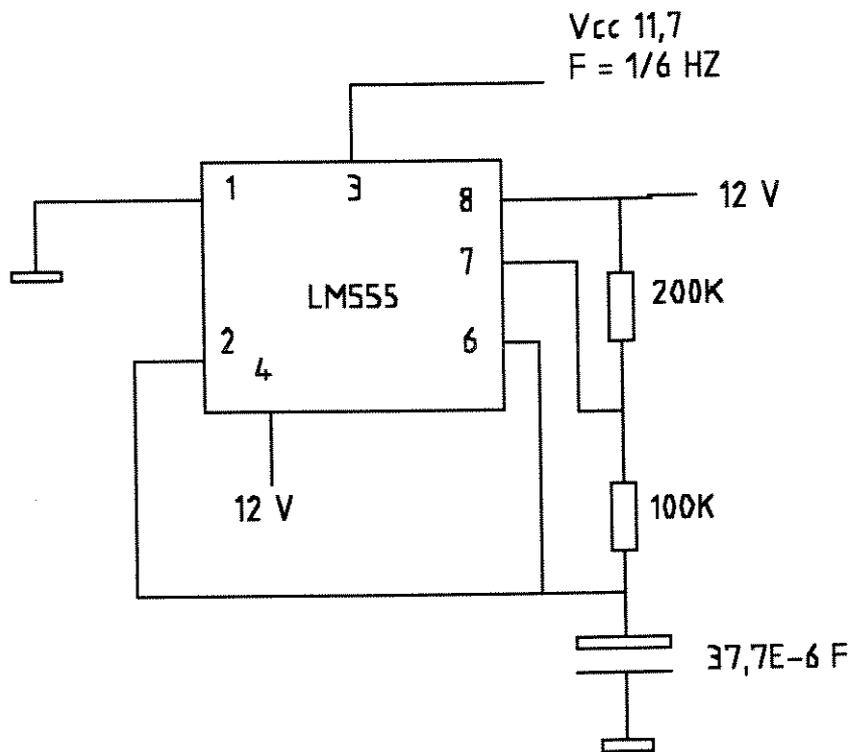


FIGURA 3.13 - Esquema do circuito multivibrador astável utilizando o CI LM555 para controle da frequência do movimento produzido no metal líquido durante o resfriamento.

O multivibrador astável, juntamente com o circuito de reversão apresentado na figura 3.14, constituem o módulo de reversão de movimento propriamente dito. O circuito de reversão utiliza transistores TIP 42 e relês magnéticos para promover a reversão do movimento rotacional do metal líquido no interior da lingoteira. Com o jogo de contatos reversíveis dos relês magnéticos é possível inverter, ciclicamente, no intervalo de frequência do multivibrador astável, duas das fases de alimentação de tensão alternada da rede elétrica, obtendo dessa forma a reversão automática e contínua do sentido do campo magnético do motor estator e, conseqüentemente, do fluxo do metal líquido no interior da lingoteira. Esse circuito possui dupla sinalização visual de reversão do movimento dentro lingoteira pelo uso de sinalização luminosa. (LED na figura 3.14)

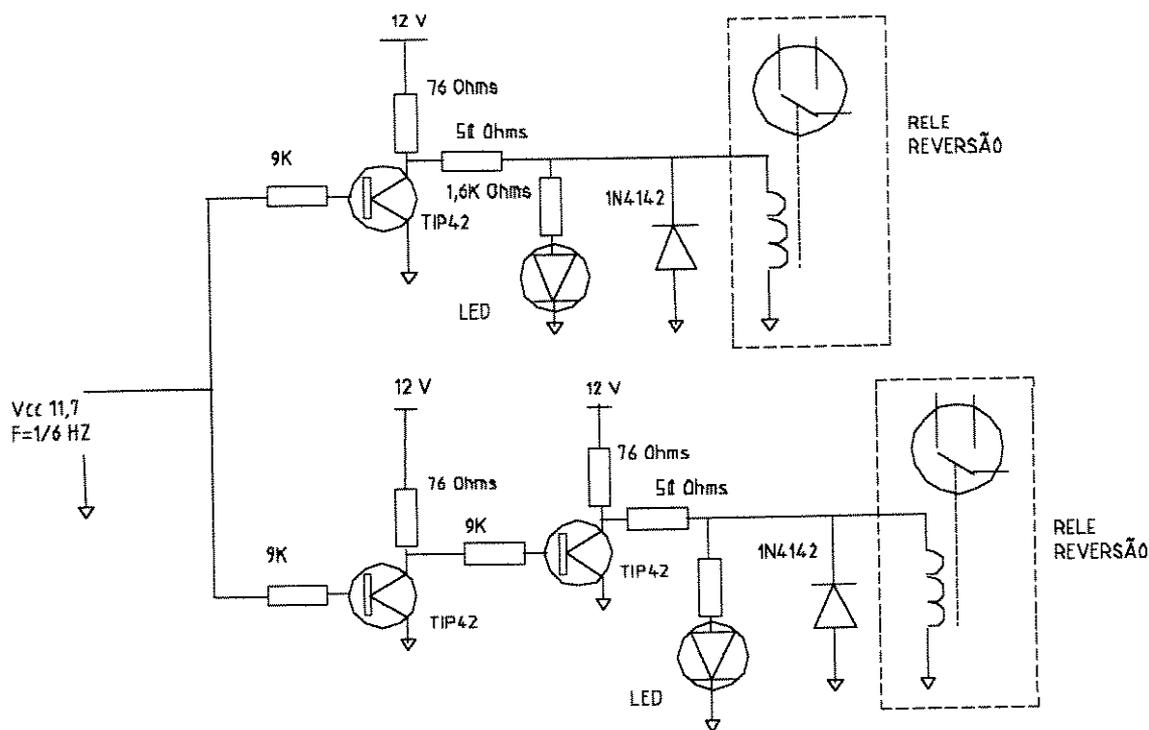


FIGURA 3.14 - Esquema do circuito de reversão do movimento do líquido durante o resfriamento.

### 3.4.3. Monitoramento da temperatura da lingoteira

Para monitorar a curva de resfriamento da lingoteira, foi utilizado um cartão de conversão analógico/digital acoplado ao termopar de leitura. Entre o termopar posicionado no interior da parede da lingoteira e o cartão de conversão, foi necessário utilizar um amplificador elétrico de sinais para compatibilização de escala e redução de sinais espúrios oriundos de circuitos adjacentes.

Como mostrado na figura 3.15, o circuito amplificador possui três circuitos integrados 741 como unidades fundamentais. Os dois primeiros constituem o estágio amplificador, responsáveis pela reprodução do sinal de entrada acrescido na saída do ganho projetado de 100 unidades. O terceiro circuito integrado utilizado opera na configuração seguidor ou repetidor de sinal, apresentando alta impedância de entrada e máxima transferência de saída. Assim, com esse estágio, obtém-se o isolamento entre os circuitos de amplificação e o de

leitura do cartão conversor, impedindo a interferência cruzada nos parâmetros individuais dos circuitos.

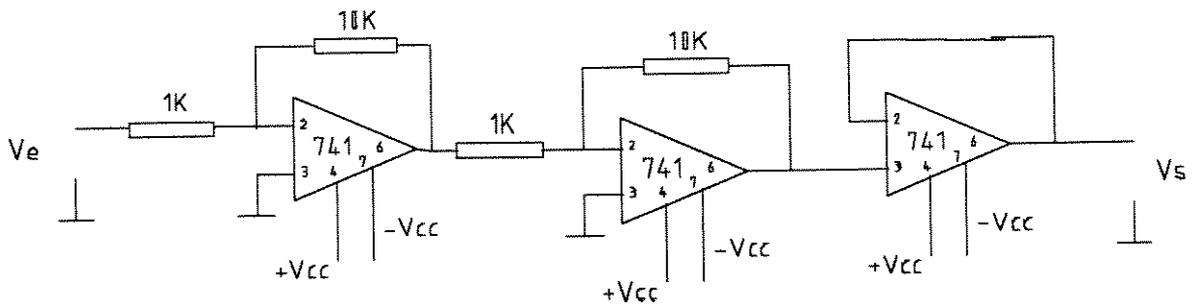


FIGURA 3.15 - Esquema do circuito de estágio amplificador de sinais utilizado para leitura de temperatura na lingoteira.

Em sucessivos testes realizados para avaliar o desempenho do circuito, foi constatado através da relação dos sinais de saída e entrada, que o valor real de amplificação apresenta média equivalente a 99,55 unidades e desvio padrão de 0,01 unidade.

A grande vantagem na utilização dos amplificadores operacionais deve-se ao fato desses apresentarem altíssimo fator de rejeição de sinal no modo comum, ou seja, os sinais espúrios, introdutores de erros e que estão presentes nas entradas, são rejeitados fortemente e, conseqüentemente, excluídos na saída.

Para o bom funcionamento do circuito amplificador, é necessária uma fonte de tensão simétrica de alimentação em seus pinos. Dessa forma, foram utilizadas duas resistências elétricas em série com o ponto comum mantido na referência zero do sistema, para o fornecimento de energia elétrica adequada ao circuito amplificador, conforme apresentado na figura 3.16.

Essas resistências elétricas são precisas e semelhantes de forma a não introduzirem desequilíbrio substancial na simetria da fonte de alimentação e apresentam alta capacidade de dissipação de energia. Os resistores estão interligados na placa de circuito impresso destinada a abrigar os circuitos de oscilação e amplificação. Apesar da alta capacidade de dissipação de energia elétrica dessas resistências, não ocorre superaquecimento do sistema devido à baixa transferência de corrente envolvida.

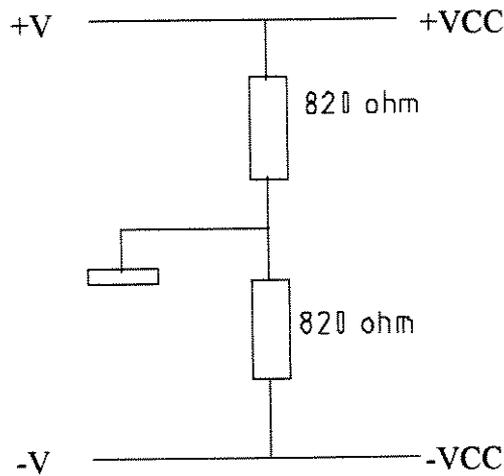


FIGURA 3.16 - Fonte simétrica de tensão utilizada para alimentação do circuito amplificador.

Com objetivo de amortizar os sinais espúrios de alta frequência, antes que os valores fornecidos pelo termopar de leitura fossem amplificados, uma rede de filtro tipo RC passa-baixa foi projetada e construída, conforme apresentado no esquema da figura 3.17.

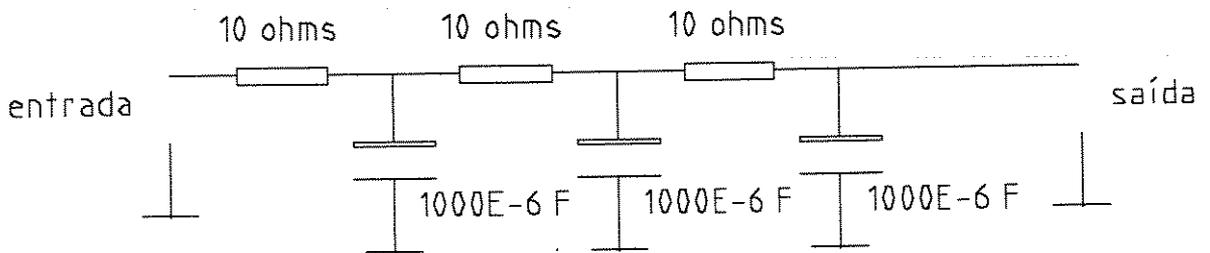


FIGURA 3.17 - Esquema do filtro tipo RC passa-baixa para redução dos sinais espúrios gerados na malha de leitura da temperatura da lingoteira.

O filtro acima é composto por três circuitos tipo RC individuais acoplados em série. Cada circuito foi projetado para apresentar baixo ganho de transferência à sinais elétricos de frequência acima de 30 Hz; dessa forma, na saída do circuito, tem-se um sinal composto predominantemente pela parcela contínua do sinal processado. Os contatos reversores dos relês magnéticos previstos no circuito de reversão são de baixa transferência de corrente e, portanto, impossibilitados de estarem no circuito principal, sendo assim, comandam a reversão

do campo magnético indiretamente através dos relês auxiliares **N** e **M**, conforme identificação constante no diagrama da figura 3.10.

## Capítulo 4

### Procedimento Experimental

#### 4.1. Introdução

O procedimento experimental foi dividido em duas partes distintas: em primeiro lugar testes de funcionamento e **calibração do sistema de leitura** de temperaturas do equipamento construído e, posteriormente, a **produção de lingotes fundidos**. A partir da leitura de temperaturas pelos termopares nas paredes da lingoteira, é controlado todo o sistema elétrico/térmico do equipamento, e, portanto, todo o seu funcionamento.

Para a calibração foram realizados ensaios para obtenção e avaliação da constante de tempo de leitura do cartão conversor analógico/digital, do ganho real do amplificador, do ajuste (*set*) dos dispositivos de controle utilizando as temperaturas lidas pelos termopares localizados na base da lingoteira e, finalmente, do desvio padrão do sistema de leitura.

Esta primeira etapa se fez necessária para o conhecimento do comportamento mecânico/elétrico / eletrônico do equipamento e o adequado ajuste de seus componentes.

Em seguida o equipamento foi utilizado para produção de lingotes da liga de Al AA2011, em diferentes condições operacionais, para análise de sua eficiência na promoção de modificações estruturais necessárias à utilização do material como matéria-prima para a conformação no estado semi-sólido reofundido.

## 4.2. Calibração do sistema de leitura de temperatura

Nos sub-tópicos seguintes serão descritos os procedimentos experimentais utilizados na obtenção dos parâmetros característicos do equipamento construído em relação aos dispositivos destinados a monitorar o sistema de leitura de temperatura da lingoteira. Esses parâmetros são essenciais para determinação da taxa de resfriamento do metal em processamento e a operação do equipamento.

### 4.2.1. Constante de tempo

Para a construção da curva de resfriamento **temperatura x tempo** com a variável independente *tempo de aquisição de dados* na abcissa, é necessário o conhecimento do tempo gasto entre duas leituras consecutivas, já que o cartão conversor oferece inúmeras possibilidades pelo ajuste do número de atraso **NA** na leitura. Para a obtenção dessa constante de tempo de leitura do cartão conversor analógico/digital foi utilizado um gerador de sinais de onda quadrada e um osciloscópio. Estes equipamentos foram montados conforme diagrama de blocos apresentado no esquema da figura 4.1.

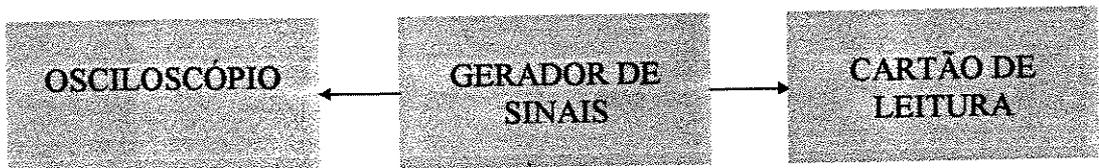


FIGURA 4.1 - Diagrama em blocos da montagem utilizada para obtenção da constante de tempo de leitura do cartão conversor analógico/digital.

O cartão conversor foi mantido no modo de leitura sem atraso e um sinal elétrico de 1Hz, onda quadrada, foi injetado em sua entrada pelo gerador de sinais. A calibração da frequência desse sinal foi obtida com auxílio do osciloscópio. Foram feitas quatro leituras, as quais foram transportadas para software Excel do Windows e, identificado o período do sinal, foi obtido por contagem simples o número de leituras efetuadas pelo cartão conversor.

## 4.2.2. Ganho do amplificador

É importante conhecer o parâmetro de ganho do amplificador e a tensão de referência, pois, posteriormente, eles serão utilizados na conversão dos valores lidos pelo cartão conversor nos respectivos valores de tensão fornecidos anteriormente pelo termopar de leitura. Define-se como tensão de referência a tensão medida na saída do amplificador, quando a tensão de entrada mantém-se no nível zero. Para a avaliação da tensão de referência e do ganho do amplificador durante o aquecimento da lingoteira, foram instalados medidores de tensão elétrica na entrada e saída do circuito, conforme esquema da figura 4.2. Foram efetuadas vinte leituras e os valores obtidos planificados para facilitar os cálculos necessários. O intervalo entre duas leituras consecutivas das tensões de entrada e saída foi aproximadamente de três minutos.

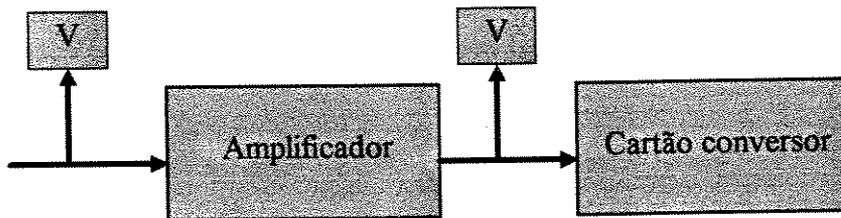


FIGURA 4.2 - Esquema de medição para avaliação do ganho do amplificador de sinais utilizados no sistema de leitura de temperatura.

## 4.2.3. Ajuste de registradores-controladores de temperaturas

Durante os experimentos, não foi utilizado termopar no interior do banho, sendo todo o controle de temperaturas feitos por três termopares, indicados na figura 3.8, inseridos na base da lingoteira. Estes termopares são responsáveis por todo o controle térmico e elétrico do sistema, conforme descrito anteriormente.

Como, no entanto, existem gradientes térmicos no banho e em diferentes pontos no interior da lingoteira, foi feito ensaio padrão para ajuste da leitura dos termopares de controle,

com relação à verdadeira temperatura no banho. Neste ensaio foi inserido um termopar no interior do metal líquido como referência para ajustes dos outros termopares na base da lingoteira.

Após um prévio aquecimento da lingoteira, o metal líquido foi vazado à 750 °C. Um certo tempo de espera foi necessário para a estabilização das temperaturas entre banho e lingoteira, a partir do qual o conjunto lingoteira/líquido reinicia o aquecimento, uma vez que o sistema de aquecimento está ligado; quando a temperatura da lingoteira atinge 700 °C, o circuito de aquecimento é desligado e como consequência, o líquido inicia resfriamento. À 660 °C é iniciada a agitação pelo tempo pré-estabelecido, findo o qual é interrompida e acionada a refrigeração por água.

A circulação de água é mantida até o conjunto lingote/metal atingir 500 °C, quando é interrompida e substituída por ar. A partir deste experimento, os respectivos controladores-registradores **M**, **F** e **A**, conectados aos termopares 3, 2 e 1, são ajustados de modo que todo o experimento posterior repita a mesma história térmica.

### **4.3. Obtenção da curva de resfriamento do banho**

O processo de modificação estrutural que se deseja envolve a agitação da liga líquida até uma determinada temperatura dentro da região *liquidus/solidus*, seguida de resfriamento rápido para a manutenção da morfologia fragmentada produzida na fase primária.

Para o sucesso da operação, é necessário conhecer a curva de resfriamento do banho durante o processo. Para tanto, ensaios foram efetuados mantendo-se constantes a potência de agitação em 1040 W e o fluxo de ar comprimido através das paredes da lingoteira. Foram realizados cinco ensaios e, com auxílio do cartão conversor analógico/digital, obtidos dados processados por programa especialmente desenvolvido (anexo 1), para obtenção das curvas de variação da temperatura com o tempo de processamento.

## 4.4. Produção de pastas pré-refundidas

Após testado o equipamento, em termos do desempenho elétrico, seguiu-se a segunda etapa do trabalho, qual seja, a verificação da eficiência do equipamento construído na produção de pastas com estruturas apropriadas para a re fundição.

### 4.4.1. Matéria-prima

Como matéria-prima para os testes de modificação estrutural foi utilizada a liga de Al para fundição AA2011, de composição básica Al/Cu. A escolha da liga AA2011 deve-se à sua disponibilidade no mercado e à possibilidade, já comprovada, de sua conformação no estado semi-sólido, por forjamento (ROVIRA, M. M. 1996) e por extrusão (ROVIRA, M. M. *et. al.*, 1997).

A tabela 4.1 apresenta a composição química da liga utilizada.

TABELA 4.1 - Composição química da liga metálica utilizada nos vazamentos realizados

Composição química da liga AA2011								
Elemento	Si	Mn	Cu	Fe	Zn	Cr	B	Bi
%	0,27	0,023	5,29	0,394	0,079	0,009	0,001	0,475

O diagrama de fases de ligas de Al-Cu apresentado na figura 4.3 indica, para a liga utilizada, à temperatura ambiente, a presença das fases  $\alpha$  (solução sólida de Al contendo Cu) e o  $\theta$  (intermetálico  $\text{CuAl}_2$ ). Na região pastosa, a pasta re fundida deve ser constituída de fase  $\alpha$ -globular e de líquido.

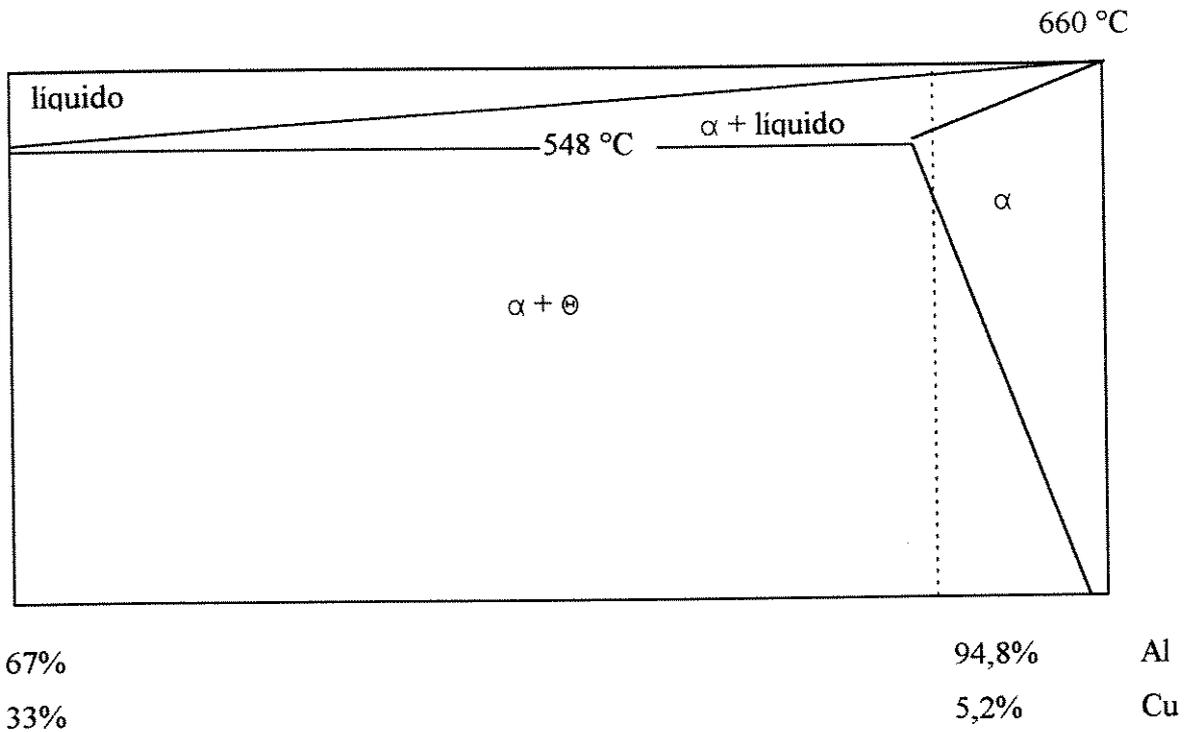


FIGURA 4.3 - Esquema do diagrama de fases da liga Al-Cu. Posição da liga AA2011 utilizada. (Mondolfo, L.F., 1976).

Na condição fundida, a liga apresenta a microestrutura típica da figura 4.4. Pode-se observar a fase  $\alpha$  com morfologia dendrítica e a fase eutética ( $\alpha + \text{CuAl}_2$ ), formada por solidificação fora de equilíbrio, em contornos dendríticos e de grãos. Na condição reofundida a fase  $\alpha$  deve apresentar morfologia globular, envolta por fase eutética.

Pelo diagrama de fases apresentado por Mondolfo, L.F., (1975) pode se estimar a faixa de solidificação da liga Al 5,2 Cu em 640 °C (*liquidus*) e 584 °C (*solidus*).

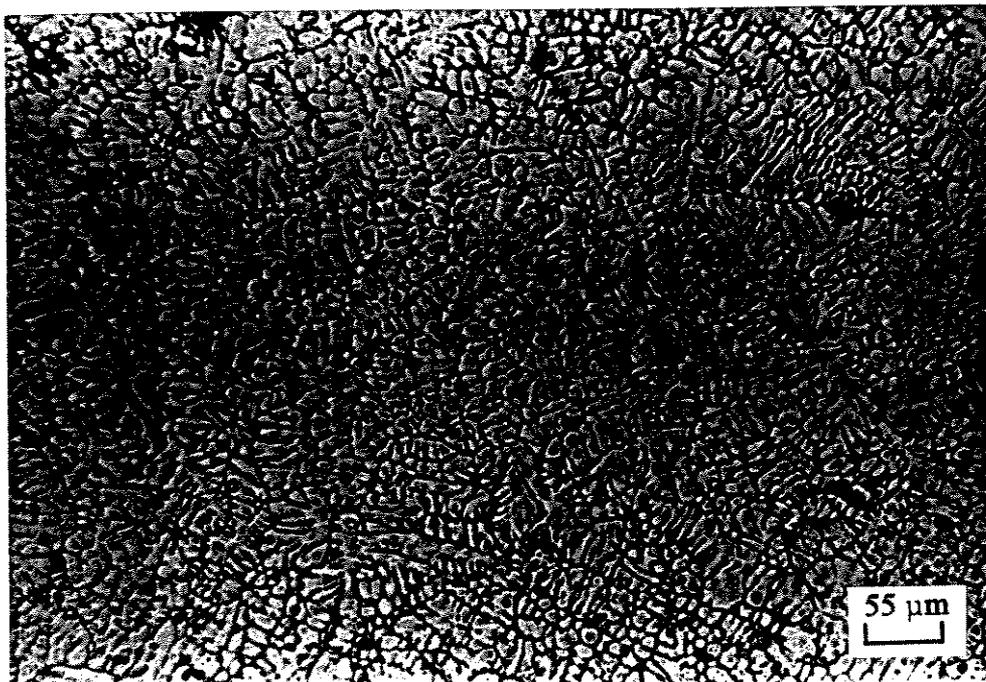


FIGURA 4.4- Microestrutura típica da liga AA2011 no estado fundido.

#### **4.4.2. Planejamento experimental**

Para avaliar o desempenho e a eficiência do equipamento em produzir pastas pré-reofundidas, foram planejados testes variando-se os parâmetros: tempo de agitação e modo de agitação. Foram mantidas constantes a potência de agitação (1040 W) e a taxa de resfriamento durante processamento (cerca de 20 °C/min.).

A distinção entre os modos de agitação deve-se a inversão cíclica do movimento rotacional da liga metálica durante a solidificação. Foi escolhido para esse tipo de movimento uma frequência de periodicidade de 1/6 Hz, a qual é ajustada através do oscilador astável descrito no capítulo 3.

Na tabela 4.2 encontram-se planejados experimentos de fundição efetuados, em todas os casos foram feitas 2 réplicas para a confirmação dos resultados obtidos.

TABELA 4.2 - Planificação dos experimentos realizados no equipamento construído.

Potência de agitação (1040 W) e taxa de resfriamento (20°C/min.)		
Modo de Agitação	Tempo de Agitação (s)	
	230	300
Normal	① 2 RÉPLICAS	② 2 RÉPLICAS
Reversão $f=1/6$ Hz	③ 2 RÉPLICAS	④ 2 RÉPLICAS

Foram tomados cuidados no sentido de manter constante o volume do material a ser processado, uma vez que a taxa de resfriamento durante o processo é mantida constante para todos os experimentos. Variações de volumes na massa do metal líquido significariam condições de solidificação distintas.

#### 4.4.3. Descrição do procedimento padrão

Inicialmente o material foi cortado de barras cilíndricas, com o peso adequadamente calculado, lavados com detergente e seco em estufa. Em seguida foram fundidos a 800 °C em forno elétrico; simultaneamente ao preparo do metal fundido, o equipamento foi ajustado para início de operação, isto é, iniciado o aquecimento da lingoteira, posicionada a chave **CH2** (indicada na figura 3.10) para a condição de agitação NORMAL ou REVERSÃO e programando o relê temporizador G (indicado na figura 3.10) para atuação por 230 ou 300 s de agitação, conforme o caso.

O comando elétrico geral do sistema monitora a temperatura de resfriamento e atua sobre o processo desde o seu início, quando a lingoteira se encontra na temperatura ambiente. O processo começa a partir do acionamento da chave geral que alimenta o circuito de comando com a tensão de 220 V. Nesse instante, a base móvel da câmara agitação encontra-se em sua posição superior para receber o metal líquido. O contato reversível do controlador e registador de temperatura A (figura 3.10), o qual é responsável pelo fim da fase de aquecimento, fecha-se ao acionamento, e o contator B (figura 3.10), acionado, alimenta a resistência elétrica em torno da câmara de agitação. O controlador e registrador de temperatura A encontra-se ajustado para atuar quando a temperatura da lingoteira atingir o valor de 700 °C.

O metal é vazado a 750 °C, fazendo aumentar a temperatura da lingoteira; durante a elevação de temperatura da lingoteira, os registradores e controladores **F** e **M** (figura 3.10), em função do prévio ajuste a 660 °C e 500°C, revertem seletivamente seus contatos de forma a habilitar, no instante oportuno, a alimentação elétrica do estator para promover a agitação da liga fundida e o acionamento da válvula solenóide de água para congelamento da estrutura do fundido, respectivamente.

Quando a temperatura de 700 °C é atingida na lingoteira, os relês auxiliares **C** e **D** (figura 3.10) são simultaneamente acionados e seus contatos auxiliares atuam na interrupção da alimentação de energia elétrica para a resistência, na alimentação do circuito amplificador de sinal provido pelo termopar de leitura, na sinalização visual do final da fase de aquecimento da lingoteira, na alimentação da fonte de tensão estabilizada, na energização do barramento **X** (figura 3.10) e no acionamento da válvula solenóide do ar. Um contato temporizado **E** (figura 3.10) foi utilizado para sincronizar a atuação dos relês **B**, **C** e **D**; como se pode observar no diagrama da figura 3.10 sua ausência impediria o acionamento da resistência elétrica.

O líquido é submetido a uma taxa de resfriamento constante devido ao fluxo de ar na parede da lingoteira; ao atingir 660 °C é iniciada a agitação pelo campo magnético gerado pelo estator. Isto ocorre devido ao retorno à posição inicial do contato reversor do controlador e registrador de temperatura **F** que, assim, possibilita a energização do contator **H** (figura 3.10). Durante o aquecimento a posição desse contato reversor não possui efeitos, pois o barramento **X** encontra-se desenergizado.

A agitação do metal fundido no interior da câmara de reofundição prossegue pelo tempo pré-determinado, findo o qual o contato temporizado do relê de tempo **E** retorna à sua posição inicial, interrompendo a energia elétrica de alimentação do estator e acionando a válvula solenóide de água. Nesse instante, a taxa de resfriamento da lingoteira eleva-se, possibilitando uma rápida redução da temperatura do conjunto, e o “congelamento” da estrutura formada na pasta fundida.

Quando a temperatura do metal atinge 500 °C, o contanto reversor do controlador e registrador de temperatura **M** (figura 3.10) atua, fechando a válvula de entrada de água

enquanto a válvula solenóide de ar é mantida aberta permitindo o fluxo de ar frio contínuo pela lingoteira. Decorrente alguns minutos, a temperatura do conjunto atinge um valor de aproximadamente 200 °C, quando a base móvel da câmara de agitação é posicionada na parte inferior da infra-estrutura, permitindo a extração do lingote solidificado. Os lingotes obtidos são então preparados para análise metalográfica.

#### **4.5. Análise metalográfica**

Os lingotes produzidos são seccionados longitudinalmente para observação da macroestrutura e transversalmente, em três regiões do lingote (parte inferior, parte central e parte superior, em relação à altura), para observação da microestrutura, conforme indicado na figura 4.5.

As amostras para análise da macroestrutura (corte longitudinal) foram então lavadas com detergente e lixadas com lixas na seqüência 220, 320, 400, 600 e 1200 para obtenção de uma superfície plana, em seguida foram atacadas com reagente químico padrão para macroestrutura de ligas Al-Cu composto de (HF 5%, HNO<sub>3</sub> 1,5% e HCl 3), lavadas e secadas.

As amostras transversais identificando as partes superior, central e inferior dos lingotes, preparadas para análise da microestrutura, foram polidas eletroliticamente com uso da solução padronizada I-5 (700 ml etanol, 120ml de H<sub>2</sub> O, 100 ml álcool isobutílico, 50 g ácido tartárico e 70 ml HClO<sub>4</sub> durante 15 segundos. Em seguida foram lavadas com detergente e secadas.

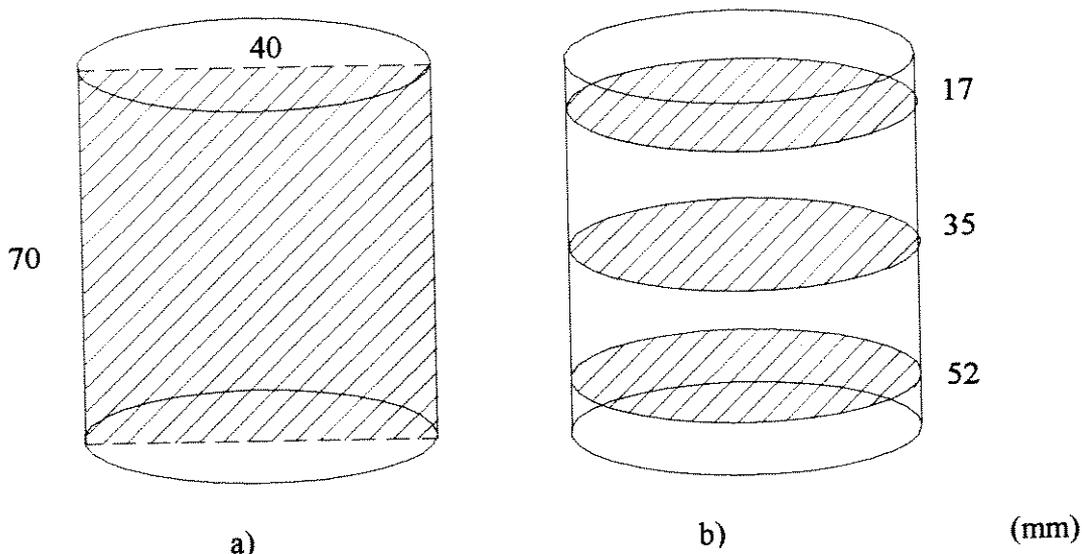


FIGURA 4.5 - Esquema de cortes para obtenção de amostras para análise micro e macroestrutural dos lingotes produzidos no equipamento construído; a) corte longitudinal e b) corte transversal. medidas a partir do topo dos lingotes.

#### 4.5.1. Metalografia qualitativa

As amostras preparadas para análise macroestrutural foram observadas e fotografadas para avaliação qualitativa da presença e localização de rechupes e vazios, acabamento superficial e aspecto geral dos lingotes.

As amostras preparadas para análise microestrutural foram observadas em microscópio óptico e fotografadas para avaliação da eficiência do equipamento projetado na modificação estrutural do produto obtido: foram analisadas visualmente a morfologia da fase primária e a distribuição da fase secundária, presença de microvazios, de coalescência entre ramos dendríticos ou glóbulos na fase primária.

#### 4.5.2. Metalografia quantitativa

Nas amostras longitudinais (macroestruturas) foram feitas medidas de tamanho de grão pelo método da intersecção, o qual estabelece que:

$$D = (L_t / M) / N \quad (4.1)$$

onde: D = diâmetro do grão  
L<sub>t</sub> = comprimento da linha de contagem  
M = aumento  
N = número de intersecções

Foram feitas cinco medidas para cada condição.

As amostras transversais (microestruturas) tiveram sua imagem digitalizada em analisador de imagens marca JVC-color vídeo câmera-model nº TK-1280U, e analisadas quantitativamente com relação ao teor de fração sólida (fase primária) na pasta fundida, fator de forma da fase primária e sua dimensão média.

Para efeito comparativo, foi também calculada a fração sólida da pasta utilizando a equação de *Scheil* e pela *regra da alavanca* diretamente sobre o diagrama de fases. As temperaturas necessárias para os cálculos foram obtidas a partir da curva de resfriamento do metal durante processamento, estimada pelo procedimento descrito anteriormente, isto é, 619 °C e 596 °C.

$$f_s = 1 - (C_1 / C_o)^{-1/(1-K)}$$

onde:

C<sub>1</sub> = Concentração de soluto na fase líquida

C<sub>o</sub> = Concentração de soluto na liga (5,2%Cu)

K = Coeficiente de partição da liga Al-Cu (K=0,17) obtido do diagrama de fases

O diâmetro médio da unidade morfológica da fase primária Al-α nas microestruturas produzidas foi calculado diretamente pelo analisador de imagens.

Para avaliação da modificação da geometria da fase primária devida à solidificação sob agitação, foram feitas medidas do fator de forma  $F_f$  também diretamente pelo analisador de imagens.

Define-se  $F_f$  como a razão entre o perímetro apresentado pela unidade morfológica e o perímetro no caso de um glóbulo ideal para área equivalente. Nas análises quantitativas via analisador de imagens foram observados 10 campos diferentes para cada amostra, sendo 2 amostras por condição.

## Capítulo 5

### Resultados e Discussões

#### 5.1. Equipamento construído

Nas figuras 5.1 a 5.8 são mostradas as fotografias do equipamento projetado e construído para reofundição de ligas metálicas. As fotografias destacam detalhes construtivos.

Na figura 5.1 pode ser visto o equipamento geral de reofundição. Identificam-se quatro partes distintas do conjunto: da esquerda para direita se encontram a) o **computador** responsável pela leitura dos sinais elétricos vindos do termopar de leitura; b) o banco de **variadores de tensão** que alimentam o motor estator; c) a **estrutura de alojamento** dos circuitos elétricos e eletrônicos e, d) o **conjunto de fundição** composto principalmente pelo motor-estator e a lingoteira inserida em seu interior.

A figura 5.2 apresenta uma vista lateral do equipamento. Pode ser visto em primeiro plano: a) a estrutura superior contendo o motor estator e a lingoteira; b) a estrutura inferior e c) a estrutura de sustentação. Em segundo plano pode ser visto parte dos dispositivos de controle do comando elétrico: d) o registrador e controlador de temperatura (**M** figura 3.10) responsável pelo comando da válvula solenóide (**J** figura 3.10) e, conseqüentemente, da desativação do sistema de resfriamento rápido da lingoteira; e) o registrador e controlador de temperatura (**F** figura 3.10) que aciona o sistema de agitação quando a temperatura estabelecida é atingida.

Na figura 5.3 pode ser visto em detalhe o conjunto de fundição: na parte central a) o **motor estator** dotado de aletas para facilitar a dissipação de calor; na parte superior b) o

**misturador** de água e ar composto por tubos de cobre de 12,5 mm de diâmetro; sobre a estrutura de sustentação estão fixas as válvulas solenóides controladoras dos fluxos de c) água (**J** na figura 3.10) e de d) ar (**K** na figura 3.10).

A figura 5.4 apresenta vista de topo do conjunto de reofundição. Podem ser vistos em detalhe: a) os pinos de tomada de energia elétrica que alimenta a resistência de aquecimento; b) a entrada de água e ar para refrigeração; c) funil de alimentação de metal líquido na parte superior do canal de alimentação.

Na figura 5.5 pode ser vista a lingoteira projetada e confeccionada: notam-se as entradas de a) metal líquido e b) mistura de água e ar na parte superior e, ao redor da lingoteira c) o sistema de isolamento com lã de rocha e corrugado de alumínio.

Na figura 5.6 é apresentada parte dos dispositivos utilizados no comando elétrico e no circuito principal do equipamento: a) o registrador e controlador de temperatura **A** (na figura 3.10) é responsável pela inicialização do processo de resfriamento da lingoteira; ao atingir a temperatura estabelecida ele aciona b) a válvula solenóide de ar (**K** na figura 3.10) no mesmo instante que desliga a alimentação de energia elétrica da resistência de aquecimento. Ao lado do registrador são mostradas c) as lâmpadas de sinalização dos processos de agitação e resfriamento rápido; na parte inferior são vistos d) os amperímetros de registro da corrente do motor estator e e) o variador de tensão de alimentação da resistência de aquecimento da lingoteira.

A figura 5.7 apresenta com mais detalhes parte dos dispositivos do comando elétrico do equipamento. De cima para baixo: a) os três fusíveis e o temporizador **E** (figura 3.10), responsáveis pela proteção contra curto-circuito e retardo de manobras de relês respectivamente; b) seqüência de relês **C**, **D**, **L**, **N** e **O** (na figura 3.10). Os dois primeiros são responsáveis pelo início do resfriamento da lingoteira; o relê **L** pela finalização; os dois restantes pela inversão cíclica do movimento do metal líquido no interior da lingoteira. Na parte inferior observa-se também c) o temporizador **G** (na figura 3.10) e d) o contator **B** (na figura 3.10) que alimenta a resistência de aquecimento.

Na figura 5.8 são mostrados os circuitos eletrônicos projetados e construídos para monitorar e controlar o processo de reofundição de ligas metálicas: na parte superior encontra-se a) a fonte de alimentação que fornece a tensão de barramento de 12 V para alimentação dos demais circuitos; abaixo e à esquerda, b) o circuito ou módulo de reversão, responsável pelo tipo de movimento do metal líquido no interior da lingoteira; à direita, na seqüência, c) o circuito filtro RC e, na mesma placa, d) os circuitos amplificador e multivibrador astável.

Para finalizar este item, é apresentada fotografia do equipamento em operação. Pode ser vista na figura 5.9 descarga de vapor pelos canais de refrigeração da lingoteira durante o estágio de resfriamento do metal líquido. Esta etapa é caracterizada pelo fim do período de agitação e início do resfriamento rápido da liga metálica em solidificação. O vapor decorre da inserção de uma mistura de água e ar através do dispositivo.

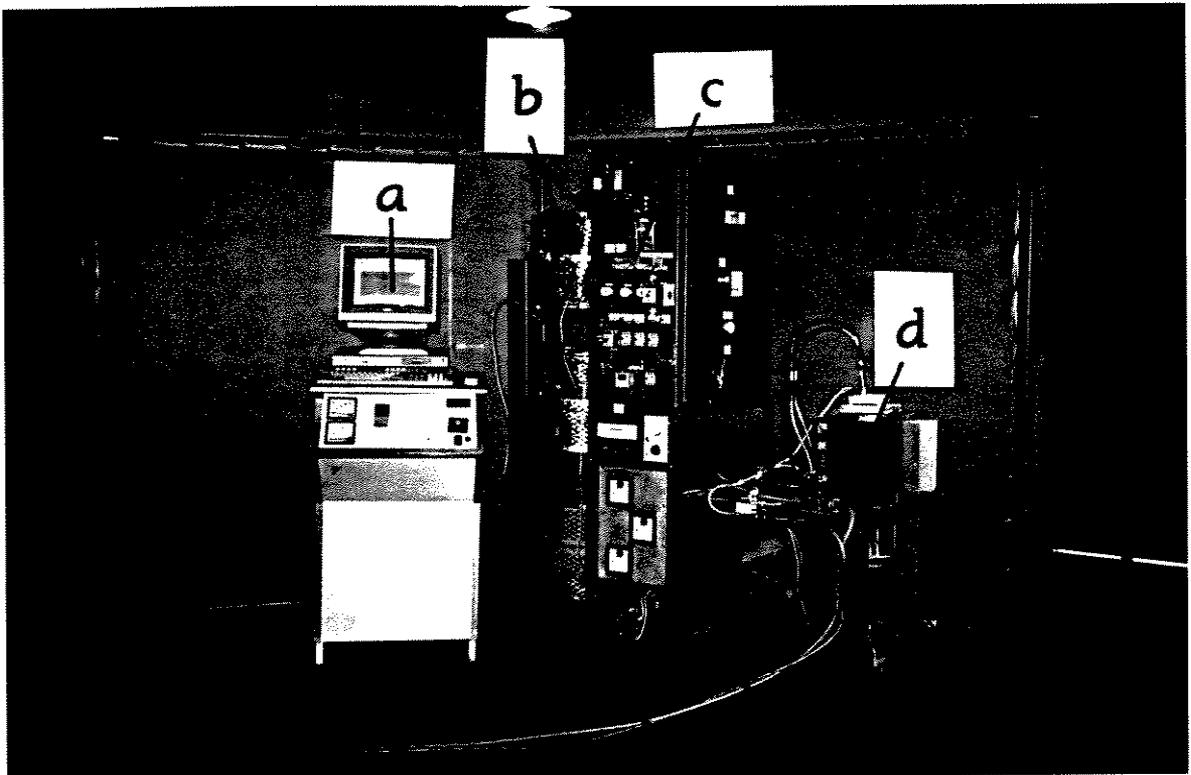


FIGURA 5.1- Vista geral do equipamento projetado e construído.

- a) sistema de aquisição de dados;
- b) variadores de tensão de alimentação do motor estator;
- c) circuitos elétricos e eletrônicos de controle;
- d) conjunto de fundição.

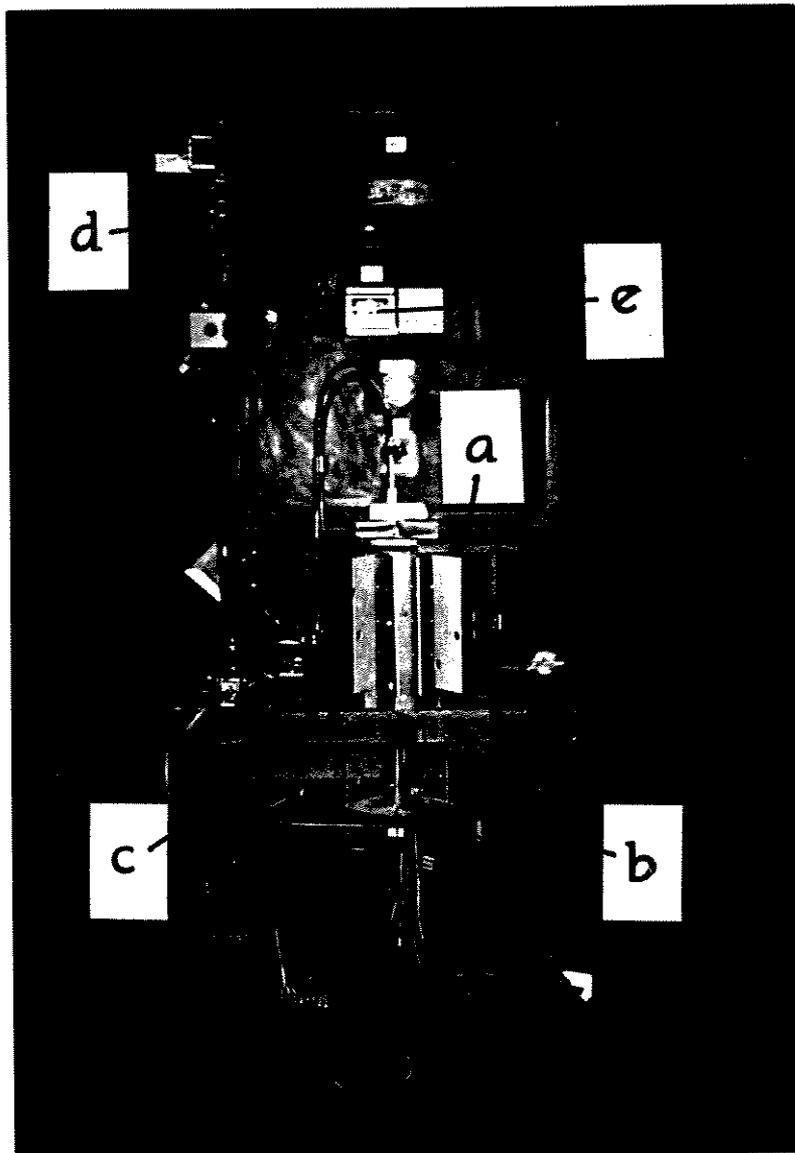


FIGURA 5.2 - Vista lateral do equipamento projetado e construído.

- a) estrutura superior contendo o motor estator e lingoteira;
- b) estrutura inferior;
- c) estrutura sustentação;
- d) registrador-controlador de temperatura , aciona a válvula de água de refrigeração;
- e) registrador-controlador de temperatura, aciona o sistema de agitação do líquido.

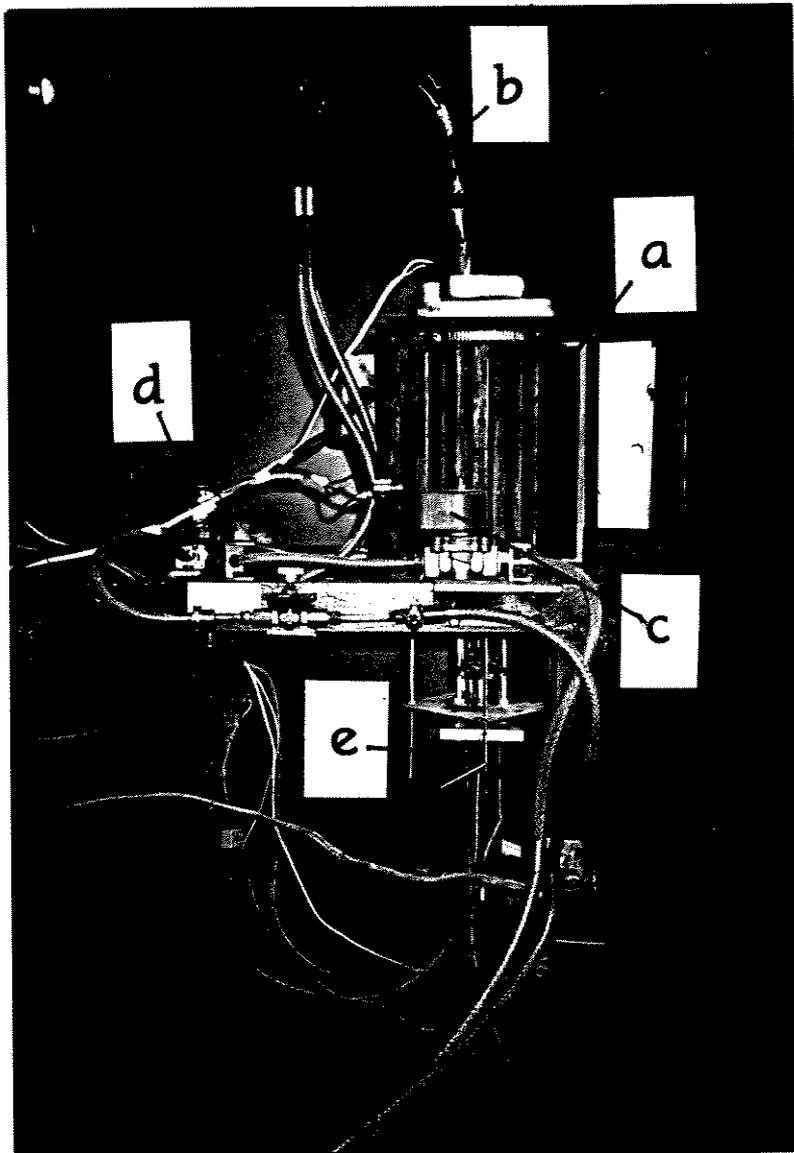


FIGURA 5.3 - Detalhe construtivo do conjunto de fundição do equipamento projetado e construído.

- a) motor estator provido de aletas;
- b) misturador de água-ar para refrigeração;
- c) válvula solenóide controladora do fluxo de água;
- d) válvula solenóide controladora do fluxo de ar;
- e) termopares de controle.

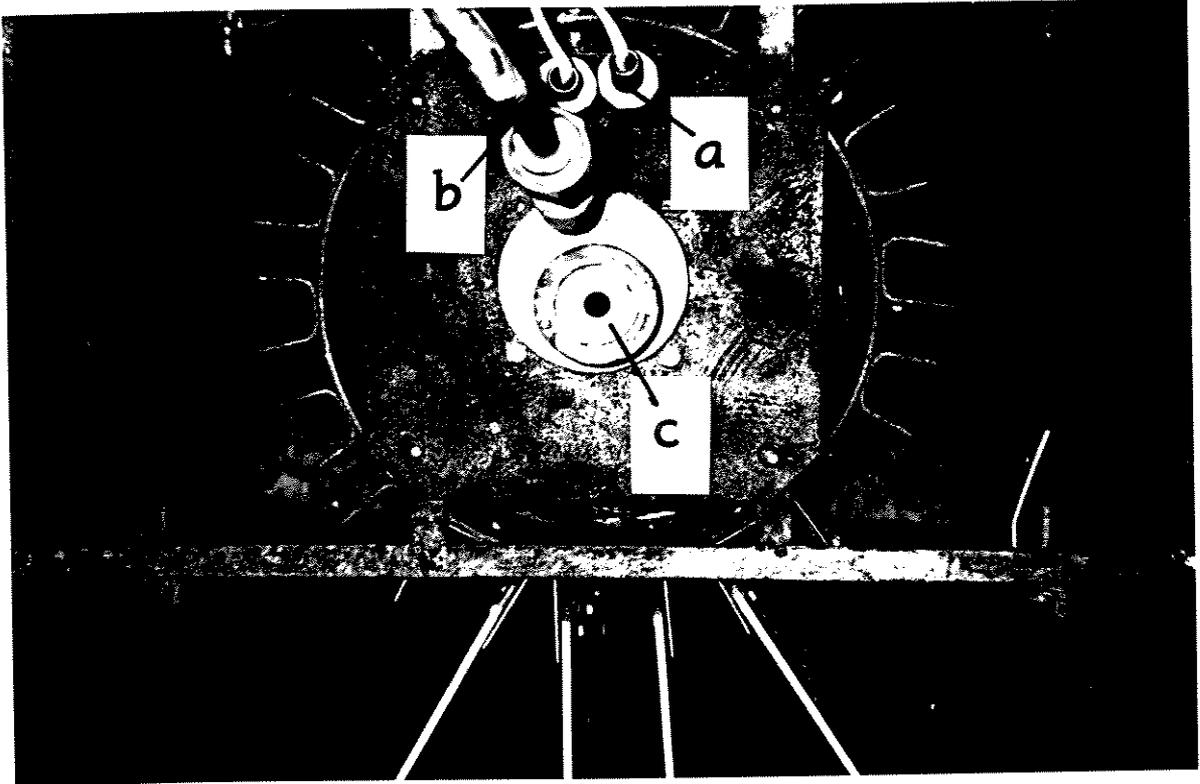


FIGURA 5.4 - Vista de topo do conjunto de fundição, com ênfase abertura para vazamento da liga metálica.

- a) pinos de tomada de energia elétrica;
- b) entrada de água-ar de refrigeração;
- c) funil de vazamento do metal líquido.

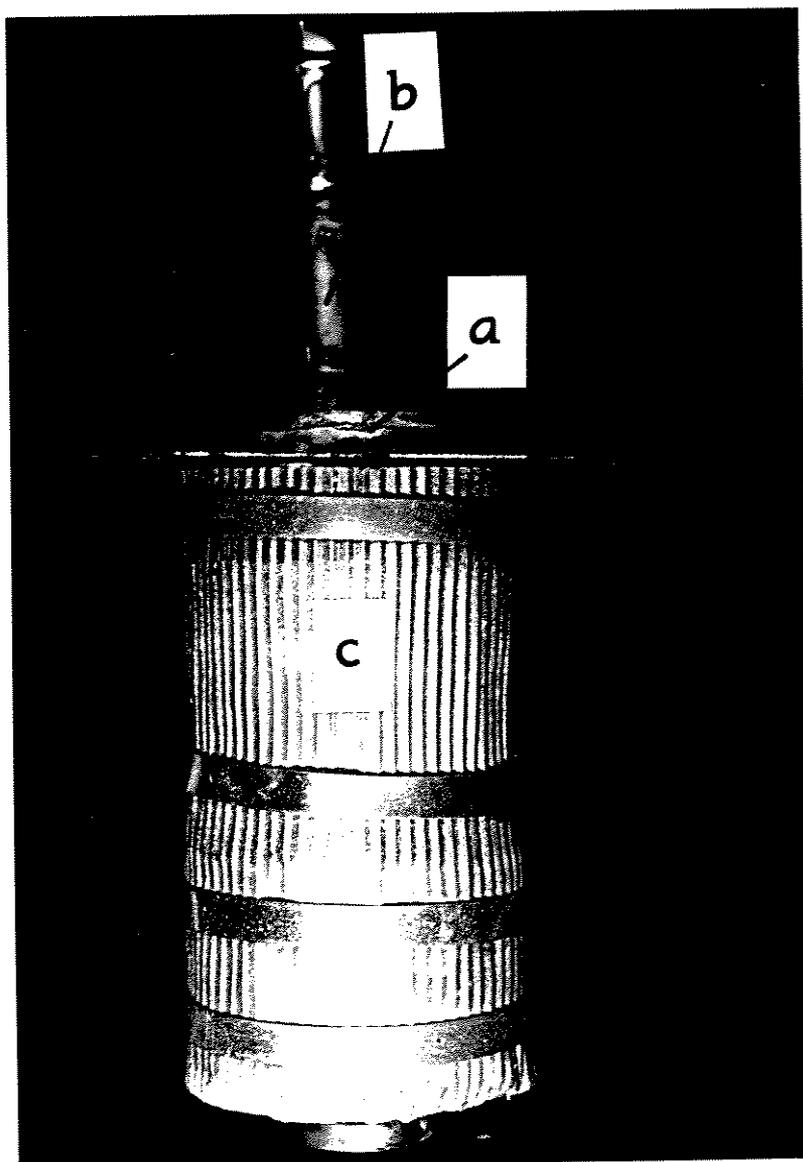


FIGURA 5.5 - Vista frontal da lingoteira projetada e confeccionada.

- a) entrada de metal líquido;
- b) entrada de água-ar de refrigeração;
- c) revestimento para isolamento térmico.

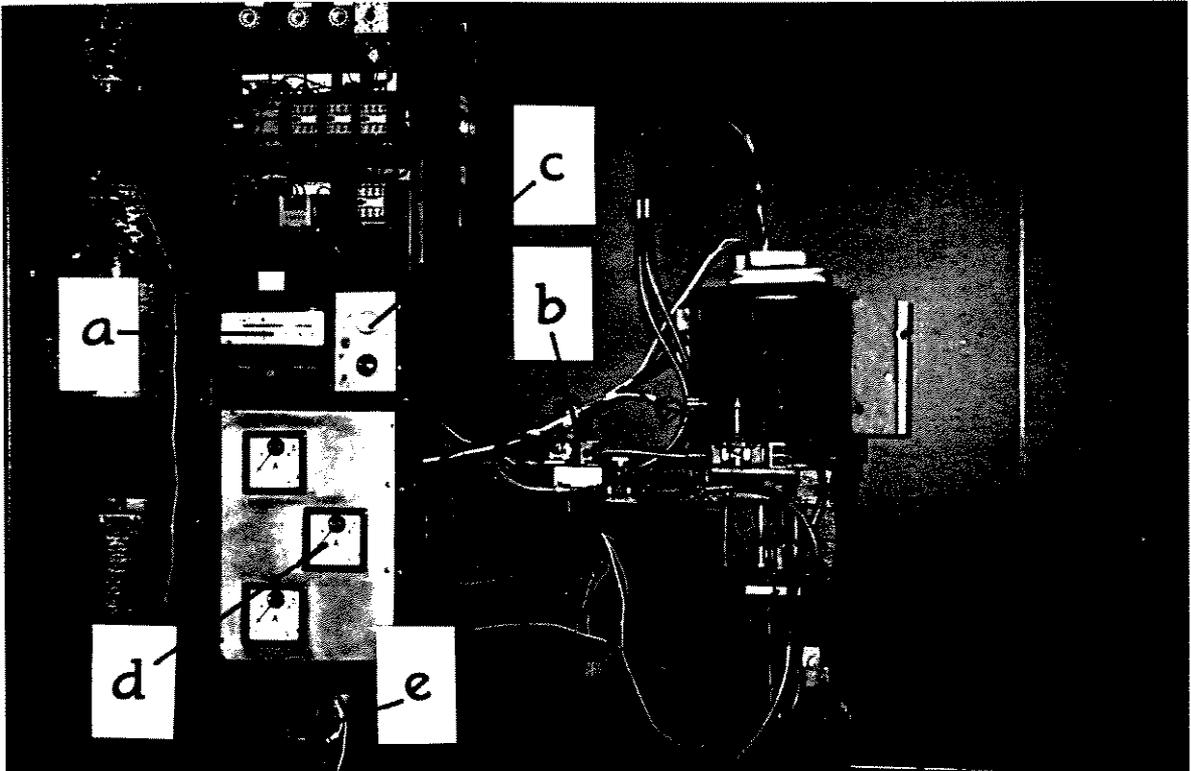


FIGURA 5.6 - Vista parcial do equipamento construído destacando parte dos dispositivos de controle e medição.

- a) registrador-controlador de temperatura, aciona a válvula de ar de refrigeração;
- b) válvula de ar;
- c) lâmpadas de sinalização dos processos de agitação e resfriamento rápido;
- d) amperímetro de registro de corrente do motor estator;
- e) variador de tensão de alimentação da resistência de aquecimento da lingoteira.

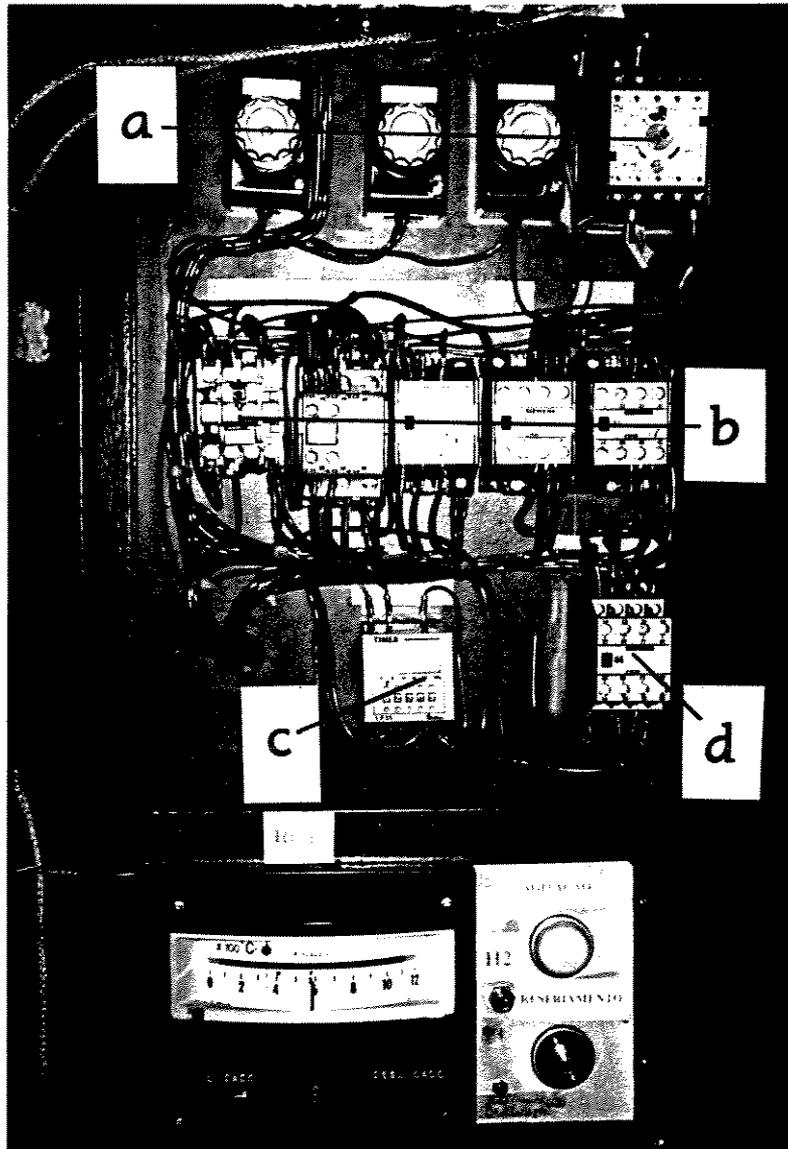


FIGURA 5.7 - Vista parcial do equipamento projetado e construído destacando parte do comando elétrico:

- a) fusíveis e temporizador;
- b) seqüência de relês de controle do processo;
- c) temporizador de agitação;
- d) contator de alimentação da resistência da lingoteira.

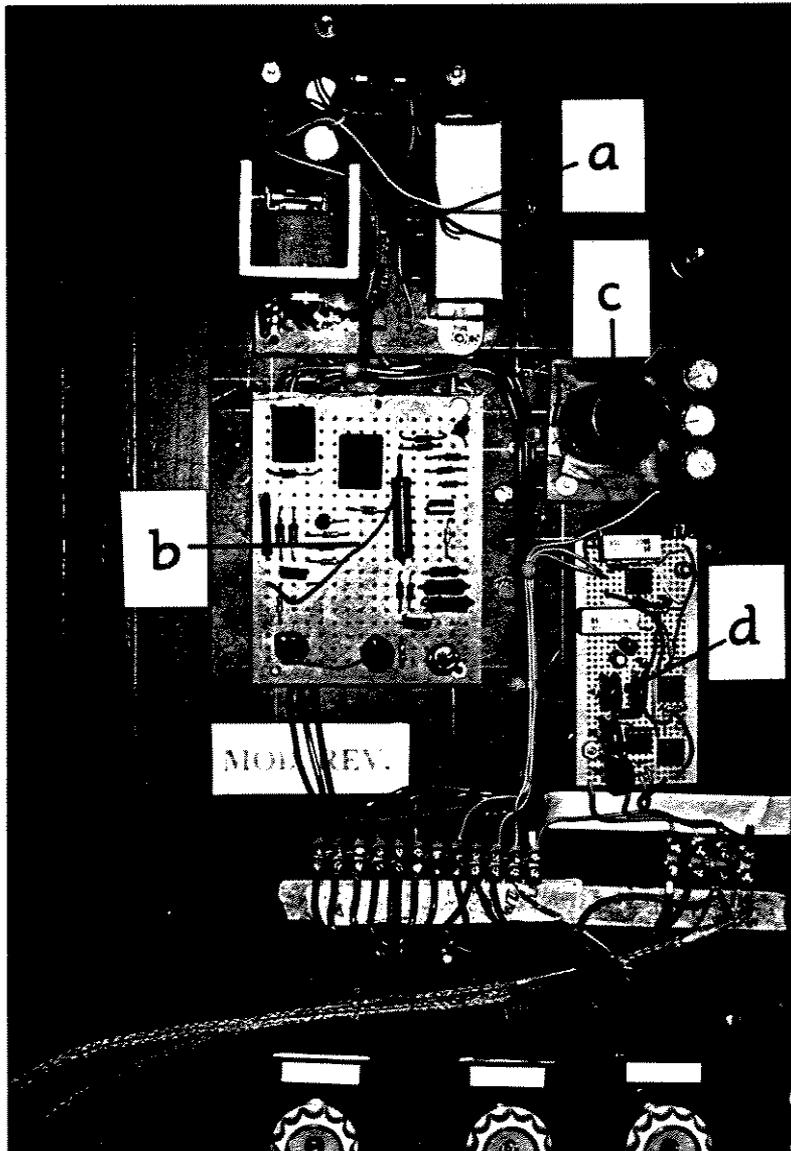


FIGURA 5.8 - Vista parcial do equipamento projetado e construído destacando os circuitos eletrônicos de controle de processo:

- a) fonte de alimentação;
- b) módulo de reversão;
- c) filtro RC;
- d) circuito amplificador e multivibrador astável.

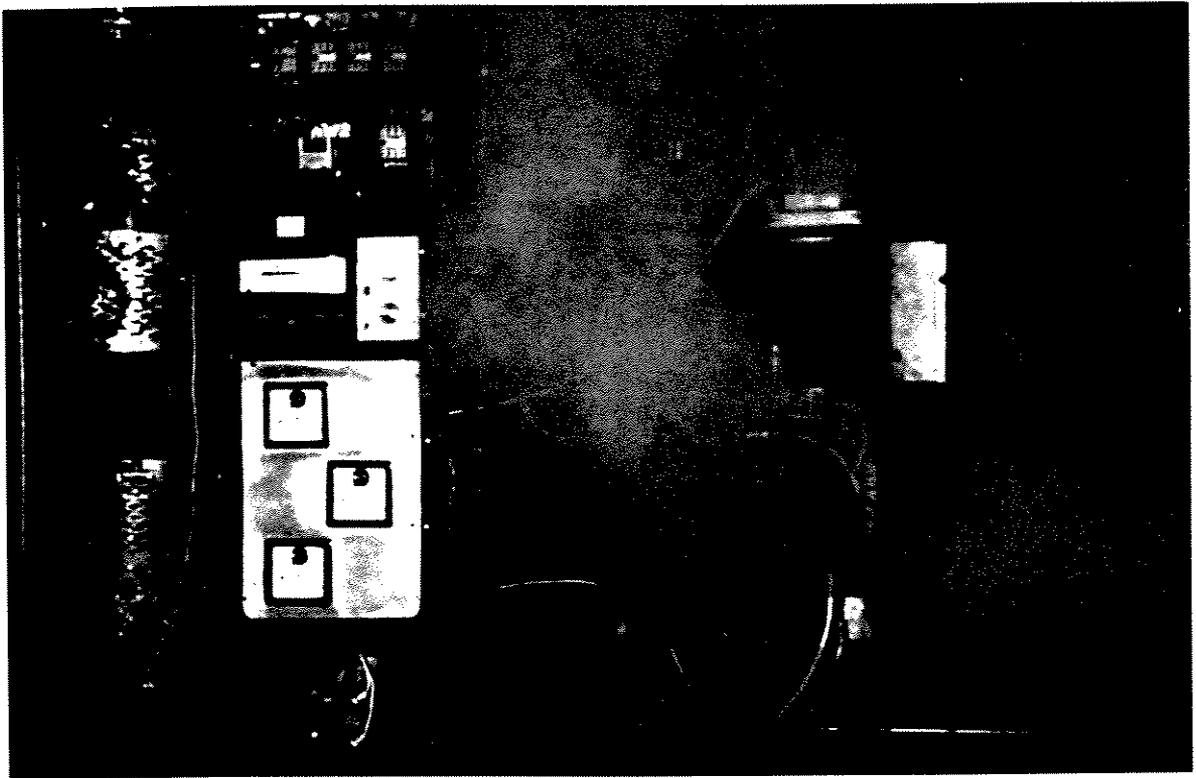


FIGURA 5.9 - Fotografia mostrando o equipamento projetado e construído durante operação: destaque a geração de vapor de água no resfriamento rápido do metal líquido no interior da lingoteira.

## 5.2. Desempenho do equipamento

A partir dos experimentos descritos no capítulo anterior, foi possível obter dados do equipamento construído para avaliação de seu desempenho. A seguir serão apresentados, separadamente, os resultados obtidos.

### 5.2.1. Constante de tempo

Para determinação do intervalo de tempo entre cada leitura do cartão conversor (na leitura da temperatura), foram feitas 4 seqüências de leituras, de 1 segundo cada, conforme indicado no item 4.2.1. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 5.1.

TABELA 5.1. Número de leitura para um período de 1 segundo e tempo fundamental de leitura (tempo entre leituras) do cartão conversor utilizado na aquisição de dados de temperaturas, no equipamento construído.

Número de leituras (1s)	Tempo Fundamental (1 / número de leituras ) (s)
16436	0,0000608
16440	0,0000608
16414	0,0000609
16390	0,0000610

Média	0,0000609
Desv. Padrão	0,00000008

O valor obtido, da ordem de 6 centésimos de milésimos, pode ser considerado bastante adequado às leituras requeridas para o controle do equipamento e do processo. No entanto, num experimento típico, é possível aumentar o tempo entre leituras, a fim de evitar excesso de dados, para tanto, em função dos recursos que o cartão conversor oferece, pode-se formular equação 5.1, que prevê o tempo gasto para realizar um certo número de leituras pré-estabelecido, produzindo-se um atraso entre leituras do equipamento, dada por:

$$t = 0,0000609 \text{ NA } ( \text{NL} - 1 ) \quad (5.1)$$

onde:

t = Tempo total de leitura (em s)

NA = Número de atraso na leitura

NL = Número de leitura

0,0000609 = Tempo fundamental entre leituras em segundo sem atraso

0,0000609 NA = Tempo fundamental entre leituras em segundo com atraso

No presente trabalho por adotado um número de atraso (NA) de 7889, o qual fornece um tempo fundamental entre leituras de 0,480 s.

### **5.2.2. Ganho do amplificador**

Para a determinação do ganho na tensão do amplificador de sinais utilizado para o sistema de leitura de temperatura, foram feitas 20 medidas preliminares. Os resultados obtidos nos testes são apresentados na tabela 5.2.

A tensão de referência encontrada manteve-se constante TR=0,286 V, havendo, no entanto, pequena diferença na casa decimal, para nível de tensão de entrada do amplificador equivalente a zero. O desvio em relação ao valor zero deve-se em parte pelo natural desequilíbrio interno dos circuitos integrados (741) e por influências de circuitos adjacentes.

TABELA 5.2. Ganho de amplificação do sinal elétrico vindo do termopar de leitura inserido na lingoteira.

Leitura Nº	Ventrada (V)	Vsaída (V)	Ganho (Vs+0.286) / Ve
1	0,0041	0,12	99,02
2	0,0077	0,48	99,48
3	0,0085	0,55	98,35
4	0,0104	0,75	99,62
5	0,0121	0,92	99,67
6	0,0127	0,98	99,69
7	0,0136	1,07	99,71
8	0,0145	1,15	99,03
9	0,0161	1,32	99,75
10	0,0255	1,42	99,77
11	0,0171	1,47	99,77
12	0,0176	1,56	99,25
13	0,0186	1,62	99,79
14	0,0191	1,70	99,30
15	0,020	1,78	99,81
16	0,0207	1,89	99,82
17	0,0218	1,98	99,82
18	0,0227	2,06	99,83
19	0,0235	2,26	99,84
20	0,0258	2,28	99,46

Média	99,54
Desvio padrão	0,4

Pode-se observar que, apesar da exatidão oferecida em projeto (ganho de 100) os resultados apresentaram uma ligeira flutuação em torno do valor ganho  $G=99,54$ . Este valor

pode ser considerado excelente e adequado ao correto desempenho do sistema de leitura de temperatura e, conseqüentemente, do controle operacional do equipamento construído.

### **5.2.3. Obtenção da curva de resfriamento do banho**

Como explicado anteriormente, foram feitos 5 testes para levantamento da curva de resfriamento do banho durante processamento da pasta reofundida.

Uma curva de resfriamento típica é apresentada na figura 5.10, onde podem ser observadas 4 etapas distintas. A etapa A-B indica o aquecimento da lingoteira após o recebimento do metal (deve ser lembrado que a leitura foi feita na parede da lingoteira); no ponto B foi iniciada a agitação do líquido, a qual é mantida pelo intervalo de tempo pré-estabelecido, isto é, o intervalo B-C na curva obtida; no ponto C é cessada a agitação e o metal é submetido a resfriamento rápido por ação da água de refrigeração; à partir do tempo indicado pelo ponto D a água é desligada, passando o material a resfriar apenas com auxílio de passagem de ar comprimido pela paredes da lingoteira.

Para ajustar a reta 1, que por sua inclinação estima a taxa de resfriamento do banho metálico, faz-se necessário em primeiro lugar, determinar os conjuntos de pares ordenados referentes aos intervalos de agitação e resfriamento rápido. Os pares ordenados dos pontos C e D, extremos dos intervalos, são previamente determinados através de manipulação de dados em planilha (Excel). A partir do ponto C, deduz-se os tempos de agitação (230 ou 300 s), encontrando, assim, o ponto inicial de agitação B. Utilizando o método de ajuste de curva dos mínimos quadrados (MILLER, I. e FREUND, J.E., 1977) são obtidas preliminarmente as retas 1 e 2. A intersecção de ambas fornece o par ordenado (T<sub>xt</sub>) do ponto C definitivo, a partir do qual, novamente deduzindo os tempos de agitação, é encontrado o ponto de início de agitação B. Com a determinação definitiva do conjunto de pares ordenados (T x t) referente ao intervalo de agitação, com o método utilizado acima de ajuste de curva, obtém-se uma nova reta 1, a qual representa a curva de resfriamento do banho metálico e sua inclinação a taxa de resfriamento.

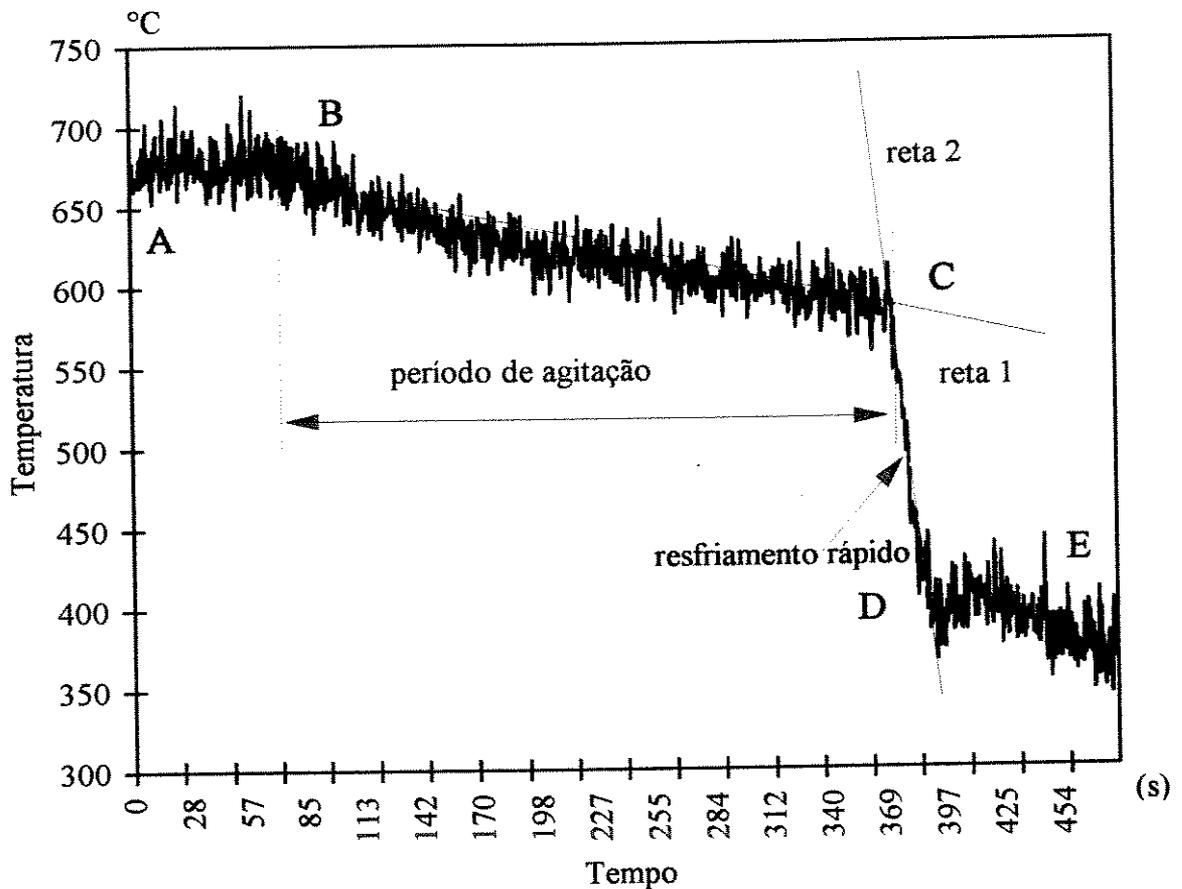


FIGURA 5.10 - Curva típica de resfriamento obtida nos vazamentos realizados, identificando pontos e períodos de interesse.

A partir da linearização do intervalo B-C da curva de resfriamento, foram calculados os coeficientes da reta 1 para os cinco ensaios-padrão variando as condições experimentais como indicado no capítulo 4, isto é, dois tempos de agitação e dois métodos de agitação. Os resultados são apresentados na tabela 5.3. A relação entre temperatura e tempo, durante o resfriamento sob agitação do metal no equipamento construído, isto é, durante a fundição pode, portanto, ser dada pela equação (5.2) da reta 1 pela média dos valores constantes na tabela 5.3, ou seja:

$$T(t) = 698 - 20,37 (t + 1,2) \quad (5.2)$$

onde:

T = Temperatura °C

t = Tempo de agitação em minutos.

TABELA 5.3 - Coeficiente das retas T x t do metal durante reofundição e taxas de resfriamento, para as diversas condições de processamento.

Parâmetros dos ensaios	Coeficientes de ajuste reta 1		Taxa de resfriamento calculado °C/min.
	a	b	
Agitação Normal t= 230 s	704 °C	- 0,3099 °C/s	18,59
Agitação Normal t= 300 s	683 °C	- 0,2780 °C/s	16,68
Agitação Reversão t= 230 s	708 °C	- 0,4106 °C/s	24,63
Agitação Reversão t= 230 s	709 °C	- 0,3932 °C/s	23,59
Agitação Reversão t= 300 s	689 °C	- 0,3060 °C/s	18,36

Pode-se observar que a taxa de resfriamento tende a depender do tipo de agitação e do tempo em que é mantida. O movimento com reversão proporciona maior taxa de resfriamento, indicando melhores condições de trocas térmicas, talvez promovidas por maior turbulência no líquido.

Para ambos os tipos de agitação, a taxa de resfriamento é aumentada com o aumento do tempo de agitação, talvez devido ao aumento da fração sólida e, portanto, das trocas térmicas.

### **5.3. Lingotes produzidos**

Para a avaliação da eficiência do equipamento projetado e construído foram feitos experimentos de fundição variando-se condições operacionais conforme descrito em capítulo anterior, isto é, dois diferentes tempos e dois distintos modos de agitação.

Lingotes típicos obtidos para cada condição são apresentados nas figuras 5.11 e 5.12. Pode-se observar um bom acabamento, característico de processos de fundição em coquilha, para todos os lingotes obtidos. Os rechupes produzidos são bastante reduzidos e não se nota porosidade acentuada ou macrossegregação em nenhum dos casos.

As macroestruturas obtidas são, em todos os casos, bastante homogêneas em todo o volume do produto e constituídas de grãos equiaxiais, de maneira dissimilar à estruturas fundidas convencionalmente em coquilhas, que em geral apresentam grãos colunares, se não submetidas a processos de refino de grão. Os resultados mostram que o equipamento construído fornece condições de produção de lingotes de qualidade compatível à qualidade obtida em produtos fundidos convencionalmente, e que tal qualidade não é influenciada pelo tempo de agitação e tipo de movimento provocado no líquido, dentro das variações analisadas neste trabalho.

#### **5.3.1. Caracterização macroestrutural**

Pode-se observar nas figuras 5.11 e 5.12 variações com relação ao tamanho de grão da estrutura, dependentes das condições de agitação utilizadas, o que pode ser observado com mais clareza nas macroestruturas apresentadas nas figuras 5.13 e 5.14. A medida do tamanho médio de grãos em todas as amostras forneceu os resultados apresentados na tabela 5.4.

Em todos os casos valores de cerca de 0,6 a 1mm foram obtidos, o que caracteriza uma estrutura eficientemente refinada. Observa-se que o tamanho médio dos grãos obtidos nas condições de agitação NORMAL, isto é, sem reversão do campo magnético aplicado, é maior

do que os obtidos para movimentos provocados por campo magnético REVERSO, para os dois distintos valores de tempos de agitação.

Estes resultados podem ser explicados à luz dos mecanismos de multiplicação cristalina apresentados no Capítulo 2: a agitação provocada no líquido promove o desprendimento de ramos dendríticos em formação, quer por efeito de fenômenos de empescoamento e desprendimento de raízes (OHNO, H. 1976; KIRKWOOD, D.H. 1975), quer por efeito mecânico de ruptura (JACKSON, K.A., *et. al.* 1967), ou ainda por efeitos de recristalização incentivada por deformações provocadas pela agitação (VOGEL, A. 1978).

A agitação com reversão aparentemente produz maior turbulência no líquido em solidificação, além de promover uma maior taxa de resfriamento, como observado. Estes fatores somados levam ao maior refino produzido nas estruturas solidificadas nas condições de agitação com reversão.

Tabela 5.4. - Diâmetro médio de grãos das estruturas produzidas no equipamento construído, obtidas em diferentes condições de processamento.

Modo de agitação	Tempo de agitação (s)	Diâmetro médio de grãos (mm)
NORMAL	230	0,99
	300	0,68
REVERSO	230	0,59
	300	0,57

A influência do tempo de agitação também pode ser observada: em ambos os tipos de movimento, NORMAL ou REVERSO, o aumento do tempo, dentro dos limites analisados,

leva à redução do tamanho médio dos grãos produzidos, por permitir maior tempo de atuação dos mecanismos de multiplicação cristalina e conseqüente maior refino da estrutura e por submeter o material à uma maior taxa de resfriamento, como calculado anteriormente. O efeito do tempo é, no entanto, mais acentuado para o modo NORMAL de movimento, modo este que aparentemente produz menor turbulência no líquido.

Estes resultados atestam a eficiência do equipamento na promoção de eficiente agitação no líquido de modo a produzir sensível modificação estrutural, até o momento observada em termos de macroestrutura.

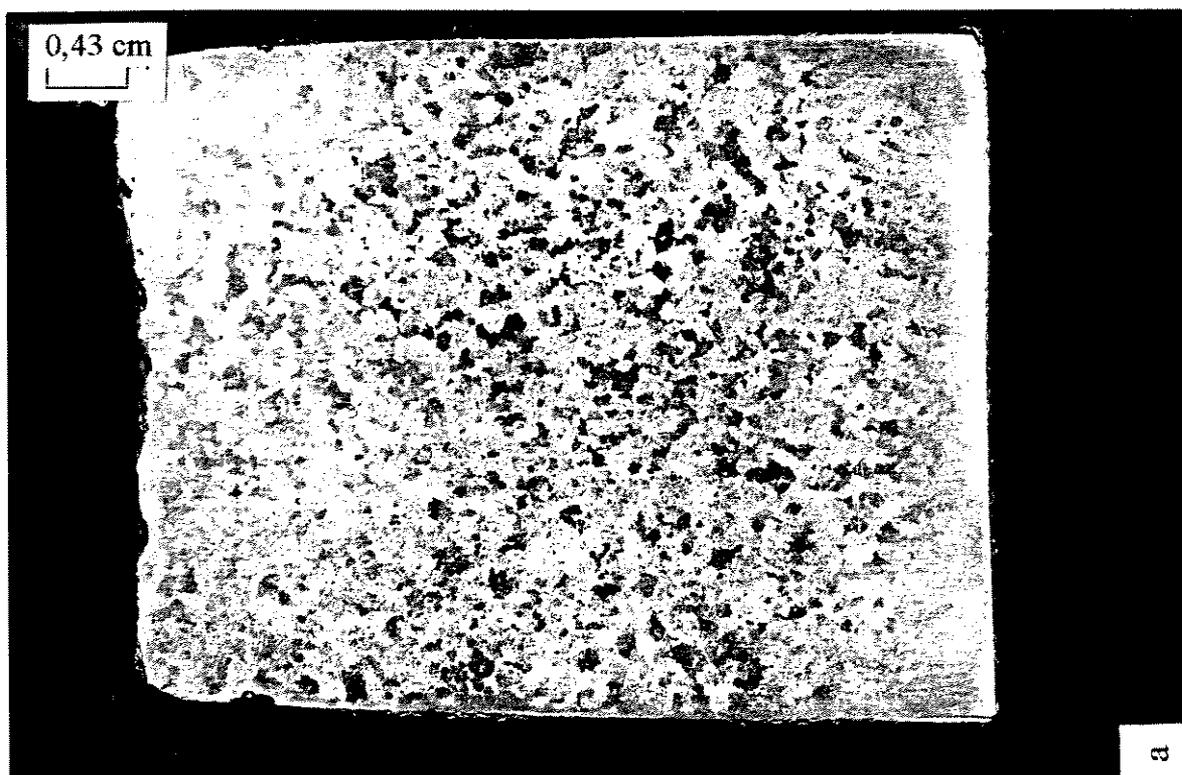
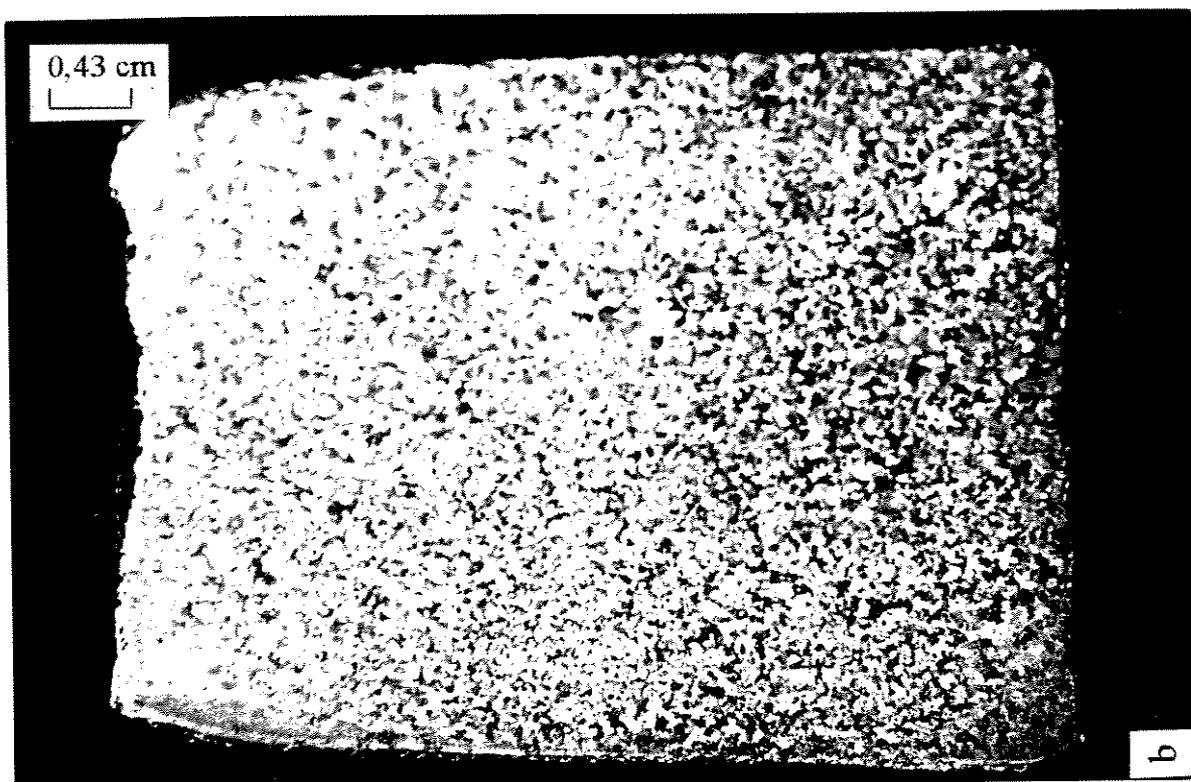


FIGURA 5.11 - Lingotes produzidos no equipamento construído, utilizando agitação NORMAL durante: a) 230 s; b) 300 s.

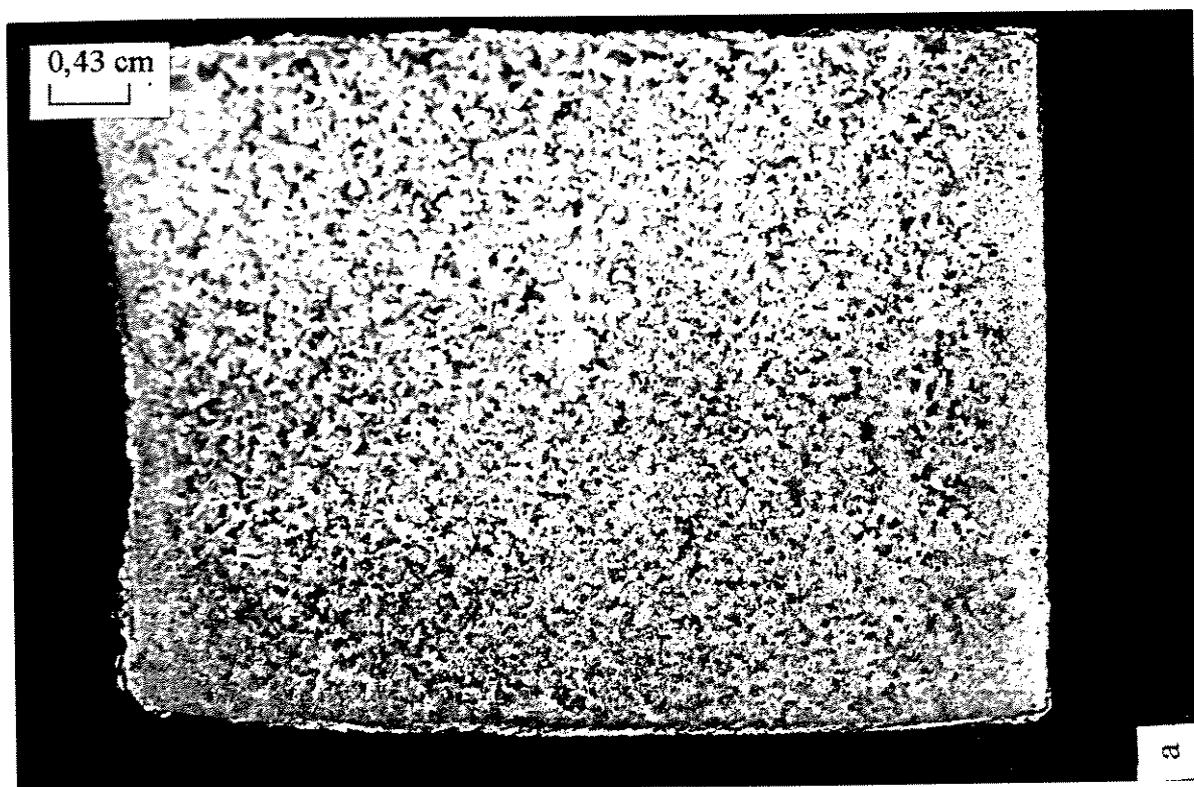
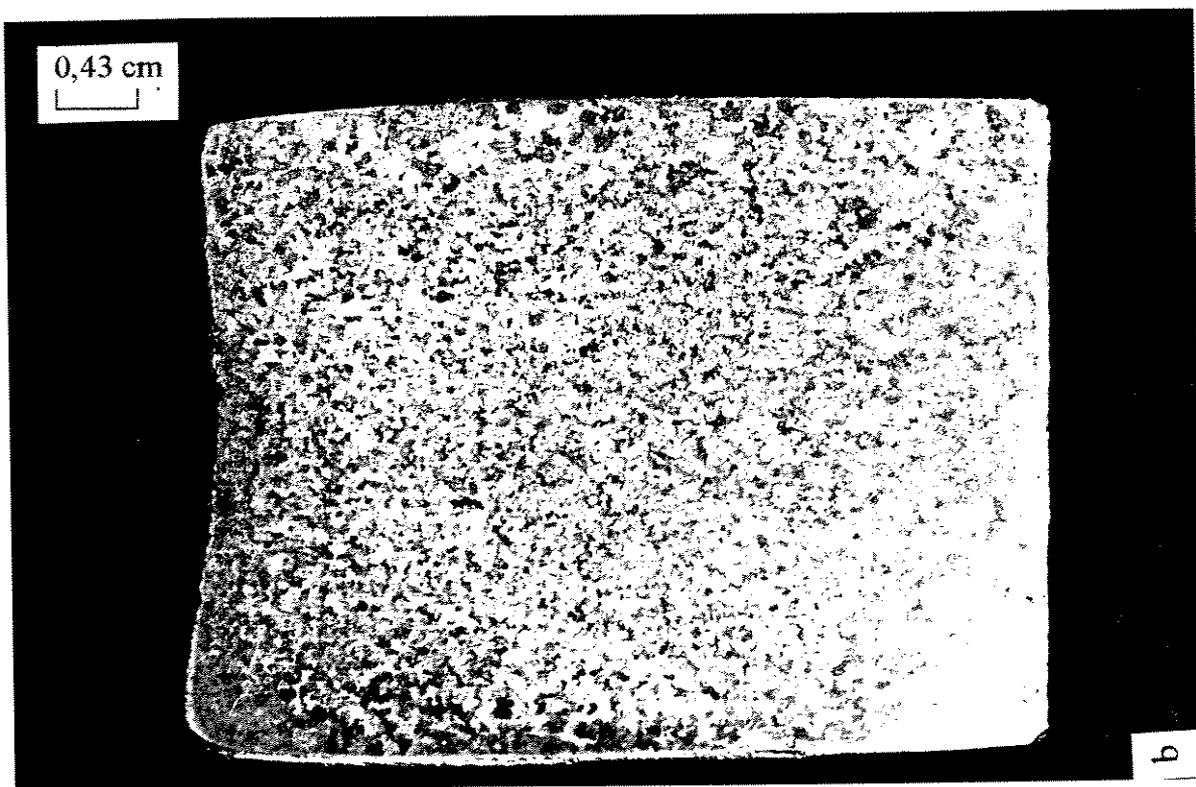


FIGURA 5.12 - Lingotes produzidos no equipamento construído, utilizando agitação REVERSA durante: a) 230 s; b) 300 s.

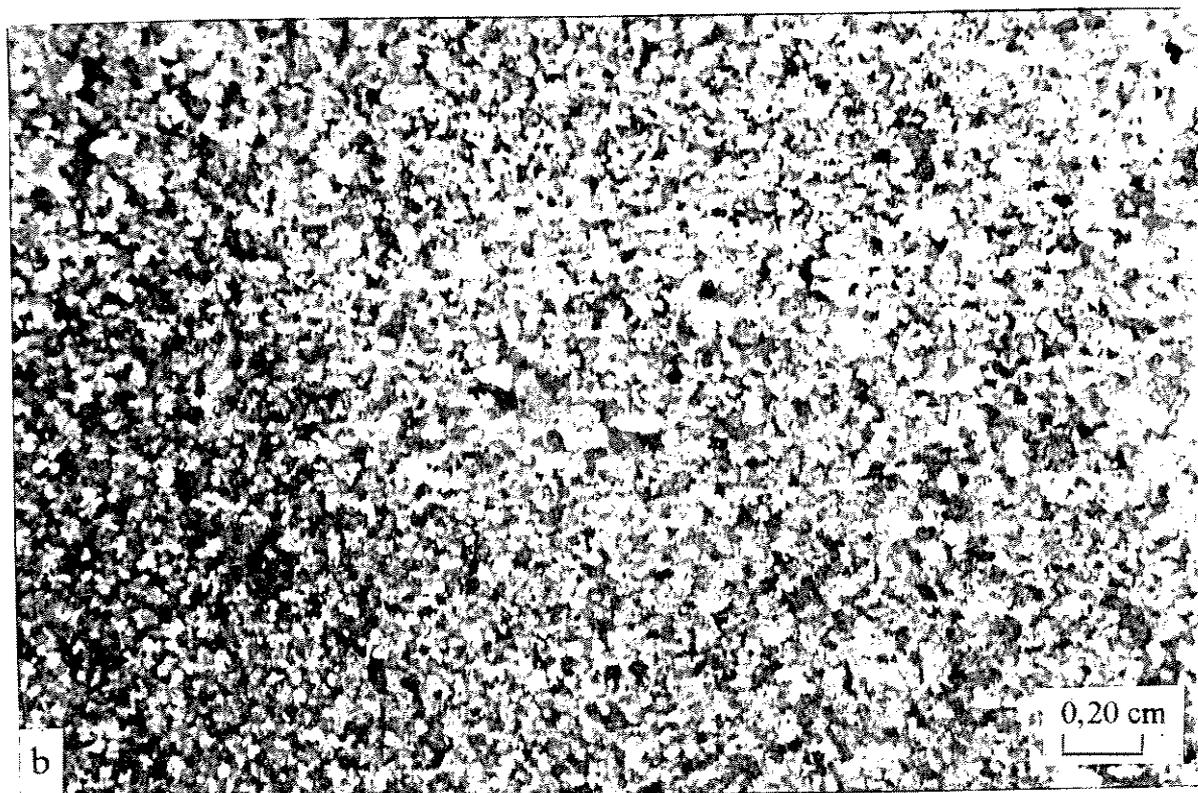
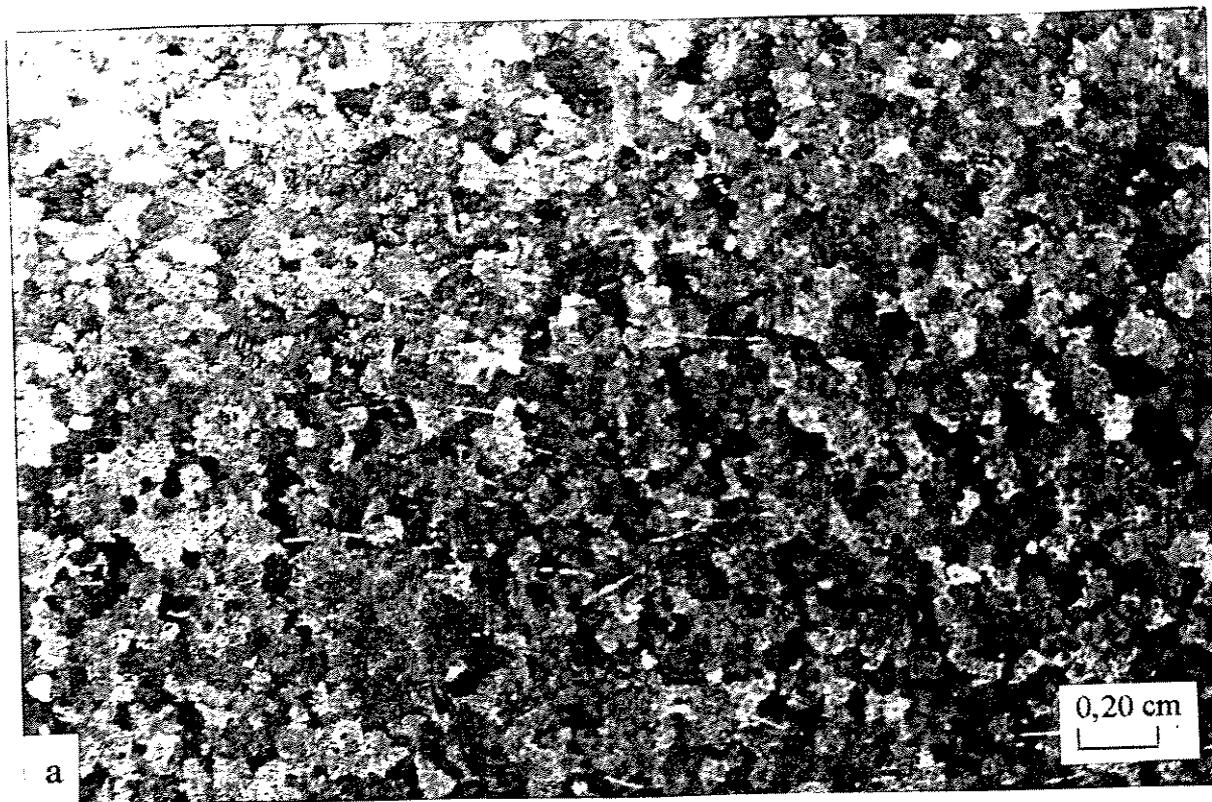


FIGURA 5.13 - Macroestruturas dos lingotes produzidos no equipamento construído, utilizando agitação NORMAL durante: a) 230 s; b) 300 s.

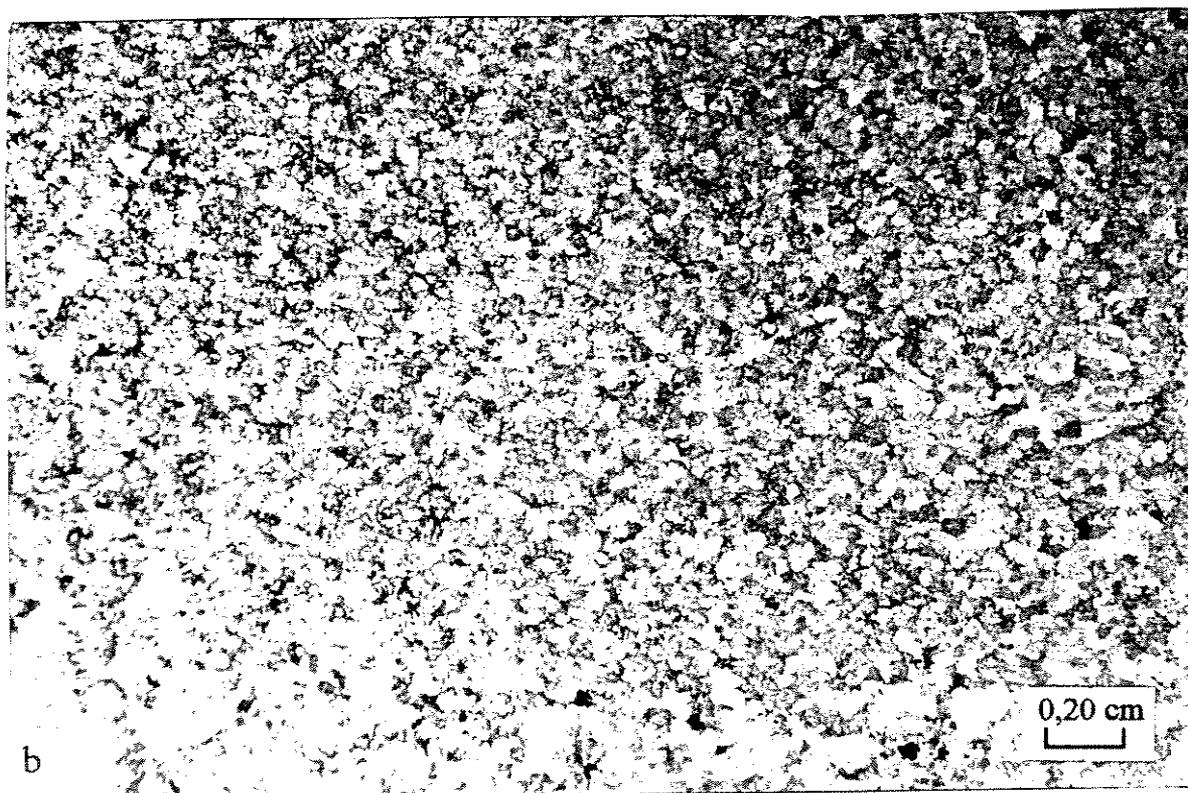
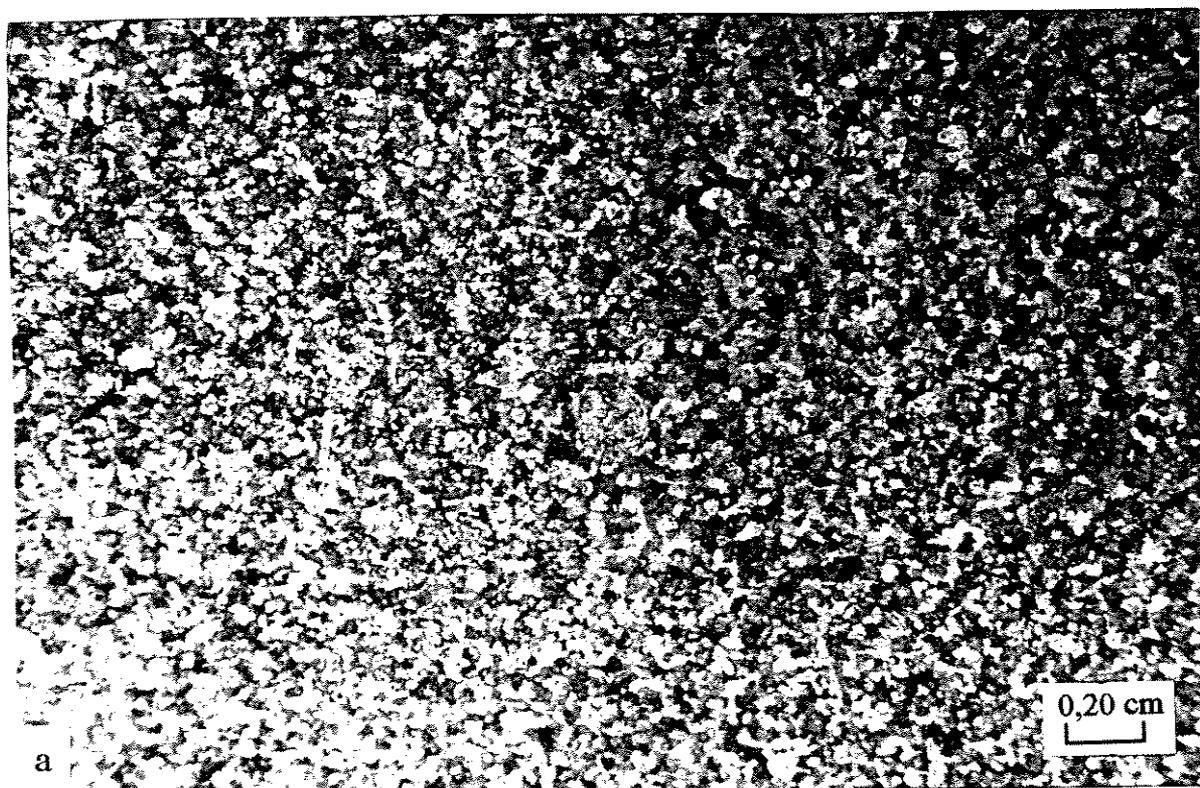


FIGURA 5.14 - Macroestruturas dos lingotes produzidos no equipamento construído, utilizando agitação REVERSA durante: a) 230 s; b) 300 s.

### 5.3.2. Caracterização microestrutural

As microestruturas dos lingotes produzidos nas diferentes condições experimentais são apresentadas nas figuras 5.15 a 5.18. Cada figura apresenta três diferentes regiões (base, centro e topo) dos lingotes obtidos; ou ainda obtidas por KAHARMANN, W., *et. al.* (1966) e BLAIS, S., *et. al.* (1996) conforme pode ser visto na figuras 2.12 e 2.13.

Pode-se observar microestruturas bastante semelhantes, em termos de morfologia da fase primária, em todos os casos. As microestruturas se apresentam na forma de fragmentos de dendritas e raras dendritas equiaxiais. Este tipo de estrutura é também obtido por HIRT, G., e *et. al.* (1996), ao utilizar agitação eletromagnética para obtenção de matéria prima para a tixoconformação de ligas Al-Si, bem como é também típica de lingotes da série Althix, produzida pela Aluminium Pechiney (Catálogo, 1996) especialmente para o processamento semi-sólido.

A matéria prima neste estado, ao ser reaquecida à temperatura necessária para o processamento semi-sólido, rapidamente sofre globularização da fase primária, adquirindo o estado pastoso reofundido requerido para a tixoconformação. No aquecimento, a fase eutética que se encontra em contornos dendríticos e de grãos se funde; o sólido envolvido por líquido rapidamente globulariza por fenômenos naturais explicados no Capítulo 2, cuja força motriz é a necessidade de reduzir tensões internas, no caso, a tensão superficial sólido/líquido.

Neste tipo de estrutura fragmentada, a globularização acontece rapidamente, da ordem de 5 a 10 min, uma vez que a morfologia da fase primária já se apresenta aproximadamente esférica.

Não se observa, nas micrografias analisadas, sensível variação da microestrutura com relação à posição na amostra analisada; o lingote se apresenta bastante homogêneo em todo o seu volume, quanto à morfologia e dimensões da fase primária e também quanto à relação entre fração relativa fase primária/eutético.

As micrografias mostram ainda a presença de porosidade em níveis compatíveis, nos casos de menor tempo de agitação, com o nível de porosidade observada na matéria prima, e parecendo estar mais evidente no topo e na base dos lingotes, embora também esteja presente na região central.

A variação dos parâmetros de processo, nos limites analisados no trabalho, não produz significativas alterações nas microestruturas produzidas. No entanto, as fotos mostram que aumento do tempo de agitação tende a produzir aumento na porosidade, para ambos os tipos de movimento. Somente a variação do tipo de movimento de NORMAL para REVERSO não parece alterar o nível de porosidade presente.

As figuras 5.19 e 5.20 apresentam com maior detalhe as microestruturas da região central dos lingotes produzidos nas diferentes condições experimentais utilizadas. Pode-se observar a presença da fase secundária como finos eutéticos  $\text{Al-CuAl}_2$ , localizada nos contornos da fase primária  $\alpha$ . Observa-se também o reduzido nível de microsegregação de cobre na estrutura, devido ao resfriamento rápido a partir do estado pastoso.

Sobre as microestruturas foram feitos ensaios quantitativos para análise da fração sólida na pasta, das dimensões e morfologia da fase primária. Os resultados são apresentados a seguir.

Com relação à fração sólida, foram calculadas de três maneiras distintas para comparação: utilizando diretamente a regra da alavanca, a equação de Scheil e através de analisador de imagens. As temperaturas utilizadas para cálculo correspondem às de final de agitação, determinadas na curva de resfriamento pré-obtida (assim, para tempo de agitação de 230 s, a temperatura de descarregamento da pasta é de 596 °C, enquanto para o processo envolvendo agitação de 300 s, a temperatura de final de agitação é de 573 °C). Para tomada de medidas no analisador de imagens a fase secundária no lingote solidificado foi considerada a fase líquida na pasta.

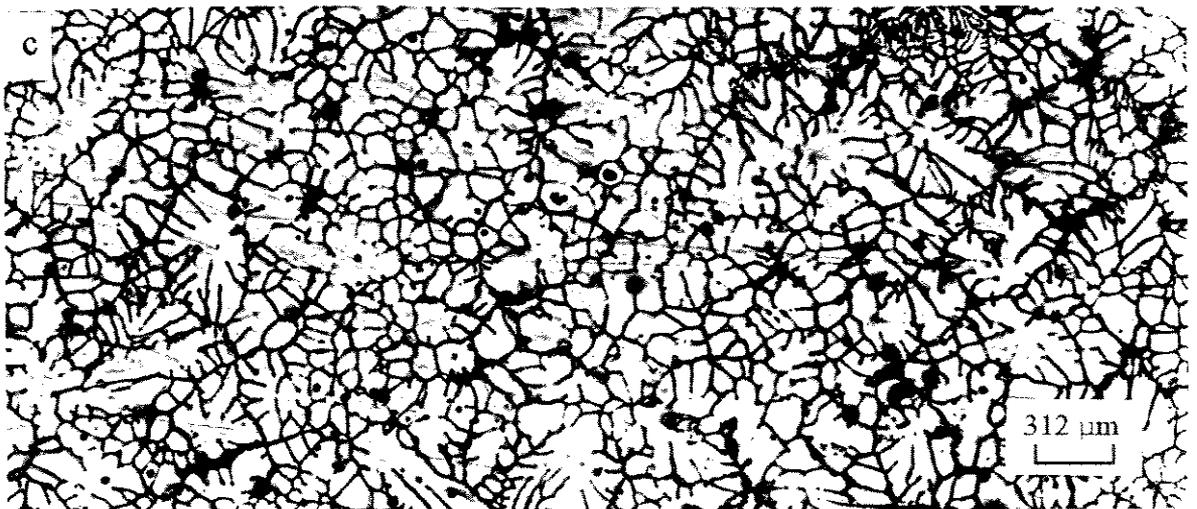
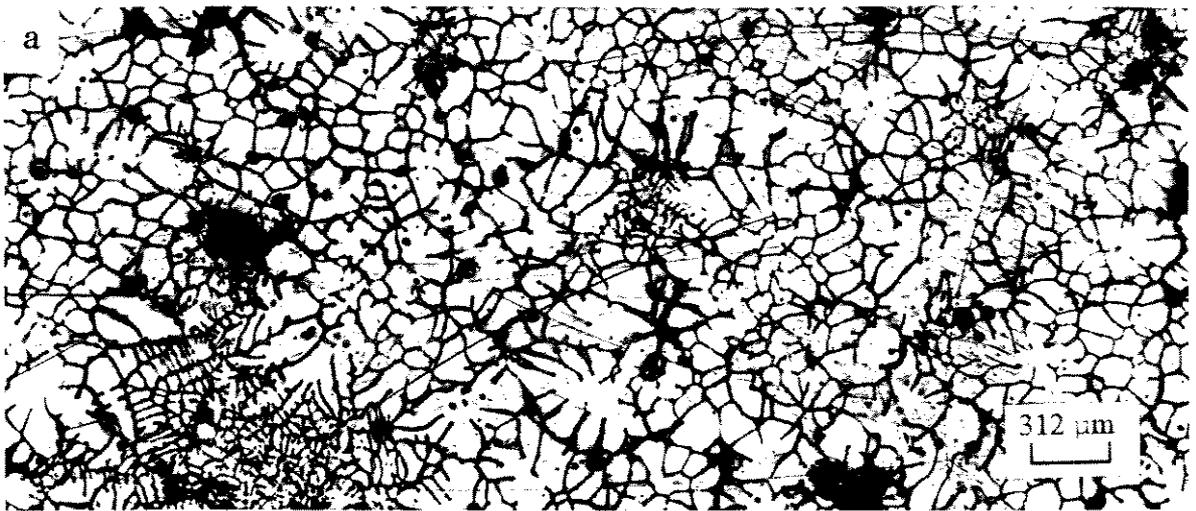


FIGURA 5.15 - Microestruturas de diferentes regiões do lingote produzido nas condições de agitação NORMAL por 230 s. a) topo; b) centro; c) base.

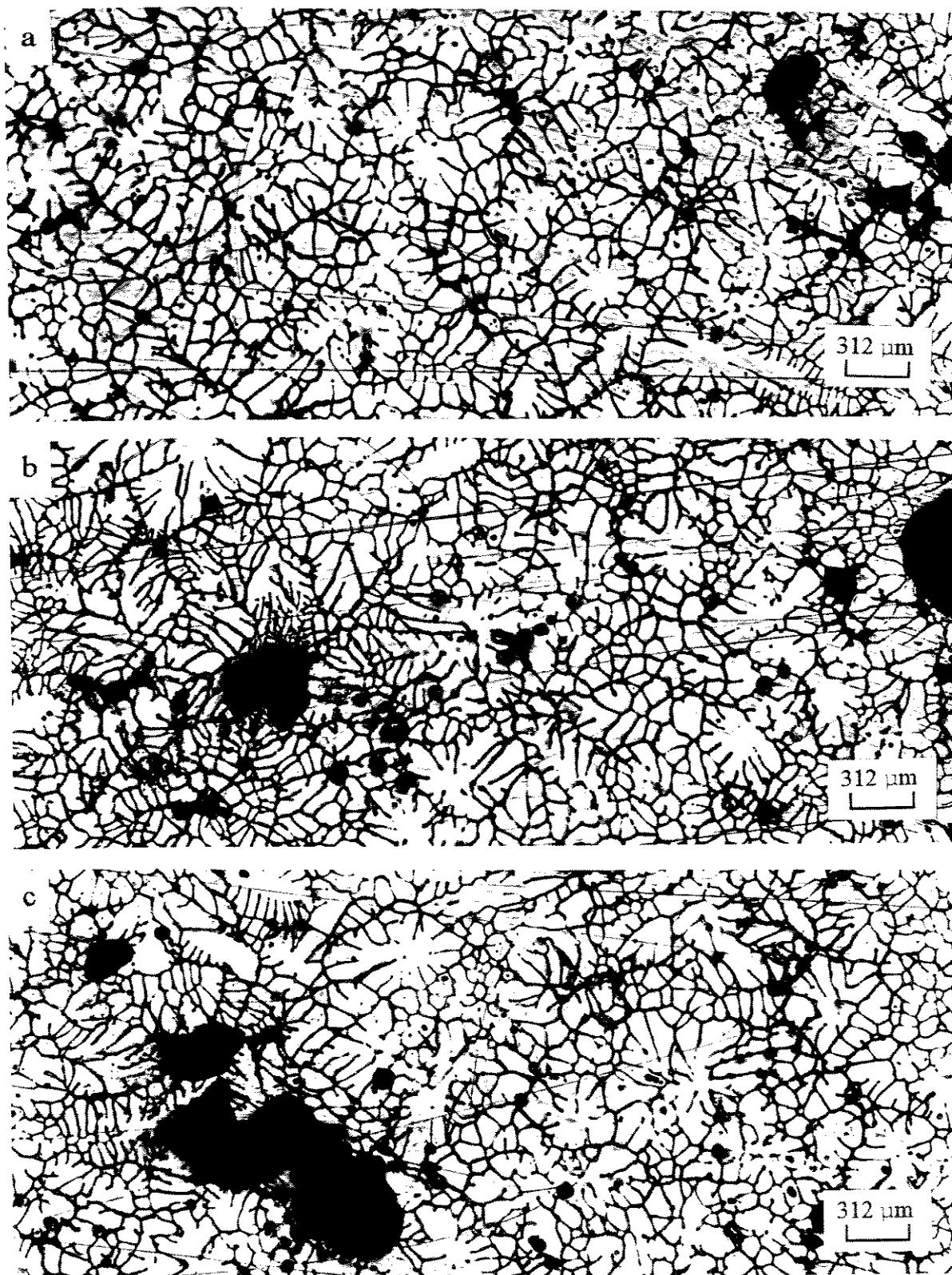


FIGURA 5.16 - Microestruturas de diferentes regiões do lingote produzido nas condições de agitação NORMAL por 300 s. a) topo; b) centro; c) base.

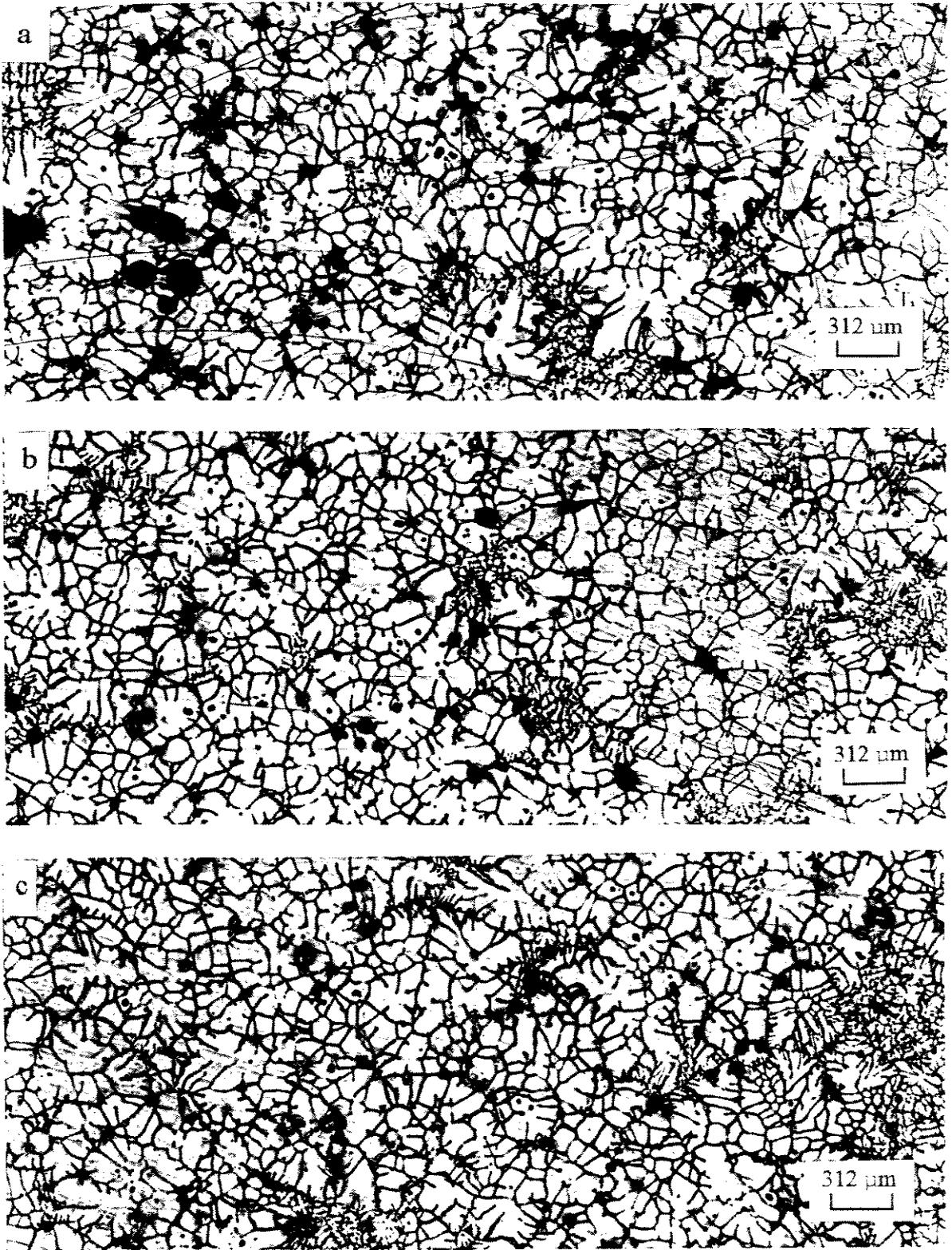


FIGURA 5.17 - Microestruturas de diferentes regiões do lingote produzido nas condições de agitação REVERSA por 230 s. a) topo; b) centro; c) base.

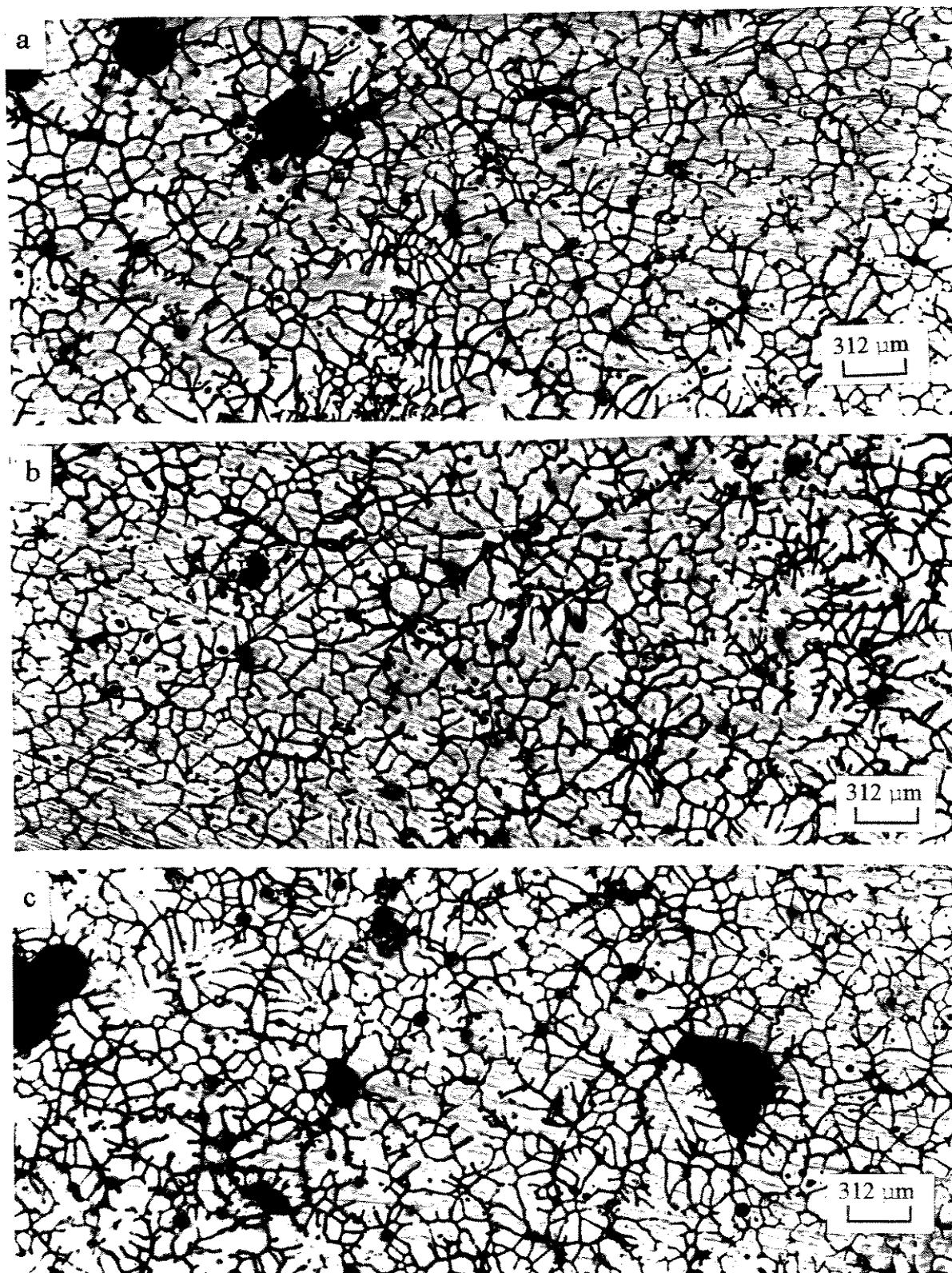


FIGURA 5.18 - Microestruturas de diferentes regiões do lingote produzido nas condições de agitação REVERSA por 300 s. a) topo; b) centro; c) base.

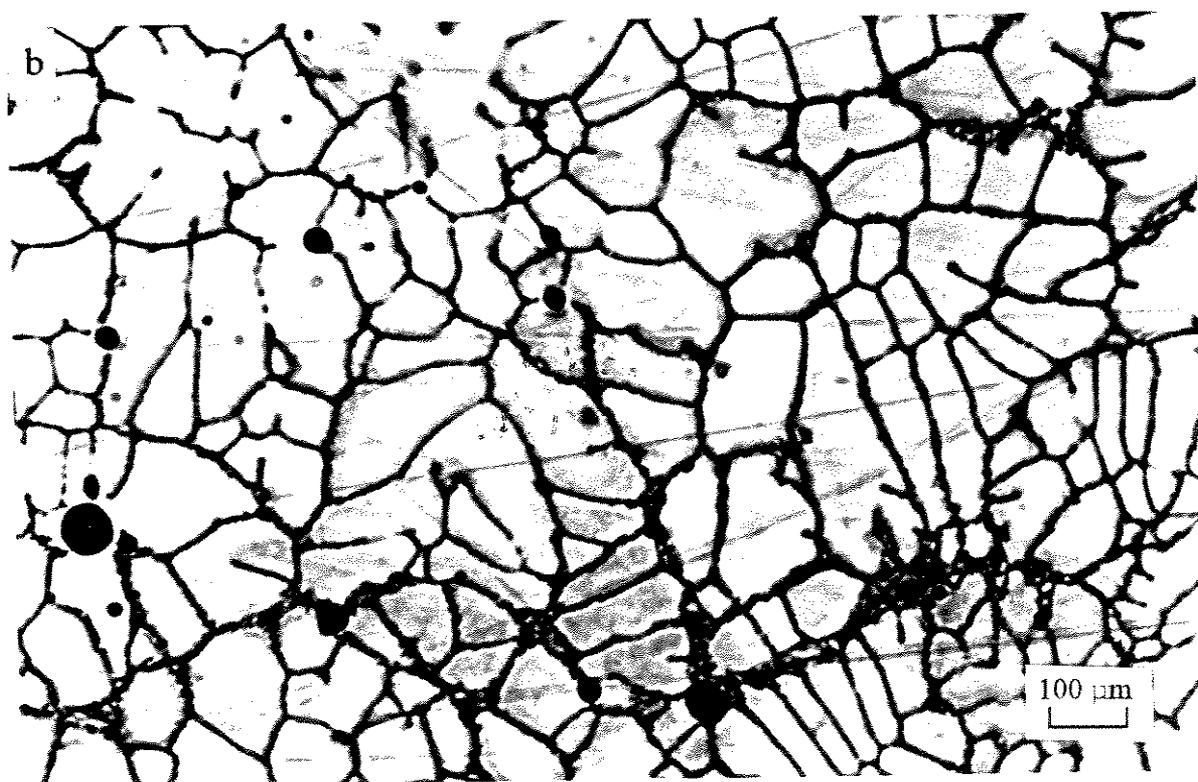
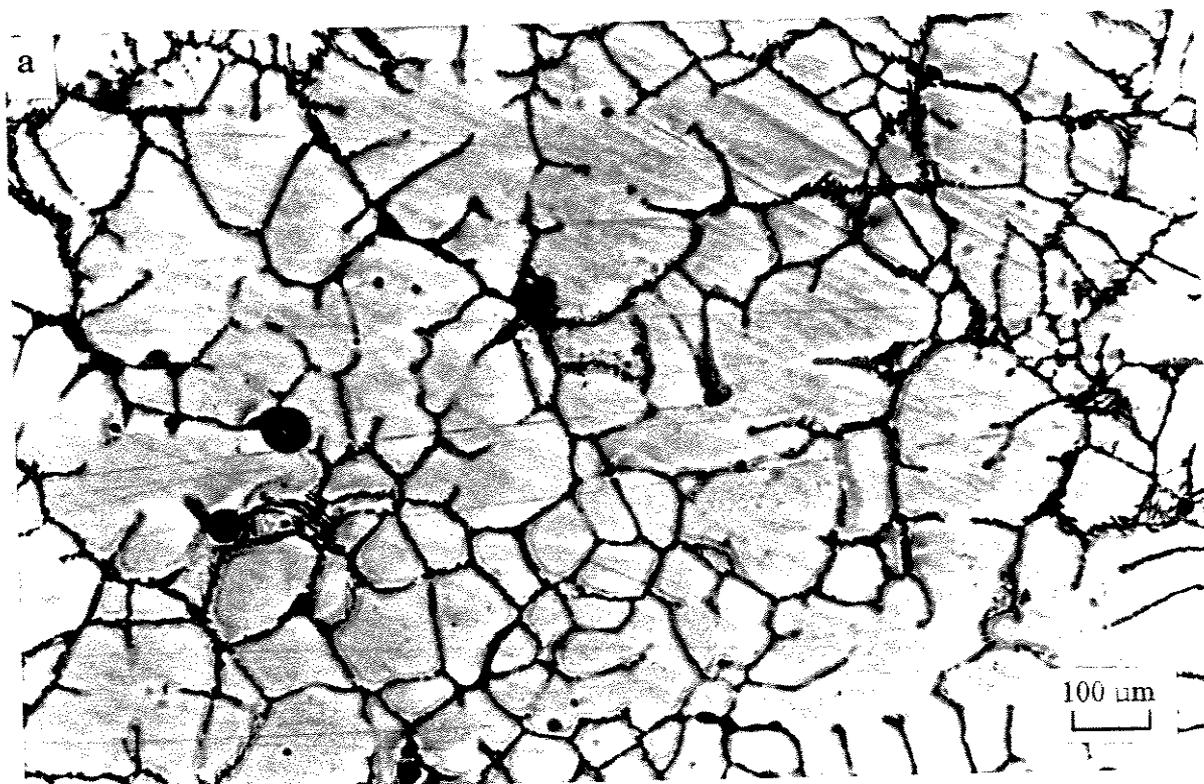


FIGURA 5.19 - Microestruturas da região central dos lingotes produzidos nas condições de agitação NORMAL durante: a) 230 s; b) 300 s.

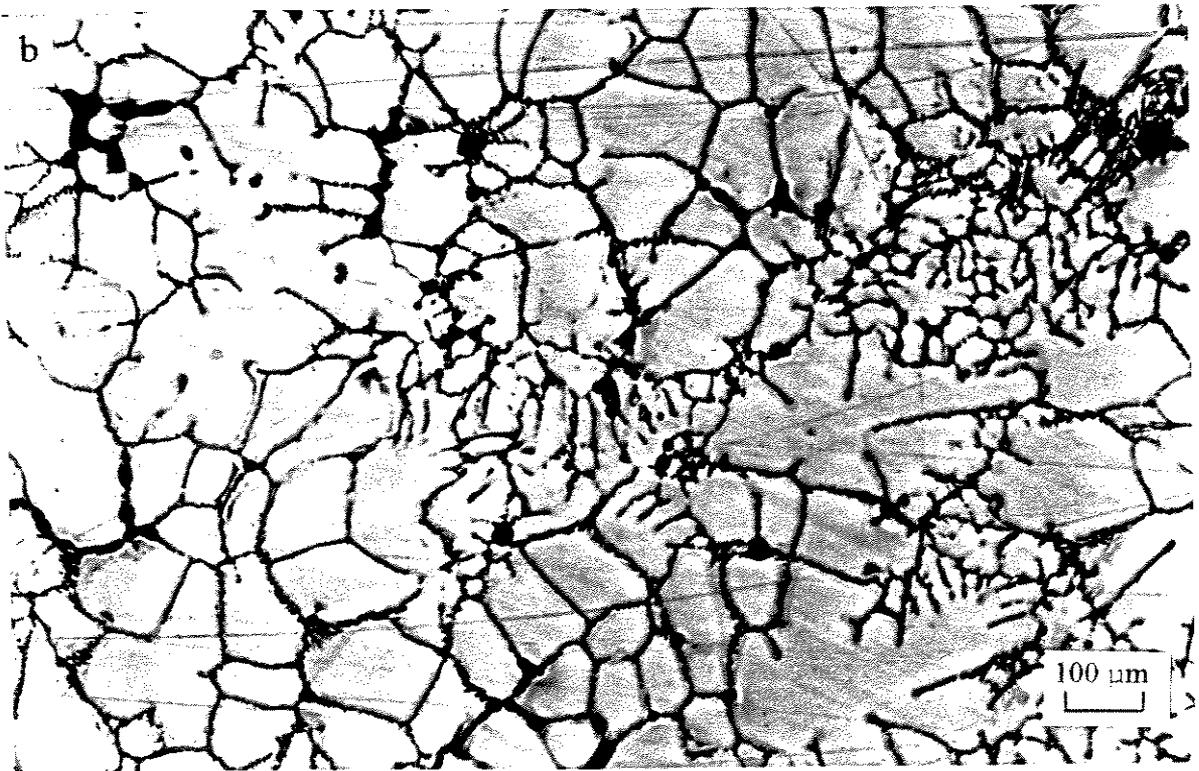
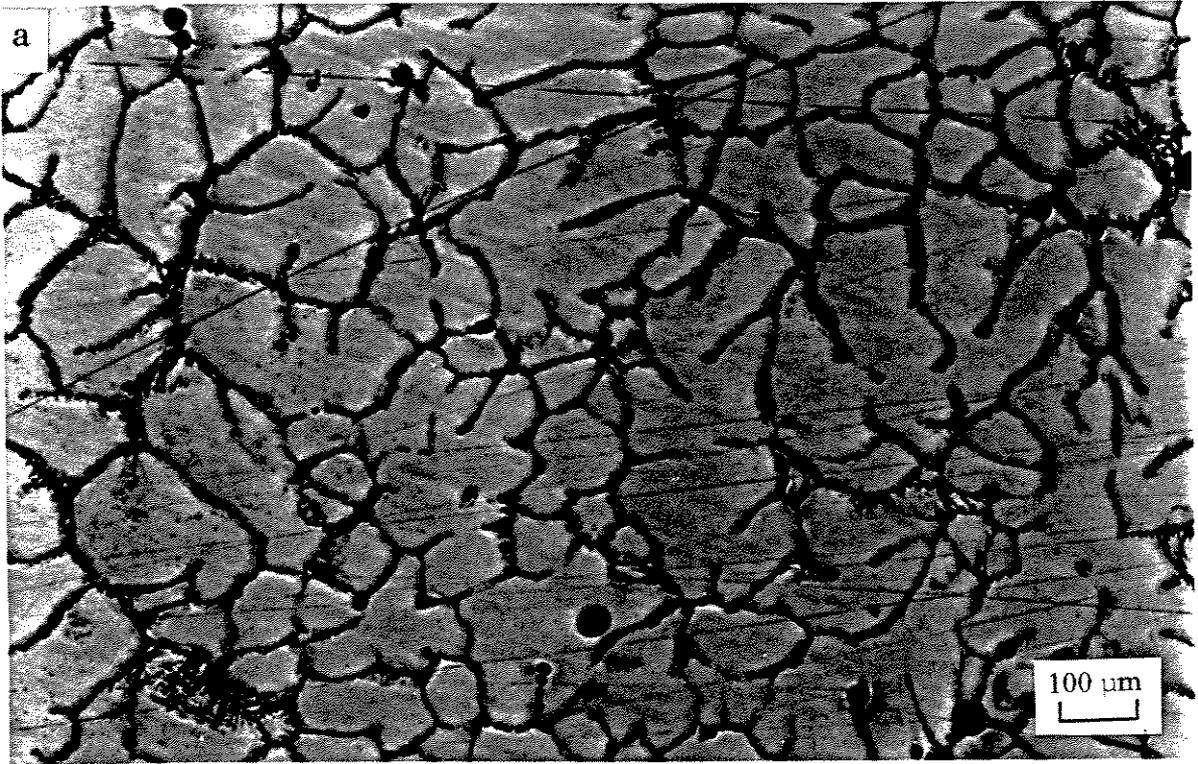


FIGURA 5.20 - Microestruturas da região central dos lingotes produzidos nas condições de agitação REVERSA durante: a) 230 s; b) 300 s.

Os resultados são apresentados na tabela 5.5.

TABELA 5.5 - Valores da fração sólida das estruturas produzidas no equipamento construído, em função das condições de processamento.

Modo de agitação	Tempo de agitação (s)	$f_s$ (Regra da Alavanca)	$f_s$ (Equação de Scheil)	$f_s$ (Análise de Imagens)
NORMAL	230 (596 °C)	0,87	0,78	0,74
	300 (573 °C)	-	0,82	0,66
REVERSO	230 (596 °C)	0,87	0,78	0,72
	300 (573 °C)	-	0,82	0,73

Pode-se observar, para o menor tempo de agitação empregado, que os valores de fração sólida variam de 72 a 87 %, dependendo do método empregado para a sua avaliação.

Para amostras produzidas utilizando 300 s de agitação, os valores encontrados para a fração sólida variam de 66 a 82 %, dependendo do método utilizado para seu cálculo. Os maiores valores de fração sólida encontrados neste caso, em comparação com os obtidos para o tempo de agitação de 230 s, são devidos à menor temperatura de final de agitação.

Naturalmente os valores calculados para a fração sólida utilizando regra da alavanca e equação de Scheil não dependem do modo de agitação. Os resultados obtidos são coerentes com as condições de processamento: maior a temperatura, menor a fração sólida, embora a variação (72/87 % e 66/82 %) não seja sensível ao olho humano, quando se observa as imagens apresentadas pelas micrografias.

Os resultados de fração sólida obtidos pelo analisador de imagens são bastante semelhantes para as diferentes condições operacionais analisadas, exceto para o caso de agitação NORMAL por 300 s.

Os valores obtidos são razoavelmente próximos aos calculados teoricamente. A correta determinação da fração sólida é bastante difícil: se feita teoricamente, erros são induzidos ao se assumir condições não práticas de solidificação; ao se utilizar analisador de imagens, erros são introduzidos pelo equipamento ao não distinguir por exemplo porosidade de fases secundárias.

Analisando conjuntamente os resultados obtidos pelo uso da equação de Scheil, tradicionalmente utilizada para o cálculo da fração sólida quando se trabalha com material semi-sólido, e os obtidos pelo analisador de imagens, no entanto, pode-se ter uma boa idéia do valor da fração sólida presente: entre 70 e 80 % para a maior temperatura e entre 70 e 90 % para a menor temperatura (exceto a condição NORMAL, 300 s).

Quanto às dimensões características da unidade morfológica da fase primária (dendritas equiaxiais ou fragmentos dendríticos), os resultados são mostrados na tabela 5.6.

TABELA 5.6 - Diâmetro médio das unidades morfológicas da fase primária (dendritas equiaxiais e fragmentos dendríticos) das estruturas produzidas no equipamento construído.

Modo de agitação	Tempo de agitação (s)	Diâmetro médio da unidade da fase primária ( $\mu\text{m}$ )
NORMAL	230	115
	300	135
REVERSO	230	125
	300	148

Pode-se observar a tendência ao aumento das dimensões da fase primária com o aumento do tempo de agitação e com o aumento da turbulência (movimento com reversão). Este efeito pode ser explicado como consequência de fenômenos de engrossamento promovidos por choques entre partículas sólidas seguido de coalescência e por mecanismos de Ostwald, ambos incentivados pelo aumento de interações entre partículas com o aumento do tempo e turbulência.

De maneira geral as dimensões das partículas da fase primária podem ser consideradas elevadas; lembrando que o material será reaquecido para o processamento semi-sólido, poderá haver crescimento excessivo do sólido, levando à redução das propriedades mecânicas do produto tixotrocoformado. Uma matéria prima com fase primária de menores dimensões poderia ser obtida pela redução do tempo de agitação e aumento da potência do motor estator, de modo a aumentar a velocidade de agitação. Trabalhos futuros poderão explorar uma maior gama de condições experimentais para a otimização das estruturas produzidas pelo equipamento construído.

Quanto à geometria das unidades morfológicas da fase primária nos lingotes obtidos, os resultados obtidos para o Fator de forma ( $F_f$ ), calculado com auxílio de analisador de imagens segundo indicado no Capítulo 3, são apresentados na tabela 5.7.

TABELA 5.7 - Valor médio do fator de forma das unidades morfológicas da fase primária (dendritas equiaxiais e fragmentos dendríticos) das estruturas produzidas no equipamento construído.

Modo de agitação	Tempo de agitação (s)	Valor médio do Fator de Forma da fase primária
NORMAL	230	2,36
	300	3,12
REVERSO	230	2,50
	300	2,32

A forma geométrica das partículas da fase sólida presentes na pasta reofundida governa o seu comportamento reológico; segundo apresentado no Capítulo 2, o que caracteriza uma pasta reofundida é a morfologia globular do sólido, a qual por sua vez caracteriza as suas propriedades de escoamento como não Newtoniano tixotrópico e permite o seu tixoprocessoamento.

Portanto, a morfologia da fase primária na matéria prima para a reofundição ou tixoconformação deve ser tal que forneça rápida globularização quando do aquecimento para obtenção do estado pastoso. Assim, é interessante que os lingotes a serem rea aquecidos para a tixoconformação apresentem morfologia da fase primária com reduzidos valores de  $F_f$ . Conforme definição de  $F_f$ , dada no Capítulo 4, valores iguais a 1 significam estrutura perfeitamente globular (forma geométrica no plano é um círculo). À medida que o valor de  $F_f$  se distancia de 1, a morfologia da partícula sólida se torna mais e mais irregular.

A tabela 5.7 mostra valores de  $F_f$  em torno de 2 a 3 para todas as estruturas produzidas no equipamento construído, sem variação sensível entre as diferentes condições operacionais analisadas. Estes valores são típicos de estruturas dendríticas equiaxiais pouco ramificadas e

bastante fragmentadas. Em contraposição, estruturas fundidas convencionalmente se constituem de dendritas com ramos primários alongados, conforme microestrutura da figura 4.4 e apresentam  $F_f$  da ordem de 30.

A análise visual das microestruturas dos lingotes produzidos não permite a diferenciação do tipo de morfologia com a variação dos parâmetros tempo e tipo de agitação empregados nos experimentos; o resultado do analisador de imagens confirma a não dependência da estrutura com as variáveis empregadas, nos limites utilizados no trabalho. No entanto, pode ser esperada maior esfericidade das partículas com o aumento do tempo de agitação e também maior engrossamento das partículas com o tempo de manutenção do sólido em contato com líquido no estado pastoso (ROBERT, M. H. 1993; FOGAGNOLO, J.B. 1995).

Os resultados mostram que o equipamento construído é eficiente na promoção de estruturas suficientemente fragmentadas para o emprego como matéria prima para a conformação semi-sólida no estado reofundido, para quaisquer das condições analisadas no trabalho.

## Capítulo 6

### Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos

#### 6.1. Conclusões quanto ao equipamento construído

- O equipamento construído apresentou excelente desempenho operacional., decorrente da adequação dos dispositivos e circuitos elétrico-eletrônicos empregados, nas diversas condições operacionais investigadas no trabalho. Foram realizados cerca de 30 vazamentos e, em todos, o ciclo de funcionamento padrão foi rigorosamente idêntico, atestando a qualidade dos dispositivos e circuitos construídos.
- Em relação à perspectiva da automação no processo, pode-se dizer que tal objetivo foi alcançado, pois somente foram realizados manualmente os ajustes iniciais nos circuitos para as condições experimentais desejadas, as operações de vazamento e retirada do lingote fundido. Esta automação permitiu a repetibilidade dos ensaios com segurança e mínima interferência manual.
- O equipamento, como projetado, permitiu a perfeita manipulação de variáveis de controle de operação:
  - a **potência elétrica** pode ser fornecida em uma ampla faixa de valores, de modo simples e rápido, através de simples ajustes individuais dos variadores de tensão;
  - a **taxa de resfriamento** do material em processamento pode ser controlada também de maneira simples, através da atuação de registros controladores de vazão de ar e

água de refrigeração conectados diretamente a sistema de leitura de temperaturas na lingoteira;

- circuitos de filtragem e ampliação de sinais permitiu a otimização de aquisição de dados de **leitura de temperaturas**, o que por sua vez permitiu o adequado controle de toda a operação do equipamento;

- o **modo de agitação** teve seu controle preciso e seguro pela utilização de circuito eletrônico específico, através do qual foi possível obter uma ampla gama de periodicidade na reversão do movimento no metal líquido.

## 6.2. Conclusões quanto ao produto obtido

- Os lingotes da liga AA 2021 produzidos no equipamento construído apresentaram acabamento superficial característico de fundição em coquilha; com mínimo rechupe de topo e com grau de porosidade compatível com o apresentado pela matéria prima utilizada.

- Os lingotes produzidos apresentaram macroestruturas bastante homogêneas em todo o volume, constituídas de grãos equiaxiais refinados, com diâmetro médio variando entre 0,6 a 1mm. O tamanho de grão variou com as condições operacionais empregadas: o maior tempo de agitação e o movimento do tipo REVERSO resultaram em menores tamanhos de grãos.

- Os lingotes produzidos apresentaram microestruturas constituídas da fase Al- $\alpha$  na forma de dendritas bastante fragmentadas e raras rosetas ou dendritas equiaxiais pouco ramificadas, e da fase eutética na forma de lamelas finas localizadas em contornos da fase primária. O mesmo tipo de estrutura foi obtido em todas as condições experimentais analisadas.

- As dimensões médias das unidades morfológicas da fase primária variaram da ordem de 115 a 150  $\mu\text{m}$ , dependendo dos parâmetros operacionais empregados na produção dos lingotes: o maior tempo de agitação e a agitação com movimento do tipo REVERSO produziram os maiores valores das dimensões médias nas partículas da fase primária.

- Para as condições operacionais utilizadas, foram obtidas as estruturas contendo fração de fase primária (equivalente à fração sólida no estado pastoso), em torno de aproximadamente 72 a 87% para a liga a 596 °C e de 66 a 82% para a liga a 573 °C.

- A fase Al- $\alpha$  em todas as microestruturas produzidas apresentou valores de fator de forma da ordem de 2 a 3, independentes das condições operacionais utilizadas para a sua produção. Estes valores de fator de forma são considerados excelentes para o propósito da utilização do material como matéria prima para o processamento no estado semi-sólido.

De maneira geral, portanto, os resultados obtidos no trabalho permitem concluir que o equipamento projetado e construído se mostrou eficiente na produção de lingotes da liga AA 2011 com microestrutura fragmentada adequada para utilização como matéria prima para o processamento no estado semi-sólido ou tixoprocessamento, após aquecimento para o restabelecimento do estado pastoso.

### **6.3. Sugestões para trabalhos futuros**

- Utilizar diretamente a temperatura do banho líquido, por inserção de termopar no seu interior, para o controle do equipamento; neste caso não haverá necessidade da correção da curva de resfriamento, feita neste trabalho devido à posição de termopares de controle nas paredes da lingoteira.

- Utilizar versão mais atualizada de cartão conversor de sinais A/D, o que permitirá maior precisão na leitura de temperaturas.

- Construção de estator próprio ( e não adaptação de motor convencional), a partir do empilhamento de lâminas de aço devidamente isoladas e refrigeradas.

- Instalação de manômetro na linha de ar comprimido logo à frente do registro controlador de vazão de ar, para permitir maior segurança na repetibilidade dos valores de vazão e portanto de condições de resfriamento.

- Explorar condições operacionais permitidas pelo equipamento e relacionar estes parâmetros com estruturas produzidas (ex. verificar efeito da potência ou velocidade de agitação, taxa de resfriamento, associadas com o tipo de movimento e velocidade de agitação, na estrutura produzida).
- Otimizar microestruturas produzidas, em termos de dimensões de partículas da fase primária, pela manipulação de parâmetros operacionais do processo.
- Relacionar porosidade com parâmetros operacionais e minimizar a sua presença pelo maior controle da qualidade da matéria prima e de condições de agitação.
- Testar o equipamento para outras ligas metálicas.
- Adaptar o equipamento para a produção contínua de pastas.

## Referências Bibliográficas

Aluminium Pechiney - "ALTHIX BILLETS", catálogo, abril 1996

ANDERSON PRG, SUMMERIL JC e MCLELLAND ARA. The view of potential users. 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, v.1, p.208 -214, Sheffield, june 1996.

APAYDIN N, PRABHAKAR KV, DOHERTY RD. Special Grain Boundaries in Rheocast Al-Mg, Materials Science and Engineering, vol. 46, p.145-150, jan. 1980.

BLAIS S., LOUE W., e PLUCHON C., Structure control by electromagnetic stirring and reheating at semi-solid state. 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, v.1, p.187 - 192, Sheffield, june 1996.

CHALMERS B., J. Australian Inst. Metals, vol. 8, p. 225 - 238, 1963.

CHIARMETTA, G."Tixoforming of automobile components", 4th Int. Conf. Semi-solid Processing of Alloys and Composites, Sheffield, june 1996, p.204-208.

COPPINI, N.L. e ROBERT, M.H. Mecanismo de formação da zona equiaxial ativados processos de refino de grão, baseado na aplicação de revestimento volátil. Anais do 1<sup>o</sup> Congresso Nacional de Metalurgia, Santiago, Chile, 1979, vol. 01, p.190.

DON SOO SHIN, JUNG ILL LEE, LEE JC, LEE HO IN. Microstructural Evolution of primary crystals in Rheocast Al-Si Alloys. 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, v.1, p.92-6, Sheffield, june 1996.

- FLEMINGS, M.C., Rheocasting, Proc. of the workshop on Rheocasting, Army materials and Mechanics Research Center, Watertown, MA, Feb. 3-4, 1977, R.D. French and Frank S., Hodi, eds, Metals and Ceramics Information Center, Columbus. Oh. pp. 265-72
- FOGAGNOLO, J.B., Contribuição à análise dos efeitos de parâmetros de processo na qualidade de compositos obtidos por compofundição, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996, p. 133, Tese ( Mestrado)
- GARABEDIAN H, STRICKLAND-CONSTABLE RF Journal Crystal Growth, v..22, p.188-92 1974
- GABATHULER, J.P., *et. al.* "Evaluation of various processes for the production of billets with thixotropic properties". 1992.
- HELLAWELL A. Grain evolution in convectional and Rheocastings, 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, v.1, p.60-65 Sheffield, june 1996.
- HIRT, G. *et. al.* "SSM Forming of Usually Wrought Aluminium Alloys". Proceeding 3rd Int. Conference on Processing of Simi-solid Alloys and Composites. Tokyo, june 1994.
- JABRANE S., CLÉMENT B., AJERSCH F. Evolution of Primary Particle Morphology during Rheoprocessing of Al 5.2% Si Alloy, 2nd International Conference on the Processing Semi-solid Alloys and Composites, , v.1, p.223-235 Cambridge-Massachusetts, june 1992.
- JACKSON, K.A., HUNT, J.D., UHLMANN D.R. e SEWARD III T.P. On the origin of the equiaxial zone in casting. Transactions of the Metallurgical. Society of AIME, v.236, p.149-157, february 1967.
- KAHRMANN, W., SCHRAGNER R. e YOUNG K. Free standing raw material production system for SSM recycling. 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, v.1, p154 - 158, Sheffield, june 1996.

- KAILASAM S.K, GLICKSMAN M.E, MANI S.S, FRADKOV V.E .Microstructural evolution in semi-solid alloys, 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, v.1, p.79-72, Sheffield, june 1996
- KAPRANOS, P. Semi-solid Metal Processing: an enviromentally friendly process. Materials World, september 1994, p.465-467.
- KATTAMIS TZ, COUGHLIN JC, FLEMINGS MC. Influence of Coarsening on Dendrite Arm Spacing of Aluminum Copper Alloys, Transactions.of the Metallurgical Society of AIME., v.239, p.1504-11, oct. 1967.
- KATTAMIS,T.Z. e PICCONE, T.J., Mater. Sci. Eng., 1991, v. A131,p. 265-72
- KENNEY, M.P. e COURTOIS, J.A., *et. al.* "Semi-solid Metal Casting and Forming". Metals Handbook, 9ª Ed., v.15, p.327-338, 1988.
- KIRKWOOD, D.H. "Semi-solid Processing of High Melting point Alloys." 4th Int. Conf. Semi-solid Processing of Alloys and Composites, Sheffield, Inglaterra, june 1996, p.320-325
- KIRKWOOD, DH, ROBERT, MH. "Alloy Slurry Formation by Partial Melting", Solidification Proc. 1987, p. 405 - 408.
- LAPLANTE, S., LEGROS, N., AJERSCH, F., CLEMENT, B., TURENNE, S. "Extrusion of thixocast semi-solid Al 356 cylindrical sections". 4th Int. Conf. Semi-solid Processing of Alloys and Composites, Sheffield, Inglaterra, june 1996, p.301-305.
- METZ S.A, FLEMINGS, M.C. Transaction America Foundrymen's Society., v.78, p.453-60, 1970
- MILLER, I. e FREUND, J.E. Probability and Statistics for Engineers, 1977, 2a. ed., capítulo 11, "Curve Fitting", p. 289 - 330.

- MONDOLFO, L.F. Aluminium Alloys: Structure and Properties. Ed. Butter Works, Londres 1976.
- MOSCHINI, R. "Mass Production of Fuel Rails by Die Casting in the Semi-solid State from Flow-Cast Al Alloys". Proceeding of 3th Int. Conf. Semi-solid Processing of Alloys and Composites, Japan, 1994, p.145-154.
- MULLINS, W.W., Two-Dimensional motion of Idealized Grain Boundaries, Journal of Applied Physics, v. 27, n.o 8, p. 900 - 904, August 1956.
- NUSSBAUM, A.I. "Semi-solid Forming of Aluminium and Magnesium". Light Metal Age, June 1996, vol.54, n° 5 e 6, p. 6-22.
- OHNO, A. The Solidification of Metals, 1976 - Ed. CHIJIN SHOKAN CO. LTD.
- PILLING J., HELLAWELL, A. Mechanical Deformation of Dendrites by Fluid Flow, Metallurgical and Materials Transactions A, v. 27A, p.229-232, Jan.1996.
- REEVES J.J, KATTAMIS T.Z. A Model for Isothermal Dendritic Coarsening., Scripta Metallurgica, v..5, p.223-229, 1971.
- ROBERT, M.H. Partial Melting as an Efficient Method to produce Rheocast Alloy Slurries. Transactions of the Japan Foundrymen's Society, v. 12, p. 45 - 51, October, 1993.
- ROVIRA, M.M. "Viabilização do Tixoforjamento da liga Al 4,5 Cu super refinada, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996, 118 p., Tese (Mestrado).
- ROVIRA, M.M., LANCINI, B.C. e ROBERT, M.H. "Tixofforming of Al-Cu Alloys". Int. Conf. on Advances in Materials and Processing Technologies, Guimarães, Portugal, julho 1997, p.82-90.

- SALVO L, SUÉRY M, DE CHARENTENAY Y., LOUÉ W. Microstructural evolution and rheological behaviour in the semi-solid state of a new Al-Si based alloy., 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, v.1, pp 10-15, Sheffield, june 1996
- SHIN DON SOO, LEE JUNG ILL, LEE JC, LEE HO IN. Microstructural Evolution of Primary Crystals in Rheocast Al-Si Alloys. 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, v.1, p.92-96, Sheffield, june 1996.
- SPENCER, D.B. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Tecchnology, Cambridge, MA, 1971.
- SPENCER, D.B., MEHRABIAN, R., FLEMINGS, M.C. Metall. Trans., v.3, p.1925 - 32, 1972.
- SZEKELY, J., CHANG, C.W. Eletromagnetically driven flows in metals processing, JOM, p. 6-11, september 1976.
- TILLER, W.A. e O'HARA, S. On the mechanisms of crystal ultiplication during solidification in the presence of fluid motion . part 2, Proceedings of the conference of the solidification of metals. ISI P110, Brighton, 4 - 7/12, London, 1967.
- UHLMANN, D.R., SEWARD, T.P., III, CHALMERS, B. The Effect of Magnetic Fields on the Structure of Metal Alloy Castings. Transactions of the Metallurgical. Society of AIME, v.236, p.527-531, april 1966.
- VENNARDS-STREET. Elementos de Mecânica dos Fluidos, 1978, 5 ed., capítulo 1 "Fundamentos", p.17.
- VIVES, C. e RICOU R., Patente n<sup>o</sup> 79818, França (1979).
- VIVES, C. Elaboration of Semisolid Alloys by Means of New Electromagnetic Rheocasting Processes, Metallurgical Transactions B, v. 23B, p. 189-206, april 1992

- VOGEL, A. Turbulent Flow and solidification stir-cast microstructure, Metal Science, p.576-78, dec. 1978.
- VOORT, V. Metallography principles and practice, Materials Science and Engineering Series, 1984, capítulo 6 "Quantitative Microscopy", p.410 - 503.
- YOUNG, K.P. "Recent advance in semi-solid metal (SSM) cast Al and Mg composites, 4th Int. Conf. Semi-solid Processing of Alloys and Composites, Sheffield, Inglaterra, june 1996, p.229-233.
- ZOQUI, E. J. Obtenção e caracterização mecânica e metalurgica da liga Al 4,5 Cu no estado reofundido, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1995, p. 256, Tese (Doutorado).
- ZOQUI, E.J. e ROBERT, M.H. VI Int. Conf. on Achievements on Mechanical and Materials, Gliwice, Polônia, dezembro de 1977,p. 213-216.

ANEXO

```

Proc curva()
Intervalo("k1").Selecionar
CélulaAtiva.Valor = 0
Intervalo("k1").Selecionar
Seleção.SequênciaDados LinhaColuna:=xlColunas; Tipo:=xlLinear; Data _
:=xlDia; Incremento:=1; ValorFinal:=1000; Tendência _
:=Falso
Intervalo("a1").Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = "=arred(1C[10];1)"
Seleção.Copiar
Intervalo("a2:a1000").Selecionar
PlanilhaAtiva.Colar
Intervalo("c1").Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = "=LC[-2]*LC[-1]"
Intervalo("C1").Selecionar
Seleção.Copiar
Intervalo("C2:c1000").Selecionar
PlanilhaAtiva.Colar
Intervalo("d1").Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = "=LC[-3]^2"
Intervalo("d1").Selecionar
Seleção.Copiar
Intervalo("d2:d1000").Selecionar
PlanilhaAtiva.Colar
Intervalo("a1002").Ativar
CélulaAtiva.Valor = "Soma[X]"
Intervalo("a1003").Ativar
CélulaAtiva.Valor = "Soma[Y]"
Intervalo("a1004").Ativar
CélulaAtiva.Valor = "Soma[XY]"
Intervalo("a1005").Ativar
CélulaAtiva.Valor = "Soma[X^2]"
Intervalo("b1002").Ativar
CélulaAtiva.Fórmula = "=soma(a1:a1000)"
Intervalo("b1003").Ativar
CélulaAtiva.Fórmula = "=soma(b1:b1000)"
Intervalo("b1004").Ativar
CélulaAtiva.Fórmula = "=soma(c1:c1000)"
Intervalo("b1005").Ativar
CélulaAtiva.Fórmula = "=soma(d1:d1000)"
Intervalo("b1006").Ativar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = "=L[-4]C/1000"
Intervalo("a1006").Ativar
CélulaAtiva.Valor = "coeficiente"
Intervalo("a1007").Ativar
CélulaAtiva.Valor = "[Y]-[XY]"
Intervalo("a1008").Ativar
CélulaAtiva.Valor = "[X]-[X^2]"
Intervalo("a1009").Ativar
CélulaAtiva.Valor = "TANGENTE"
Intervalo("a1010").Ativar
CélulaAtiva.Valor = "CONSTANTE"
Intervalo("c1003").Ativar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = "=LC[-1]*L[3]C[-1]"
Intervalo("c1002").Ativar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = "=LC[-1]*L[4]C[-1]"
Intervalo("b1007").Ativar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = "=L[-4]C[+1]-L[-3]C"
Intervalo("b1008").Ativar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = "=L[-6]C[1]-L[-3]C"

```

```
Intervalo("b1009").Ativar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = "=L[-2]C/L[-1]C"
Intervalo("b1010").Ativar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = "=(L[-7]C-L[-8]C*1[-1]C)/1000"
Intervalo("b1010").Ativar
AtribValor constante = CélulaAtiva
Intervalo("b1009").Ativar
AtribValor tangente = CélulaAtiva
```

Fim Proc