

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR LUIZ ANTONIO GALHEGO
FHIBES E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 13 / 09 / 91

Ademir Botet
ORIENTADOR

DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO PARA OBTENÇÃO DE

PASTAS REOFUNDIDAS DE METAIS E LIGAS

NÃO-FERROSAS

15 / 91

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO : DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO PARA OBTENÇÃO DE
PASTAS REOFUNDIDAS DE METAIS E LIGAS
NÃO-FERROSAS.

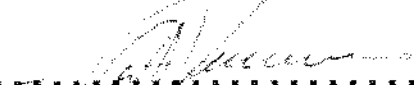

AUTOR : LUIZ ANTÔNIO GALHEGO THIBES

ORIENTADOR : MARIA HELENA ROBERT

APROVADO POR



.....
PROF. DR. MARIA HELENA ROBERT - PRESIDENTE


.....
PROF. DR. CLAUDIO SHYINTI KIMINAMI
.....
PROF. DR. ITAMAR FERREIRA

CAMPINAS, 13 DE AGOSTO DE 1991.

11/2/1991

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,

Hilton Rocha Thibes

Heloisa Galhego Thibes,

gracias a eles estou aqui hoje.

A minha noiva Maria Angélica F. Zacharias que me deu a maior
força nesses anos de trabalho.

Aos meus irmãos Miltinho, Verinha, Angélica e Solange.

Não poderia me esquecer de minha avó, que sempre cuidou, com
muito carinho, de mim.

Luiz Antônio/29.07.91

AGRADECIMENTOS

Quero aqui enfatizar o grande apoio que obtive de minha orientadora Profa. Dra. Maria Helena Robert. Nesses anos de trabalho juntos tive a certeza de ter sido orientado por alguém de competência e dedicação ao seu trabalho.

Agradeço a colaboração dos técnicos de laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica da UNICAMP: Emílcio, Ari, Claudomiro e Rita; e à secretária do Departamento de Materiais e Processos de Fabricação Luciene.

Quero agradecer a colaboração das secretárias da coordenaria da Pós-graduação, Denise e Vera, que sempre estiveram prontas a auxiliar os alunos nos processos de matrícula e/ou outros de caráter burocrático.

Agradecimentos ao CNPq pelo seu programa de apoio a pesquisa realizado no Brasil.

RESUMO

O trabalho apresenta o projeto e construção de um equipamento para a produção de pastas metálicas reofundidas de metais e ligas não-ferrosas. Tal equipamento, do tipo viscosímetro rotacional, fornece, via agitação mecânica do líquido em solidificação, as condições necessárias à transformação da estrutura dendrítica (solidificação convencional) para globular (reofundida). O equipamento foi projetado para a produção de volumes da ordem de 80 cm³ de pastas, a temperaturas até cerca de 650 °C. Testes foram feitos para a liga Al-6%Si. Através da variação dos parâmetros de processamento (tempo e velocidade de agitação) é verificada a influência dos mesmos na morfologia da estrutura obtida. Foram analisados tempos de 3 a 10 minutos de agitação e velocidades de 800 a 1200 rpm. Os resultados obtidos quanto ao equipamento construído atestam sua eficiência na obtenção de pastas metálicas reofundidas da liga utilizada: o equipamento é de fácil operação e custo relativamente baixo, e pode se prestar com algumas modificações a estudos de comportamentos reológicos e à produção contínua de pastas metálicas reofundidas. Os resultados obtidos permitem ainda observar que, de modo geral, o aumento da velocidade de agitação reduz o tamanho das partículas do sólido primário globular; para tempos reduzidos de agitação glóbulos de grandes dimensões, quando comparados a tempos maiores de agitação, são obtidos.

ABSTRACT

Title: Development of a process for rheocast slurries of non-ferrous alloys production.

This work deals with the production of rheocast metallic slurries. Initially an appropriate equipment to be used as rheocaster was designed and built. The chosen process utilizes vigorous isothermal stirring of the metal or alloy within its solidification range, in a viscometer type rheocaster specially built to promote necessary conditions for globular structure (rheocast material) production. The built equipment was designed to produce quantities around 80 cm³ of metallic slurries, at processing temperatures of the order of 650 °C. Experiments were carried out utilizing Al-6%Si alloy. It was verified the influence of process parameters (time of stirring and shear rate) on the morphology of obtained solid phase in the produced slurries. Times from 3 to 10 min. and stirring speed from 800 to 1200 rpm were investigated. Obtained results show the efficiency of the designed equipment to produce good quality slurries of Al-6%Si; being of easy operation and low building cost. Such equipment can be utilized, with few adaptations, as viscometer to study rheological properties of rheocast metals and alloys, and also for the continuous production of slurries. Related to the rheocast structure, it was verified the average diameter of globular solid phase decrease with increasing shear rate and stirring time.

INDÍCE

	Pg
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
CAPÍTULO II - FUNDAMENTOS DA REOFUNDIÇÃO	5
1. HISTÓRICO	5
2. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA REOFUNDIDA	9
2.1. Quanto à morfologia	9
2.2. Quanto à composição	10
3. MECANISMOS DE FORMAÇÃO E CRESCIMENTO DA ESTRUTURA REOFUNDIDA	11
3.1. Formação	11
3.2. Crescimento	14
4. PROPRIEDADES DA PASTA E DO SÓLIDO REOFUNDIDOS	18
4.1. Propriedades da pasta reofundida	18
4.2. Propriedades do reofundido sólido	21
5. APLICAÇÃO DE REOFUNDIÇÃO / POTENCIALIDADES	22
5.1. Na injeção de metais de alto ponto de fusão	22
5.2. Na produção de compósitos	23
5.3. Na purificação de metais	23

CAPÍTULO III - OBTENÇÃO DE ESTRUTURAS REOFUNDIDAS	29
1. PROCESSOS DE OBTENÇÃO	29
2. EQUIPAMENTOS PARA REOFUNDIÇÃO	30
2.1. Equipamentos envolvendo agitação mecânica	31
A. Equipamentos com rotor externo	31
B. Equipamentos com rotor interno.....	32
C. Equipamentos com propulsores	34
2.2. Equipamentos envolvendo agitação eletromagnética	35
3. INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE PROCESSO	
NA ESTRUTURA REOFUNDIDA	37
3.1. Efeito da temperatura de trabalho	37
3.2. Efeito do tempo de agitação	38
3.3. Efeito da velocidade de agitação	39
3.4. Efeito da taxa de resfriamento durante a agitação....	39
3.5. Efeito da taxa de resfriamento após o vazamento	40
CAPÍTULO IV - PROJETO E CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO	54
1. NECESSIDADES	54
2. TIPO DE EQUIPAMENTO ESCOLHIDO - JUSTIFICATIVAS	55
3. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO	57
3.1. Mesa de trabalho	59

3.2. Forno	60
A. Características físicas	60
B. Características térmicas	61
3.3. Rotor	74
A. Material utilizado	74
B. Geometria e dimensão do rotor	75
3.4. Motor	77
A. Especificação da potência do motor	77
B. Motor utilizado	80
3.5. Lingoteira para solidificação da pasta	80
3.6. Sistema de Controle	83
A. Controlador de velocidade de agitação	83
B. Controle de temperatura	84
4. CUSTO DO EQUIPAMENTO	87

CAPÍTULO V - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL96

1. LIGA METÁLICA UTILIZADA	96
2. OBTENÇÃO DE ESTRUTURA DE REFERÊNCIA	97
3. AJUSTE DO EQUIPAMENTO - TESTES PRELIMINARES	97
3.1. Ajuste mecânico	97
3.2. Ajuste térmico	99
4. TESTES PARA PRODUÇÃO DE PASTAS REOFUNDIDAS	102

4.1. Condições de processamento	102
A. Temperatura de trabalho	102
B. Forma de agitação	104
C. Tempos de agitação	104
D. Velocidades de agitação	105
E. Taxa de resfriamento final	106
4.2. Descrição do procedimento experimental	107
4.2.1. Etapa 1 - Fusão da liga	107
4.2.2. Etapa 2 - Agitação da liga pastosa	108
4.2.3. Etapa 3 - Descarga da liga pastosa	109
4.2.4. Etapa 4 - Preparo de amostras para análise de resultados	109
A. Análise metalográfica	109
B. Microanálise	110
CAPÍTULO VI - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	117
1. QUANTO AO EQUIPAMENTO CONSTRUIDO.....	117
1.1. Apresentação do equipamento	117
1.2. Comentários gerais com relação ao equipamento construído	119
2. QUANTO À QUALIDADE DO REOFUNDIDO OBTIDO	122
2.1. Apresentação dos resultados	122

A. Microestruturas	122
B. Resultados de microanálise	126
2.2. Discussão dos resultados	128
a. Efeito do tempo de agitação	128
b. Efeito da velocidade de agitação	130
CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES	145
1. QUANTO AO EQUIPAMENTO	145
2. QUANTO À QUALIDADE DO REOFUNDIDO OBTIDO	147
CAPÍTULO VIII - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	149
BIBLIOGRAFIA	151

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1. INTRODUÇÃO

A quase maioria dos processos de conformação de metais de interesse comercial envolvem o metal, ou no estado totalmente líquido (fundição) ou totalmente sólido (laminação, forjamento, extrusão).

Nos últimos 20 anos, experimentos realizados mostraram que o metal, quando é vigorosamente agitado durante a sua solidificação, apresenta o sólido em formação com morfologia não dendrítica, tendendo a globular (1,2).

Um novo processo ligado à fundição começa a surgir na década de 70, graças ao trabalho pioneiro de um grupo de pesquisadores liderados por M.C. Flemings, no Massachusetts Institute of Technology (MIT). Este processo denominou-se "Rheocasting", ou seja, Reofundição (3).

O processo de reofundição consiste na obtenção de pastas metálicas com características estruturais particulares: sólido

globular em suspensão em líquido. Essas características particulares levam à propriedades de escoamento específicas: a massa sólido-líquida apresenta um comportamento reológico não-Newtoniano e tixotrópico (4,5).

O termo reofundição se origina, portanto, da reologia, ciência que trata do estudo do escoamento de fluidos.

As propriedades viscosas de pastas reofundidas as tornam potencialmente interessantes para várias aplicações, se destacando a fundição por injeção com menor temperatura e menor turbulência no preenchimento de matrizes do que processos convencionais, que utilizam o metal no estado totalmente líquido, resultando em produtos com melhor qualidade (menor incidência no aparecimento de trincas) e matrizes com superior vida útil (2,6-8).

A pasta metálica pode ainda ser facilmente manuseada no estado de repouso, quando apresenta alta viscosidade e, portanto, se comporta como sólido, podendo ser processada por forjamento, extrusão, etc., com reduzida resistência à deformação quando solicitada (9).

Outras potencialidades associadas a esse material são a possibilidade de produção de compósitos metal-não metal (10) e a purificação de metais (9).

Apesar das inúmeras potencialidades apresentadas para a reofundição, sua utilização comercial é bastante limitada e, no Brasil, inexistente. No nosso país, alguns trabalhos técnico-científicos têm sido publicados nos últimos 5 anos (11-14),

relatando aspectos de desenvolvimento de processos para a produção de pastas reofundidas.

2. OBJETIVOS DESTE TRABALHO

O objetivo principal deste trabalho é o projeto e construção de equipamento, de laboratório, para a produção de pastas metálicas reofundidas de metais e ligas não ferrosas de médio ponto de fusão.

O equipamento a ser construído será do tipo viscosímetro rotacional, o qual é constituído basicamente de uma câmara cilíndrica aquecida para contenção do líquido em processamento, apresentando em seu interior um rotor com eixo concêntrico à câmara cilíndrica. Este equipamento será projetado para produzir quantidades limitadas de pasta, e para trabalhar em temperaturas da ordem de 650 C.

O equipamento será projetado ainda levando-se em conta sua posterior adaptação para utilização como reômetro, no estudo de propriedades de escoamento de pastas reofundidas.

Com a construção de tal equipamento tentar-se-á verificar a influência de alguns parâmetros de processamento na qualidade estrutural da pasta metálica reofundida a ser obtida no equipamento. Os parâmetros velocidade e tempo de agitação serão variados na reofundição da liga Al-6% Si, tentando analisar os

prováveis mecanismos de formação da pasta a ser obtida.

Espera-se, portanto, com os resultados deste trabalho, contribuir para a continuidade das pesquisas em reofundição no país, fornecendo equipamento que permita tanto a produção de pastas metálicas de metais e ligas de médio ponto de fusão, quanto o estudo de propriedades viscosas do semi-sólido globular; e ainda contribuir para o entendimento de fenômenos envolvidos na formação da sua estrutura.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS DA REOFUNDIÇÃO

1. HISTÓRICO

O pioneiro da reofundição foi um grupo de pesquisadores do Massachusetts Institute of Technology (MIT) liderados por M.C. Flemings (1,3). Através da investigação dos mecanismos envolvidos na formação de trincas à quente em fundidos, forneceram, indiretamente, o ponto de partida para que esse novo ramo de estudos se tornasse de grande interesse à comunidade científica, dadas as enormes potencialidades iniciais sugeridas pelo novo processo (9,10).

Em seus experimentos, Flemings provoca, não intencionalmente, pela agitação vigorosa a modificação da estrutura em solidificação, obtendo sólido não dendrítico. Estudando a facilidade de acomodação, com relação a tensões de contração durante a solidificação desse material sólido tendendo a globular, observa alta fluidez do semi-sólido com que trabalha.

Esta alta fluidez é mantida para teores elevados de sólido (~ 50%). Este é o interessante ponto de partida da reofundição: Flemings e seguidores passam a pesquisar esta pasta metálica quanto

a suas propriedades de escoamento (reológicas) e eventuais aplicações tecnológicas. É o início da reofundição.

É observada a possibilidade de produzir pastas metálicas particulares com auxílio de agitação vigorosa aplicada ao líquido em solidificação. A estrutura obtida, originalmente dendrítica, passa a ser constituída por sólidos primários com morfologia globular. Esta nova estrutura apresenta propriedades peculiares quanto ao escoamento: um comportamento reológico característico de fluidos não Newtonianos tixotrópicos.

A partir deste momento vários trabalhos são publicados e sugerem a aplicação de semi-sólidos em processos de fundição.

Spencer (4), em 1972, sugere o uso de pastas metálicas para a fundição sob pressão e para o lingotamento contínuo.

Mehrabian (15), em 1972, além de produzir peças fundidas por injeção de semi-sólidos, verifica a reversibilidade do processo: materiais reofundidos quando reaquecidos recobram a condição pastosa original ("tixofundição"). Dois anos mais tarde sugere dois processos importantes: a possibilidade de purificação de metais pela separação das fases sólido e líquido de pastas reofundidas e a produção de materiais compósitos metal-não metal a partir de metais semi-sólidos (9).

Flemings (1)(3), em 76 e 79, publica dois trabalhos, resumindo os conhecimentos adquiridos sobre reofundição até então.

A partir de 1976 as pesquisas, inicialmente voltadas para as

potencialidades do novo processo, tomam um novo rumo: estudos dos mecanismos de formação da estrutura reofundida assim como sua dependência com os parâmetros de processamento.

Mehrabian e colaboradores trabalham na obtenção de compósitos à base de alumínio (16); na utilização de reofundidos em processos de forjamento (17) e fundição sob pressão (18) e ainda pesquisa as relações da estrutura do reofundido com seu comportamento reológico (19,20).

Vogel pesquisa mecanismos de solidificação sob agitação. Apresenta importantes trabalhos em 78 e 79 (21,22).

Nas décadas de 80 e 90 há um crescente número de trabalhos publicados sobre reofundição em várias partes do mundo:

* E.U.A. - Laxmanan e Flemings estudam o escoamento de pastas metálicas e chegam a uma relação empírica entre viscosidade e a taxa de cisalhamento (23);

* Brasil- Arruda e Prates utilizam a reofundição para processos de refino de grão (24);

* Japão - Riei Ichikawa et al investigam como as condições de processamento influenciam na variação da estrutura e na viscosidade de ligas Al-Si (25), publicando seus resultados em 1981; mais recentemente (1990), Kiyochi Ichikawa et al publicam trabalhos relacionados à reofundição de superligas à base de Ni (26) e

propriedades de reofundidos em Al-Cu (27).

* Egito - Assar, Mahallawy e Taha apresentam em dois trabalhos o comportamento reológico e sua dependência com a estrutura do reofundido produzido com ligas de Al-Cu (28,29);

* Índia - Prasad publica em 1982 estudos sobre a formação da microestrutura e propriedades mecânicas em reofundidos (30,31);

* França - Suéry trabalhando com Sn-Pb em 1984, estuda a variação da viscosidade com a estrutura de reofundidos, quando submetidos à compressão, em temperaturas superiores à líquidas (32,33);

* China - Wang Nan publica em 1990 seus resultados relativos a estudo do comportamento no escoamento de pastas reofundidas de Al-Zn (34).

Como observado, o atual interesse entre os pesquisadores da reofundição, se relaciona à: verificação das potencialidades de aplicação do reofundido; estudos dos mecanismos de formação da estrutura; possibilidade de obtenção por outros meios e estudos de propriedades do reofundido.

Apesar do grande desenvolvimento científico e tecnológico do processo de reofundição, a sua aplicação industrial ainda não vem ao encontro às expectativas e potencialidades anunciadas nos primeiros trabalhos divulgados. Em 1983, Marsh descreve em seu trabalho (35) os prováveis impedimentos da utilização industrial da reofundição: a disputa de várias empresas pela patente do processo.

Por outro lado, 20 anos de pesquisas na área levaram a avanços, e descobertas de grande importância para o progresso científico e tecnológico, espera-se que a reofundição, a curto ou médio prazo, consiga seu lugar de destaque no cenário industrial.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA REOFUNDIDA

2.1. QUANTO À MORFOLOGIA

Macroscopicamente, a estrutura bruta de fusão resultante da reofundição é constituída de grãos equiaxiais, ou melhor, grãos globulares de reduzidas dimensões e homogêneos.

Microscopicamente, a estrutura típica de um reofundido é constituída de uma fase sólida predominantemente globular, envolta por uma fase líquida. O metal líquido remanescente, quando resfriado rapidamente, solidifica convencionalmente de maneira dendrítica. O produto será constituído, portanto, de fase sólida primária globular envolta por fase secundária dendrítica fina, conforme mostrado na figura II.1.

Através da variação de parâmetros operacionais na fabricação da pasta, pode-se controlar a estrutura globular (dimensão, esfericidade, outros) e a fração sólida e líquida presentes na pasta (2,19).

Eventualmente, podem ser observadas regiões de fase secundária, presente no interior das partículas globulares do sólido primário, significando o aprisionamento de líquido nessas regiões durante o processamento da reofundição (20).

Os mecanismos de formação e crescimento da estrutura reofundida estão sendo incessantemente estudados para que as características do produto obtido possam ser programadas por meio do controle do processo.

2.2. QUANTO A COMPOSIÇÃO

Outro aspecto importante característico da estrutura reofundida se refere aos índices de microsegregação presentes em sua estrutura: as partículas globulares da fase primária apresentam reduzida microsegregação, indicando uma homogeneização composicional; o líquido, envolto às partículas globulares, apresenta uma alta concentração de soluto.

Lee e co-autores (36) apresentam resultados de estudos de microsegregação em reofundidos, revelando: teor de soluto reduzido e homogeneamente distribuído nas partículas globulares do sólido primário e alta concentração de impurezas na fase dendrítica fina.

O acúmulo de soluto nas regiões entre glóbulos pode possibilitar a reversibilidade do processo de reofundição, isto é, o reofundido solidificado pode retornar à condição pastosa por

reaquecimento e refusão das regiões inter-glóbulos que apresentam alto teor de soluto. O processo é denominado tixofundição.

3. MECANISMOS DE FORMAÇÃO E CRESCIMENTO DA ESTRUTURA REOFUNDIDA

3.1. FORMAÇÃO

O processo mais comumente utilizado na obtenção de pastas reofundidas envolve a agitação vigorosa do líquido em solidificação, a fim de modificar a estrutura em crescimento.

Vários pesquisadores têm estudado como as tensões de cisalhamento no líquido interferem na solidificação. Tais forças, causadas pela agitação, funcionam como força motriz para formação da estrutura globular. Estes estudos resultaram em vários trabalhos propondo mecanismos de formação da estrutura reofundida.

Tiller e outros mostram que o efeito de correntes de convecção naturais ou forçadas no fluido na interface de solidificação dendrítica é a fragmentação do sólido formado, resultando em multiplicação dos cristais em crescimento (37,38).

Na ausência de agitação forçada pode surgir nas raízes dos ramos dendríticos secundários um empescoamento, provocado pela redução da velocidade de crescimento, devido ao acúmulo de soluto nestas regiões. O empescoamento, gerando um afinamento destas raízes, torna-as suscetíveis ao rompimento mecânico e/ou térmico, por ação de correntes convectivas no líquido.

Segundo Tiller e Jackson a agitação estimula a multiplicação cristalina por auxiliar na refusão dos ramos afinados em suas raízes (dobramento dos ramos dendríticos podem ocorrer, com formação de discordâncias, cujo movimento produz aquecimento local, que pode refundir a raiz e liberar o cristal); e por gerar correntes de convecção forçadas capazes de romper os ramos dendríticos.

Os trabalhos de Tiller e Jackson forneceram dados e idéias que foram utilizadas por outros pesquisadores na busca de uma explicação para a formação da estrutura reofundida. Surgem duas correntes principais de hipóteses quanto à formação do reofundido: uma atribuída a Vogel e outra a Kattamis.

a. MODELO 1 - Vogel (21) e Vogel et al (39) :

Segundo os autores, a forte agitação imposta ao líquido em solidificação provoca o dobramento de ramos dendríticos, criando regiões de diferentes orientações cristalográficas, as quais são separadas por um contorno. Esse contorno pode ser de alto ou de

baixo ângulo, dependendo do grau dobramento. Elevados ângulos significam contornos de alta energia a eles associada. Nestes casos, tais contornos podem ser penetrados por líquido. Esta condição é dada pela seguinte relação $\theta_{CS} > 2\theta_{SL}$ (onde θ_{CS} é a energia do contorno e θ_{SL} é a tensão superficial líquido/sólido), e leva à separação do braço dendrítico dobrado, resultando num novo cristal em crescimento no líquido.

Apaydin et al (40) fortalecem as proposições de Vogel, confirmando que somente os contornos de alta energia são penetrados por líquido e separados.

b. MODELO 2 - Swartzbeck e Kattamis (41) e Kattamis (7):

Para Kattamis, a formação da estrutura reofundida se inicia durante a solidificação em presença de agitação no reator: há formação de dendritas em forma de rosetas equiaxiais, que tendem a globularizar, a fim de reduzir tensões superficiais.

A globularização de dendritas equiaxiais em crescimento, na presença de líquido ocorre, segundo o autor, por fenômenos naturais de engrossamento: que estimulados pela agitação, acelera fenômenos de transporte de massa.

Os principais mecanismos de engrossamento dendrítico natural sugeridos por Kattamis são coalescência e Ostwald "ripening", vide figura II.2. Estes mecanismos causam o desaparecimento de braços

secundários, e propiciado pelas pequenas distâncias de difusão entre as dendritas finas, originam uma rápida esferoidização da dendrita equiaxial.

Segundo os modelos apresentados, podemos dizer que as etapas da formação de uma estrutura reofundida são:

- nucleação da fase primária e crescimento inicial na forma de dendritas equiaxiais;

- modificação gradual da estrutura dendrítica para globular, tendo como força motriz a redução da energia superficial no sistema. Essa modificação ocorre por fragmentação dendrítica e/ou por fenômenos de engrossamento;

- cessada a agitação impõe-se um resfriamento rápido, a partir do qual inicia-se a solidificação do líquido remanescente por nova nucleação ou por simples incorporação à fase sólida.

3.2. CRESCIMENTO

Quanto ao crescimento da estrutura reofundida, pode-se dizer que a transformação da estrutura dendrítica para globular, segundo Vogel, é rápida e direta, sem estágios intermediários de globularização. O estágio posterior à recristalização/separação é o

crescimento globular do cristal separado.

Para Kattamis, no entanto, a transição é mais gradual: primeiramente ocorre evolução e crescimento simultâneos, e somente após total esferoidização o crescimento seria semelhante ao da estrutura globular obtida por atuação do mecanismo proposto por Vogel.

Com o objetivo de analisar o crescimento globular em meio líquido e fornecer mais dados para uma melhor compreensão no assunto, acrescentamos uma idéia geral dos mecanismos de evolução de estruturas dendríticas:

Fenômenos de engrossamento de dendritas - "Coarsening"

Durante a formação dendrítica, iniciada logo após os primeiros estágios de crescimento de um sólido, o ramo principal em crescimento desenvolve ramificações laterais, que são acompanhadas de fenômenos naturais de engrossamento.

O espaçamento entre os braços primários, secundários e terciários depende das condições de solidificação. Em velocidades de crescimento elevadas, podem formar-se apenas ramificações secundárias, mas, à medida que a velocidade diminui, desenvolvem-se também ramificações terciárias. O espaçamento interdendrítico varia em diferentes estágios de solidificação, devido a efeitos de engrossamento e crescimento.

A força motriz do engrossamento dendrítico é a redução de superfícies internas ao sistema pelo aumento da relação volume sólido/área da interface sólido-líquido. Esta redução é consequência da transferência preferencial de massa, de superfícies sólidas curvas para planas, ou de superfícies com reduzido raio de curvatura para outras com alto raio de curvatura.

Mortensen sugere que os mecanismos de engrossamento de ramos dendríticos podem ser divididos em dois grupos, os quais são esquematizados na figura II.2 (42):

a) engrossamento segundo mecanismos de Ostwald ("ripening"):

Neste mecanismo ocorre dissolução de braços dendríticos menores, difusão de soluto no meio líquido e incorporação de soluto em braços dendríticos mais grosseiros. O resultado da atuação deste mecanismo é a redução geral do número de braços e aumento do espaçamento entre eles.

Há uma predominância deste mecanismo para frações sólidas mais baixas, ocorrendo em maior intensidade no início da solidificação (42).

b) engrossamento segundo mecanismo de coalescência:

Este mecanismo é caracterizado pela aglomeração de braços dendríticos devido à deposição preferencial de soluto em regiões de curvatura côncava, ou da aproximação de duas superfícies e conseqüente contato. O resultado é a supressão de superfícies de separação, levando à coalescência de dois ou mais braços em um só de maior dimensão.

A taxa de difusão do soluto no meio líquido, entre os braços dendríticos, é apontada em todos os estudos como a responsável pela evolução do engrossamento dendrítico (42).

Na reofundição, a presença de agitação estimula difusão no meio líquido, que por sua vez estimula os mecanismos de engrossamento, resultando nas estruturas globulares observadas.

4. PROPRIEDADES DA PASTA E DO SÓLIDO REOFUNDIDOS

4.1. PROPRIEDADES DA PASTA

Uma consequência da morfologia globular das pastas metálicas reofundidas é o estabelecimento de um escoamento característico, segundo leis conhecidas da reologia.

Mehrabian e Joly (19) apresentam, em 1976, um estudo sobre o comportamento reológico das pastas reofundidas de ligas de Pb-Sn, estabelecendo o comportamento viscoso como sendo não-Newtoniano e tixotrópico.

Fluidos não-Newtonianos apresentam um comportamento de escoamento, onde a relação tensão aplicada X taxa de cisalhamento não é linear. Nos fluidos Newtonianos a viscosidade é constante para qualquer tensão, e pode ser obtida pela relação $\tau / \dot{\gamma}$ (τ e $\dot{\gamma}$ são respectivamente a tensão e a taxa de cisalhamento aplicadas).

Em fluidos não-Newtonianos, o parâmetro comumente utilizado para definir seu comportamento viscoso é a viscosidade aparente, relação $\tau / \dot{\gamma}$ para uma especificada condição.

Assim, pastas metálicas reofundidas apresentam reduzida fluidez quando submetidas a baixas tensões; no entanto, sob altas tensões, apresentam um escoamento semelhante a líquidos, apresentando alta fluidez.

A figura II.3 (a) apresenta curvas típicas de variação da viscosidade de pastas reofundidas submetidas a diferentes taxas de cisalhamento, em função da fração sólida da pasta, segundo resultados de Joly e Mehrabian (19). Pode-se notar que pastas contendo fração sólida até da ordem de 60 % podem escoar facilmente, se submetidas a taxas de cisalhamento elevadas.

O comportamento tixotrópico do escoamento, apresentado pelas pastas metálicas reofundidas, significa que a viscosidade aparente, além de depender da tensão aplicada, depende, também, do tempo de aplicação desta tensão. Assim, para um determinada tensão, a pasta apresenta uma definida viscosidade aparente; se a tensão for repentinamente modificada, a resposta não é imediata, isto é, o novo valor de viscosidade aparente somente é atingido após um certo tempo. Por exemplo, a redução da carga leva à redução da viscosidade aparente através de uma histerese; a área dessa histerese define o grau de tixotropia do material. A figura II.3 (b) ilustra a tixotropia da liga Sn-15%Pb reofundida por Joly e Mehrabian (19).

Esse comportamento viscoso, peculiar, das pastas reofundidas pode ser relacionado com sua estrutura interna.

A explicação dos fenômenos de tixotropia em fluidos é publicada por Moore em 1959 (43): o grau de coesão da estrutura interna do fluido determina sua viscosidade aparente - para altas tensões aplicadas, estruturas internas fortemente coesas podem se tornar desorganizadas, apresentando conseqüentemente uma baixa viscosidade aparente, já reduzidas tensões não são capazes de romper a coesão

estrutural, resultando em alto valor de viscosidade aparente.

Para pastas metálicas reofundidas, a provável coesão estrutural é a interação entre as partículas sólidas globulares, que apresentam alta tendência à aglomeração com o aumento da fração sólida. Os resultados obtidos por Joly e outros autores (4,19,20) podem ser explicados por este modelo.

Pode-se observar pela Figura II.3 (a) que a partir de uma determinada tensão aplicada, a viscosidade cai significativamente, o que pode ser explicado pelo rompimento da coesão entre as partículas, ocorrendo nesse ponto.

Na figura II.3 (b), pode-se observar que para uma dada tensão aplicada, a pasta apresenta um valor determinado de viscosidade, dada pelo equilíbrio entre a tendência de destruir (pela tensão aplicada) e construir (pela coalescência) a coesão da estrutura interna; após retirada a tensão, um determinado tempo é requerido para estabelecimento da nova situação de equilíbrio. Este tempo depende do tipo de coesão a ser refeita na estrutura da pasta.

Ainda com relação as características reológicas da pasta metálica reofundida, podemos salientar e compreender algumas de suas potencialidades: podem ser facilmente manuseadas como sólido e fundidas, sob tensão, como líquidos; e apresentam escoamento não turbulento, conforme filmado por Mehrabian (9).

4.2. PROPRIEDADES DO REOFUNDIDO SÓLIDO

Quanto às propriedades mecânicas do reofundido sólido, estas devem depender fortemente da quantidade relativa da fase globular (sólido primário homogêneo e dútil), e da fase dendrítica (líquido da pasta, solidificado convencionalmente em fases secundárias, mais frágeis) (5,27).

O assunto é ainda tema de estudos e pouca informação pode ser obtida na literatura.

Segundo Mehrabian (44) em trabalho publicado em 1977, reofundidos da liga 905 a base de cobre, contendo 70 % de fração sólida, apresentam limite de resistência à tração e alongamento levemente superiores à liga fundida convencionalmente; enquanto o limite de escoamento é levemente reduzido no reofundido.

Já em trabalhos mais recentes, de 1990, Ichikawa (26,27) observa altos valores de alongamento para a super-liga à base de Ni (65% Ni, 7%Co, 11% Cr....) no estado reofundido, contendo 42% de sólido.

A tabela II.1 sumariza os resultados dos autores citados.

O perfeito entendimento do comportamento mecânico de reofundidos ainda deve ser buscado; no entanto é reconhecido que o reofundido apresenta reduzida porosidade e ausência de vazios de contração quando injetados sob pressão.

5. APLICAÇÃO DA REOFUNDIÇÃO / POTENCIALIDADES

5.1. NA INJEÇÃO DE METAIS DE ALTO PONTO DE FUSÃO

A possibilidade de injeção de material semi-sólido, portanto, à temperaturas menores que as requeridas para injeção de líquidos, abre um vasto campo de utilização da reofundição. Vantagens da injeção de semi-sólido: maior produtividade e maior vida útil das matrizes; ausência de turbulência no preenchimento de matrizes e, portanto, minimização de oclusão de gases no fundido; melhor acomodação da estrutura interna às tensões de contração na solidificação, portanto, ausência de vazios e de trincas de contração (6,9).

Pecas de alta qualidade, de aços inoxidáveis, aços ferramenta, ligas de Co, ligas de Ni, super-ligas, têm sido analisadas para a reofundição (45,46). Ligas não-ferrosas, tradicionalmente utilizadas em injeção (Al-Si, Al-Cu, Sn-Pb) podem ser produzidas com vantagens, à partir de pastas metálicas.

5.2. NA PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS

Compósitos metal/não-metal de alta resistência mecânica e ao desgaste, podem ser produzidos com facilidade e vantagens através da utilização de pastas metálicas. A adição de SiC, Al_2O_3 , MnO, Boro, Carbono, vidro, na forma de partículas ou fibras, pode ser facilmente incorporada à pasta metálica: a alta viscosidade da pasta previne a aglomeração, flutuação ou sedimentação das fibras ou partículas adicionadas (9,16).

5.3. NA PURIFICAÇÃO DE METAIS

Conforme apresentado anteriormente, a pasta metálica é constituída de uma suspensão de sólido globular com baixos níveis de soluto, envoltos por líquido contendo altos teores dos elementos de liga ou impurezas.

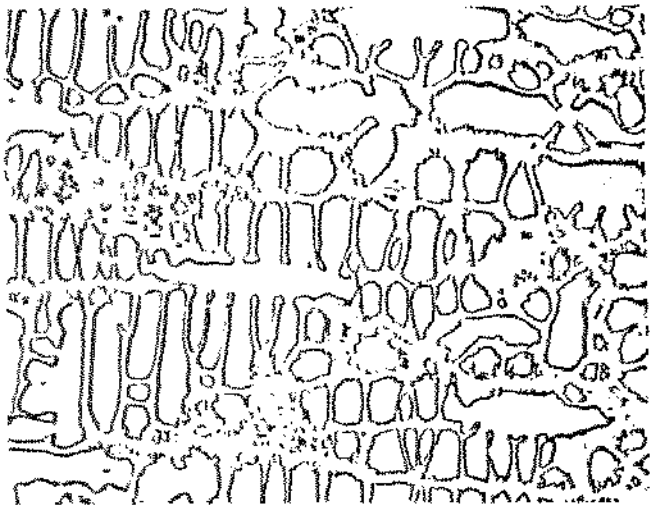
Alguns pesquisadores sugerem a possibilidade de purificação de metais com o uso de pastas reofundidas, através da separação dos glóbulos de alta pureza do restante do líquido contendo impurezas e soluto: tal separação poderia ser processada por decantação do sólido e posterior filtragem do líquido, ou por jateamento da pasta por borriço de gases inertes, ou ainda por processo de compressão da

mistura, com a finalidade de expulsar o líquido remanescente (9).

Não há, no entanto, notícias do desenvolvimento de tais processos.

a

b



2

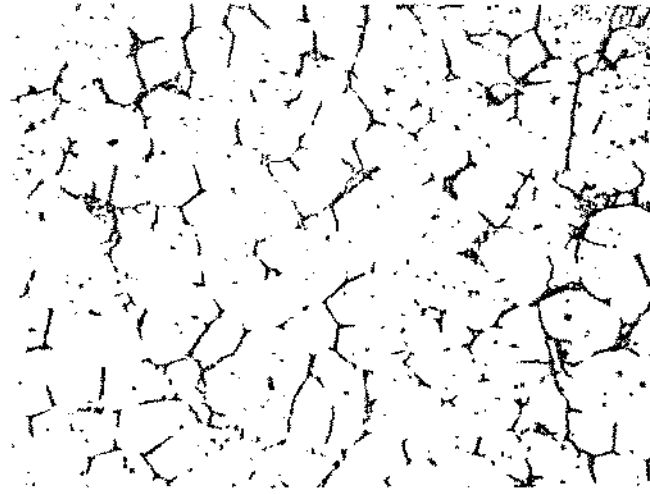


Figura II.1 - Micrografias das ligas fundidas (a) convencionalmente;
(b) reofundidas.
(1) Bronze 905 (Cu, Sn, Zn). 75x (18);
(2) Al 6061 (Si, Cu, Mg, Cr). 55x (17).

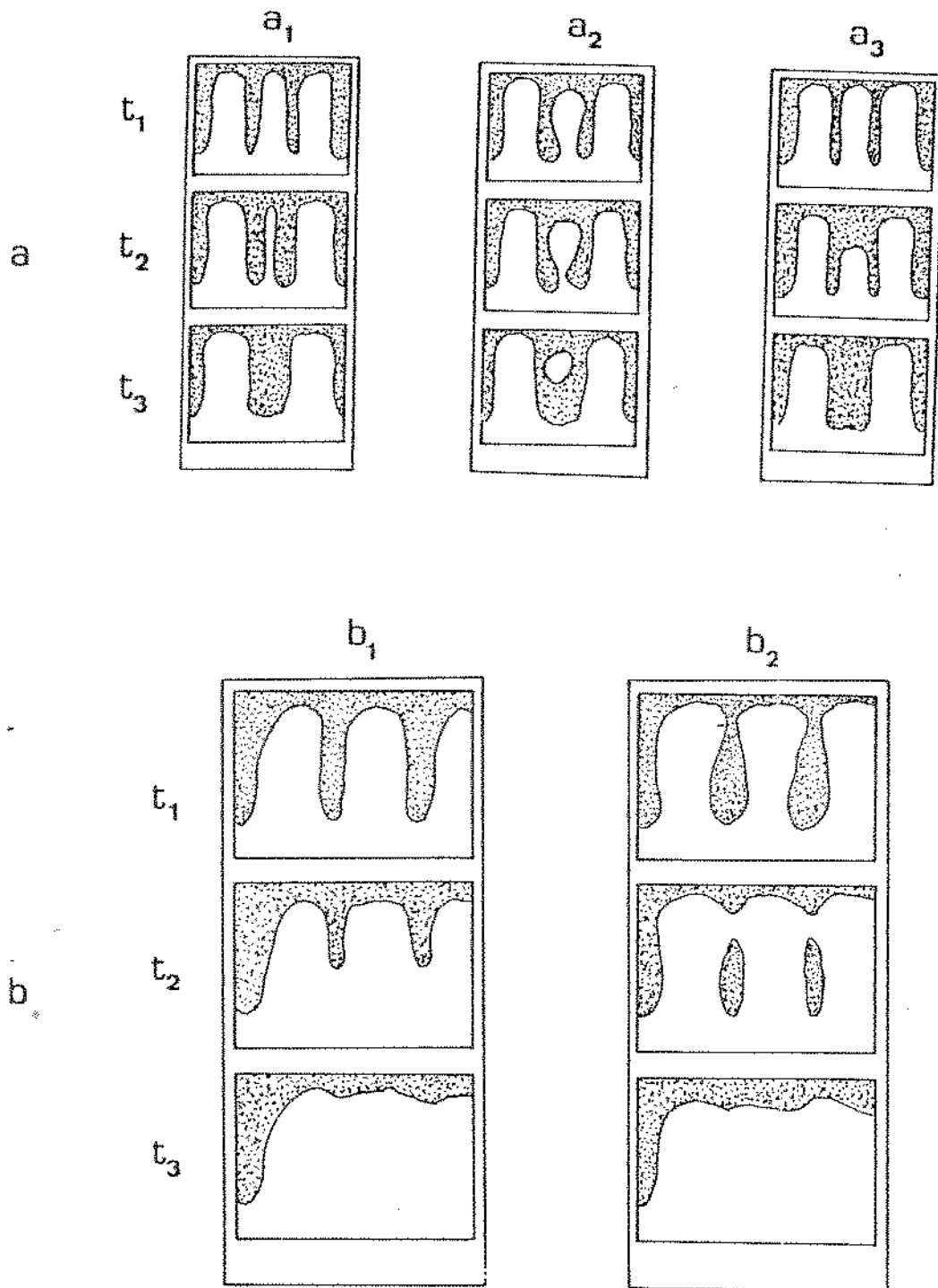


Figura II.2 - Mecanismo de engrossamento dendrítico

(a) Ostwald "ripening"

a₁ e a₂ - modelo de Kattamis e Flemings (47,48);

a₃ - modelo de Kahlveit (49);

(b) Coalescência

b₁ - modelo de Kirkwood e Young (50);

b₂ - modelo de Genda (51).

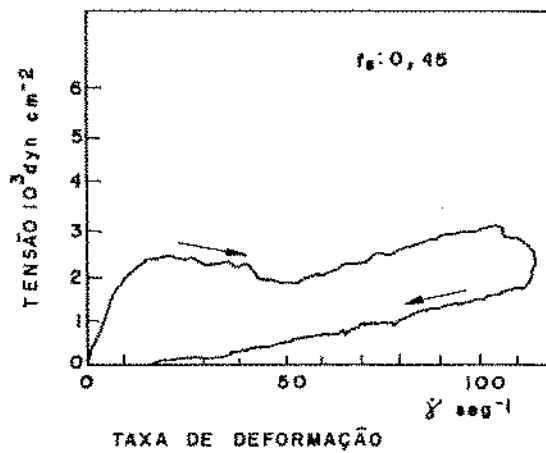
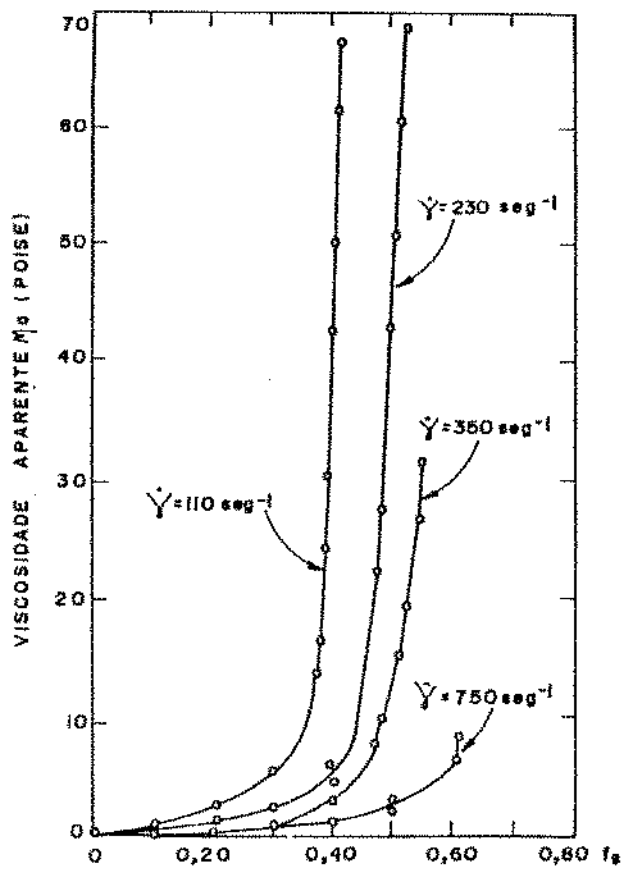


Figura II.3 - Propriedades reológicas da liga Sn-15%Pb reofundida por Joly e Mehrabian (19).

- (a) Viscosidade aparente em função da fração sólida e da tensão aplicada;
- (b) Relação entre $\tau / \dot{\gamma}$, com uma certa fração sólida; e a formação da histerese quando retirada a carga aplicada.

TABELA II.1 - Propriedades mecânicas de ligas solidificadas
convencionalmente e refundidos (26,44).

LIGA	PROPRIEDADES	LIMITE DE ESCOAMENTO	LIMITE DE RESISTENCIA	% ALONGAMENTO
	ESTADO			
Cu 985	REFUNDIDO	19 ksi	47 Ksi	38
	CONVENCIONAL	22 Ksi	45 Ksi	25
SUPER LIGA Ni	REFUNDIDO	-----	118 MPa	91
	CONVENCIONAL	-----	137 MPa	11

CAPÍTULO III

OBTENÇÃO DE PASTAS REOFUNDIDAS

1. PROCESSOS DE OBTEÇÃO DE PASTAS REOFUNDIDAS

Pastas metálicas reofundidas são comumente produzidas em equipamentos especialmente projetados e construídos para esse fim. Objetiva-se a formação de uma estrutura globular ao invés de dendritas, pela interferência na solidificação do material.

Os equipamentos comumente utilizados para produzir essa interferência fazem uso de agitação forçada aplicada ao sistema constituído por partículas sólidas e líquidas, durante um determinado estágio de sua solidificação.

A agitação pode ocorrer de maneira contínua ou isotérmica. Pode-se dizer que a agitação é contínua quando se inicia a uma temperatura acima da temperatura líquidus e cessa a uma temperatura previamente determinada, entre a temperatura líquidus e sólidus, a partir da qual o material é descarregado do reator. A agitação isotérmica é iniciada a uma temperatura definida entre a temperatura líquidus e sólidus e mantida constante por um determinado tempo, após o qual o material é descarregado em moldes refrigerados, a fim

de promover uma rápida solidificação da fase ainda líquida. Para os dois processos a temperatura de descarregamento define a fração sólida presente na pasta produzida.

A Figura III.1 esquematiza a reofundição com agitação isotérmica e contínua.

As pastas descarregadas e solidificadas em moldes refrigerados podem ser armazenadas para posterior utilização. Neste caso devem ser reaquecidas à temperatura da qual foram descarregadas do reator, para readquirir o estado pastoso, sendo então processadas. Neste caso o processo é chamado tixofundição (ou tixoforjamento, etc).

No caso da utilização da pasta diretamente do reator que a produziu, o processo é chamado reofundição (ou reoforjamento, etc).

A Figura III.2 esquematiza processos de reo e tixofundição.

Reatores para reofundição podem ainda produzir pastas metálicas de maneira contínua ou estanque, isto é, volumes definidos e limitados de material (8).

2. EQUIPAMENTOS PARA REOFUNDIÇÃO

A agitação do líquido em solidificação, para a produção de pastas pode ser promovida por ação mecânica ou eletromagnética.

2.1. EQUIPAMENTOS ENVOLVENDO AGITAÇÃO MECÂNICA

A. EQUIPAMENTOS COM ROTOR EXTERNO

A Figura III.3 esquematiza um equipamento, tipo viscosímetro de Couette, adaptado para altas temperaturas e utilizado por Spencer (4) para o estudo da influência da agitação em líquidos em solidificação, transformando a estrutura dendrítica em globular.

O equipamento consiste basicamente de um cadinho refrigerado contendo em seu interior um eixo cilíndrico ou cônico, concêntrico com o cadinho, de modo que apenas um estreito espaço anular possa ser ocupado pelo líquido. O líquido é vazado no equipamento a uma temperatura apropriada (acima da temperatura líquidus); ao ser atingida a temperatura desejada, inicia-se a rotação do cadinho, enquanto o cilindro interno é mantido fixo. As forças cisalhantes no líquido provocam a modificação da estrutura em solidificação.

Há um grande desgaste do cadinho e do cilindro, que deverão ser revestidos com materiais resistentes à abrasão (óxidos cerâmicos). O espaço anular, entre o cilindro interno e o cadinho, varia de 3 a 9 mm (19). Segundo Flemings (8), o sistema com estas características garante a presença de um cisalhamento uniforme no interior do líquido, e conseqüentemente homogeneidade na estrutura pastosa obtida. As velocidades variam de reduzidas velocidades (0.16 rpm) a

altas velocidades (1000 rpm).

Segundo Vogel velocidades superiores a 1000 rpm podem ocasionar retenção de ar no material (39).

Estes sistemas podem ser utilizados tanto para a obtenção de quantidades finitas e definidas, quanto para a produção contínua de pastas reofundidas.

Após cessada a agitação, a pasta metálica deve ser vazada em moldes refrigerados, a fim de promover uma rápida solidificação da fase ainda líquida.

B. EQUIPAMENTOS COM ROTOR INTERNO

A partir de equipamentos tipo viscosímetros foram desenvolvidos outros, cuja agitação passa a ser promovida por um rotor centrado no interior do cadinho, mantido agora fixo.

Também aqui, o cadinho e o rotor são revestidos por materiais resistentes à abrasão; o espaço anular é reduzido a 6 mm.

O processo pode ser utilizado tanto na produção de quantidades estanques de pasta, como se presta, com eficiência, à sua produção contínua. O rotor pode ou não ser retirado do cadinho, para se proceder a descarga do material.

Estes equipamentos podem ter uma câmara superior, contendo o

metal a uma temperatura acima da líquidus. Essa câmara funciona como um reservatório de material, que será processado a fim de produzir a pasta reofundida. Quando tal câmara está presente, podemos identificar o equipamento como sendo um sistema de câmara dupla. Sempre existirá uma câmara inferior, cilíndrica ou cônica, onde efetivamente se processa a reofundição.

As velocidades de agitação podem atingir velocidades superiores aos equipamentos com rotores externos.

A Figura III.4 (a-c) mostra alguns equipamentos que utilizam rotor interno na agitação do líquido. Na figura (a) é mostrado um equipamento para obtenção de uma quantidade definida de pasta, desenvolvido por Lee (36), já sistemas contínuos utilizados por Flemings (8), Mehrabian (9), Kievits (52), são mostrados nas figuras que se seguem.

Tais equipamentos apresentam maior operacionalidade e eficiência na produção de pastas metálicas do que o utilizado por Spencer, ou seja, equipamento com rotor externo, tendo sido utilizados com sucesso na reofundição de metais ferrosos e em ligas de alto ponto de fusão, como super ligas à base de Co, conforme indicado por Mehrabian (44).

Apesar da facilidade de operação, com relação aos equipamentos tipo viscosímetro com rotor externo, os sistemas providos de rotor interno apresentam, como os anteriores, algumas limitações: difícil controle da temperatura na câmara inferior, a qual aliada à reduzida dimensão do espaço no qual o líquido é cisalhado, produz frequentes

interrupções no processamento, por descontrole da fração sólida resultante.

Mesmo com inconvenientes operacionais, estes processos se constituem nos mais populares no ramo da reofundição, para a produção de pastas de diferentes metais e ligas reofundidas.

C. EQUIPAMENTOS COM PROPULSORES

Equipamentos contendo propulsores tipo pás, podem também ser utilizados para a produção de reofundidos. A agitação no metal semi-sólido contido no cadinho é promovida por ação das pás, por um tempo e à temperatura previamente determinados. Bons resultados foram obtidos com este tipo de equipamento, por Mehrabian e outros (16) (30)(31).

Estes equipamentos foram inicialmente desenvolvidos para a produção de compósitos metal reofundido-não metal, pois em equipamentos tipo viscosímetros, devido ao pequeno espaço anular, havia impossibilidade de adição de partículas não metálicas à pasta.

Os propulsores, que podem ser constituídos de uma ou mais pás, são revestidos com materiais resistentes à abrasão, podendo ou não ser retirados do cadinho após o processamento. As velocidades de rotação utilizadas variam de 100 a 1000 rpm.

A Figura III.5 mostra alguns desses equipamentos desenvolvidos

Pode-se observar a semelhança entre os distintos projetos, sendo somente variados geometria, distribuição e número de pás.

Mehrabian introduz uma modificação no sistema, ao promover rotação simultânea do cadinho contendo o líquido. Obtém pastas reofundidas, às quais adiciona óxidos cerâmicos e carbonetos para a produção de compósitos. O sistema duplo de agitação parece ser mais efetivo na promoção da dispersão dessas partículas sólidas não-metálicas, no metal semi-sólido (16).

O principal inconveniente apresentado nos equipamentos com propulsores é a não uniformidade da agitação promovida, em todo o volume de material, comprometendo o controle e a qualidade do reofundido obtido.

2.2. PROCESSOS ENVOLVENDO AGITAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Neste processo a agitação do líquido é promovida por um campo magnético envolvendo o metal em solidificação.

O sistema é mostrado na figura III.6. O equipamento é constituído basicamente de uma câmara superior, onde é mantido o metal líquido, e uma inferior onde é vazado o material à temperatura desejada, e onde efetivamente se processa a solidificação.

A câmara inferior, fabricada em material não magnético (Cu, aço inoxidável), é envolvida por espiras que produzem um campo magnético quando ligadas a um motor bipolar, bi ou trifásico. O campo magnético provoca correntes de fuga no interior do líquido em solidificação, provocando forte agitação e modificando a morfologia de crescimento do sólido.

Este processo proposto por Winter (53), apresenta algumas limitações importantes: o volume de material a ser produzido é pequeno, já que as correntes induzidas pelo campo magnético promovem uma agitação vigorosa e eficiente somente nas regiões próximas às paredes da câmara; o efeito Joule acarreta aquecimento do metal, que deve ser retirado do sistema, para que não interfira na fração sólida desejada; o custo do processo é elevado.

Como pode ser visto, diversos equipamentos foram desenvolvidos para produção de reofundidos, apresentando vantagens e limitações uns sobre os outros.

A necessidade de produção de pastas de boa qualidade, com reduzidas limitações de processamento, é força motriz para o contínuo aprimoramento de reatores para reofundição.

3. INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE PROCESSO NA ESTRUTURA

REOFUNDIDA

A estrutura globular reofundida pode ser produzida pela ativação dos mecanismos descritos nos modelos apresentados anteriormente, atribuídos a Vogel e Kattamis. A atuação destes mecanismos depende dos parâmetros de processamento utilizados, quais sejam:

- temperatura(s) de trabalho;
- tempo de agitação do líquido / sólido;
- velocidade de agitação;
- taxa de resfriamento durante a agitação;
- taxa de resfriamento após vazamento.

3.1. EFEITO DA TEMPERATURA DE TRABALHO

A temperatura na qual a pasta é agitada, no caso de agitação isotérmica, ou a temperatura na qual a pasta é descarregada do reator, no caso de agitação contínua, define a relação entre

quantidades de sólido e líquido presentes no reofundido produzido.

Altas temperaturas de processamento significam baixas frações sólidas, o que pode também significar mais pobre globularização deste sólido. Por outro lado, elevados teores de sólido (reduzida temperatura de processo) pode também acarretar em pobre globularização, principalmente se a agitação for do tipo isotérmica e com reduzidas velocidades (19,29).

3.2. EFEITO DO TEMPO DE AGITAÇÃO

O tempo de agitação do material no reator tem fundamental importância na globularização da estrutura dendrítica em crescimento. Tempos insuficientes podem levar à produção de sólidos com morfologia intermediária entre dendrítica e globular. Por outro lado, tempos elevados de agitação podem levar ao excessivo crescimento das partículas sólidas, por permitir a ocorrência de mecanismos de engrossamento, segundo alguns autores (19).

O efeito do tempo de agitação deve estar diretamente ligado à temperatura e velocidade de agitação: para altas temperaturas (reduzidas frações sólidas), tempos maiores de agitação devem ser requeridos uma vez que há pouca interação entre partículas sólidas; para altas velocidades de agitação, reduzidos tempos de processamento podem ser eficientes para a globularização da estrutura dendrítica.

3.3. EFEITO DA VELOCIDADE DE AGITAÇÃO

A velocidade de agitação influencia fortemente a atuação dos mecanismos de formação e crescimento da estrutura reofundida.

Altas velocidades de agitação significam uma diminuição no diâmetro das partículas do sólido primário. Essa condição desestimula a aglomeração e a coalescência. Ao passo que, baixas velocidades de agitação estimulam os fenômenos de engrossamento, significando um aumento do diâmetro das partículas do sólido primário globular (19,29).

3.4. EFEITO DA TAXA DE RESFRIAMENTO DURANTE A AGITAÇÃO

Utilizando-se processamento para produção de reofundido com agitação contínua, pode-se impor diferentes taxas de resfriamento ao líquido em solidificação, até que a temperatura de descarga seja atingida.

A taxa de resfriamento aplicada ao material pastoso, mantido no reator, modifica a atuação dos mecanismos de formação e crescimento da estrutura reofundida. Altas taxas de resfriamento aplicadas até a temperatura de descarga do material acarreta uma redução no tamanho do sólido primário globular formado, pois há menor atuação destes mecanismos, já que um tempo menor para atingir a temperatura de

descarga é necessário. Baixas taxas de resfriamento significam um aumento no diâmetro das partículas do sólido globular formado, pois mecanismos de engrossamento são incentivados pelo maior tempo requerido para atingir a mesma temperatura de descarga (19).

3.5. EFEITO DA TAXA DE RESFRIAMENTO APÓS O VAZAMENTO

Variações da taxa de resfriamento após o vazamento podem ser impostas tanto nos processos com agitação contínua, como nos processos com agitação isotérmica.

O tempo necessário para atingir a temperatura final de solidificação pode ser maior ou menor, dependendo da taxa de resfriamento imposta ao material descarregado.

Pode-se dizer que altas taxas de resfriamento após o vazamento não acarretam aumento na dimensão das partículas do sólido globular formado, pois mecanismos de crescimento são desestimulados. Baixas taxas de resfriamento após a descarga do material acarretam aumento no diâmetro final das partículas do sólido globular originado e crescimento dendrítico a partir dos glóbulos do sólido primário (19,29).

Deve ser comentado a forte interdependência entre os efeitos dos parâmetros de processamento; pode-se, como consequência, conseguir um mesmo efeito na estrutura final do reofundido com a manipulação de diferentes parâmetros (19).

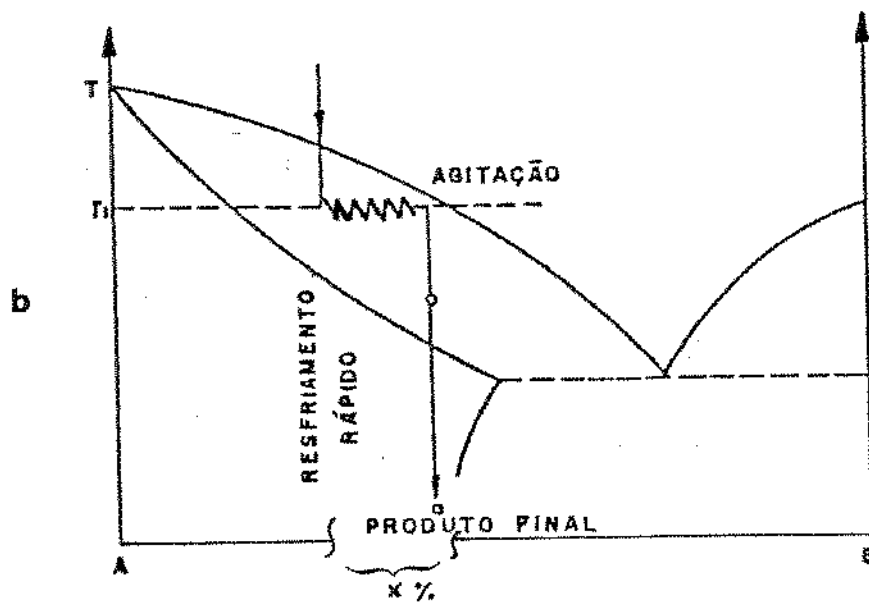
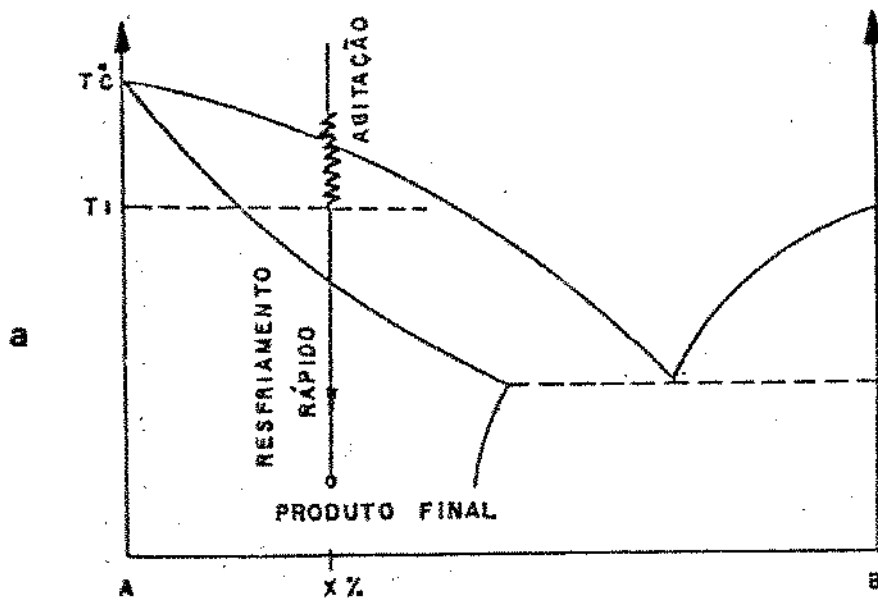
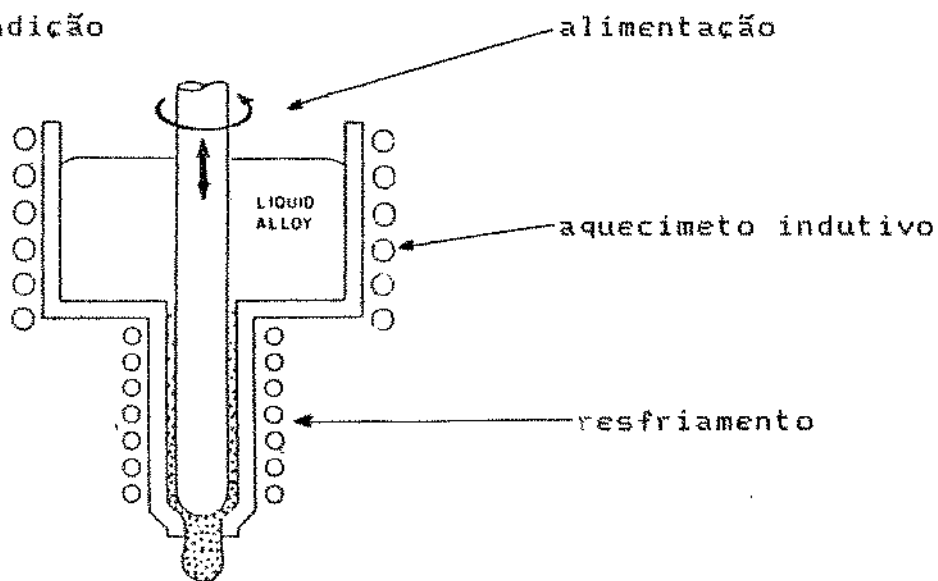
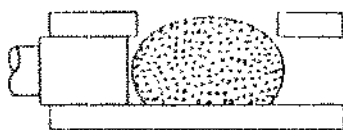


Figura III.1 - Esquema mostrando o resfriamento em dois processos de solidificação:
 (a) Reofundição com agitação contínua;
 (b) Reofundição com agitação isotérmica.

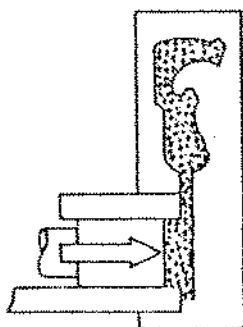
(a) reofundição



(b) pasta na câmara de injeção



(c) pasta injetada na matriz



(d) produto final

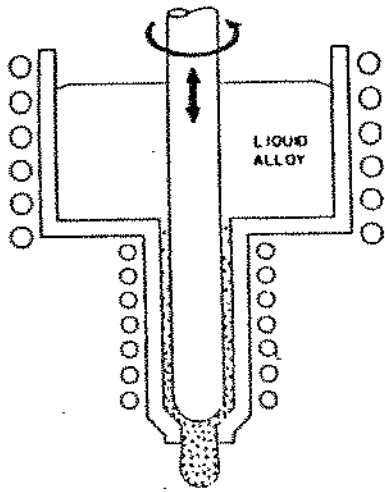


(1)

Figura III.2 - Esquema dos processos (8)

- (1) Reofundição;
- (2) Tixofundição.

(a) reofundição



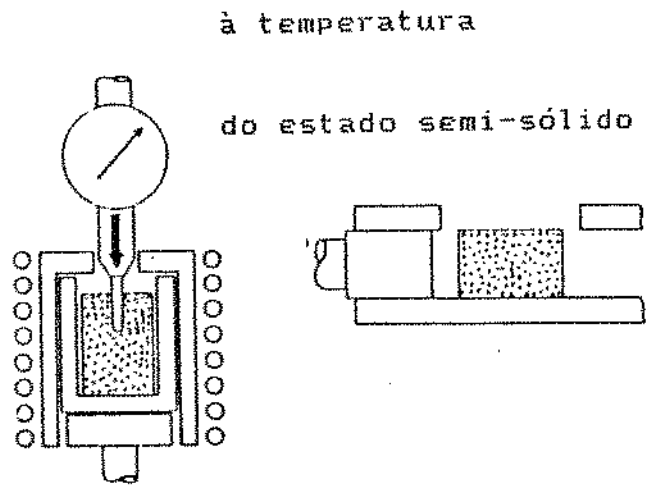
(b) lingote reofundido



(c) lingote seccionado



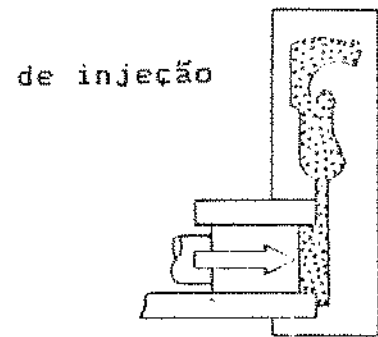
(d) reofundido reaquecido



à temperatura

do estado semi-sólido

(e) reofundido na máquina



de injeção

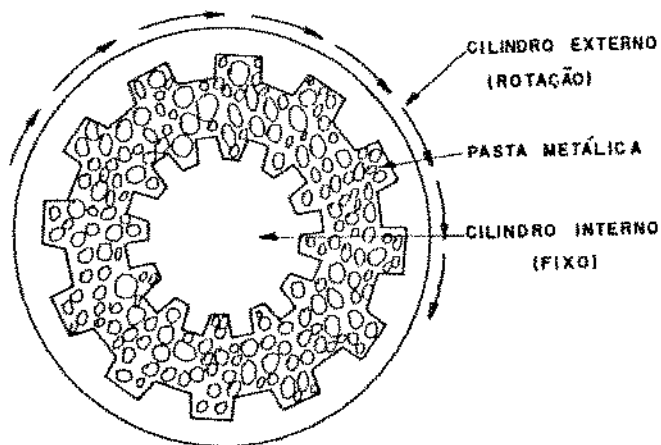
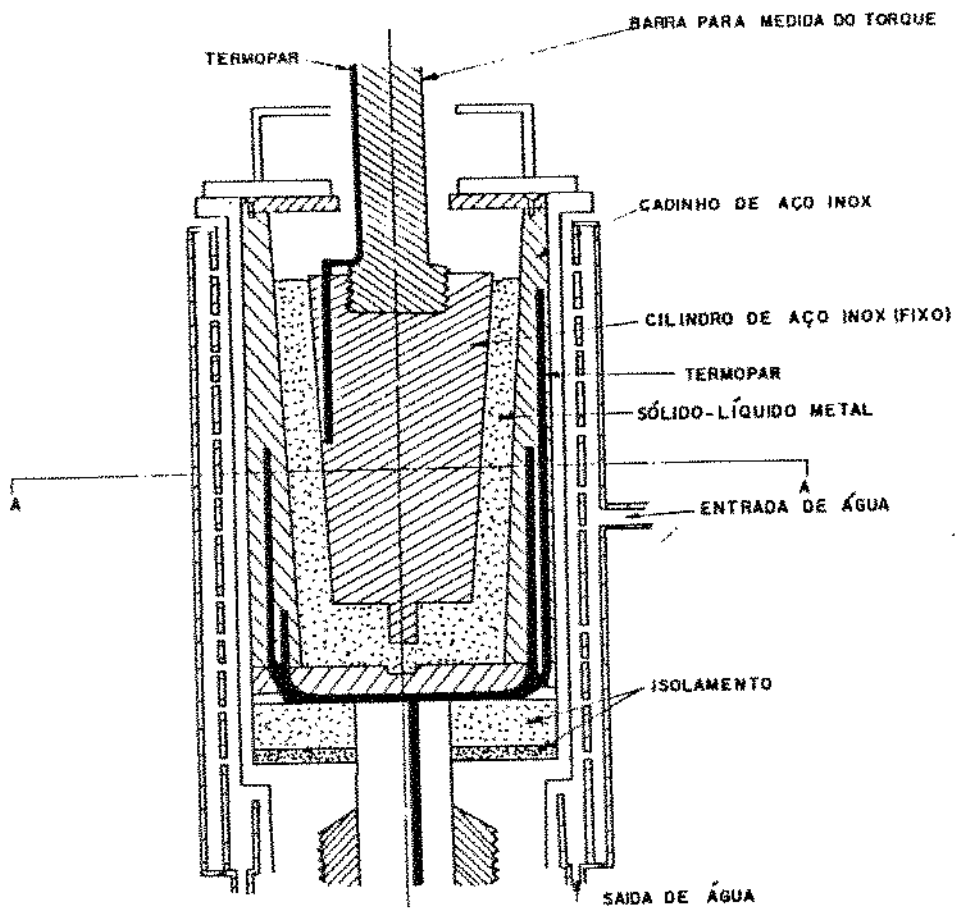
(g) produto

final



(2)

(Cont.) Figura III.2



CORTE A-A

Figura III.3 - Equipamento tipo viscosímetro de Couette, com rotor externo - adaptado por Spencer (4.19) para utilização em processos de reofundição.

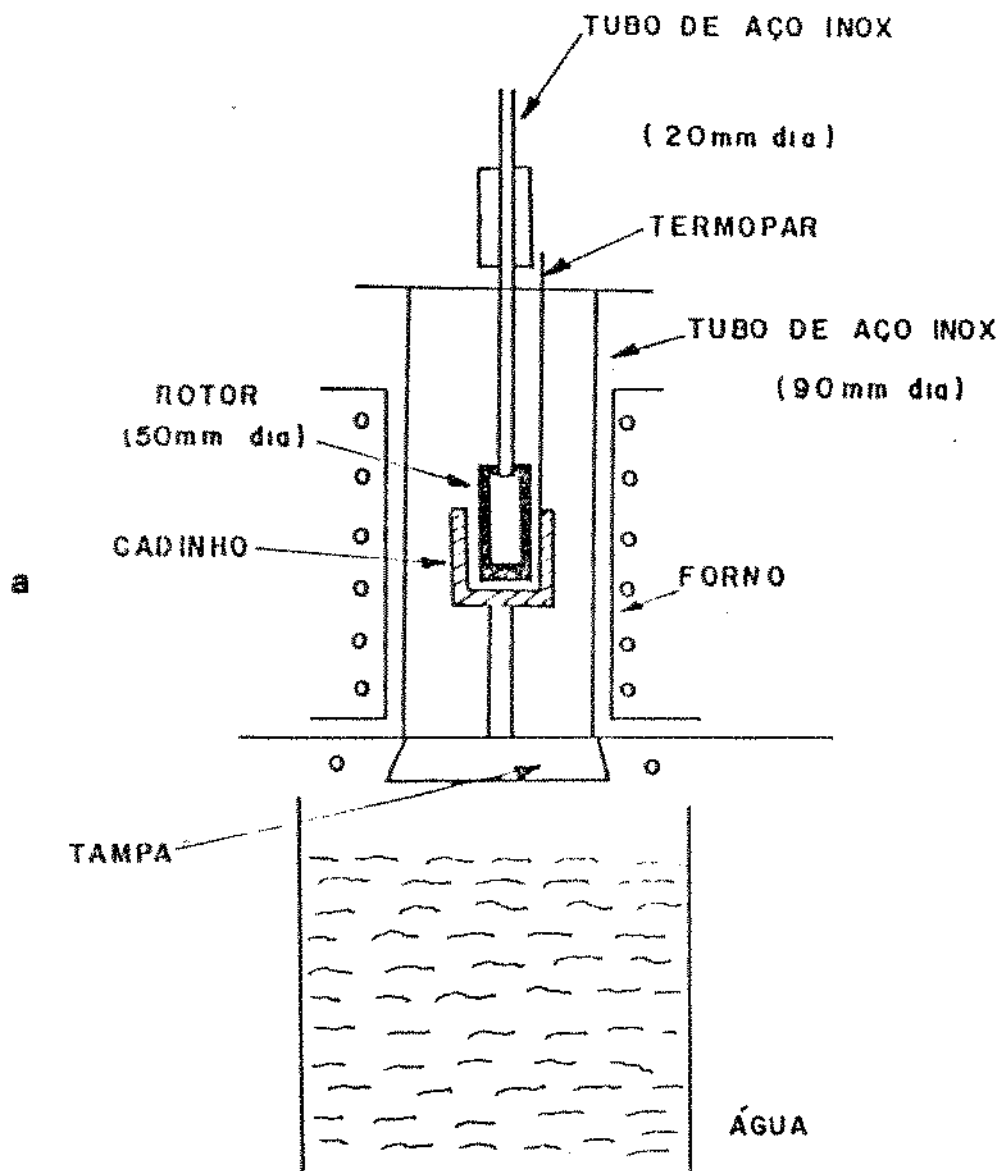
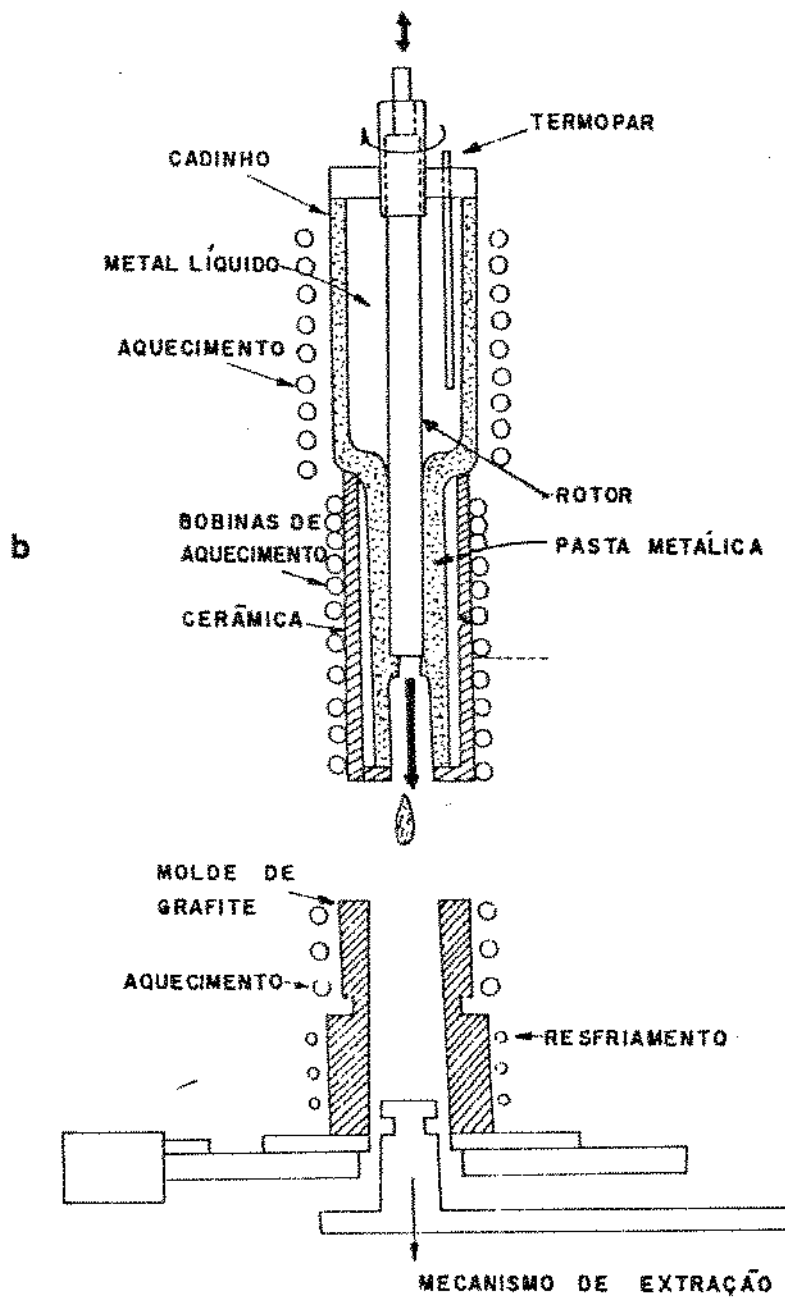
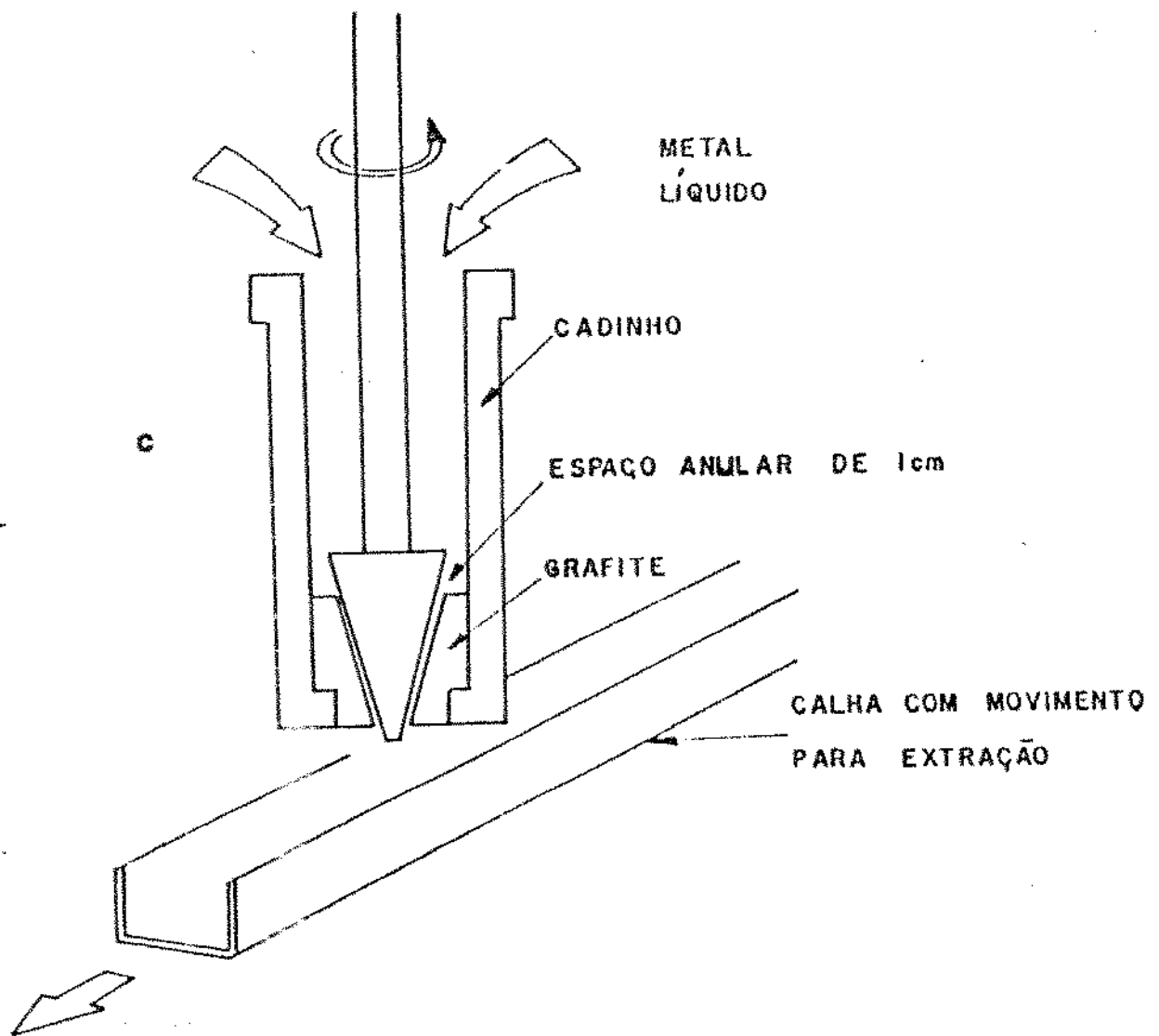


Figura III.4 - Equipamento, tipo viscosímetro, com rotor
 (a) tipo estanque - Lee (36);
 (b) tipo cilíndrico contínuo - Flemings (8),
 Mehrabian (9) e outros.
 (c) tipo cônico contínuo - Kievits (52);



(cont.) Figura III.4



(cont.) Figura III.4

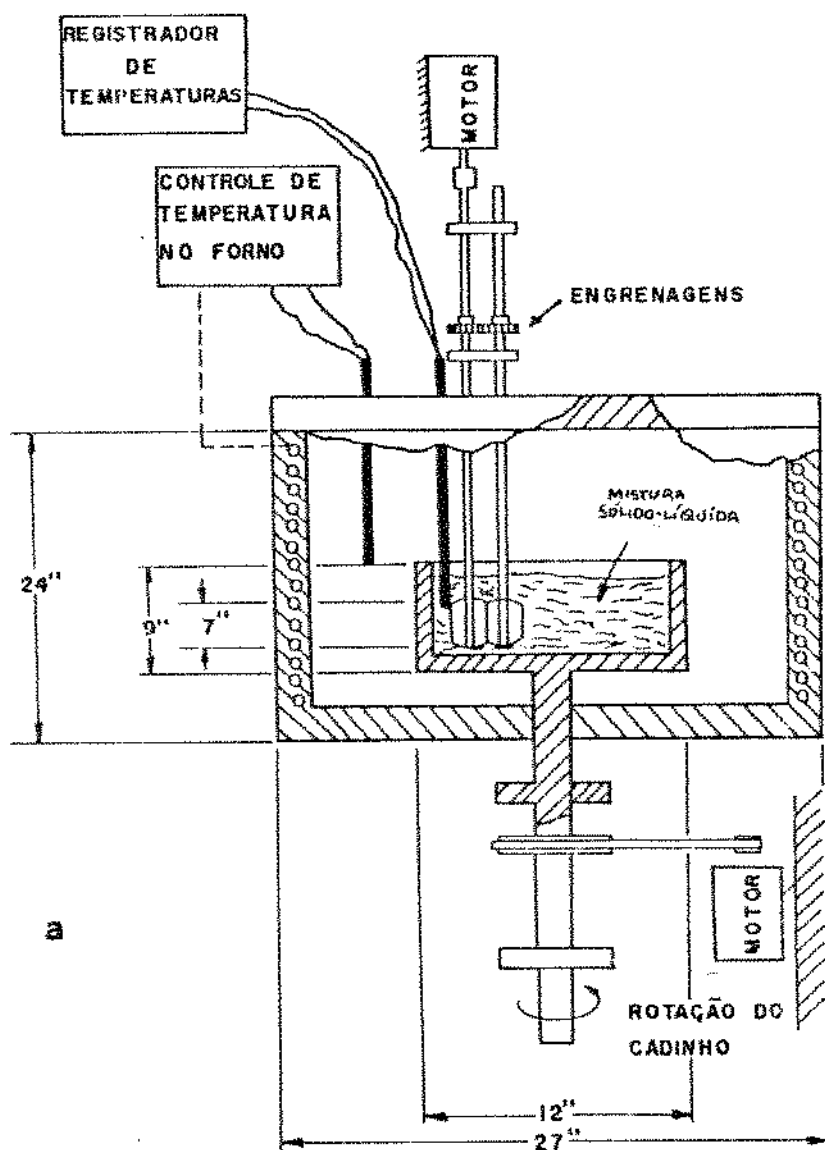
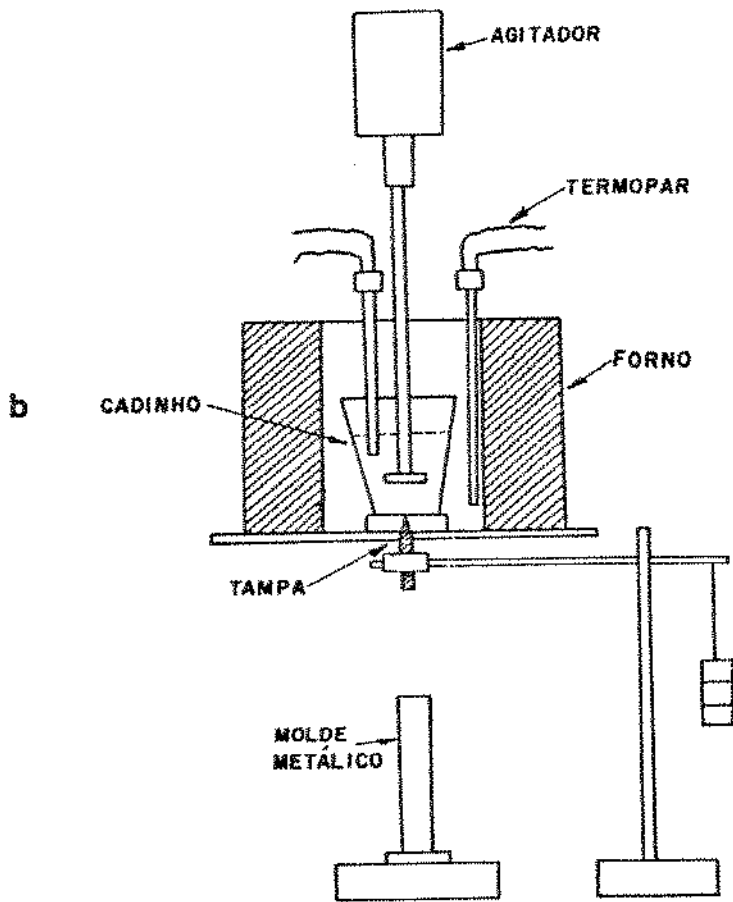
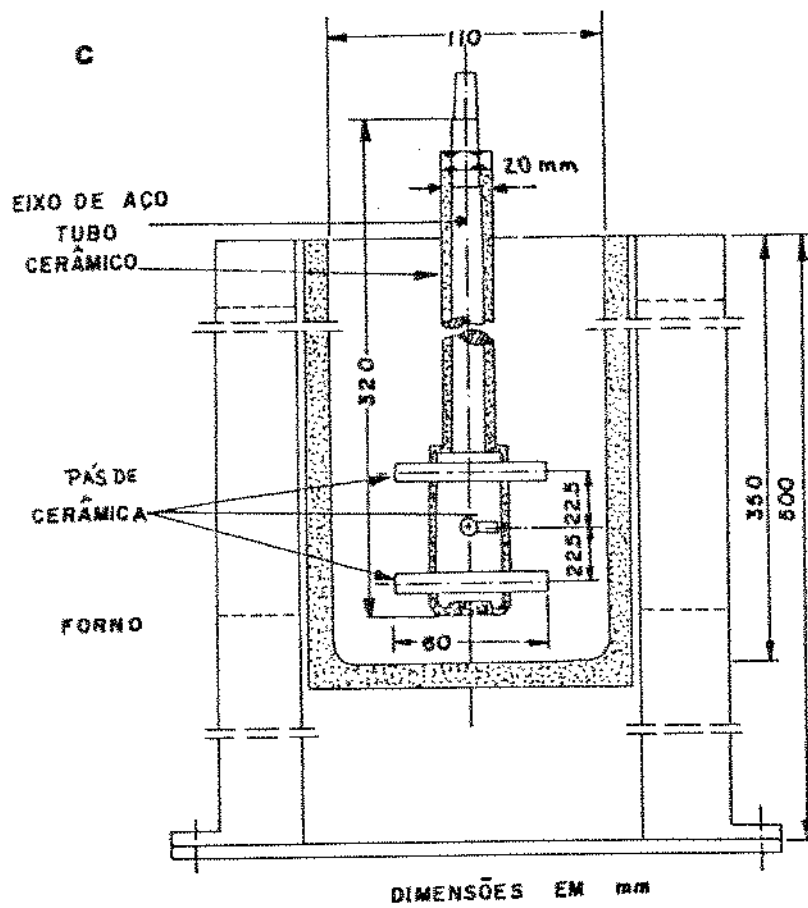


Figura III.5 - Equipamentos com propulsores utilizados na reofundição:

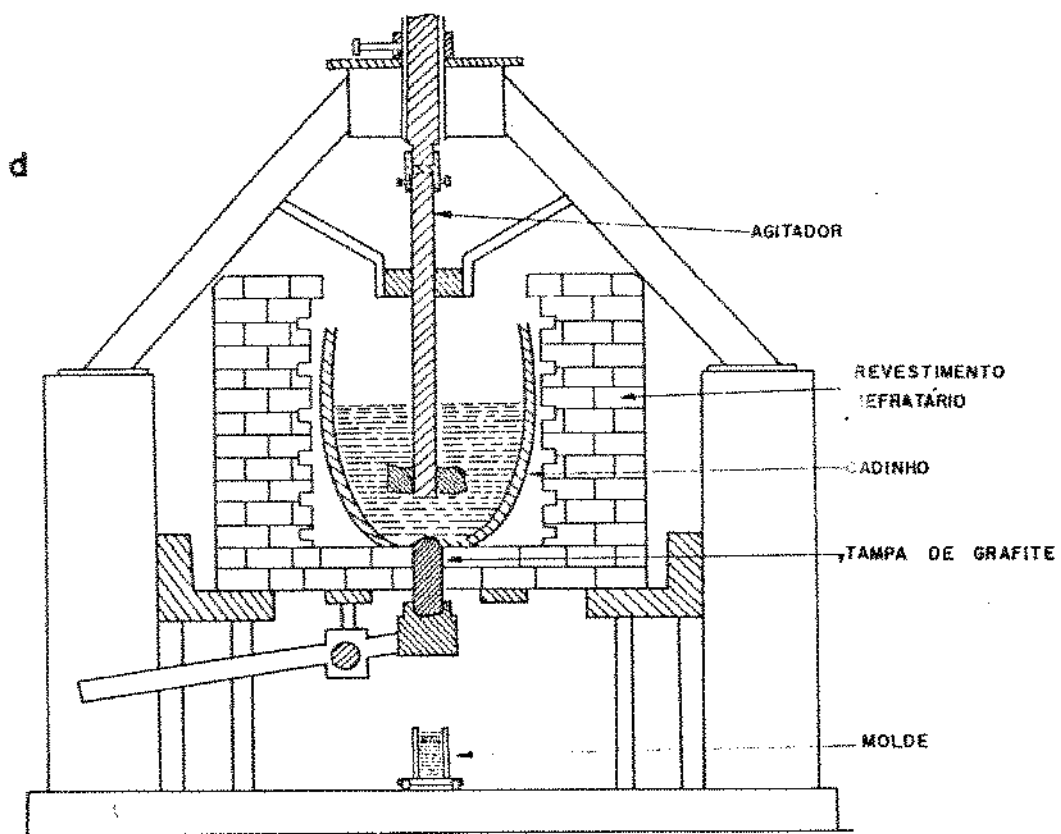
- (a) Mehrabian (9,16);
- (b) Prasad (30);
- (c) Assar (29);
- (d) Banerji (54);
- (e) Fascetta (55).



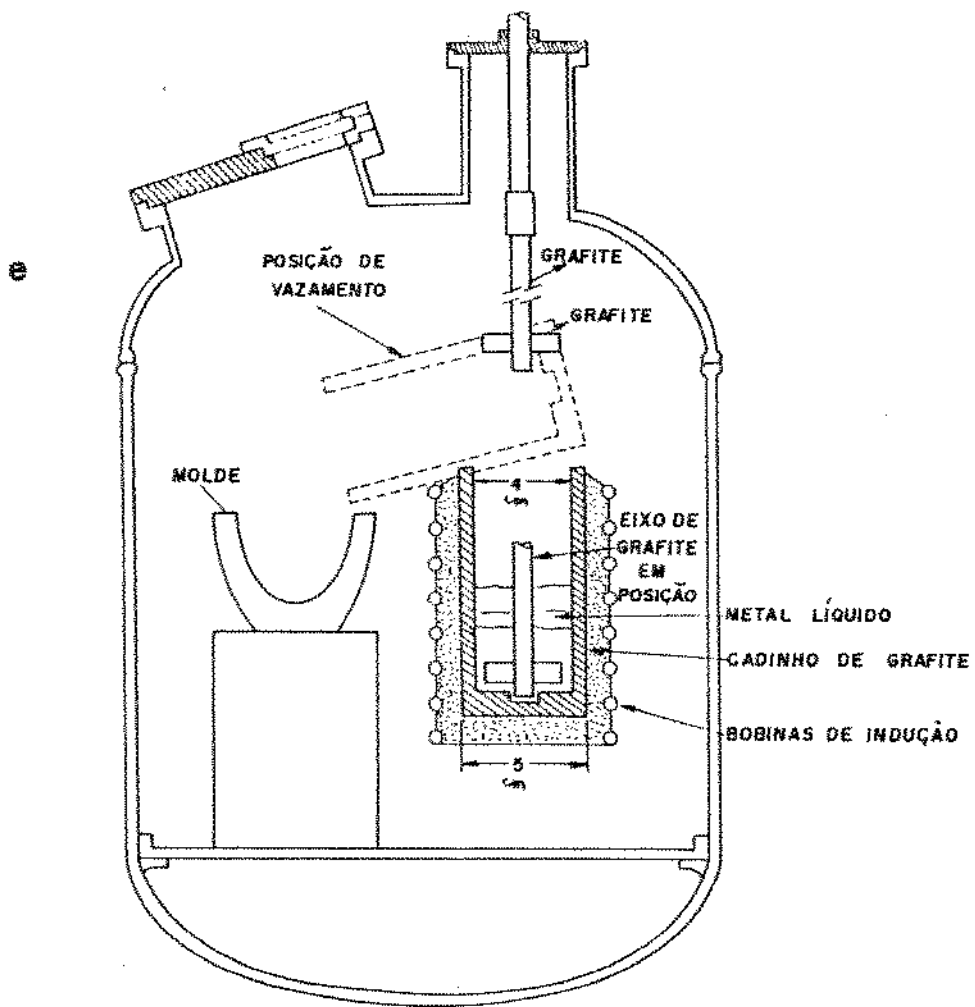
(cont.) Figura III.5



(cont.) Figura III.5



(cont.) Figura III.5



(cont.) Figura III.5

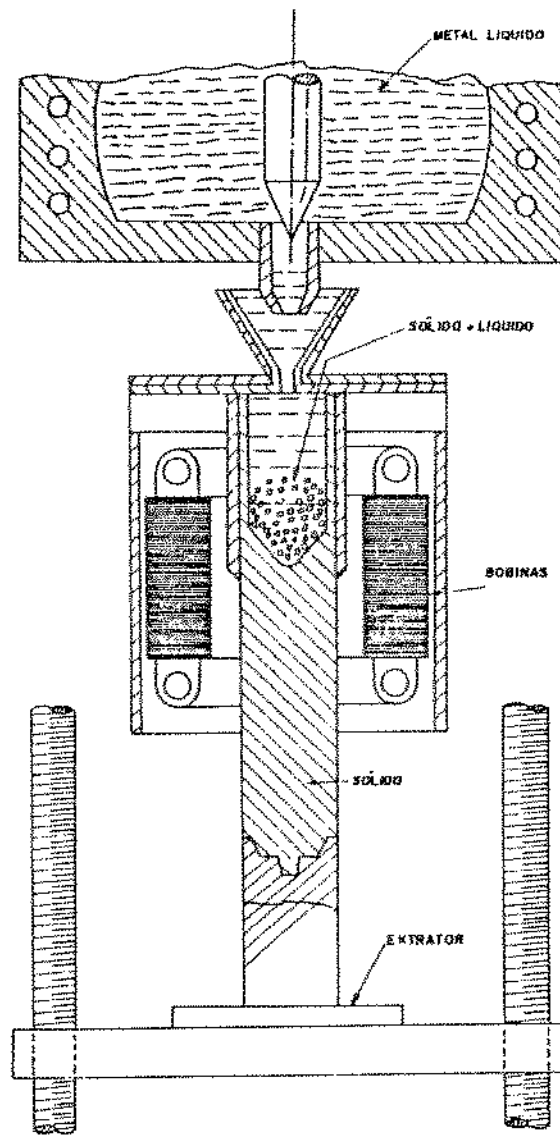


Figura III.6 - Equipamento para reofundição com agitação eletromagnética - Winter (53).

CAPÍTULO IV

PROJETO E CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO

1. NECESSIDADES

Como ponto de partida para o projeto do equipamento a ser construído, estabeleceu-se os seguintes parâmetros como necessidades a serem cumpridas:

* equipamento a ser utilizado para a produção de pastas reofundidas de metais e ligas com temperaturas de trabalho da ordem de 650 °C.

* equipamento para a produção de quantidades definidas de pastas reofundidas, da ordem de 80 cm³ por corrida ;

* equipamento básico para a construção de um reator de produção contínua de pastas;

* equipamento básico para a construção de reômetro, a ser utilizado para estudos de propriedades viscosas de pastas metálicas reofundidas.

Com estas necessidades em mente, e levando em conta parâmetros

operacionais e de custo, foi escolhido o tipo de equipamento a ser projetado e construído, conforme item seguinte.

2. TIPO DE EQUIPAMENTO ESCOLHIDO - JUSTIFICATIVAS

Como já apresentado no capítulo III, existem vários tipos de equipamentos e diversas maneiras de se promover agitação em um sistema em solidificação; para a produção de pastas reofundidas:

- agitação com propulsores;
- agitação eletromagnética;
- agitação mecânica promovida por rotor.

A agitação promovida por propulsores não garante homogeneidade na distribuição da taxa de cisalhamento em todo o volume de material em processamento, dificultando o controle da estrutura globular a ser produzida, através da manipulação de parâmetros de processo. A estrutura reofundida obtida nestes equipamentos em geral apresenta heterogeneidade quanto à globularização, dimensões e distribuição do sólido primário imerso em líquido.

A agitação eletromagnética, além de ser um processo de elevado custo, envolvendo fontes indutoras onerosas, provoca intensa agitação restrita à estreita região de líquido junto à superfície do

cadinho que o contém, não garantindo, desta forma, homogeneidade na distribuição de tensões cisalhantes. As estruturas resultantes, como consequência, devem apresentar morfologia irregular, não perfeita ou homogeneamente globularizada.

Equipamentos tipo viscosímetros rotacionais, com cadinho fixo e rotor concêntricos parecem ser adequados à produção de pastas reofundidas de boa qualidade, desde que providas as condições para promoção de cisalhamento homogêneo entre camadas de líquido em solidificação. Estas condições devem significar, segundo Flemings (8) reduzido espaço anular entre cadinho e rotor.

A finalidade principal deste trabalho é o desenvolvimento de um processo para obtenção de pastas metálicas reofundidas de boa qualidade. Investigando as potencialidades dos equipamentos apresentados na literatura, para realização de tal processo, tentou-se também adequar aos objetivos do trabalho perspectivas de pesquisas futuras.

Finalmente optou-se pela construção de um equipamento, que promove agitação mecânica com rotor interno, o qual poderá, com algumas modificações, ser utilizado:

- como viscosímetro rotacional para estudo de comportamento reológico de pastas metálicas;

- como reofundidor para produção contínua;

O equipamento produzirá quantidades estanques de material, que poderá ser caracterizado como sendo reofundido.

3. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

Um esquema geral do equipamento projetado é apresentado na Figura IV.1.

O equipamento consiste de dois cilindros concêntricos, com um espaço anular entre eles. O cilindro interno é o rotor e o cilindro externo é o cadinho. O cadinho é envolto por resistência elétrica, que por efeito Joule gera o calor necessário para obtenção da temperatura de trabalho desejada. A temperatura a ser utilizada garante ao material processado um estado semi-sólido.

O conjunto cadinho (construído de aço VH 13) e resistência elétrica é montado de tal maneira a constituir um forno à resistência. O cadinho possui na sua extremidade inferior uma abertura cônica, necessária ao descarregamento do material

processado. Circundando a resistência elétrica encontra-se uma camada de isolamento, feita por lã cerâmica. Externamente, um tubo de amianto confere ao forno um formato cilíndrico. O forno então construído é montado numa estrutura de sustentação, aqui chamada de mesa de trabalho.

O rotor cilíndrico, situado no interior do forno, possui eixo concêntrico com o cadinho. É posicionado de tal maneira a permitir uma folga de 3 mm entre sua base e a base do cadinho. O metal líquido a ser processado ocupa os espaços entre o rotor e a parede interna do forno.

A abertura cônica inferior do forno é mantida fechada durante o processamento, por uma haste que, através de um dispositivo mecânico, é abaixada no momento do descarregamento.

Após o tempo de agitação especificado, o material é descarregado em uma lingoteira refrigerada a água.

Colunas-guia são montadas na mesa de trabalho para permitir o movimento vertical do rotor, e garantir sua concentricidade com o cadinho.

O sistema de controle utilizado para especificar os parâmetros do processo consiste de um controlador de velocidades, montado na mesa de trabalho, e de uma mesa de operação e controle de temperaturas.

O controlador de velocidades está ligado ao motor, o qual é

responsável pela rotação do agitador (rotor).

O controle da temperatura do forno é realizado com o auxílio de um controlador eletromecânico (liga-desliga) ligado a um termopar, cuja extremidade é posicionada no fundo de um canal feito na parede interna do cadinho; a esse termopar liga-se um registrador gráfico, também responsável pelo monitoramento da temperatura. Esse sistema garante que a temperatura de trabalho adotada seja mantida constante durante o processamento do material.

Para melhor apresentação pode-se dividir o equipamento projetado e construído em 6 partes principais:

- mesa de trabalho;
- forno;
- rotor;
- motor;
- lingoteira;
- sistema de controle (temperatura e velocidade).

as quais passam a ser descritas separadamente.

3.1. MESA DE TRABALHO

A estrutura de sustentação do equipamento é construída com

vigas em u e cantoneiras de aço 1020, devidamente soldadas.

Nela são fixados o motor, o forno, o controlador de velocidade e colunas-guia.

A Figura IV.2 mostra a mesa com suas dimensões principais.

3.2. FORNO

A. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

De acordo com a idéia inicial, o forno deve conter uma massa de metal a ser processado, da ordem de 200 g. para o alumínio. Para a especificação de suas dimensões foram levados em consideração:

- o espaço entre a parede interna do cadinho e do rotor, que deve possuir um valor adequado, para que a taxa de cisalhamento no líquido seja suficientemente homogênea e alta para garantir a formação de uma estrutura reofundida de boa qualidade;
- eficiência de aquecimento.

Foi projetado um forno circular, cujo desenho esquemático é

apresentado na Figura IV.1.

O forno contém uma abertura inferior, cônica, para descarregamento da pasta. Na sua parede, a 2 mm da superfície interna foi construído um canal vertical onde é posicionado termopar para controle da temperatura da câmara de aquecimento.

O forno é constituído de um cadinho cilíndrico de aço especial para trabalho à quente (Villares VH 13 = ABNT H 13), de 10 mm de espessura, revestido com uma camada de isolação de 32 mm. O conjunto é envolvido por um cilindro de amianto de 16 mm de espessura.

O sistema de aquecimento é constituído de resistências, protegidas por missangas refratárias, envolvendo o cadinho. A figura IV.3 mostra com mais detalhes: a geometria e as dimensões do cadinho utilizado.

B. CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

O sistema de aquecimento escolhido foi o resistivo, dados o seu reduzido custo, elevado rendimento térmico - da ordem de 60 a 80 % (56), operacionalidade e possibilidade de controle de temperaturas.

Foi utilizado fio tipo Kanthal A1 (Fe-Cr;Al;Co), de 2 mm de diâmetro, protegido com missangas refratárias. Uma pequena folga foi prevista, quando do enrolamento do fio no cadinho, para prevenir

danos causados por sua dilatação quando aquecido.

Especificou-se como temperatura máxima o valor de 800 °C. Levando-se em conta perdas de calor para o meio, pode-se com segurança assegurar temperaturas de trabalho da ordem de 650 °C, suficientes para o processamento do Al e a maioria de suas ligas comerciais.

Nestas temperaturas pode-se também prevenir a redução da resistência mecânica dos materiais utilizados na fabricação do cadinho e rotor. Revestimentos cerâmicos seriam necessários para trabalho a temperaturas superiores.

No final deste item é apresentado o cálculo das especificações térmicas do forno.

O monitoramento e controle da temperatura de processamento é de extrema importância para a reofundição: o desconhecimento ou descontrole da temperatura pode levar desde à produção de pastas com estrutura não globular, até causar acidentes pelo entupimento do canal de vazamento ou travamento do sistema de agitação.

O controle da globularização da estrutura depende do controle da temperatura de processamento. Em sistemas que utilizam agitação contínua durante resfriamento da pasta, o gradiente térmico ao longo do cadinho (sentido longitudinal) deve ser perfeitamente controlado. Optou-se, no equipamento construído neste trabalho, pelo sistema de agitação isotérmica, por ser considerado de maior facilidade

operacional.

Assim, o forno foi projetado de maneira a minimizar variações de temperaturas com o tempo de agitação, em todo seu volume útil (ocupado pelo metal em reofundição). A minimização de gradientes térmicos na câmara útil do forno foi conseguida através de um simples artifício: a altura do forno foi super-dimensionada (a altura é diretamente proporcional ao comprimento de fio resistivo utilizado), para compensar as perdas de calor para atmosfera, pela sua parte superior e base.

CÁLCULO DAS NECESSIDADES TÉRMICAS

Foi projetado sistema elétrico para aquecimento de uma massa de Al de 200 g. Para os cálculos a serem efetuados considera-se sua fusão com superaquecimento de 140 °C.

A potência requerida, portanto, levando-se em conta perdas de calor para o ambiente, seja por condução ou por convecção, é calculada. Para a estimativa das perdas para o ambiente divide-se o forno em três regiões: topo, aberto para o ambiente; parede lateral, com camadas de isolamento; e base, com camada de isolamento e refrigeração. A figura IU.4 mostra os desenhos esquemáticos destas regiões, e seus respectivos circuitos térmicos. A base é simplificada para facilitar os cálculos da transferência de calor por condução.

* POTÊNCIA NECESSÁRIA PARA FUSÃO DE 0.2 KG. DE ALUMÍNIO (56):

$$Q_{AQ} = m \cdot c_p \cdot (T_F - T_0); \quad Q_F = m \cdot L; \quad Q_{SQ} = m \cdot c_{SQ} \cdot (T_{SQ} - T_F).$$

Q_{AQ} = calor necessário para aquecer certa massa de material da temperatura ambiente à temperatura de fusão;

Q_F = calor necessário à fusão de uma certa massa de material;

Q_{SQ} = calor de superaquecimento de uma certa massa de material;

c_p = calor específico (para Al - 0,248 kcal/kg.°C);

L = calor latente de fusão (Al - 92,5 kcal/kg°C);

c_{SQ} = calor específico médio do material fundido (0,26 kcal/kg°C);

T_F = temperatura de fusão (para Al puro - 660°C);

T_{SQ} = temperatura de superaquecimento (800°C);

T_0 = temperatura ambiente (25°C).

A quantidade de calor necessária é a soma das três parcelas:

$$Q = Q_{AQ} + Q_{SQ} + Q_F = 57,38 \text{ Kcal}$$

A potência em Watts requerida para o aquecimento num período de

1 hora pode ser calculada pela seguinte equação :

$$q = \frac{Q}{860.t}$$

t = tempo necessário para fundir o material (t= 1 hora).

$$q_1 = 67 \text{ W}$$

* CÁLCULO DAS PERDAS PARA O AMBIENTE (57):

PAREDE LATERAL - para o cálculo da transferência de calor radial, do centro do cadinho para o ambiente, algumas simplificações são necessárias :

- como a condutividade térmica do alumínio é elevada, e a camada que o contém (3mm) é reduzida, pode-se desconsiderá-la para efeito de cálculo de resistência térmica; Significa que as temperaturas na superfície externa do rotor e na parede interna do cadinho são iguais, seu valor corresponde a 800°C.

O circuito térmico e desenhos esquemáticos são mostrados na figura IV.4 (a).

T_1 = temperatura no centro do cadinho;

T_2 = temperatura na parede interna do cadinho (800°C);

T_3 = temperatura na camada de isolamento (lã cerâmica);
imediatamente após as resistências elétricas;

T_4 = temperatura na parede externa do tubo de amianto (80°C);

O calor transferido nesta região pode ser estimado pela seguinte equação:

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_1 - T_4)}{R_{LA} + R_{AM}} \quad (\text{Watts})$$

onde R_{LA} , R_{AM} = resistências térmicas ($\text{m}^\circ\text{C}/\text{W}$).

$$r_1 = 40 \text{ mm}; r_2 = 72 \text{ mm}; r_3 = 88 \text{ mm}.$$

$$R_{LA} = [\ln (r_2/r_1)]/(K_{LA}) = 15,47 \text{ m}^\circ\text{C/W}$$

$$R_{AM} = [\ln (r_3/r_2)]/(K_{AM}) = 1 \text{ m}^\circ\text{C/W}$$

l = comprimento parcial do tubo de amianto (0,09mm);

K_{LA} = condutividade térmica da lã cerâmica (0,038 W/m^oC);

K_{AM} = condutividade térmica do amianto (0,20 W/m^oC).

$$q_2 = 24,71 \text{ W}$$

IQFO - (a) o cálculo da transferência de calor para o ambiente através da abertura superior é baseado em equações de transferência de calor por convecção.

O calor trocado por convecção pode ser calculado pela seguinte equação $q = h \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot (T_3 - T_0)$, onde $L = A/P$, é denominada dimensão característica.

As propriedades para o ar são avaliadas à temperatura de película $T_p = (T_3 + T_0)/2 = 412,5^\circ\text{C}$.

$\rho = 0,8826 \text{ kg/m}^3$ (densidade);

$C = 1,014 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ (calor específico);

$\mu = 2,286 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ (viscosidade dinâmica);

$\nu = 25,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (viscosidade cinemática);

$K = 0,03365 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (condutividade);

$\beta = 1 / T = 1,46 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

β = coeficiente de expansão volumétrica especificado na temperatura absoluta (T) do gás.

$g = 9,81 \text{ m/s}$ (aceleração da gravidade).

$$\frac{g \cdot \beta \cdot \rho^2 \cdot c_p}{\mu \cdot K} = 1,47 \times 10^7 \quad (1/\text{m}^\circ\text{K})$$

$$1,47 \times 10^7 \times d^3 \times (T_3 - T_0) = Gr \cdot Pr = 2,16 \times 10^6$$

Gr = número de Grashof;

Pr = número de Prandtl.

Através desse produto são obtidas duas constantes (C e m), necessárias à obtenção do número de Nusselt, que por sua vez é utilizado no cálculo do coeficiente de transferência de calor (h); consultando tabela na literatura (57) $C = 0,54$ e $m = 1/4$. O número de Nusselt pode ser obtido pela seguinte equação :

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^m = 20,7$$

Por sua vez o cálculo do coeficiente de transferência de calor:

$$h = \frac{Nu_a K}{d} \quad (\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$$

d = diâmetro do cadinho (0,06m)

$$h = 11,6 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A = área da superfície em contato com ar;

P = perímetro da superfície em contato com ar.

h_1 = altura do cadinho (0,155 m);

h_2 = altura do rotor (0,085);

d = diâmetro do cadinho (0,060);

$$L = \left[\frac{\pi \cdot d^3}{4} + 2 \cdot \pi \cdot (h_1 - h_2) \right] / \left[2 \cdot \pi \cdot d + 2 \cdot (h_1 - h_2) \right]$$

$$L = 0,0306 \text{ m}$$

$$q_3 = 836 \text{ W}$$

(b) transferência de calor do eixo do rotor para ambiente:

Considerando-o como uma aleta cilíndrica imersa num ambiente, onde sua extremidade é mantida a 25°C , tem-se que $q = -K \cdot A \cdot dT/dx$, onde A é a área do diâmetro menor do rotor ($d=18 \text{ mm}$); uma extremidade é mantida a 25°C , e a outra a 800°C .

K = condutividade do aço ($28 \text{ W/m}^\circ\text{C}$);

dx = comprimento utilizado do eixo ($0,3 \text{ m}$).

$$q_4 = 0,0059 \text{ W}$$

BASE - para o cálculo da transferência de calor na região inferior do forno, algumas simplificações são realizadas e podem ser verificadas na figura IV.4 (b). Nesta região são consideradas trocas de calor por condução.

ponto_m - corresponde ao ponto médio da camada de isolamento, sua temperatura foi calculada pela equação utilizada para o cálculo lateral de transferência de calor onde $q_1 = 24.71 \text{ W}$, conseqüentemente $T = 415^\circ\text{C}$;

ponto_h - início da camada de refrigeração;

ponto_a - superfície externa (temp. ambiente = 30 °C).

A equação utilizada para estimativa da transferência de calor na base do forno é:

$$q = (T_x - T_0) \cdot K \cdot A / x$$

Observando o desenho esquemático na figura IV.(b) nota-se uma área correspondente à condução de calor pelo ar, e outra correspondente às camadas refrigeração e lã cerâmica :

Para o ar tem-se $q_5 = [(800 - 30) \times 0,03365 \times 0,0033] / 0,06$

$$q_5 = 1,43 \text{ W}$$

Para a outra camada (lã + água) tem-se q dado pela seguinte equação:

$$q = [\Delta T \cdot A \cdot k_{\text{ar}} \cdot k_{\text{H}_2\text{O}}] / \Delta x \cdot (K_{\text{ar}} + K_{\text{H}_2\text{O}})$$

K_{H_2O} = condutividade da água (0,0623 W/m °C);

K_{LA} = condutividade da lâ cerâmica (0,038 W/m °C);

$A = 0.027 \text{ m}^2$

$$q_6 = 12,38 \text{ W}$$

Finalmente a potência requerida corresponde a soma das parcelas de calor trocado para cada região mais aquela necessária a fusão de 0,2 Kg de Al:

$$P = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 942 \text{ W}$$

Para um rendimento térmico de 70 % obtém-se 1345 W.

A temperatura do resistor quando $T_{\text{orno}} = 800^\circ\text{C}$ será de pelo menos 880°C (56). Escolheu-se um resitor tipo Kanthal A₁ (Fe-Cr 23 a 24; Al 5.5 a 6.25; Co 0.1 a 2).

Cálculo da intensidade de corrente elétrica:

$$I = P / V_{\text{max}} ; \quad \text{onde } V_{\text{max}} = 110 \text{ V (variac)}$$

$$I = 12 \text{ A}$$

Cálculo da resistência elétrica :

$$R = V_{\text{max}} / I = 9,2 \text{ Ohms}$$

Do Manual Kanthal :

Superfície irradiante S_i (cm^2 / Ohm) :

$$S_i = (I^2 \times C) / p$$

C = fator de temperatura :

p = carga de superfície admissível (Watts / cm^2).

Para $T = 1000^\circ\text{C}$: $C = 1,062$ e $p = 4 \text{ Watts} / \text{cm}^2$.

$S_i = 38,23 \text{ cm}^2 / \text{Ohms}$; da tabela 4a: $d = 1,3 \text{ mm}$

d = diâmetro do fio.

Comprimento do fio necessário:

$$l = R / (r_{\text{ee}} \times C) = 7,9 \text{ metros}$$

Como temos disponibilidade de resistência Kanthal A₁ com

diâmetro de 2 mm, utiliza-se a mesma para construção do forno; não há restrição em utilizar um diâmetro maior, a não ser que com o aumento do diâmetro a resistência elétrica diminua, assim sendo para que comprimento permaneça o mesmo, aumenta-se a intensidade de corrente elétrica para que a potência requerida seja constante.

Para esse novo diâmetro tem-se :

- $0,4616 \text{ Ohms/m}$;

- $r = 3,693 \text{ Ohms}$ (para 8 metros de fio).

3.3. ROTOR

A agitação promovida na pasta metálica é realizada por um rotor concêntrico ao cadinho, onde o material é vazado. O rotor é acoplado a uma placa com dois mancais de rolamento, e seu movimento é realizado por um sistema de transmissão por correia (eixo motriz - polia motriz-correia-polia-rotor), e sua velocidade é controlada por um painel fixado na lateral da mesa de trabalho.

A. MATERIAL UTILIZADO

Pelo fato do rotor estar também sujeito a altas temperaturas, escolheu-se para sua construção o mesmo aço capaz de suportar trabalhos à quente, utilizado para confecção do cadinho: aço VH 13

(ABNT H 13). Suas características gerais podem ser citadas:

- trata-se de um aço cromo-molibdênio-vanádio;
- possui excelentes propriedades mecânicas em temperaturas elevadas ;
- é utilizado como material de molde e componentes de máquinas de fundição sob pressão de ligas de zinco e alumínio; ou ainda para fabricação de matrizes e punção de forjamento.

B. GEOMETRIA E DIMENSÃO DO ROTOR

A geometria e diâmetro do rotor estão relacionados com a geometria e dimensão do cadinho já adotado. Estabelecendo o espaço anular a ser deixado entre esses dois cilindros, espaço este a ser preenchido com o metal líquido, fica determinada a dimensão do rotor.

O espaço anular deve ser reduzido, de modo a se conseguir elevadas taxas de cisalhamento no material em processamento. Com algumas simplificações, pode-se considerar a taxa de cisalhamento aproximadamente uniforme em todo o volume do líquido, para tais reduzidos espaços; o que deve garantir homogeneidade na estrutura reofundida em formação.

Um espaçamento maior origina uma faixa ampla de velocidades,

imprimidas às partículas de diferentes camadas, portanto, há uma variação menor, quanto às tensões aplicadas em camadas sucessivas. Isso não é interessante, pois reduziria o cisalhamento entre camadas, pouco estimulando a formação de glóbulos. Por outro lado, pequenos espaços anulares, além de intensificar o efeito da taxa de cisalhamento, garante uma melhor distribuição das tensões aplicadas às partículas do sólido globular. Conclui-se então que altos gradientes de taxa de cisalhamento são interessantes para a obtenção da estrutura reofundida.

Consultando a literatura (8,19) existente, definiu-se um espaço anular de 3 mm, e com isso o diâmetro do rotor, que fica em contato com o metal parcialmente solidificado, fica determinado. A Figura IV.5 apresenta as dimensões do rotor: trata-se de eixo maciço escalonado; a extremidade inferior do rotor, em contato com o material processado, tem um diâmetro de 54 mm e uma altura de 85 mm; a parte do rotor sem contato direto com o material processado tem um diâmetro de 18 mm e um comprimento de 460 mm.

O rotor é montado em um sistema constituído de dois mancais de rolamento e uma polia fixados em um suporte. Esse suporte desliza em colunas-guia, conferindo um movimento vertical ao rotor, que ao ser elevado facilita o vazamento e o descarregamento da pasta.

Durante a operação, o rotor não entra em contato com a base do cadinho: um espaço de 3 mm é deixado entre sua base e a do cadinho para facilidade de operação.

3.4. MOTOR

O motor, responsável pelo movimento de rotação do rotor, é fixado em suporte, localizado na mesa de trabalho, conforme visto anteriormente.

A. ESPECIFICAÇÃO DA POTÊNCIA DO MOTOR

Para dimensionamento da potência do motor, necessária para produzir vigorosa agitação na liga metálica a ser processada, considera-se que o rotor é solicitado à cargas constantes de torsão. O cálculo do momento torsor aplicado ao eixo girante pode ser calculado pela seguinte equação :

$$M = (\text{Área}) \times (r) \times (\text{viscosidade}) \times (\text{taxa de cisalhamento})$$

O Torque (M) é transmitido do cilindro interno para o cilindro externo através das camadas de fluido (r = distância radial para qualquer camada de fluido).

O Torque pode ainda ser obtido através da literatura (3,25), de ligas metálicas com fração sólida da ordem de 40 - 50 %, em equipamento com geometrias e dimensões semelhantes ao construído

neste trabalho; ou seja :

$$M = 0,14 \text{ kgf.cm}$$

Para $n = 2000$ rpm tem-se a potência correspondente para este momento torsor (M) :

$$P = \frac{n \cdot M}{72600}$$

$$P_1 = 0,004 \text{ cv}$$

O eixo do rotor é fixado em dois mancais de rolamentos, ficando sujeito a um torque provocado pelo atrito entre os mancais e o eixo girante. Tomando-se como velocidade máxima 2000 rpm, tem-se a seguinte equação para cálculo do torque (58):

$$T = \frac{4 \cdot \mu^2 \cdot r^3 \cdot l \cdot \omega \cdot n}{c}$$

T = torque devido ao atrito no mancal;

n = rotação em rps;

r = raio do eixo girante;

l = largura do mancal;

c = folga existente entre o rolamento e o eixo;

μ = viscosidade do lubrificante.

Para $\mu = 8 \text{ Pas.}$; $l = 20 \text{ mm}$; $c = 0,038 \text{ mm}$; $n = 33 \text{ rps}$ obtém-se

$T = 0,04 \text{ kgf.cm}$, portanto, para dois mancais, têm-se o torque total de $0,08 \text{ kgf.cm}$. A potência associada ao mesmo é:

$$P_2 = (2000 \times 0,08) / (72600) = 0,0022 \text{ cv}$$

Portanto a potência total requerida é $P_1 + P_2 = 0,0062 \text{ cv}$; para compensar a transmissão de movimento efetuada por correia, aplica-se um fator de sobrecarga igual a 2: $P = 0,0124 \text{ cv}$. E ainda, para evitar um subdimensionamento da potência do motor, emprega-se um fator de segurança igual a 3, portanto, a potência final necessária é $0,0372 \text{ cv}$.

Pode-se agora adquirir o motor mais apropriado existente no mercado.

B. MOTOR UTILIZADO

Especificações do motor utilizado:

- * Potência - 1/4 CV;
- * Tensão - 180 V;
- * Rotação - 3600 RPM;
- * Ciclo - corrente contínua;
- * Fabricante - Indústria e Comércio Lavill LTDA.

3.5 LINGOTEIRA PARA SOLIDIFICAÇÃO DA PASTA

Para a solidificação da fase líquida contida na pasta reofundida produzida no equipamento construído, foi utilizada lingoteira de aço 1020, posicionada sob a abertura do reator.

A lingoteira, conforme esquema da Figura IV.6, possui geometria cilíndrica, de dimensões 50 mm de diâmetro externo por 64 mm de altura, com 5 mm de espessura de parede. É refrigerada a água para a promoção de elevada taxa de resfriamento do reofundido. O sistema

controlador de fechamento ou de descarga, do material processado no forno, é montado através da lingoteira.

CÁLCULO DA TAXA DE RESFRIAMENTO NA LINGOTEIRA

A estimativa do tempo total de solidificação pode ser dada para sistemas metal/molde com geometria plana pela seguinte equação (59):

$$t_p = \alpha L^2 + \beta L$$

onde

t_p = tempo total de solidificação para geometria plana;

L = metade da dimensão principal ($L = 1,7$ cm).

Os coeficientes α e β podem ser calculados pelas seguintes equações:

$$\alpha = (H \cdot \rho) / [2 \cdot K_s \cdot (T_F - T_0)] \quad ; \quad \beta = (H \cdot \rho) / [h_i \cdot (T_F - T_0)]$$

onde

H = calor latente da liga (Al-6,5%Si - 108 cal/g);

K_s = condutividade térmica da liga (0,32 cal/m°C.s);

h_i = condutância interface metal/molde (10^{-2} cal/cm°C.s);

ρ = densidade da liga em solidificação (2,58 g/cm³);

T_F = temperatura de início de solidificação (590°C);

T_0 = temperatura externa da parede do molde (30°C);

Portanto $\alpha = 0,7775$ s/cm² e $\beta = 49,76$ s/cm;

Para geometria metal/molde não plana (nosso caso) aplica-se ao tempo t_p um fator de correção geométrico (F): F = 0,76 para cilindros; Pode-se então obter o tempo total de solidificação para a liga Al-6%Si:

$$t_p = 86,84 \text{ seg.}, \text{ e } t_p' = F \cdot t_p = 65,9 \text{ seg.}$$

O cálculo da taxa de resfriamento pode ser calculado do seguinte modo:

$$\dot{E} = \frac{T_p - T_s}{t_p'}$$

onde

T_s = temperatura sólida obtida experimentalmente (552°C);

\dot{E} = taxa de resfriamento ($^\circ\text{C}/\text{seg.}$).

$$\dot{E} = 0,58^\circ\text{C}/\text{seg.}$$

3.6. SISTEMA DE CONTROLE

A. CONTROLADOR DE VELOCIDADE DE AGITAÇÃO

Para o controle da velocidade do rotor utilizou-se um variador de velocidades do tipo NW-VE 2, ligado a uma rede monofásica de 220 V, 60 Hz. Este variador produz uma tensão contínua ajustável, permitindo a variação e o controle da velocidade do motor de

corrente contínua.

Especificações gerais do controlador utilizado, adquirido no mercado:

- * Potência - 1/4 CV;
- * Corrente nominal - 2 A.
- * Fabricante - Newtronic Tecnologia LTDA.

B. CONTROLE DE TEMPERATURA

Para o controle preciso da temperatura no espaço anular, onde permanecerá o material em processamento, projetou-se um canal no sentido longitudinal do cadinho, junto à sua parede interna (a 2mm da superfície), para colocação de um termopar, o qual é o responsável pelo controle da temperatura no forno. Nos testes preliminares do equipamento, utilizou-se um segundo termopar no interior do espaço anular, para a verificação de prováveis gradientes nesta região.

O controle da temperatura de trabalho é realizado por um controlador de temperaturas do tipo liga-desliga conectado ao termopar da parede do forno. A abertura e o fechamento do circuito de alimentação do forno é realizado por uma chave magnética

(contator).

Aparelhos utilizados na monitoração da temperatura:

- * Variac - tensão= 110 V ; frequência= 60 Hz;
corrente máxima= 25 A; Potência Max.=6 kVA;
fabricante- Soc.Tec.Paulista S.A.

- * Contator: tipo- 3TA11; tensão nominal= 110 V; corrente= 35 A
potência máxima= 4kW; fabricante- Siemens S.A.

- * Amperímetro: modelo- quadrado; escala- 0 - 25A;
fabricante: Rene Graf

* Voltímetro: modelo- quadrado; escala- 0 - 250 V;
fabricante- Rene Graf

* Registrador gráfico: modelo- RB103.Série 466
alimentação- 110 V, 60 Hz.
fabricante- Equip.Científicos do
Brasil Ind.Com.LTDA.

* Registrador e controlador de temperatura (mostrador)
marca- Engro série 6000;
escala- 50 - 1200 °C.

* Termopares: tipo- Chromel Alumel; Bainha-aço inoxidável;
diâmetro- 15 mm; fabricante- Ecil.

A figura IV.7 apresenta o esquema elétrico do sistema de controle de temperaturas projetado e construído.

4. CUSTO DO EQUIPAMENTO

Especificação do componente em valores (Cr\$) de Junho de 1991.

A. PARTE ELÉTRICA:

- chave liga-desliga	2.000,00
- amperímetro	15.000,00
- voltímetro	15.000,00
- fusíveis e caixa	6.000,00
- fios, conectores, isolantes e bornes	5.000,00
- tomadas	600,00
- fios de cobre	1.500,00
- resistor	12.000,00
- lampadas/soquetes	2.000,00
- controlador temperatura	10.000,00
- contator	25.000,00
- variac	300.000,00
- termopares	20.000,00
Sub-total	414.000,00

B. PARTE ESTRUTURAL:

- barra aço 1"/8m	8.000,00
-------------------------	----------

- barra aço 1020 "U" 3"/1 1/2/6m	8.000,00
- chapa aço 1020 1"/20cm/2m	15.000,00
- cantoneira 1 1/2" 2m	1.000,00
Sub-total	32.000,00

C. OUTROS:

- barra aço VH 13 - 2 1/8" x 100 mm.....	4.740,00
- barra aço VH 13 - 1 1/4" x 1000 mm.....	12.546,00
- barra aço VH 13 - 3 3/4" x 250 mm	38.840,00
- motor	100.000,00
- controlador/tacômetro digital	500.000,00
- cabo aço	1.000,00
- tubo amianto (h=30cm; d=260 mm)	1.500,00
- polias alumínio (2).....	2.000,00
- rolamentos (2)	6.000,00
- mancal (2)	4.000,00
- mangueira 6m	1.800,00
- parafusos diversos	1.500,00
Sub-total	673.926,00

Total geral1.120.026,00

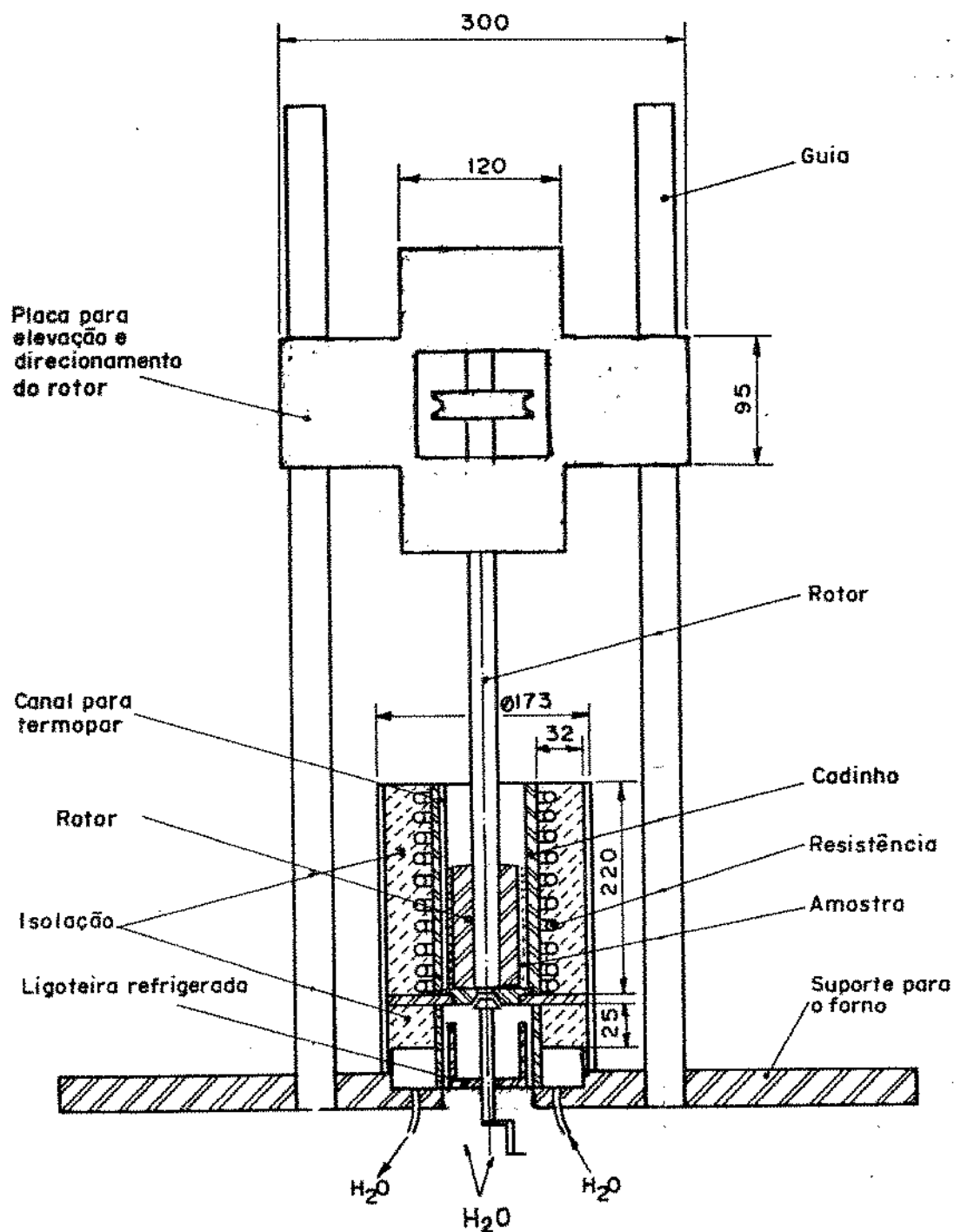


Figura IV.1 - Diagrama esquemático de parte do equipamento projetado (dimensões em mm).

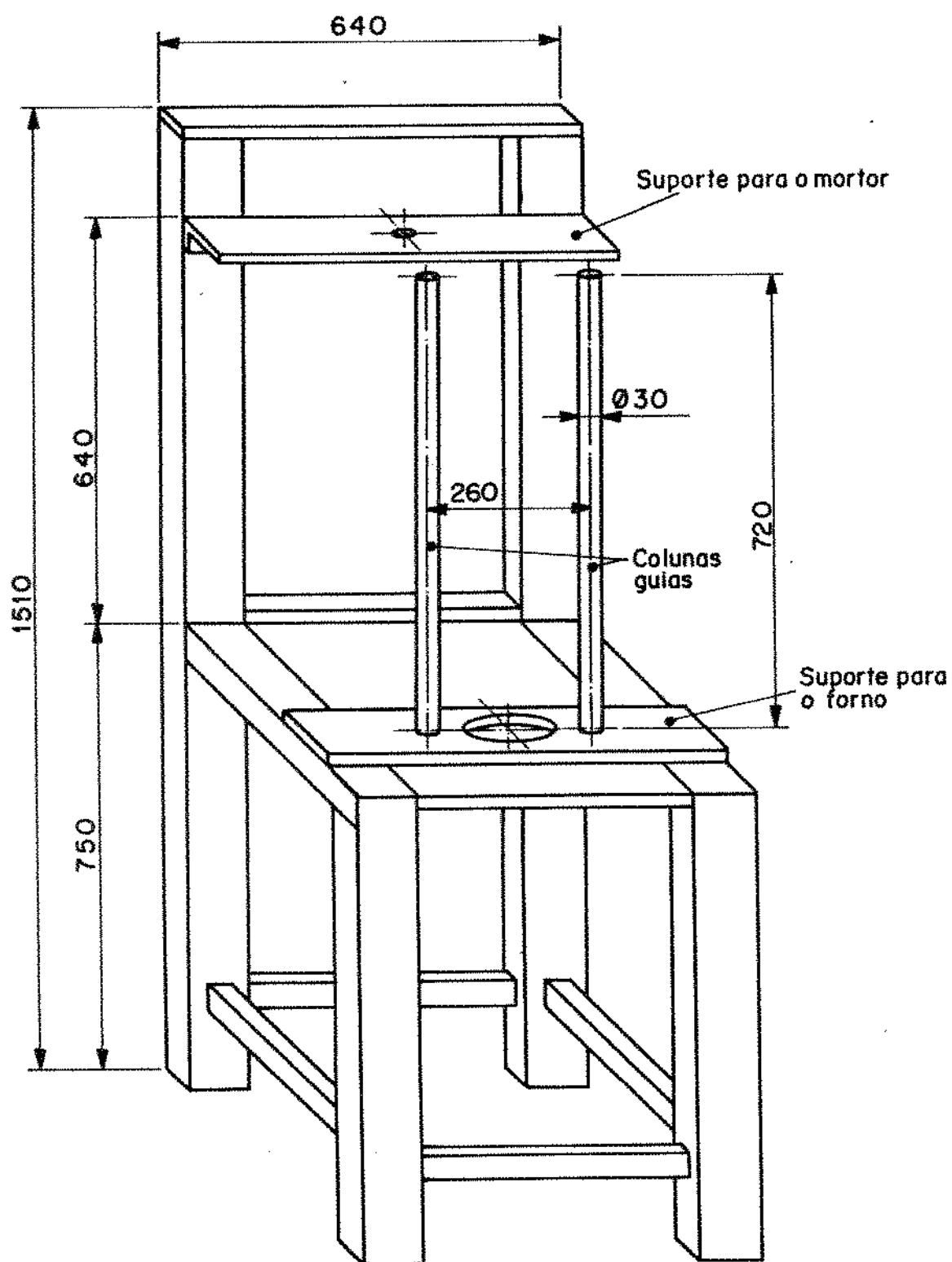


Figura IV.2 - Mesa de trabalho (dimensões em mm).

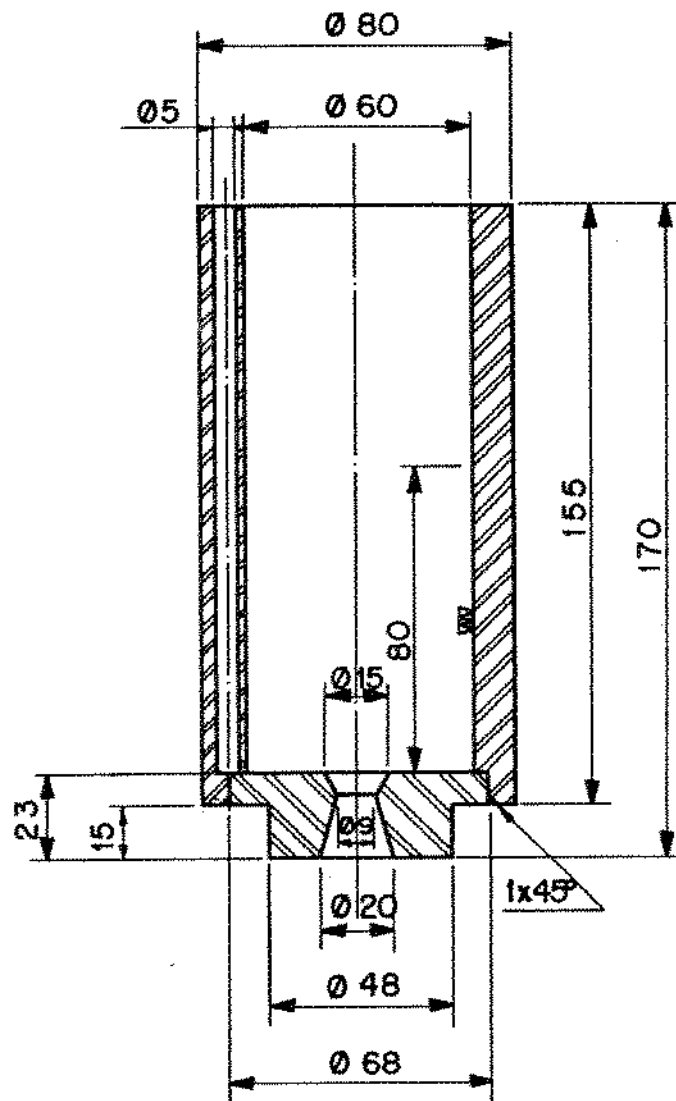
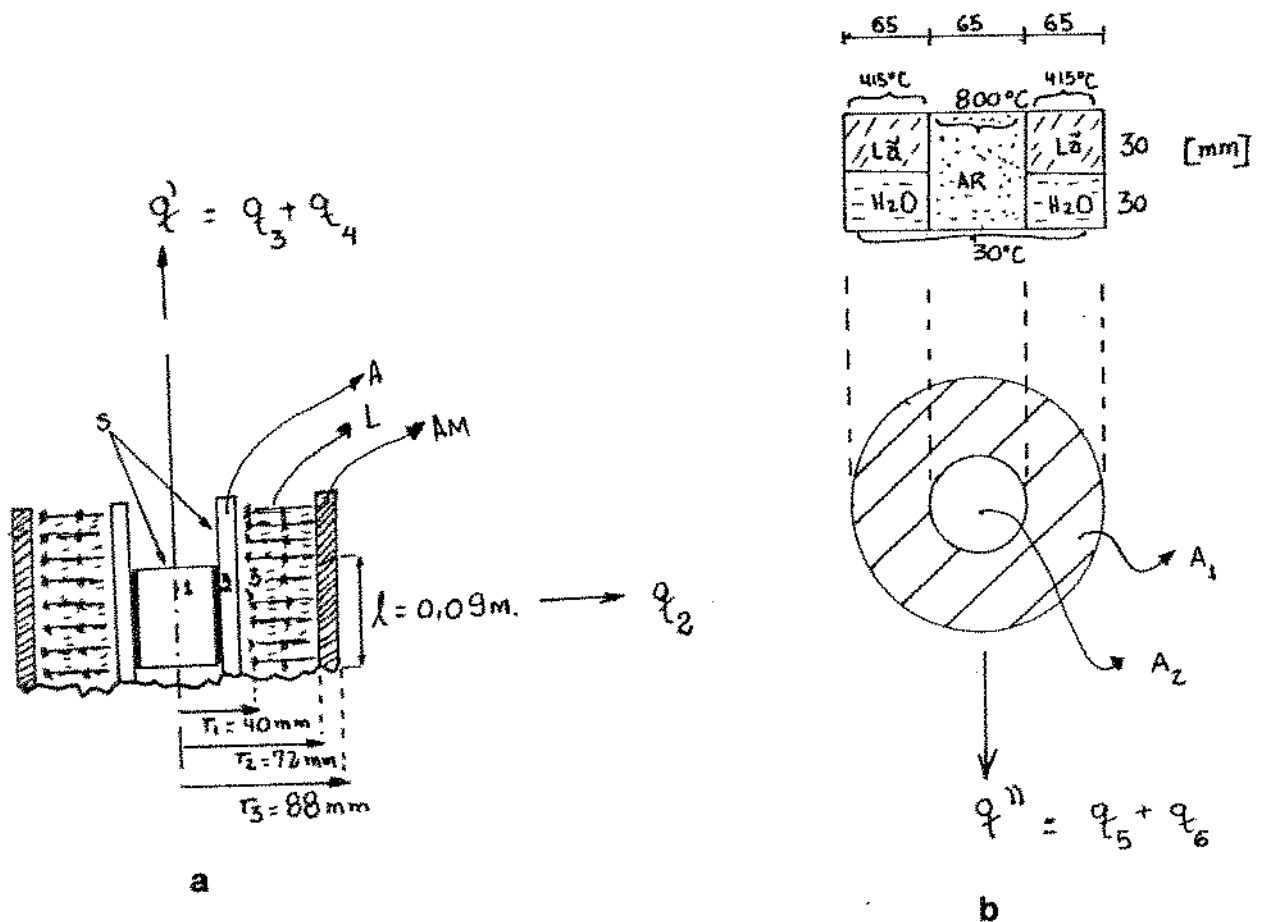


Figura IV.3 - Cadinho do reator (dimensões em mm):

- * parte inferior - abertura para descarga da pasta processada;
- * na lateral do copo - canal utilizado para colocação de termopar, responsável pelo controle da temperatura de trabalho.



- s = superfícies consideradas no cálculo do comprimento característico;
- l = comprimento considerado no cálculo da transferência radial de calor;
- A_1 e A_2 = superfícies transversais consideradas na transferência de calor na base;
- A = aço; L = lã cerâmica; AM = tubo de amianto.

Figura IV.4 - Desenhos esquemáticos utilizados nos cálculos das perdas de calor para o ambiente.

a) regiões utilizadas no cálculo das perdas de calor por condução (radial) e convecção (topo) no forno;

b) região utilizada no cálculo das perdas de calor na base do forno.

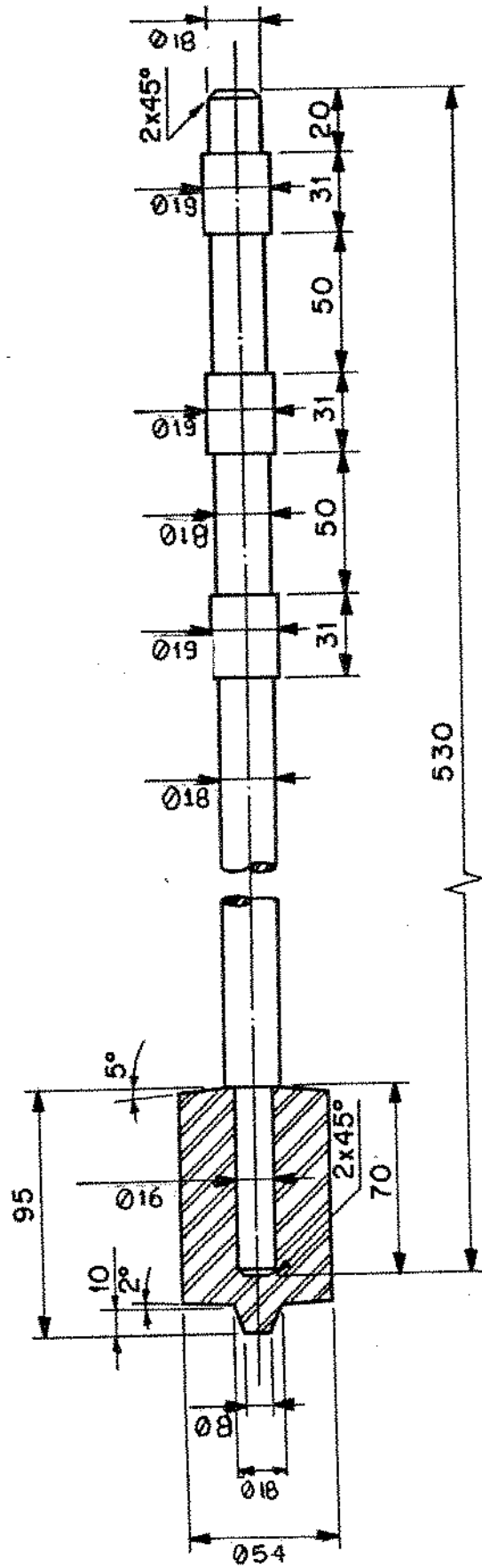


Figura IV.5 - Desenho do rotor utilizado na agitação da pasta metálica (dimensões em mm).

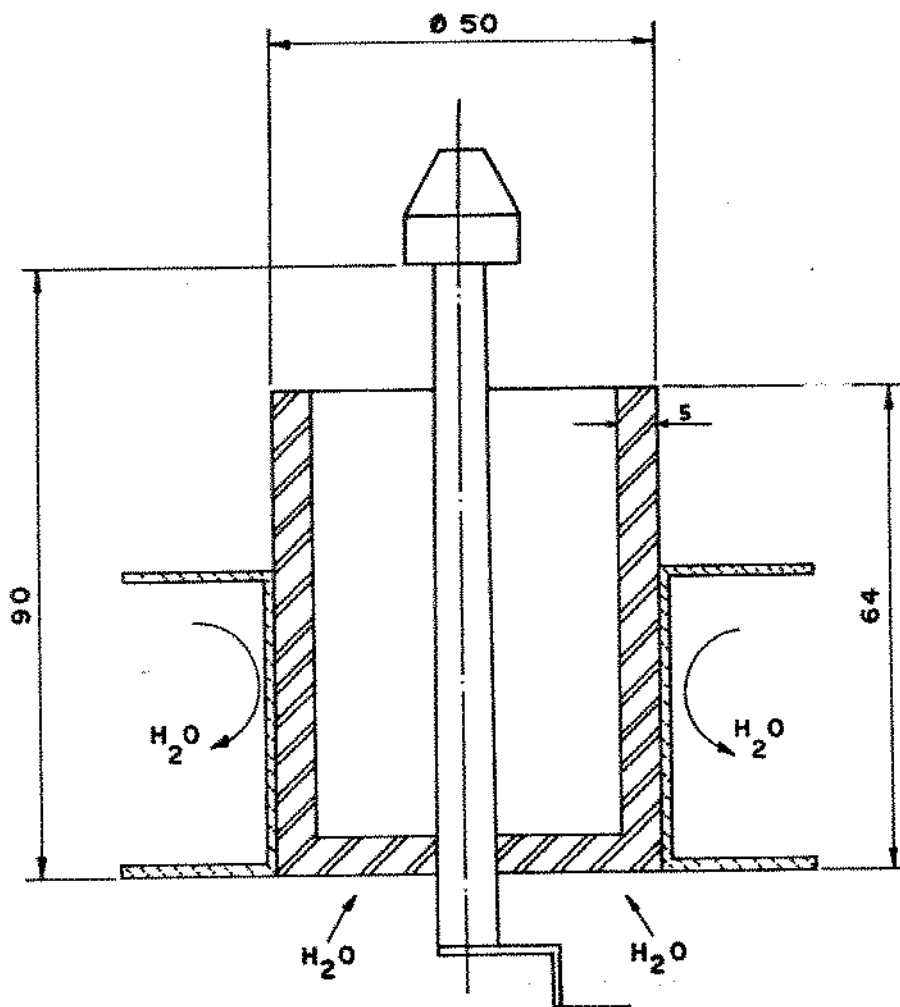


Figura IV.6 - Lingoteira responsável pelo recolhimento da pasta metálica processada (dimensões em mm).

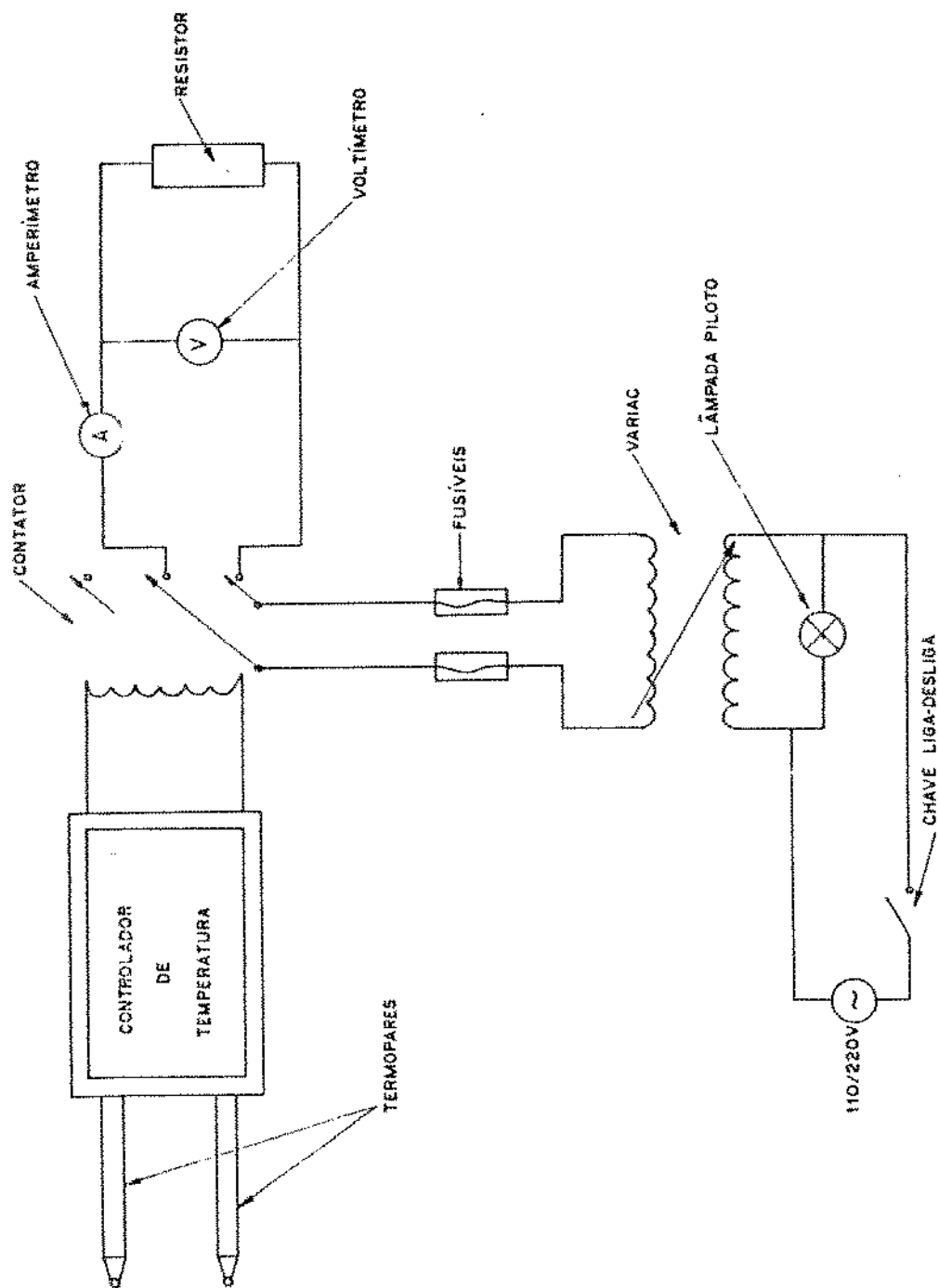


Figura IV.7 - Esquema elétrico do sistema controlador de temperatura.

CAPÍTULO V

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

1. LIGA METÁLICA UTILIZADA

O material utilizado na verificação do desempenho do equipamento construído foi a liga comercial Al-6%Si adquirida no mercado.

Esta liga foi escolhida por ser um material de importância industrial, utilizada amplamente na fundição sob pressão para componentes para a indústria automobilística.

Além disto, segundo diagrama de fases do sistema Al-Si, mostrado na figura V.1, a liga contendo 6% em peso de Si apresenta uma ampla faixa de solidificação, isto é, a diferença entre temperatura líquidus e sólidus é da ordem de 40°C. Tal amplitude torna a liga interessante do ponto de vista de processamento por reofundição, pois permite o fácil controle do processo, além de possibilitar maior liberdade na obtenção de frações sólidas programáveis na pasta reofundida.

2. OBTENÇÃO DA ESTRUTURA DE REFERÊNCIA

Necessita-se de uma estrutura de referência para auxiliar na análise dos resultados. Essa estrutura foi obtida pela solidificação convencional da liga Al-6%Si, vazada a 680°C em lingoteira submetida ao mesmo regime de extração de calor que o ocorrido durante a solidificação da pasta reofundida descarregada do reator. A estrutura dendrítica obtida é utilizada como referência para análise do grau de globularização das pasta obtidas no equipamento construído.

3. AJUSTE DO EQUIPAMENTO - TESTES PRELIMINARES

3.1 AJUSTE MECÂNICO

Construído o equipamento, foram efetuados alguns ajustes mecânicos com a finalidade de eliminar possíveis interferências que possam prejudicar o desempenho do equipamento.

Inicialmente foram feitos testes de agitação sem qualquer material no interior do cadinho.

Como há um movimento relativo entre o rotor (girante) e o cadinho (fixo), deve-se ter o cuidado de centralizar o rotor no

interior do último, de modo a não provocar contato e, portanto, atrito entre eles, o que poderia ocasionar um eventual travamento no movimento de rotação, já que o espaço anular entre essas duas partes é reduzido.

Após a centralização desses dois componentes ligou-se o motor a reduzidas rotações para verificação do comportamento do equipamento, quanto à sua estabilidade e concentricidade do movimento do rotor. Observou-se que o contato entre a extremidade cônica do rotor e a abertura cônica de descarga gera ruídos e vibrações, indicando a necessidade de manter uma folga entre essas duas superfícies (retificadas). Com a elevação mínima do rotor conseguiu-se eliminar o atrito existente nessas duas superfícies, mantendo-se uma folga de 1.5 mm entre elas.

Em seguida foram feitos testes de agitação com o cadinho preenchido com metal líquido. O vazamento foi efetuado com o rotor em movimento à temperatura de 680°C ($T_L + 0,10T_L$) e mantida nesta temperatura. As velocidades de agitação foram variadas de 100 a 1500 rpm. Pode-se notar que velocidades excessivas, em torno de 1500 rpm não são aconselháveis, pois causam vibrações no equipamento, prejudiciais à realização dos experimentos; borrifamento de material, também foi observado.

Adequando os dados encontrados em literatura (4,19) com as velocidades ótimas (em termos operacionais) conseguidas pelo equipamento, estabeleceu-se a seguinte faixa de velocidades para

trabalho: 800 a 1200 rpm.

Foi também testado o sistema de descarregamento do material do reator: nenhum vazamento para fora da lingoteira ou oclusão de material na abertura de descarga foi observado. O sistema mecânico de abertura (haste) funcionou a contento.

3.2 AJUSTE TÉRMICO

Sendo a temperatura um parâmetro de processamento extremamente importante na reofundição é necessário um conhecimento preciso das condições térmicas da câmara de reação.

O equipamento construído foi projetado para a reofundição via agitação isotérmica do metal, assim a existência de gradientes térmicos no interior do cadinho provocaria a perda do controle do processo e conseqüentemente, do produto obtido. Caso tal gradiente seja expressivo há necessidade de efetuar correções no equipamento, pois variações muito grandes não garantem uma homogeneização quanto a fração sólida produzida, ficando difícil relacionar a estrutura obtida com os parâmetros do processo.

Inicialmente determinou-se a curva de aquecimento do forno até 590°C, com auxílio de dois termopares ligados a registrador gráfico. Um dos termopares (o responsável pelo controle da temperatura) foi ligado a registrador e controlador do tipo liga-desliga com a finalidade de manter a temperatura de trabalho constante. A

extremidade desse termopar foi colocada no fundo do canal especialmente construído na parede do cadinho. O segundo termopar foi posicionado no espaço anular, tomando-se o cuidado para que ambos os termopares estivessem fixados numa mesma altura com relação à base do cadinho. A utilização de dois termopares, um no espaço anular e outro no interior da parede do cadinho, é necessária para que se possa estimar a temperatura no espaço anular durante a agitação vigorosa da liga Al-6%Si. A colocação de termopar no interior da pasta metálica cisalhada não fornece precisão na leitura da temperatura; portanto, após estabilização do forno à temperatura de 590 °C, é desnecessária a utilização do segundo termopar (localizado no espaço anular).

A figura V.2 apresenta a curva de aquecimento obtida do forno construído. Observou-se uma diferença de temperatura entre os dois termopares da ordem de 10 °C, após estabilização. Para efeito do cálculo da fração sólida presente na pasta considerou-se a temperatura registrada no espaço anular, ou seja 590 °C. Esta é a temperatura a que o metal está submetido durante o processamento da reofundição. A temperatura no interior do cadinho se mantém constante durante 40 min., depois de estabilizada; enquanto a temperatura no canal construído no cadinho sofre uma oscilação de +/- 5 °C em torno do valor da temperatura média 605 °C.

O gradiente de temperaturas no interior do forno é obtido com auxílio de dois termopares colocados no interior da câmara de aquecimento (cadinho), estabilizada à 590 °C. Um dos termopares é elevado, a partir do fundo do cadinho, de 15 em 15 mm, para

verificação da temperatura em cada ponto do espaço anular, no sentido longitudinal; o outro, fixado a 90 mm a partir da base do cadinho, é responsável pela estabilização do forno a 590°C. A figura V.3 apresenta o gradiente de temperaturas no forno, pode-se observar que tal gradiente é da ordem de 2 °C, considerado desprezível em nossos experimentos. Para obtenção desta temperatura foi necessária uma corrente elétrica, que passa pelo resistor, de 25 A e uma voltagem de 50 V, as quais fornecem uma potência elétrica de 1250 W; Com esses dados foi possível estimar o rendimento térmico real do forno projetado e construído, pois para uma temperatura de 800°C necessitar-se-ia 1667 W, e não 1345 W como calculado com o rendimento de 70 %. Portanto, pode-se calcular o rendimento térmico real da seguinte maneira :

$$942 / n = 1667 , \text{ ou seja, } n = \underline{57 \%}$$

4. TESTES PARA PRODUÇÃO DE PASTA REOFUNDIDA

4.1. CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO

A. TEMPERATURA DE TRABALHO

Para a especificação da temperatura de trabalho foi obtida inicialmente a curva de solidificação da liga Al-6%Si a ser utilizada na produção do material reofundido. Pela curva obtida foi possível determinar com segurança as temperaturas líquidas e sólidas da liga, e portanto, determinar a faixa de temperaturas para a reofundição.

A figura V.4 mostra a curva de solidificação da liga em questão, obtida experimentalmente. Os pontos 1 e 2 assinalados no gráfico correspondem respectivamente às temperaturas líquidas e sólidas, e seus valores são 620 °C e 552 °C.

Definiu-se uma temperatura de trabalho entre a temperatura líquidus e sólidus de 590°C. A essa temperatura corresponde uma fração sólida f já formada, a qual pode ser calculada utilizando-se a equação de Scheil (59):

$$f_s = 1 - [(T_m - T_L) / (T_m - T_T)]^{1/(1-k)}$$

f = fração sólida a T_T ;

T_L = temperatura líquidus da liga;

T_m = temperatura de fusão do Al puro;

T_T = temperatura de trabalho;

k = coeficiente de partição.

O valor do coeficiente de partição foi obtido de diagrama Al-Si da literatura (60); o valor aproximado (calculado pela regra da alavanca com composição 6% de Si) para uma temperatura de 590°C é 0,4. Devido simplificações existentes na utilização da equação de Scheil e ao modo de se calcular o coeficiente de partição, imprecisões são geradas no estabelecimento da fração sólida presente na pasta. A fração sólida calculada é da ordem de 60 %.

B. FORMA DE AGITAÇÃO

Como visto anteriormente existem dois grupos de processos de reofundição, onde a agitação é a responsável pelas transformações ocorridas no metal em solidificação: a agitação pode ocorrer de maneira contínua, desde temperaturas superiores à temperatura líquidus até a temperatura definida pela fração sólida desejada na pasta, quando o material é então descarregado; ou de maneira isotérmica, na qual o material é mantido na temperatura de trabalho e agitado vigorosamente por um certo tempo, a partir do qual é descarregado do reator.

Optou-se por um processo de reofundição com agitação isotérmica, onde $dT/dt = 0$. Na prática, os equipamentos responsáveis pelo controle de temperaturas não fornecem uma temperatura absolutamente constante; há sempre uma pequena variação associada ao tipo de controle de temperatura utilizado no equipamento, sejam eles eletro-mecânicos ou eletrônicos.

C. TEMPOS DE AGITAÇÃO

O tempo de agitação relaciona-se com a estrutura reofundida produzida, uma vez que os mecanismos de formação e crescimento da estrutura globular são regidos por condições cinéticas apropriadas.

Neste trabalho foram utilizados tempos de agitação de 2 a 10 min., à temperatura constante de 590 °C.

D. VELOCIDADES DE AGITAÇÃO

A velocidade de agitação tem também importante papel nos mecanismos de formação e crescimento da estrutura reofundida.

Vários testes prévios foram realizados para a determinação da faixa de velocidades a ser utilizada, e como já mencionado anteriormente, velocidades superiores a 1500 rpm são desaconselháveis. Escolheu-se como faixa favorável de velocidades : 800 a 1200 rpm.

A esta faixa de velocidades correspondem taxas de cisalhamento no metal líquido da ordem de 795 a 1139 sec^{-1} .

A taxa de cisalhamento pode ser calculada para as condições dadas, segundo a seguinte equação (19):

$$\dot{\gamma} = (2.\Omega.k) / (1 - k^2)$$

$\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento média;

Ω = velocidade angular do rotor;

k = razão entre o raio do rotor e o raio do cadinho.

E. TAXA DE RESFRIAMENTO FINAL

Após agitação pelo tempo determinado, o semi-sólido produzido foi vazado em lingoteira de aço refrigerada, para solidificação rápida do componente líquido da pasta. Para as condições utilizadas (dimensões da lingoteira, massa de metal a ser resfriado e temperatura da água de refrigeração, a taxa de resfriamento produzida é da ordem de 0,58 $^{\circ}\text{C} / \text{s}$, calculada no capítulo IV (item lingoteira).

4.2. DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Antes da realização dos experimentos o rotor e o cadinho foram pintados com revestimento isolante (pó de alumina), para facilitar a desmoldagem do material, e também para proteger tais componentes contra a eventual corrosão provocada pela liga de alumínio líquida.

Pronto para realização dos experimentos, o forno foi ajustado para temperatura de 590°C, a qual foi mantida constante durante todo o processo. Foram estabelecidas as etapas para o processamento do material, desde o seu estado sólido inicial até o reofundido final solidificado. A figura V.5 apresenta o diagrama esquemático das etapas envolvidas na produção do reofundido.

4.2.1. ETAPA 1 - FUSÃO DA LIGA

A liga foi fundida em cadinho de carbetto de silício, revestido internamente com pintura isolante, em mufla elétrica. Após a fusão da liga, foi retirado e vazado à temperatura de 680°C, no forno de processamento.

Com a finalidade de impedir travamento do rotor, devido a vazamento em temperatura muito próxima da temperatura sólida, há necessidade de especificar uma temperatura de vazamento adequada. A curva de solidificação da liga utilizada auxilia na especificação da temperatura de vazamento. Foi adotada temperatura de 680 °C, correspondendo a um superaquecimento de 60 °C.

O metal é vazado com o rotor em movimento e o forno estabilizado à temperatura de trabalho.

4.2.2. ETAPA 2 - AGITAÇÃO DA LIGA PASTOSA

Esta é a etapa onde ocorre a reofundição propriamente dita, isto é, onde ocorre a solidificação parcial do material, em condições de agitação para a produção de pasta com sólido primário globular.

O metal líquido foi vazado no forno de processamento após 40 minutos de permanência na temperatura de trabalho a fim de obter equilíbrio térmico em todo sistema. Esse vazamento é realizado com o rotor já em movimento, à velocidade previamente especificada.

A agitação é mantida pelo tempo desejado.

4.2.3. ETAPA 3 - DESCARGA DA PASTA

Decorrido o tempo de agitação desejado, o material foi descarregado, à temperatura de 590 °C, na lingoteira refrigerada, recoberta internamente com pintura de alumina.

O resfriamento rápido da pasta reofundida permite o fornecimento de informações sobre aspectos estruturais do material no estado pastoso.

O descarregamento foi feito acionando a haste de fechamento, na base do cadinho. Tal acionamento abre a porta de descarga e recolhe o reofundido produzido na lingoteira refrigerada.

4.2.4. ETAPA 4 - PREPARO DE AMOSTRAS PARA ANÁLISE DE

RESULTADOS

A. ANÁLISE METALGRÁFICA

O material recolhido na lingoteira foi retirado e preparado para análise metalográfica. O material obtido apresenta forma cilíndrica com dimensões: 40mm de altura, 40mm de diâmetro e um furo

com 5mm de diâmetro (provocado pela haste de fechamento); o mesmo é cortado transversalmente e sua superfície lixada mecanicamente com lixas de carbeto de silício de granas: 220, 320, 400 e 600.

Em seguida, as amostras foram polidas em feltro, utilizando-se pasta de diamante de granas 6, 3 e 1 μ , a fim de produzir uma melhor qualidade de polimento. Nas passagens de uma pasta para outro foi utilizado limpeza por ultra-som para retirada de possíveis partículas.

Efetuados os polimentos necessários, as amostras foram submetidas a ataque por imersão para revelação dos grãos; a liga Al-6%Si é deixada por 5 segundos em uma solução aquosa de 5% de HF (61).

Em seguida as amostras foram fotografadas e analisadas num Banco Metalográfico Zeiss - modelo Neophot 32.

B. MICROANÁLISE

Com a observação das micrografias, notou-se a presença de fases comuns em amostras obtidas em diferentes condições de operação

(tempo e velocidade de agitação). Microanálise foi utilizada para identificação de tais fases.

A microanálise foi realizada em microscópio eletrônico de varredura (M.E.V), marca Cambridge - Modelo S4-10, dotado de sistema de microanálise por energia dispersiva.

As condições utilizadas foram : tensão aplicada de 20 KV e corrente de 130 μ A.

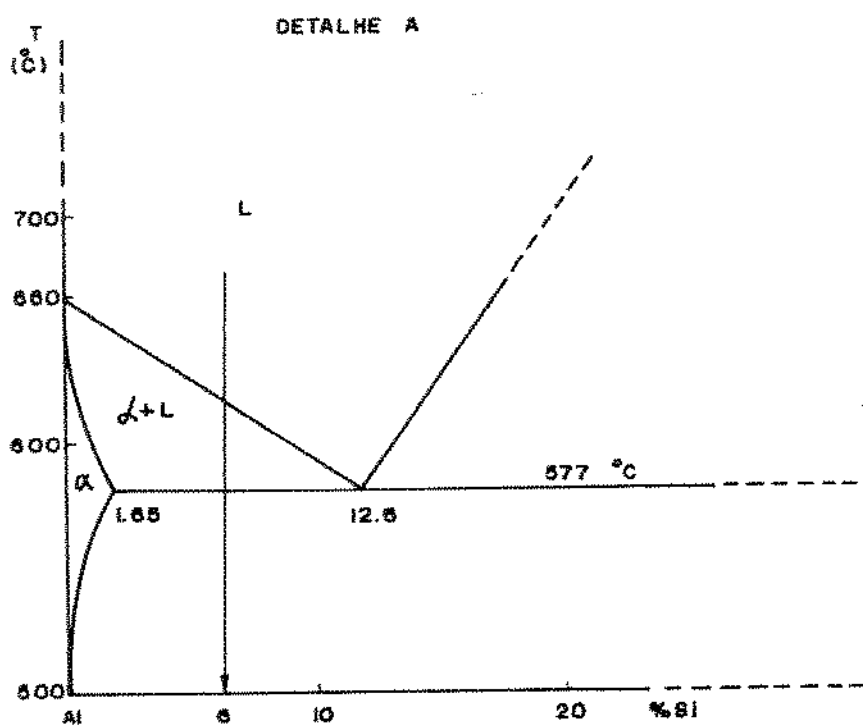
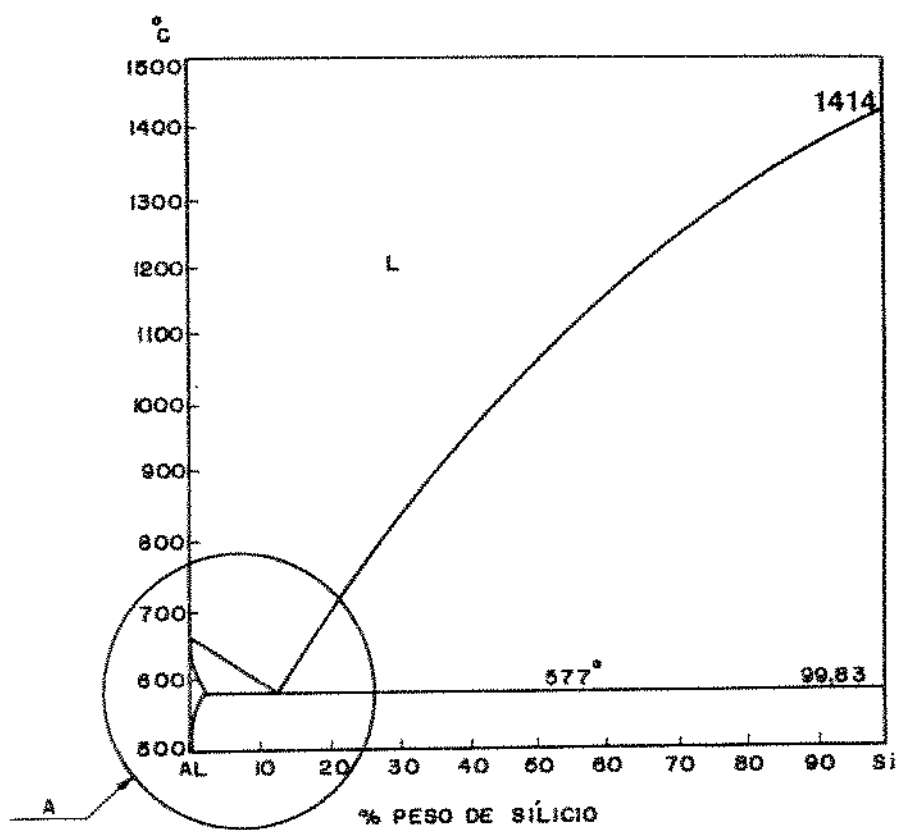


Figura V.1 - Diagrama de equilíbrio da liga Al-Si utilizada(60)

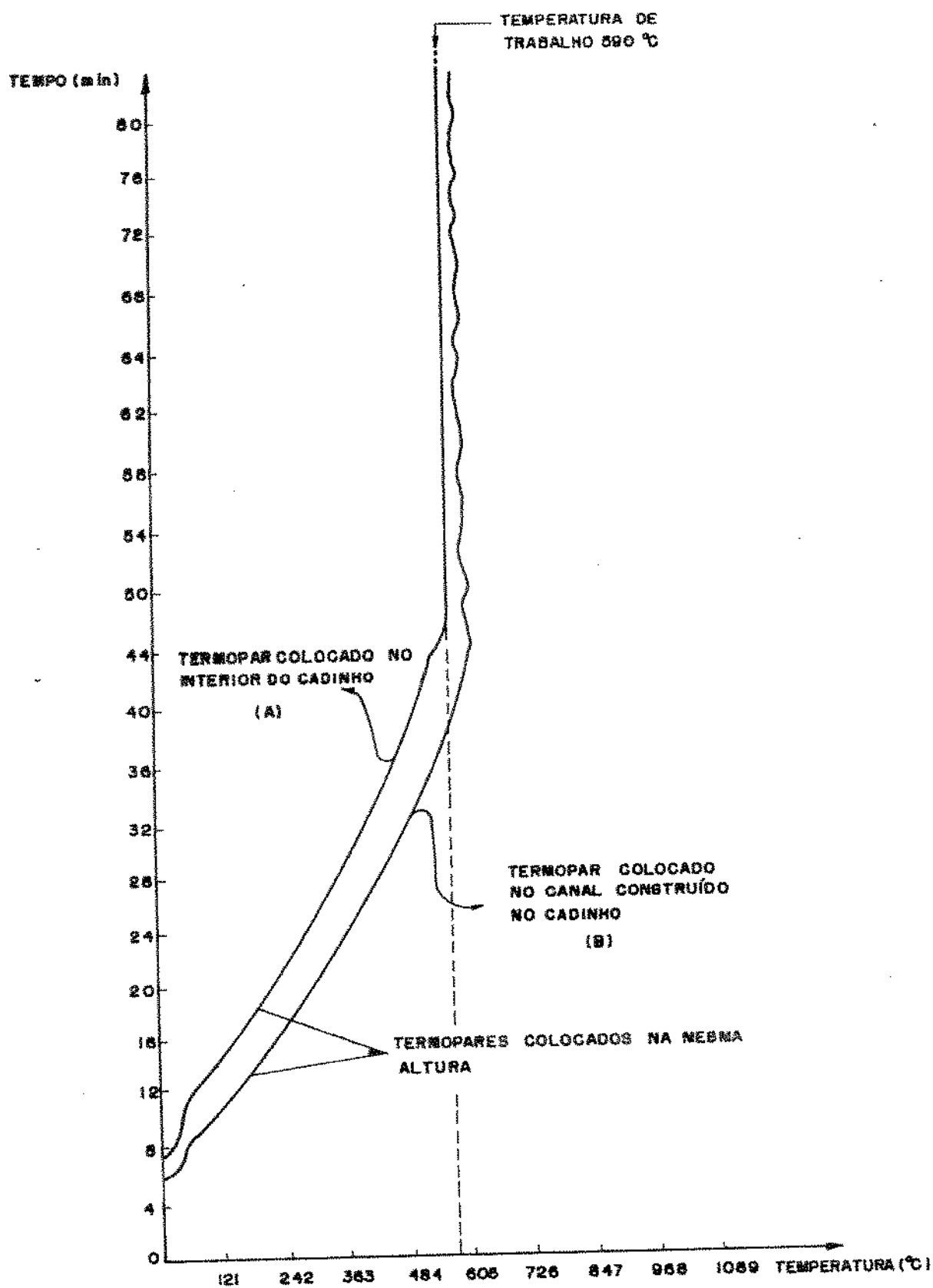


Figura U.2 - Curva de aquecimento do forno projetado e construído.

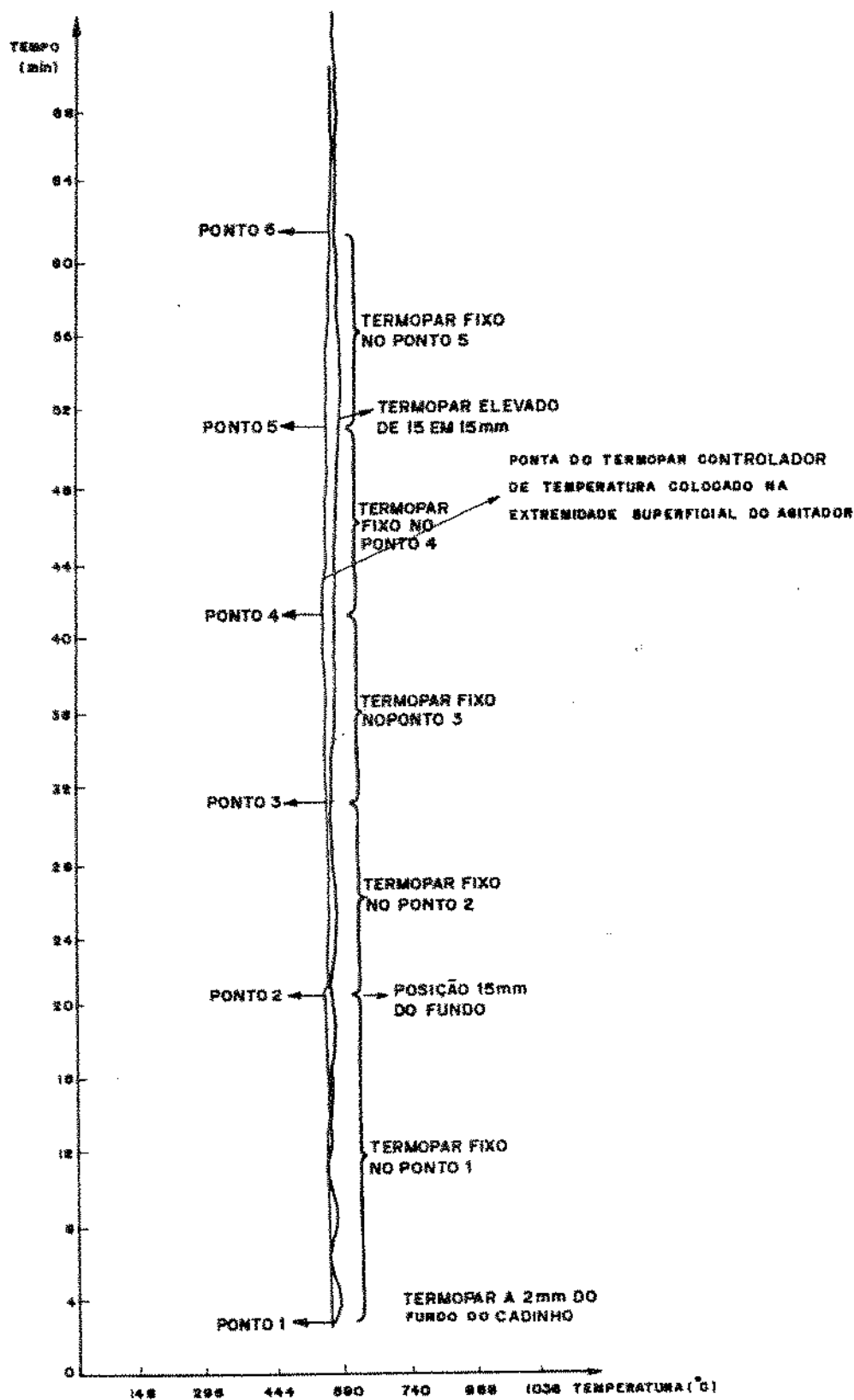


Figura V.3 - Variação da temperatura, no espaço anular do equipamento construído, com a altura a partir da base do cadinho.

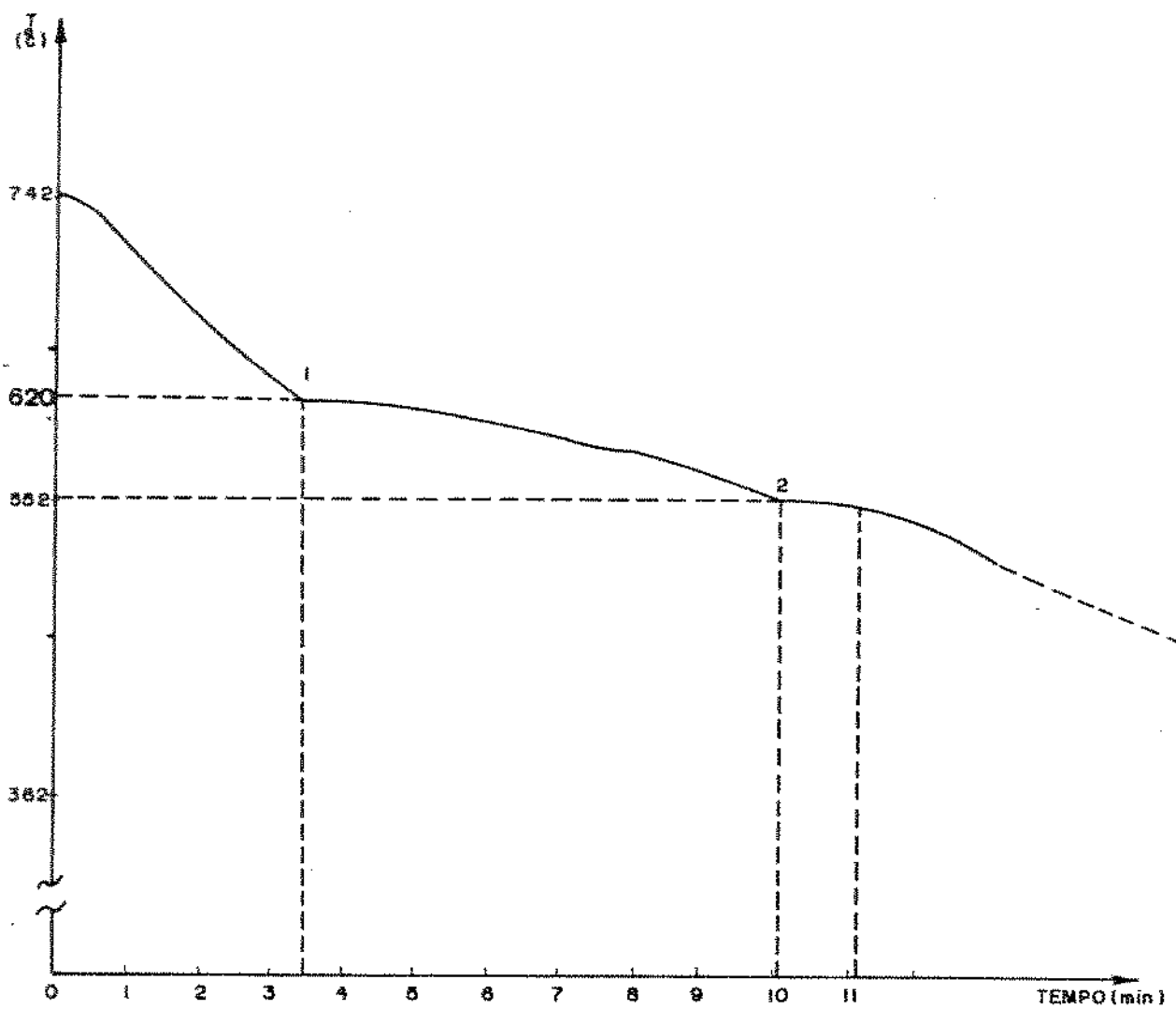


Figura V.4 - Curva de solidificação da liga hipoeutética Al-6% Si utilizada neste trabalho.

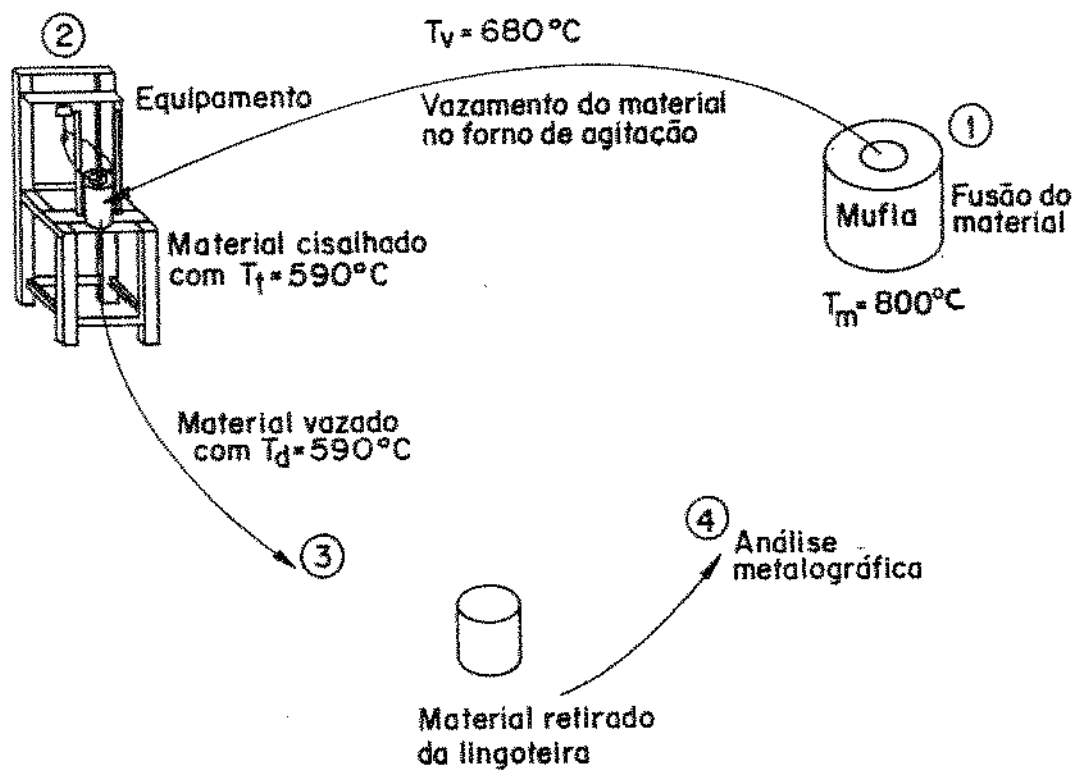


Figura V.5 - Diagrama esquemático das etapas de processamento por reofundição da liga Al-6% Si.

CAPÍTULO VI

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

1. QUANTO AO EQUIPAMENTO CONSTRUÍDO

1.1. APRESENTAÇÃO DO EQUIPAMENTO

De acordo com projeto apresentado em capítulo anterior, foi construído reator para produção de pastas metálicas reofundidas, tipo viscosímetros rotacional, a ser utilizado para metais e ligas com temperatura de trabalho da ordem de 650°C .

Os resultados, quanto à construção do equipamento, são mostrados nas fotos que se seguem.

A foto da figura VI.1 mostra uma vista geral do equipamento completo: estrutura, forno (câmara de processamento), rotor para agitação do líquido em solidificação, lingoteira para vazamento da pasta reofundida produzida, motor para obtenção de velocidades de agitação, sistema de controle de velocidade e temperatura.

Na foto é ainda mostrado equipamento utilizado para a fundição da liga, constituído de forno elétrico tipo poço, cadinho e

lingoteira para transferência da liga fundida para o reator.

A figura VI.2 mostra com maior aproximação, uma vista geral do forno e sistema de agitação.

Na figura VI.3 é mostrada a câmara de processamento da reofundição, constituída do forno e rotor posicionado em seu interior, da maneira descrita em capítulo anterior.

Pode-se notar os termopares de monitoramento e controle da temperatura, um posicionado no interior da parede do forno e outro no interior do espaço anular.

Uma outra vista do equipamento mostra o sistema de controle de velocidades do motor, para agitação do rotor, segundo apresentado na figura VI.4.

A figura VI.5 apresenta uma foto do rotor (desmontado do equipamento) utilizado para agitação, enquanto a figura VI.6 mostra a lingoteira necessária ao recolhimento e resfriamento da pasta metálica reofundida produzida.

Os resultados quanto ao desempenho do equipamento foram já apresentados no capítulo relativo a procedimentos experimentais, onde foram discutidos os ajustes mecânicos e térmicos necessários ao bom funcionamento do equipamento.

Foram então estabelecidas a velocidade máxima de trabalho de 1200 rpm, e o tempo requerido para a estabilização da temperatura do forno à 590°C: 40 min.

Naquele capítulo foi também apresentado o resultado do controle térmico do forno construído: a temperatura da câmara de processamento é praticamente a mesma em qualquer ponto, isto é, não há gradiente térmico expressivo no espaço anular a ser preenchido com o metal líquido a ser reofundido. Quanto ao rendimento térmico do forno, pode-se especificá-lo em torno de 60 %, faixa aceitável segundo a literatura (56).

Os resultados do levantamento das condições térmicas do forno permitem confirmar a intenção de se produzir pastas reofundidas por agitação isotérmica do líquido em solidificação.

1.2. COMENTÁRIOS GERAIS COM RELAÇÃO AO EQUIPAMENTO CONSTRUÍDO

Com o equipamento construído foi possível a obtenção de pastas metálicas reofundidas. Quantidades estanques, da ordem de 150 gramas, puderam ser obtidas.

Os resultados obtidos com a variação dos parâmetros (tempo e velocidade de agitação) de processamento foram de grande auxílio à análise da formação da estrutura reofundida.

O sistema de controle da agitação, ou melhor, da velocidade de rotação do rotor utilizado mostrou-se muito eficiente.

A temperatura pode ser também facilmente monitorada e controlada por termopares acoplados a registrador gráfico e a

sistema eletromecânico liga-desliga automático.

Quanto à operacionalidade, o equipamento se mostrou de fácil operação, apresentando, no entanto, problemas quanto à limpeza posterior ao descarregamento da pasta reofundida. Uma pequena massa de metal permanece no interior da câmara do forno, aí solidificando. É necessário a retirada do rotor da câmara de processamento para a sua retirada.

Portanto, o tempo de limpeza após a realização de um experimento é demasiadamente alto, quando comparado ao tempo necessário para que a experiência seja realizada. Sobre esse aspecto, algumas alterações poderiam ser efetuadas para evitar a retenção de metal no interior do forno, quando do seu descarregamento:

- aumento do diâmetro de saída, para facilitar o descarregamento da pasta;
- alteração da geometria do cadinho cilíndrico para geometria cônica, facilitando também o escoamento da pasta reofundida.

Quanto ao custo, pode-se comentar que os gastos envolvidos na construção do equipamento foram reduzidos. Pode ser fornecido, para comparação, o custo de um viscosímetro utilizado para estudo da viscosidade de pastas poliméricas (temperaturas até 200°C), segundo cotação recente: em torno de US\$ 150.000,00.

Lembrando da inexistência no mercado, de equipamentos para a produção de semi-sólidos metálicos reofundidos, o custo envolvido neste projeto pode ser considerado desprezível.

Quanto à potencialidade do equipamento construído pode-se comentar que, através de pequenas alterações, podemos transformar esse tipo de equipamento (produtor de pastas reofundidas) em viscosímetro rotacional para estudos de comportamentos reológicos. Para isto basta acrescentar um transdutor de torque com a finalidade de medir a força de arraste da pasta sobre o cadinho que tende a girar (forno montado sobre rolamento), e relacioná-la com a viscosidade .

O desempenho do equipamento, quanto à produção de pasta metálica reofundida, foi avaliado através das micrografias de cada amostra, processada à uma condição experimental previamente estabelecida. As micrografias são comparadas com uma estrutura de referência e apresentadas no próximo item.

2. QUANTO À QUALIDADE DO REOFUNDIDO OBTIDO

2.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A. MICROESTRUTURA

Como comentado anteriormente, foi possível produzir, com o equipamento construído, uma quantidade limitada a 150 g., de pasta reofundida da liga Al-6%Si.

Diferentes condições operacionais foram testadas e analisadas sua influência na estrutura do reofundido obtido.

A tabela VI.1 apresenta condições típicas testadas e localiza no texto as microestruturas resultantes.

A fim de estabelecer uma melhor caracterização das estruturas reofundidas obtidas no equipamento construído, as micrografias obtidas em diferentes condições de processamento são comparadas com a micrografia da liga obtida por fundição convencional. Posteriormente são analisadas as influências dos parâmetros de processamento (tempo e velocidade de agitação) na formação da estrutura reofundida, comparando-as entre si.

Inicialmente é apresentada a estrutura de referência, isto é, da liga Al-6%Si solidificada de maneira convencional, segundo condições explicadas no capítulo anterior.

Conforme figura VI.7, pode ser observada a microestrutura típica do Al-Si solidificada convencionalmente, constituída de fase primária dendrítica α - Al, cercada por cristais agulhados de Si eutético.

Nas figuras que se seguem são apresentadas as microestruturas obtidas após processamento por reofundição via agitação isotérmica.

As figuras VI.8, VI.9 e VI.10 apresentam as micrografias das amostras de Al-6%Si processadas com tempos de agitação de 5 e 10 min. e velocidades de 800, 1000 e 1200 rpm.

Pela observação geral das micrografias apresentadas, pode-se concluir que a agitação do metal líquido durante sua solidificação produz alteração de morfologia da microestrutura em crescimento. A nova morfologia formada pode ser comparada com a convencional, apresentada na figura VI.7. Essa nova estrutura apresenta uma fase alfa (sólido primário globular) de Al circundada por uma rede fina de cristais de silício eutético em forma de agulhas. Não é mais notada estrutura dendrítica.

As migrografias da figura VI.8 apresentam o resultado obtido pelo processamento da liga à velocidade de agitação de 800 rpm por tempos de 5 e 10 minutos.

Pode ser observada a globularização da estrutura após 5 minutos de agitação. Para tal tempo, no entanto, glóbulos de grandes dimensões são obtidos, quando comparados com as dimensões de glóbulos após 10 minutos de agitação.

Neste último caso pode ser observado também que os glóbulos se apresentam mais isolados, como partículas individuais.

Em ambos os casos, o Si eutético se apresenta como agulhas finas, de menores dimensões em relação à sua situação na estrutura solidificada convencionalmente.

A morfologia e dimensões dos cristais de Si eutéticos dependem da velocidade de resfriamento final da pasta. Como esta velocidade é geralmente alta devido à alta taxa de resfriamento imposta e à reduzida temperatura de vazamento, a pasta reofundida deve apresentar pequenos cristais eutéticos quando comparados com os

obtidos em solidificação convencional, como observado.

A figura VI.9 apresenta as microestruturas do Al-6%Si processado por agitação a 1000 rpm, pelos mesmos tempos, isto é, 5 e 10 minutos.

Também neste caso pode ser observada a obtenção de estruturas globulares ao invés de dendríticas. Glóbulos de grandes dimensões, muitas vezes constituídos de vários menores aglomerados, são obtidos para o menor tempo de agitação. O aumento do tempo de processamento, para 10 minutos resulta em glóbulos menores e mais isolados.

Na figura VI.10 são apresentados os resultados obtidos para a reofundição processada por agitação do líquido em solidificação, a 1200 rpm, por tempos de 5 e 10 minutos. Novamente pode ser observada a presença da fase primária com morfologia não dendrítica.

O menor tempo de agitação promoveu a formação de glóbulos de maiores dimensões que os glóbulos obtidos em processamento mais longo.

Pode-se observar também uma quantidade razoável de poros em ambas as amostras processadas por agitação a 1200 rpm. Segundo Vogel (39), velocidades elevadas (acima de 1000 rpm) podem causar oclusão

de gases no interior da pasta; esta afirmação pode ser uma explicação razoável pelo maior surgimento poros nesta condição de processamento.

B. RESULTADOS DE MICROANÁLISE

As microestruturas reofundidas apresentaram diferentes fases, comuns às amostras obtidas para diferentes condições de processamento. Para identificação dessas fases escolheu-se a amostra processada com velocidade e tempo de agitação respectivamente de 800 rpm e 10 min. A figura VI.11 mostra a micrografia obtida para esta amostra, onde os pontos numerados indicam as fases analisadas (para cada fase diferentes pontos são analisados). Pode-se tentar, por comparação das microestruturas obtidas neste trabalho com microestruturas de liga Al-5%Si (443F) obtida na literatura (62), identificar as fases presentes:

Região 1 - Trata-se de uma fase que se apresenta com morfologia globular, de razoáveis dimensões, situada entre glóbulos da fase primária.

Foram detetados os elementos Al, Si, Cr, Mn, Fe, e Cu; sendo o Si de maior teor.

Região 2 - Fase com morfologia irregular. Por comparação provavelmente é um vazio de contração. A análise revelou os elementos Al, Cu, Zn que devem pertencer a uma fase sob o vazio de contração.

Região 3 e 5 - Fase com morfologia agulhada de coloração cinza (tonalidade média em relação a outras semelhantes: escuras e claras), também situada em contornos de glóbulos da fase primária. Apresentou alto teor de Al, Fe e Si. Provavelmente deve ser uma fase Fe_3SiAl_{12} .

Região 4 - Fase com morfologia de reticulado, presente em contornos de glóbulos da fase primária. A análise revelou alto teor de Al e Cu. Fase de finas partículas precipitadas de $CuAl_2$ de tonalidade cinza clara.

Região 6 - Fase primária α -Al (interior do glóbulo).

Região 7 - Fase com morfologia agulhada, típica do eutético Si, como comprovado pela microanálise, com coloração cinza escura.

2.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Pode ser observado pelas micrografias apresentadas, que estruturas reofundidas puderam ser obtidas pela utilização do equipamento construído, com relativa facilidade.

Pode ser ainda observado que os parâmetros operacionais tempo e velocidade de agitação interferem de maneira significativa na estrutura das pastas produzidas. Pode-se, portanto, concluir que a obtenção de pastas com boa qualidade (esferecidade e uniformidade de dimensões de glóbulos) deve depender da manipulação correta das variáveis de processo envolvidas.

A. EFEITO DO TEMPO DE AGITAÇÃO

O efeito do tempo de agitação na estrutura reofundida produzida pode ser analisado comparando-se os resultados obtidos para uma determinada velocidade de agitação.

Assim, comparando-se as microestruturas apresentadas nas figuras VI.8, 9 e 10 (a) com as apresentadas em VI.8, 9 e 10 (b) pode-se notar que glóbulos de maiores dimensões estão sempre presentes para o menor tempo de agitação, independentemente da velocidade imposta.

Os grandes glóbulos obtidos para o menor tempo de agitação se assemelham, principalmente para a menor velocidade de agitação, a aglomerados de glóbulos de menores dimensões.

Este tipo de estrutura sugere mecanismos de dobramento e engrossamento dendrítico, para a formação da estrutura reofundida, para esta menor velocidade de agitação. Rompimento dendrítico significativo deve estar também presente, uma vez que inúmeros pequenos glóbulos podem ser observados entre os grandes aglomerados; vale a pena notar que tais glóbulos também podem ter sido originados pela baixa taxa de resfriamento aplicada na lingoteira.

O aumento do tempo de agitação leva à formação de glóbulos de menores dimensões e mais isolados, provavelmente por aumentar o período de ação de forças cisalhantes no interior do material.

Embora 5 min. de agitação já sejam suficientes para a formação de estruturas globulares, o aumento do tempo de agitação acarreta aparentemente uma melhor esferecidade das partículas da fase primária, redução no seu diâmetro médio e maior homogeneidade de distribuição de tamanhos de glóbulos; conseqüentemente uma melhor qualidade no reofundido obtido é alcançada.

B. EFEITO DA VELOCIDADE DE AGITAÇÃO

Tomando-se as amostras processadas com o mesmo tempo de agitação, mas a diferentes velocidades, pode-se analisar a influência deste último parâmetro, na estrutura reofundida produzida.

Assim, pela comparação das microestruturas das figuras VI.8, 9 e 10 (a) entre si, pode-se observar que, para reduzidos tempos de agitação (5min.), o aumento da velocidade de agitação leva à redução do diâmetro médio de glóbulos da fase primária. Mecanismos de rompimento dendrítico devem estar mais fortemente ativados com o aumento das taxas de cisalhamento entre camadas de material em processamento. Mais fortes dobramentos devem ser promovidos, levando à formação de estruturas globulares mais diretamente, sem estágios de globularização por fenômenos de engrossamento.

A observação e comparação das microestruturas apresentadas nas figuras VI.8, 9 e 10 (b) mostra o mesmo efeito da velocidade de agitação, para amostras agitadas por 10min.: o aumento da velocidade leva à redução das dimensões de glóbulos da fase primária. Inúmeros glóbulos de pequenas e mais homogêneas dimensões e distribuição são formados.

Pode-se inferir que o aumento da velocidade de agitação gera correntes de convecção forçada mais elevadas, que estimulam o mecanismo de dobramento de ramos secundários seguido de fragmentação dendrítica.

Pela discussão dos resultados podemos observar que estruturas tipicamente reofundidas, ou seja, partículas de sólido primário com geometria esférica e circundadas por uma fina camada de líquido (eutético fino - característica de uma estrutura de solidificação rápida), foram obtidas para todas as condições experimentalmente utilizadas, embora, a esfericidade das partículas aumentem e suas dimensões médias diminuam para as condições de maiores velocidades e tempos de agitação.

Deve ser lembrado que a influência dos parâmetros tempo e velocidade de agitação, na formação da estrutura reofundida são interdependentes, uma vez que tanto um como o outro são parâmetros que interferem na cinética dos fenômenos presentes no desenvolvimento das transformações ocorridas. Assim, o aumento da velocidade de agitação, mantendo-se constante o tempo em que é aplicada, pode resultar em estruturas semelhantes às obtidas por aumento do tempo, mantida constante a velocidade.

Como exemplo podemos observar que a estrutura obtida nas condições velocidade 1200 rpm e tempo 5 min. é muito semelhante à obtida para 10 min. de agitação a 800 rpm.

A possibilidade e facilidade de controle dos parâmetros tempo e velocidade de agitação significam a possibilidade de programação da estrutura a ser obtida.

Quanto aos resultados das microanálises efetuadas pode-se comentar a presença de diferentes fases, devido às altas concentrações de impurezas (Fe, Zn, Cu) na liga de alumínio utilizada (de pureza comercial).

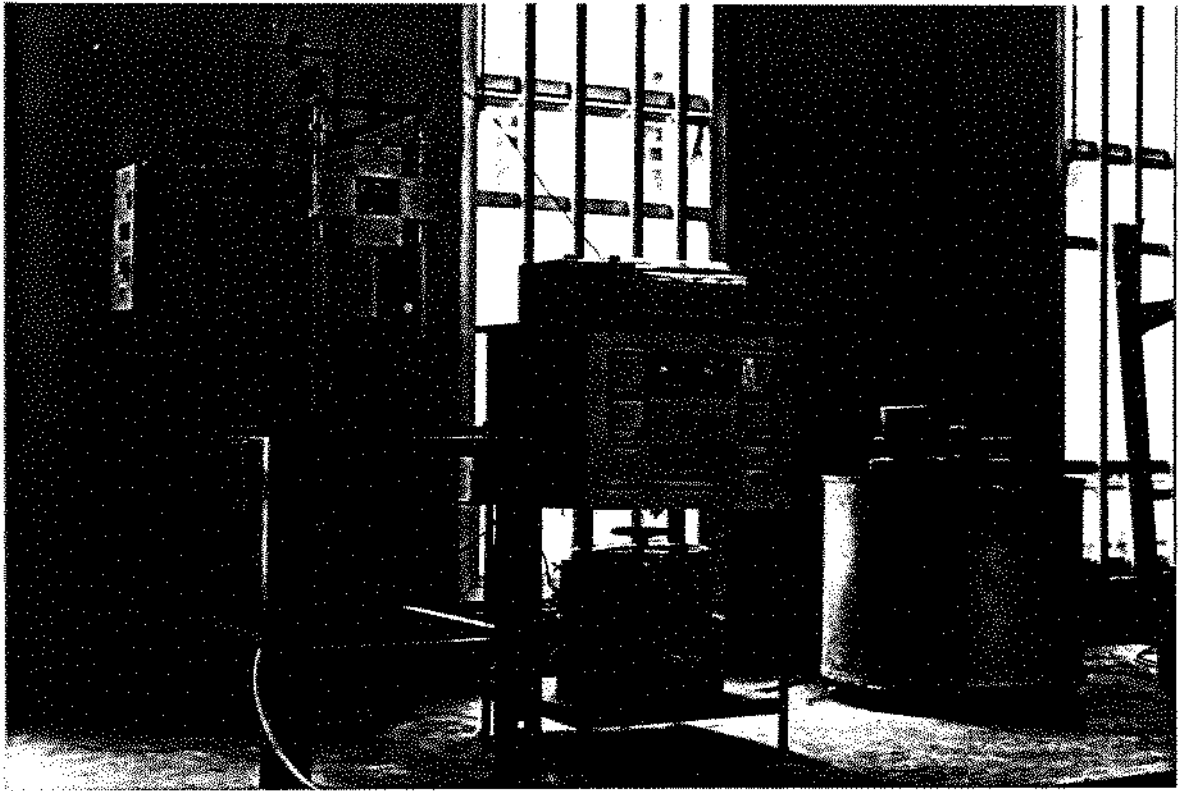


Figura VI.1 - Foto apresentando o equipamento completo e equipamentos auxiliares utilizados neste trabalho.

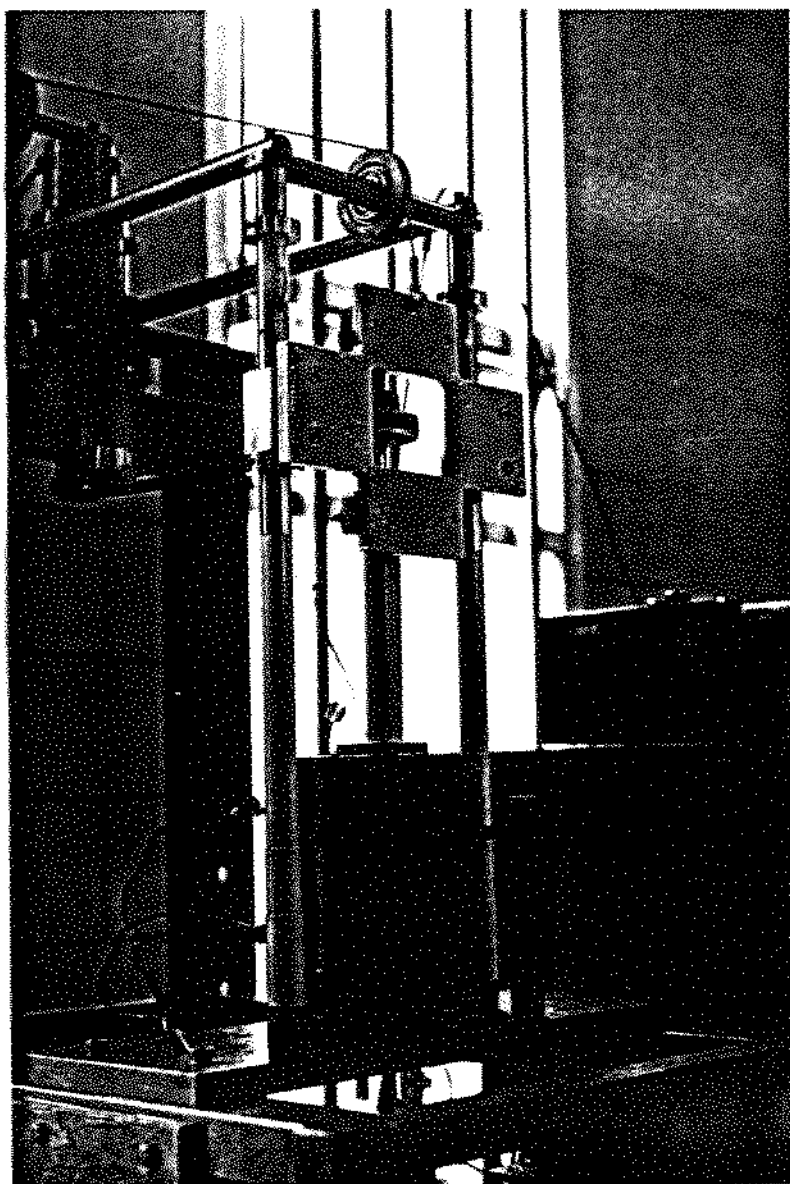


Figura VI.2 - Foto mostrando vista geral do sistema de agitação e forno, do equipamento construído.

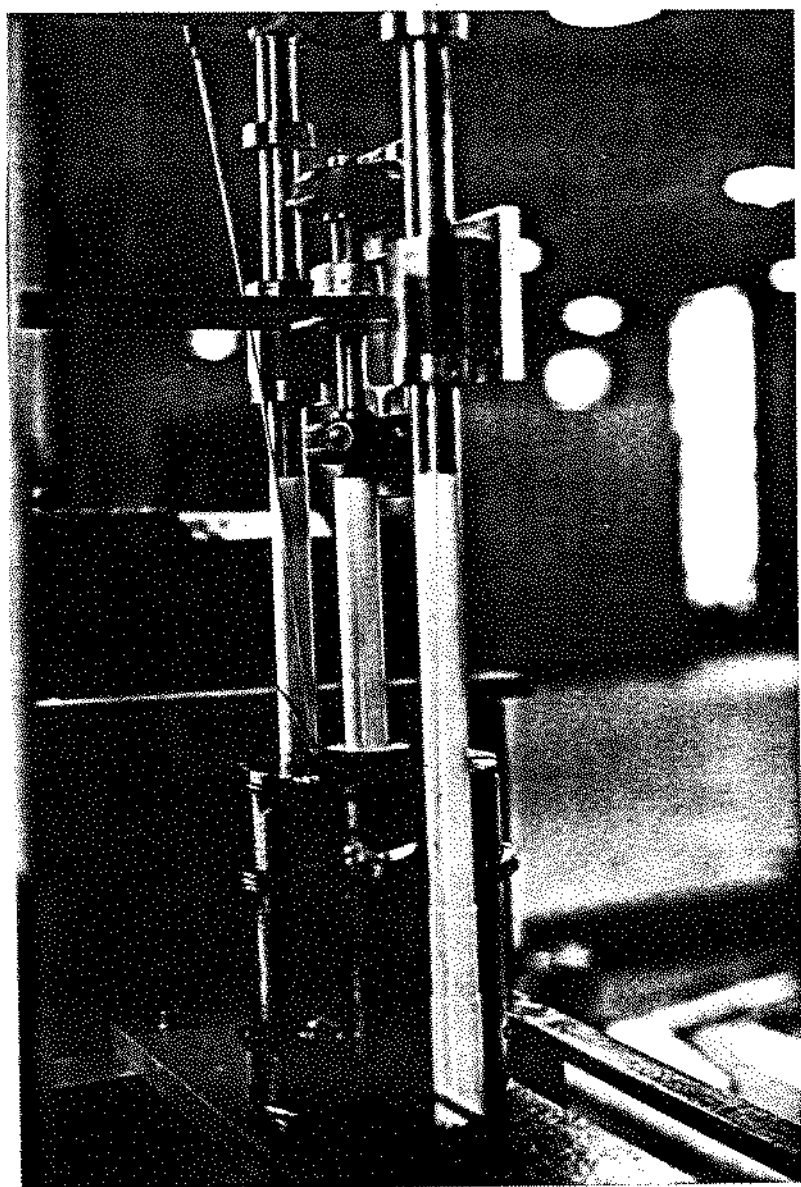


Figura VI.3 - Foto mostrando a câmara de reação, para produção da pasta, do equipamento construído.

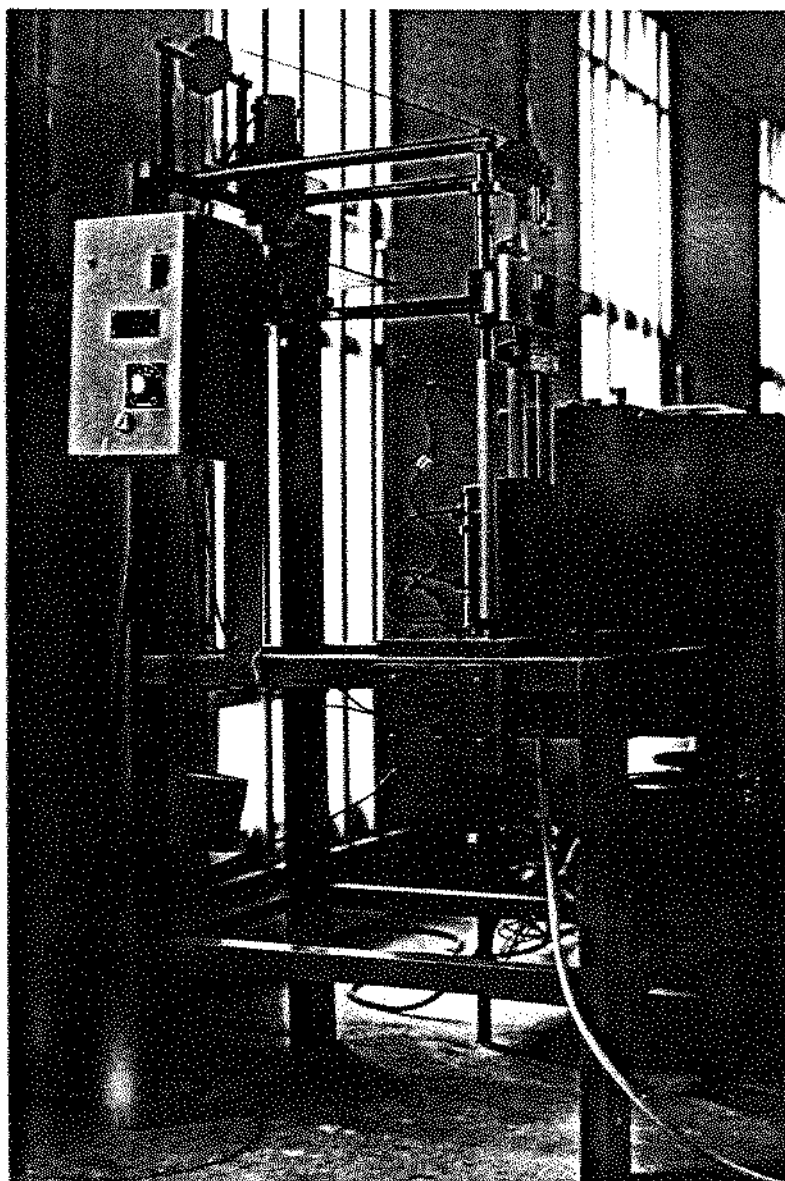


Figura VI.4 - Foto apresentando outra vista do equipamento construído : destaque para o sistema de controle da agitação.

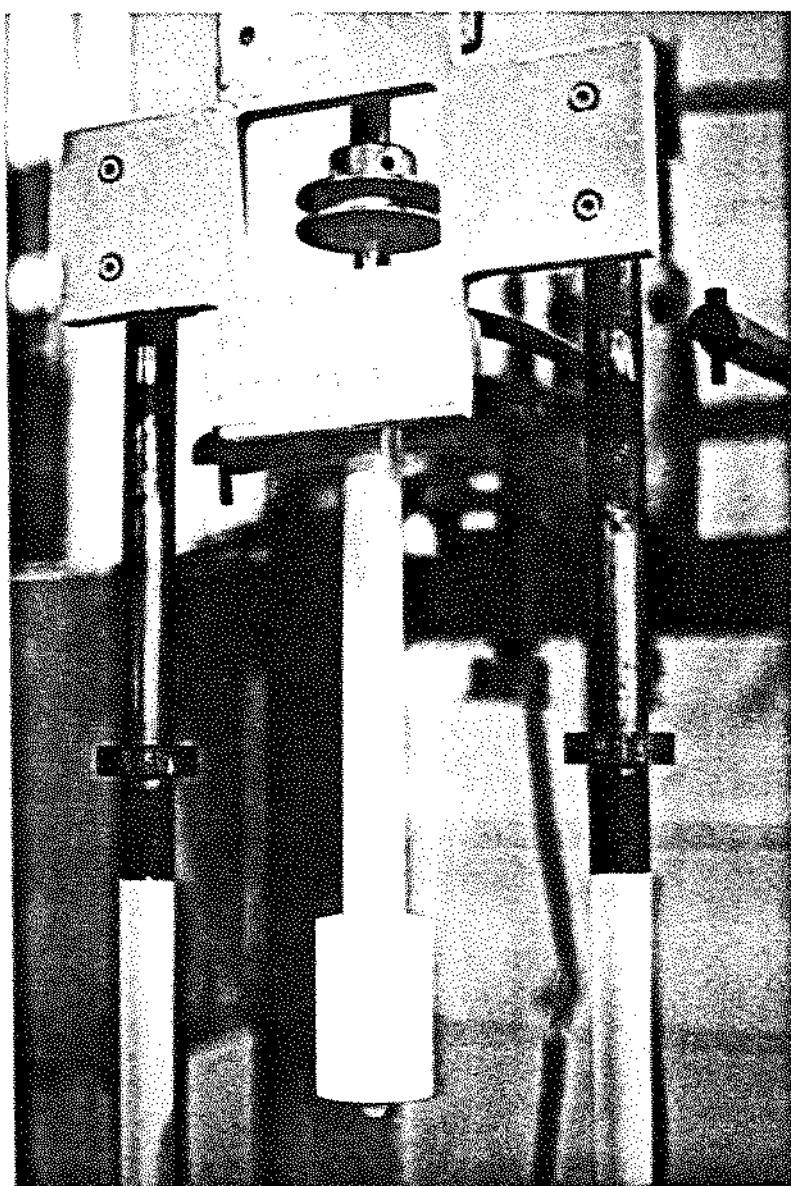


Figura VI.5 - Foto mostrando o rotor de agitação da pasta reofundida.

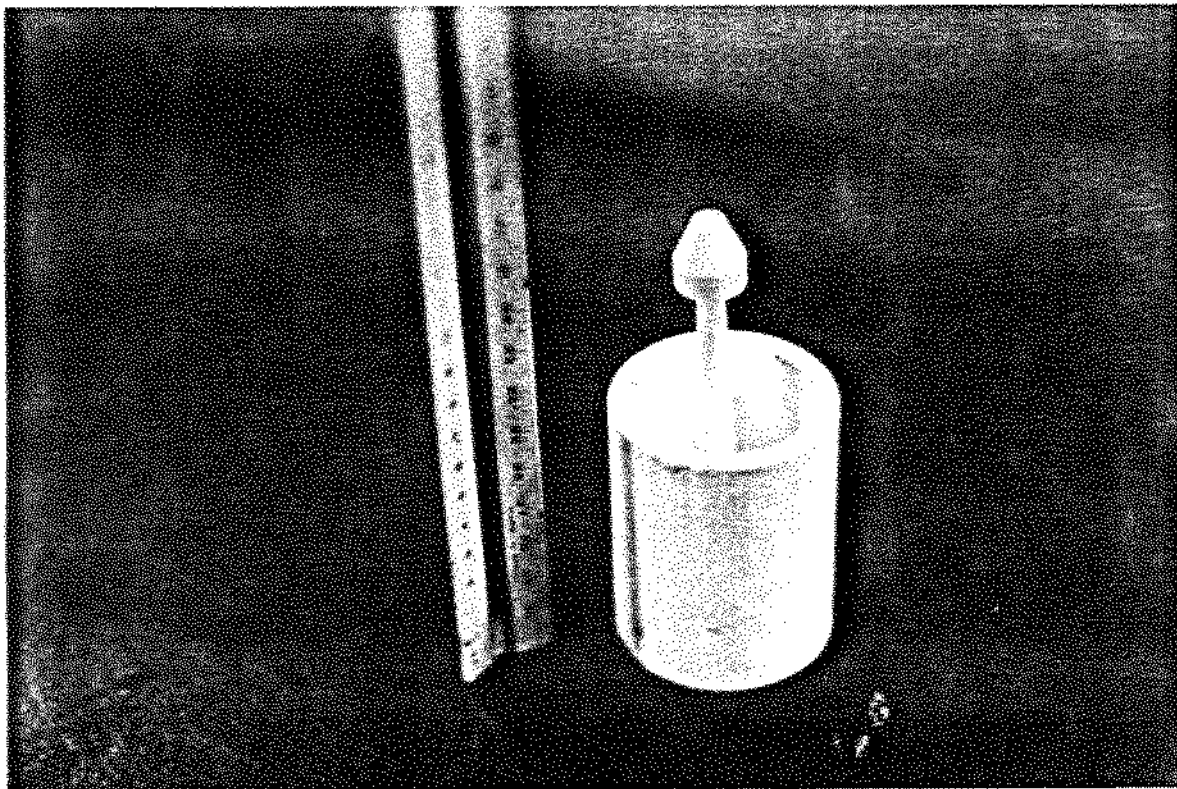


Figura VI.6 - Foto apresentando a lingoteira utilizada para o recolhimento da pasta reofundida.

Tabela VI.1 - Condições utilizadas para a reofundição
 por agitação, a 590 C, da liga Al-6%Si.

VELOCIDADE (RPM)	800	1000	1200
TEMPO (MIN)			
5	FIG. VI.8 (a)	FIG. VI.9 (a)	FIG. VI.10 (a)
10	FIG. VI.8 (b)	FIG. VI.9 (b)	FIG. VI.10 (b)

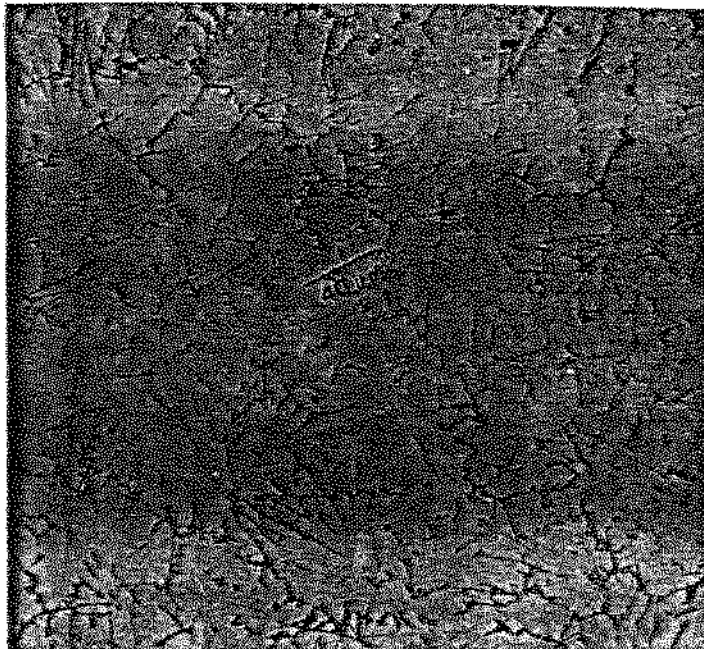
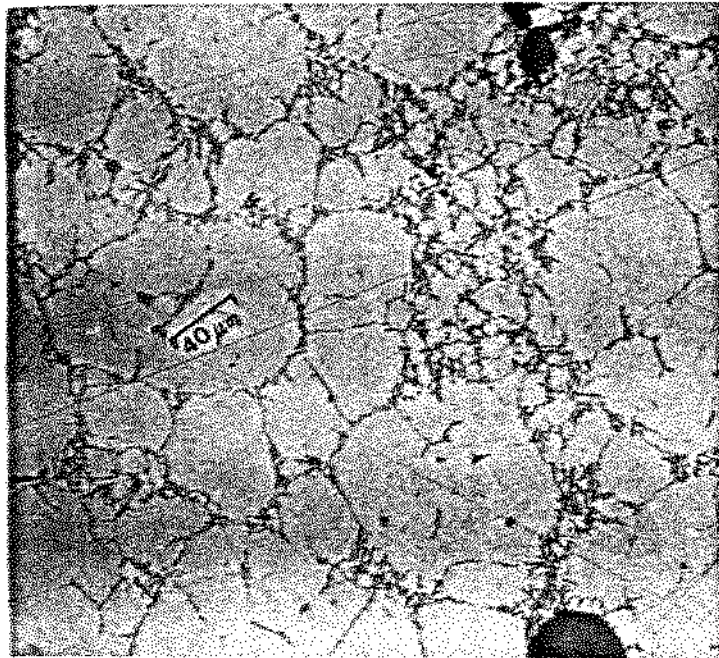


Figura VI.7 - Micrografia da amostra Al-6%Si processada convencionalmente (ausência de agitação).

a



b

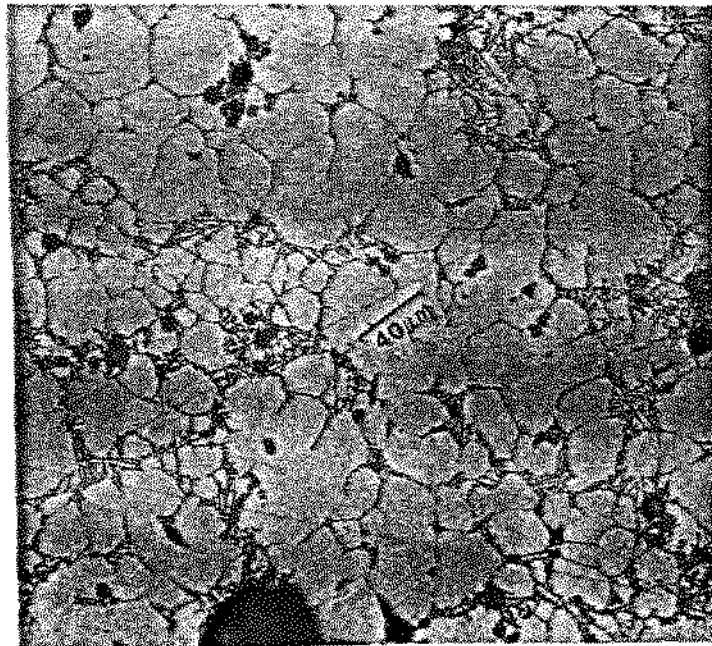
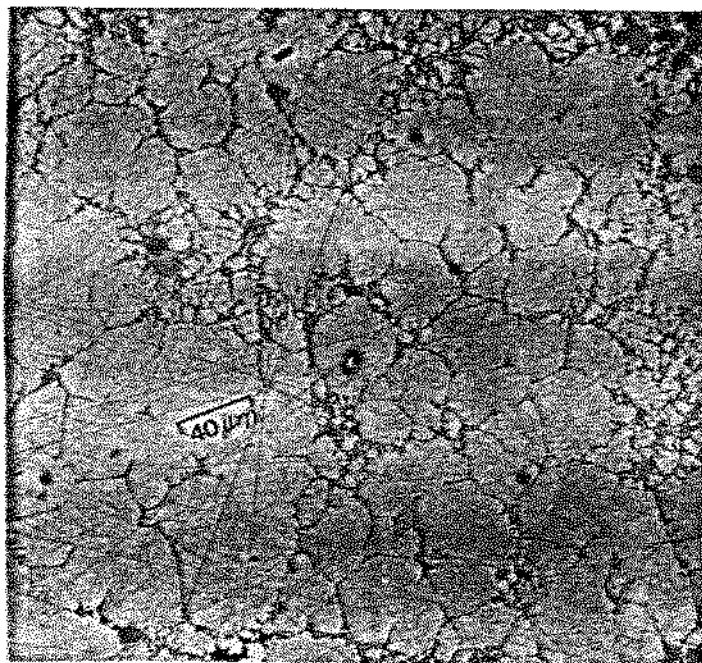


Figura VI.8 - Micrografia das amostras Al-6%Si processadas com velocidade de agitação de 800 rpm
(a) tempo de agitação - 5 minutos;
(b) tempo de agitação - 10 minutos.

a



b

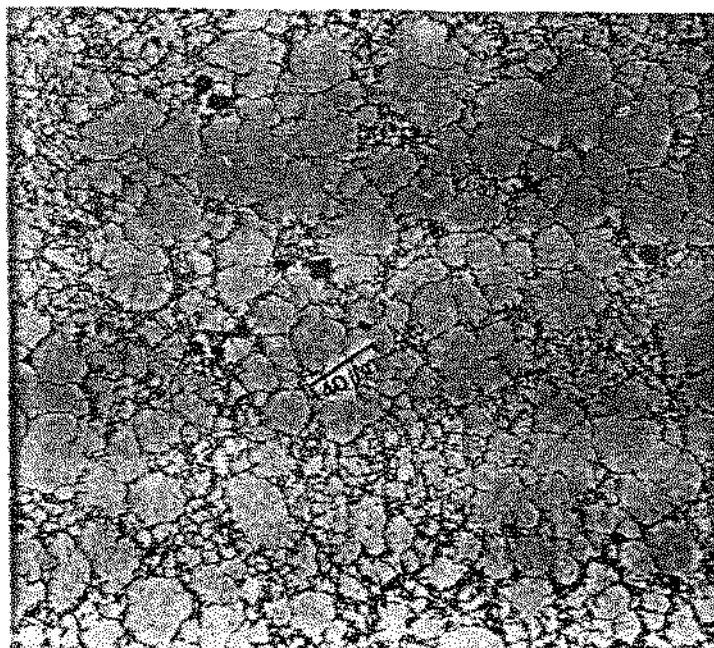
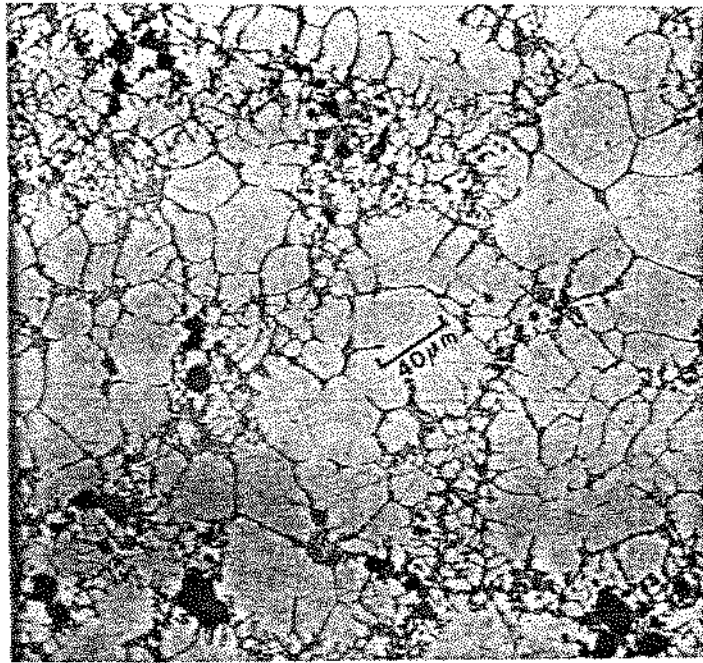


Figura VI.9 - Micrografias das amostras Al-6%Si processadas com velocidade de 1000 rpm
(a) tempo de agitação - 5 minutos;
(b) tempo de agitação - 10 minutos.

a



b

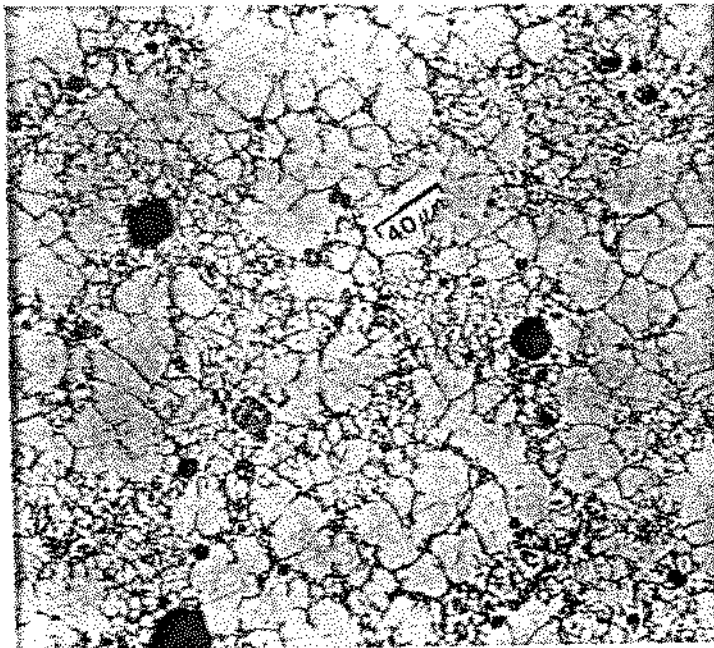


Figura VI.10 - Micrografias das amostras Al-6%Si processadas com velocidade de 1200 rpm
(a) tempo de agitação - 5 minutos;
(b) tempo de agitação - 10 minutos.

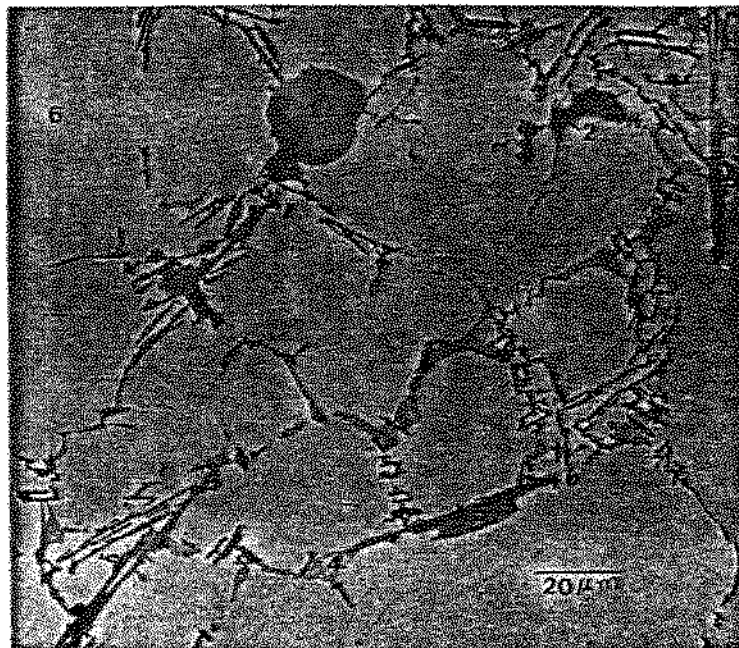


Figura VI.11 - Micrografia da amostra Al-6%Si, processada por 10 minutos e 800 rpm, indicando as regiões analisadas por microanálise.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

O trabalho realizado como tema desta tese, permite concluir, de maneira geral que : o equipamento projetado e construído obteve um bom desempenho no processamento da liga Al-6%Si, no que se refere à produção de pasta metálica reofundida. Nas diferentes condições utilizadas, o parâmetro de mais difícil controle foi a temperatura (variável importante no processo, pois ela define a fração sólida presente na pasta reofundida a ser produzida) . Os outros parâmetros operacionais, tempo e velocidade de agitação, são facilmente manipulados e reprodutíveis na prática.

A análise dos resultados obtidos permitiu enumerar as seguintes conclusões específicas, quanto ao desempenho do equipamento e quanto à qualidade do reofundido produzido:

1. QUANTO AO EQUIPAMENTO

- * O equipamento projetado e construído se presta com eficiência à produção de pastas metálicas reofundidas, dadas as limitações comentadas abaixo:

- * Equipamento de fácil construção e reduzido custo de projeto e montagem;
- * Facilidade de operação e manipulação das variáveis de processamento tempo e velocidade de agitação, os quais definem a qualidade da estrutura da pasta produzida;
- * Potencialmente aplicável como reator para produção contínua de reofundidos, bastando para isso o acoplamento de um sistema contínuo de alimentação de líquido e vazamento da pasta;
- * Pode ser transformado em um viscosímetro rotacional, para estudos de escoamento de pastas metálicas, bastando para isso adicionar um sistema para medição do torque, podendo ser feito por intermédio de célula de carga, que devidamente fixada, mede a reação do forno (montado em rolamento) ao metal semi-sólido cisalhado em sua parede;

* O equipamento, no entanto, apresenta as seguintes limitações:

- a utilização de velocidades de rotação elevadas (acima de 1500 rpm) causa vibrações excessivas no sistema mecânico;
- pequeno volume de pasta produzida por corrida (150 g.);
- temperatura de trabalho no interior da câmara limitada a 650°C.

Dessas limitações, somente a última apresenta caráter realmente restritivo à utilização do equipamento, já que quanto às altas velocidades de agitação, pode-se dizer que velocidades superiores a 1500 rpm são desnecessárias à produção de reofundidos de boa qualidade, e quanto ao pequeno volume produzido, o equipamento pode, com pequenas modificações, se prestar à produção contínua de reofundidos.

2. QUANTO A QUALIDADE DO REOFUNDIDO OBTIDO

Os testes em diferentes condições operacionais efetuados neste trabalho permitem concluir que :

- * Em todas as condições analisadas se obtém estrutura tipicamente reofundida, constituída de glóbulos da fase α -Al envoltos por cristais de Si eutético fino;
- * O aumento do tempo de agitação acarreta uma redução na dimensão das partículas do sólido primário;
- * O aumento da velocidade de agitação, também acarreta redução no tamanho das partículas globulares primárias;
- * Os efeitos do tempo e velocidade de agitação são interdependentes: se aumentado o tempo pode ser reduzida a velocidade, e vice-versa; para a obtenção de estruturas semelhantes;
- * O mecanismo mais provável envolvido na formação da estrutura é o dobramento de ramos dendríticos e sua fragmentação.

CAPÍTULO VIII

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- * Estudo da viabilização da reofundição para processos de injeção;

- * Utilização de tal equipamento para o estudo de novos materiais, por exemplo compósitos;

- * Projetar um rotor/cadinho cilíndrico ou cônico, de material cerâmico, que sejam acoplados de maneira intercambiável e rígida, facilitando a limpeza e a sua troca, no caso de excessivo desgaste;

- * Através de um transdutor de torque fixado em um lugar previamente estabelecido, transformá-lo em um viscosímetro do tipo rotacional para estudos de comportamentos reológicos;

cos de pastas metálicas reofundidos e outros materiais;

* Com a variação dos parâmetros de processamento (tempo e velocidade de agitação, temperatura - fração sólida) produzir diferentes estruturas reofundidas e analisar suas propriedades mecânicas;

BIBLIOGRAFIA

1. FLEMINGS M.C. - "New solidification processes and products" - Metals Technology, Fev.1979, p.56-61.
2. HALLA, N.F., SUÉRY, M. - "Microstructure and mechanical properties of modified and non-modified stir-cast Al-Si hypoeutectic alloys" - Journal of Materials Science, vol.23, 1988, p.2419-2423.
3. FLEMINGS, M.C., RIEK, R.G., YOUNG, K.P. - "Rheocasting" - Material Science and Engineering, vol.25, 1976, p.103-117.
4. SPENCER, D.B., MEHRABIAN, R., FLEMINGS, M.C. - "Rheological behavior of Sn-15%Pb in the crystallization range" - Metall.Trans., vol.3, Julho 72, p.1925-1931.
5. YOUNG, K.P., RIEK, R.G., FLEMINGS, M.C. - "Structure and properties of thixocast steels" - Metals Technology, Abril 1979, p.130-137.
6. RIEK, R.G., MEHRABIAN, R., et al - "Machine casting of a partially solidified high copper content alloy" - AFS Transactions, vol.83, 1975, p.25-30.
7. KATTAMIS, T.Z. - "Casting of semi-solid metals" - Int. Symposium in Quality Control of Engineering alloys and the role of Metals Science, Delft/Holanda, 1977, p.189-201.
8. FLEMINGS, M.C., RIEK, R.G., YOUNG, K.P. - "Rheocasting processes" - AFS Int. Cast Metals Journal, vol.1, 1976, p.11-22.

9. MEHRABIAN, R., FLEMINGS, M.C. - "Casting of semi-solid aluminum alloys" - Inst. Conference on light metals, Leoben/Viena, 1975, p.214-217.
10. GIRODT, F.A., ALBINGRE, L., et al - "Rheocasting Al Matrix composites" - Journal of Metals, novembro 1987, p.18-21.
11. THIBES, L.A.G., ROBERT, M.H. - "Desenvolvimento de processo para medida da viscosidade de pastas metálicas reofundidas" - Jornadas Metalurgicas II Congresso ALAMET, Buenos Aires/Argentina, maio 1991, p.71-72.
12. THIBES, L.A.G., ROBERT, M.H. - "Projeto e construção de um equipamento para medida de viscosidade de pastas metálicas reofundidas" - 9 Congresso Brasileiro (CBECIMAT), Águas de São Pedro/SP, 1990, p.923-925.
13. SANTOS, E.C., KIMINAMI, C.S. - "Projeto e construção de um sistema de reofundição contínua para processamento de ligas de baixa temperatura de fusão" - Tese de mestrado apresentada na Universidade Federal da Paraíba, 1989.
14. ROBERT, M.H. - "Proposição de um novo processo para a obtenção de pastas metálicas reofundidas" - Tese apresentada na Universidade Estadual de Campinas para obtenção de título de Prof.Livre Docente, 1989.
15. MEHRABIAN, R., FLEMINGS, M.C. - "Die casting of partially solidified alloys" - AFS. Transactions, vol.80, 1972, p.173-182.

16. SATO, A., MEHRABIAN, R. - "Aluminum matrix composites: fabrication and properties" - Metall.Trans., vol.7B, 1976, p.443-451.
17. RAMATI, S.D.E., MEHRABIAN, R., et al - "Forging of liquid and partially solid Sn-15%Pb and aluminum alloys" - Metall.Trans., 9B, Junho 1978, p.279-286.
18. BACKMAN, D.G., MEHRABIAN, R., FLEMINGS, M.C. - "Die thermal behavior in machine casting of partially solid high temperature alloys" - Metall.Trans., vol.8B, Setembro de 1977, p.471-477.
19. MEHRABIAN, R., JOLY, P.A. - "The rheology of a partially solid alloy" - Journal of Materials Science, vol.11, 1976, p.1393-1418.
20. RAMATI, S.D.E., ABBASCHIAN, G.J., MEHRABIAN, R. - "The structure of a partially solid alloy" - Metall.Trans., vol.9B, Junho 78, p.241-245.
21. VOGEL, A. - "Turbulent flow and solidification: stir-cast microstructure" - Metals Science, Dez.78, p.576-578.
22. VOGEL, A. - "Solidification science helps develop new foundry technology" - Metals and Materials, Fev.79, p.30-32.
23. LAXMANAN, V., FLEMINGS, M.C. - "Deformation of semi-solid Sn-15%Pb alloy" - Metall.Trans., vol.11A, Dez.80, p.1927-1937.

24. ARRUDA, A.C., CAMPOS, M.P. - "Rheocasting techniques applied to grain refinement of aluminum alloys" - Conference in solidification technology in the Foundry and Casthouse, Warwick/Inglaterra, Set.80, p.143-146.
25. MIWA, K., ICHIKAWA, R. - "Apparent viscosity and structure in Al-Si alloys partially solidified under stirring" - J.Japan Inst.Metals, vol.45, n.8, 1981, p.853-859.
26. ICHIKAWA, K., SATOSHI, I., et al - "Homogenization of microstructure an improvement of elevated temperature tensile properties in a Ni-Base Superalloy by rheocasting" - Materials transactions, JIM, vol.31, n.8, 1990, p.730-738.
27. ICHIKAWA, K., SATOSHI, I. - "Microstructure an tensile properties of rheocast Al-Cu, Bi-Sn, an Bi-Pb eutectic alloys" - Materials Transactions, JIM, vol.31, n.1, 1990. p.75-82.
28. ASSAR, A., MAHALLAWY, N., TAHA, M.A. - "Fluidity of stir-cast Al alloy into shell mold" - Umono, vol.52, n.8, 1980, p.475-480.
29. ASSAR, A., MAHALLAWY, N., TAHA, M.A. - "Influence of processing variables on structure and porosity in stir-casting Al-Cu alloys" - Metals Techonology, vol.9, Maio 82, p.165-170.
30. PRASAD, P.R., et al - "Microstructure and mechanical properties of rheocast Al-10%Cu alloy" - Z. Metallkde, vol.73, n.7, 1982, p.420.
31. PRASAD, P.R., et al - "Microstructure of rheocast hypoeutectic Al-Cu alloys" - Z. Metallkde, vol.73, n.11, 1982, p.714-716.

32. SECONDE, J.F., SUÉRY, M. - "Effect of solidification conditions on deformation behavior of semi-solid Sn-Pb alloys" - Journal Materials Science, vol.19, 1984, p.3995-4006.
33. TAHA, M.A., SUÉRY, M. - "Structural characteristics and extrusion behavior of Pb-Sn alloys in semi-solid state" - Metals Technology, vol.11, Junho 1984, p.226-230.
34. NAN, W., GUANGJI, S., HANGUD, Y. - "Rheological study of partially solidified Tin-Lead and Aluminum-Zinc alloys for stir-casting" - Materials Transactions, JIM, vol.31, n.8, 1990, p.715-722.
35. MARSH, P. - "The die is cast in the metal making battle" - New Scientist, Janeiro 82, p.72-74.
36. LEE, H.I., et al - "Structure and segregation of stir-cast Al-Si alloys partially solidified under stirring" - J.Japan Inst.Metals, vol.45, n.8, 1981, p.853-859.
37. TILLER, W.A., O' HARA, S. - "On the mechanisms of crystal multiplication during solidification in the presence of fluid motion - part 2" - Proceedings of the solidification of Metals Conference, ISI P110 - Brighton, u.k., Dez. 67, p.27-36.
38. JACKSON, K.A., HUNT, J.D., UHLMANN, D.R., SEWARD, T.P. - "On the origin of the equiaxed zone in casting" - Trans.of Metall. Society of AIME, vol.236, Fev.66, p.149-157.

39. VOGEL, A., DOHERTY, R.D., CANTOR, B. - "Stir-cast microstructure and slow crack growth" - Int.Conference in solidification and casting, Sheffield/Inglaterra, 1977, p.518-525.
40. APAYDIN, N., PRABHAKAR, K.V., DOHERTY, R.D. - "Segregation in Al alloys solidified under stirring" - Mat. Science and Engineering, vol.46, 1980, p.145-151.
41. SWARTZEBECK, G.W., KATTAMIS, T.Z. - "Solute redistribution in a duplex dendritic structure" - Journal of Materials Science, vol.9, 1974, p.635-643.
42. MORTENSEN, A. - "On the influence of coarsening on microsegregation" - Metall. Trans. A., Maio 88, p.327-334.
43. MOORE, F. - "Rheological properties of thixotropic fluids" - Trans.Brit.Ceram.Soc., vol.58, 1959, p.470-476.
44. MEHRABIAN, R., et al - "Casting partially solid metals and metal-non metal composites" - SDCE Int.Die-casting exposition and Congress, paper n. G-T 77-093, Winsconsin/USA, 1977.
45. OBLACK, J.M., RAND, W.H. - "Solid-liquid phase characterization of several rheocast high performance alloys" - Metall. Trans., vol.7B, Dez.76, p.699-703.
46. OBLACK, J.M., RAND, W.H. - "Structure and properties of the rheocast ferrous alloys 440C" - Metall.Trans., vol.7B, Dez.76, p.705-709.

47. KATTAMIS, T.Z., HOLMBERG, U.T., FLEMINGS, M.C. - "Influence of coarsening on dendrite arm spacing and grain size of Mg-Zn alloy" - Journal of Institute Metals, vol.95, 1967, p.343-349.
48. KATTAMIS, T.Z., FLEMINGS, M.C. - "Dendrite structure and grain size of undercooled melts" - Trans.Met.Soc. AIME, 236, 1966, p.1523-1532.
49. KAHLWEIT, M. - "On the ageing of dendrites" - Scripta Metallurgica, vol.2, 1968, p.251-254.
50. YOUNG, K.P., KIRWOOD, D.H. - "The dendrite arm spacing of Al-Cu alloys solidified under steady state conditions" - Metall.Trans., vol.6A, 1975, p.197-202.
51. GENDA, G., YUYON, C., GEING, A. - "Mechanism of coarsening of dendrite during solidification" - Solidification Processing Conference, Sheffield/Inglaterra, Set.87, p.416-419.
52. KIEVITS, F.J., PRABHAKAR, K.V. - "Rheocasting (stir-casting) of aluminum alloys" - Int.Symposium in Quality Control of Engineering alloys and the role of metal science, Delft/Holanda, 1977, p.203-213.
53. WINTER, J., DANTZIG, J., TYLER, D. - "U.K. Patent application, number GB 2042, 386 A, 1980.
54. BENERJI, A., SURAPPA, M.K., ROHATGI, P.K. - "Cast aluminum alloys containing dispersions of zircon particles" - Metall.Trans., vol.14B, Junho 1983, p.273-280.

55. FASCETTA, E.F., et al - "Die casting partially solidified high copper content alloys" - Die-casting Engineering, Setembro 73, p.44-54.
56. STAGI, D.L. - "Fornos elétricos" - Editora Hemus, 1987.
57. HOLMANN, J.P. - "Transferência de calor" - Editora McGraw-Hill, 1983.
58. SHIGLEY, J.E. - "Elementos de Máquinas" - Livros Técnicos e Científicos Editora SA., vol.2, 1984.
59. FLEMINGS, M.C. - "Solidification processing" - Editora McGraw-Hill, USA, 1974.
60. MONDOLFO, L.F. - "Aluminum alloys: structure and properties" - Butter Worthsm, London, 1976.
61. AMERICAN SOCIETY FOR METALS - "Metals Handbook" - Ed.ASM, vol.8, USA, 1973.
62. AMERICAN SOCIETY FOR METALS - "Metals Handbook" - Ed.ASM, vol.7, USA, 1972.