

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE REOFUNDIÇÃO CONTÍNUA
PARA PROCESSAMENTO DE LIGAS DE BAIXA TEMPERATURA DE FUSÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ENGENHARIA MECÂNICA

- ERINALDO CLEMENTE DOS SANTOS -

ENGENHEIRO MECÂNICO

CAMPINA GRANDE, MARÇO DE 1989

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE REOFUNDIÇÃO
CONTINUA PARA PROCESSAMENTO DE LIGAS DE BAIXA
TEMPERATURA DE FUSÃO

ERINALDO CLEMENTE DOS SANTOS

PROJETO E CONTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE REOFUNDIÇÃO
CONTINUA PARA PROCESSAMENTO DE LIGAS DE BAIXA
TEMPERATURA DE FUSÃO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento às exigências para
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. CLÁUDIO SHYINTI KIMINAMI

CAMPINA GRANDE,
.... DE MARÇO 1989



S237p Santos, Erinaldo Clemente
Projeto e construcao de um sistema de reofundicao
continua para processamento de ligas de baixa temperatura
de fusao / Erinaldo Clemente dos Santos. - Campina Grande,
1989.
103 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Mecanica) -
Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e
Tecnologia.

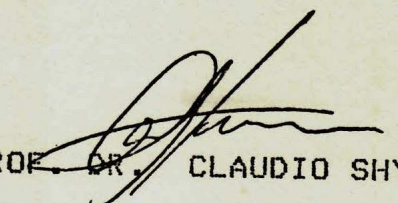
1. Reofundicao Continua 2. Ligas Metalicas 3. Ligas de
Baixa Temperatura de Funcao - 4. Engenharia Mecanica 5.
Dissertacao I. Kiminami, Claudio Shyinti, Dr. II.
Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) III.
Titulo

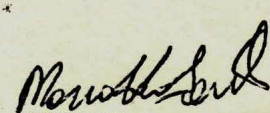
CDU 621.74.047(043)

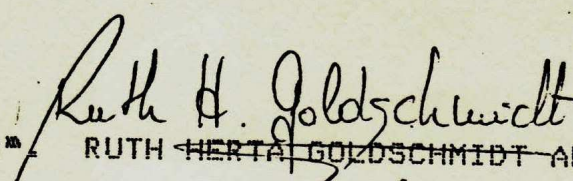
PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE REOFUNDIÇÃO
CONTINUA PARA PROCESSAMENTO DE LIGAS DE BAIXA
TEMPERATURA DE FUSÃO

ERINALDO CLEMENTE DOS SANTOS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 21 DE MARÇO DE 1989


PROF. DR. CLAUDIO SHYINTI KIMINAMI
ORIENTADOR


PROF. MARCO ANTONIO DOS SANTOS
EXAMINADOR


PROF. DR. RUTH ~~HERTA~~ GOLDSCHMIDT ALIAGA KIMINAMI
EXAMINADORA

CAMPINA GRANDE
MARÇO DE 1989

DEDICATÓRIA

A meus Pais

João Maciel dos Santos

Regina Clemente do Rêgo

A minha Esposa

Maria de Fátima Araújo Santos

A minha Irmã

Aurizete Clemente dos Santos

Agradecimentos

- A Deus, pai todo poderoso, por tudo o que me tem reservado.
- Ao Professor Dr. Cláudio Shyinti Kiminami, orientador deste trabalho, pelo apoio, dedicação e tolerância demonstrados.
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, que através do projeto nº 401.095/87, possibilitou a execução deste trabalho.
- Ao Departamento de Engenharia Mecânica, em atenção à Área de Materiais e Processos de Fabricação, pela facilidade de seus Laboratórios que me permitiram concluir este trabalho.
- Ao Professor Manassés da Costa Agra Mello, pela colaboração prestada na construção do equipamento, principalmente na parte elétrica.
- Ao professor Antonio Almeida Silva, pela apresentação de sugestões na elaboração do projeto.
- A BRASINOX na pessoa do Engenheiro Agrício Luiz Siqueira Brito, pela doação de parte do material, utilizado na construção do equipamento.
- Aos bolsistas de iniciação científica - CNPq José Inácio, Alberto Sálvio e Carlos Roberto pela cooperação na construção e experimentos do equipamento.
- Aos colegas Lima, Kênia, Jogerson e Luciano pelo companherismo demonstrado durante o curso.
- Ao Departamento Nacional de Obras Contra as Sêcas, DNOCS, na pessoa do Engenheiro Nelito Gomes de Matos pela usinagem de alguns componentes do sistema.
- Aos funcionários do D.E.M José Felix e Francisco Barsileiro Filho, pela colaboração prestada nos serviços gerais e preparação das amostras respectivamente.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

d_e	-	diâmetro externo
d_i	-	diâmetro interno
e	-	espessura
h	-	altura
l	-	litros
m	-	metro
m^3	-	metros cúbicos
min	-	minuto
rpm	-	rotações por minuto
"	-	polegadas
%	-	porcentagem

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	-	Ampéres
C	-	Calor específico
°C	-	Graus Célcus
CFC	-	Cúbica de Face Centrada
E	-	Tensão
I	-	Corrente
J	-	Joule
K	-	Kelvin
Kg	-	Quilogramas
L _v	-	Calor latente
L	-	Comprimento
M	-	Massa
P	-	Potência
Q	-	Quantidade de calor
T _m	-	Temperatura ambiente
T _f	-	Temperatura de fusão
V	-	Volts
W	-	Watts
Ω	-	Ohms

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	IDENTIFICAÇÃO	PAG.
2.1	- Apresentação esquemática do processo de reofundição (3).	12
2.2	- Exemplos de regiões ótimas para reofundição em sistemas binários Al-Cu, Al-Mg e Pb-Sn (7).	13
2.3	- Viscosidade aparente da liga Sn-15% Pb reofundida para diferentes taxas de cisalhamento (grau de agitação) (7).	14
2.4	- Esquema do equipamento para reofundição intermitente (8).	15
2.5	- Esquema do processo de reofundição contínua (9).	16
2.6	- Esquema do processo de tixofundição (10).	17
2.7	- Esquema do processo de reofundição em combinação com um processo de transformação mecânica (Laminação) (7).	18
3.1	- Esquema do sistema de reofundição contínua projetado.	34
3.2	- Conjunto de cadinhos e canal de vazamento.	35
3.3	- Agitador (parte que fica diretamente em contato com o metal fundido).	36
3.4	- Complemento do agitador e acoplamento.	37
3.5	- Apresentação de todos os componentes existentes em cada sistema.	38
3.6	- Apresentação da alternativa escolhida para a realização do movimento vertical do agitador.	39
3.7	- <i>Projeto de</i> Estrutura de sustentação da unidade de processamento projetada.	40
3.8	- <i>Projeto da este.</i> Estrutura do painel de controle projetada.	41
3.9	- Esquema do circuito elétrico da unidade de controle para o sistema de reofundição contínua.	42

4.1	- Conjunto de cadinhos e canal de vazamento construído.	54
4.2	- Parte do agitador que fica em contato direto com o metal fundido.	55
4.3	- Unidade de processamento construída, já fixada na estrutura de sustentação.	56
4.4	- Unidade de controle construída, com todos os equipamentos já instalados.	57
4.5	- Unidade de processamento e unidade de controle com todos seus componentes.	58
5.1	- Diagrama de equilíbrio da liga Pb - Sn(15).	64
6.1	- Análise da variação da temperatura em diversos pontos ao longo do sistema de agitação.	69
6.2	- Estrutura da amostra da liga Pb - 26% Sn obtida utilizando processo convencional de fundição.	70
6.3	- Estrutura da amostra da liga Pb - 26% Sn obtida utilizando o processo de reofundição.	71

I N D I C E

Í N D I C E

	PAG
CAPÍTULO - 1 - Introdução e Objetivos	01
1.1 - Introdução	02
1.2 - Objetivos	03
CAPÍTULO - 2 - O Processo de Reofundição	05
2.1 - Conceitos Básicos do Processo	06
2.2 - Processos	06
2.2.1 - Reofundição Intermitente	07
2.2.2 - Reofundição Contínua	07
2.3 - Vantagens Técnicas e Econômicas do Processo Reofundição	08
2.4 - Variáveis de Processo e Seus Efeitos na Estrutura e Propriedades de Ligas Reofundida Continuamente	09
2.4.1 - Taxa de Resfriamento	09
2.4.2 - Taxa Média de Cisalhamento	10
2.4.3 - Fração Volumétrica de Sólidos	10
2.5 - Aplicações para Reofundição e Ti- xofundição	10
FIGURA DO CAPÍTULO - 2	11

CAPÍTULO - 3 - Projeto	19
3.1 - Especificações do Projeto	20
3.2 - Sistema de Reofundição Contínua	20
3.3 - Unidade de Processamento	21
3.3.1 - Sistema de Fusão	21
3.3.2 - Sistema de Agitação	23
3.3.3 - Sistema de Vazamento	27
3.4 - Estrutura de Sustentação da Unidade de Processamento	29
3.5 - Unidade de Contrôlo	29
3.5.1 - Sistema de Fusão	30
3.5.2 - Sistema de Agitação	30
3.5.3 - Sistema de Vazamento	31
3.5.4 - Painel de Contrôlo	32
FIGURAS DO CAPÍTULO - 3	33
CAPÍTULO - 4 - Construção e Montagem	43
4.1 - Unidade de Processamento	44
4.1.1 - Cadinhos e Canal de Vazamento	44
4.1.2 - Fornos	45
4.1.3 - Agitador: Movimento de Rotação e Vertical	46
4.1.4 - Motor	47
4.1.5 - Estrutura de Sustentação da Unidade Processamento	48

4.2	-	Unidade de Contrôlo	48
4.2.1	-	Painel de Contrôlo	48
4.3	-	Custo do Equipamento	52
		FIGURAS DO CAPÍTULO - 4	53
CAPÍTULO - 5	-	Reofundição da liga Pb - Sn	59
5.1	-	Preparação da Liga	60
5.2	-	Reofundição da Liga	60
5.2.1	-	Parâmetros de Processo estabelecido	60
5.2.2	-	Procedimento para realização da reofundição	61
5.3	-	Análise Metalográfica	62
		FIGURAS DO CAPÍTULO - 5	63
CAPÍTULO - 6	-	Resultados e Discussões	65
6.1	-	Reofundição da Liga	66
6.2	-	Análise Metalográfica	67
		FIGURAS DO CAPÍTULO - 6	68

CAPÍTULO - 7 - Conclusões	72
CAPÍTULO - 8 - Sugestões para Trabalhos Futuros	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
APÊNDICES	79
APÊNDICE - I	
Propriedades Físicas do Chumbo e Estanho.	80
APÊNDICE - II	
Determinação da Quantidade Necessária de Calor para a Fusão da Liga Pb - 26% Sn.	82
APÊNDICE - III	
Determinação dos Cálculos da Resistência para os Fornos de Fusão, Agitação e Canal de Vazamento com Aquecimento Resistivo.	83
APÊNDICE - IV	
Determinação do Cálculo da Espessura das Paredes de Isolante dos Fornos de Fusão, Agitação e Canal de Vazamento.	92

APÊNDICE - V

Determinação da Potência do Motor de CC a ser
utilizado no Sistema. 98

APÊNDICE - VI

Levantamento de Custo para a Construção do
Equipamento de Reofundição Contínua. 103

R E S U M O

R E S U M O

A reofundição contínua é uma tecnologia inovativa em fundição onde a liga metálica é vazada no estado parcialmente solidificado após sofrer uma agitação mecânica. Esse processo permite a produção de peças fundidas mais homogêneas de qualidade superior e com menor tempo de desmoldagem, quando comparadas com processos convencionais.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de projeto e construção de um sistema de reofundição contínua para processamento de ligas de baixa temperatura de fusão ($T_F \leq 773K$), com as seguintes especificações: vazão média de $0,0006 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, velocidade de agitação na faixa de 1000 rpm, capacidade do cadinho de $0,005 \text{ m}^3$ e preciso controle da vazão. Uma unidade de processamento foi construída constando de três fornos de aquecimento resistivo independentes, para fusão, agitação e vazamento do metal. O agitador tem dupla função qual seja a de agitar a pasta - metálica e controlar a vazão pelo movimento vertical. Numa unidade de controle foi concentrada os equipamentos de medição e controle dos fornos e do agitador.

ABSTRACT

A B S T R A C T

Continuous rheocasting is a new casting process, where a semi-solid slurry is vigorously agitated before casting. This process is promising to improve the soundness and homogeneity of the cast product with shorter period of time in the die.

This work presents the design and construction of a continuous rheocasting system for processing low melting temperature alloys ($T_F \leq 773K$). The specification of this system were: average flow rate $0,0006 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, maximum stirring rate 1000 rpm, crucible capacity $0,005 \text{ m}^3$ and accurate flow rate control. A processing unit with three resistance furnaces to melting, stirring and casting was constructed. The stirrer had two functions: to stir the semi-solid slurry and control the flow rate by vertical movement. In a control unit, all equipments for measurements and controls of the system was set up.

CAPÍTULO - 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

CAPÍTULO - 1 - Introdução e Objetivos

1.1 - Introdução

Há diversas e importantes razões para se produzir peças metálicas fundidas com tamanho de grão fino. Por exemplo a alta ductilidade ocorre principalmente como o resultado de uma estrutura finamente dividida, além de obtermos um aumento na resistência mecânica (1). Geralmente procura-se obter peça metálica com grão fino, pois as propriedades mecânicas a temperatura ambiente melhoram. Numa peça bruta de solidificação é difícil saber se o efeito benéfico do refino de grão é direto (resultando da presença de contornos de grão funcionando como barreira para o movimento de discordâncias) ou indireto (melhor distribuição de constituintes frágeis com grão menor).

Há duas formas básicas de aumentar o número de grãos de uma peça metálica fundida (1). Uma delas envolve o aumento da taxa de nucleação, enquanto a outra se baseia na fragmentação das dendritas em crescimento formando núcleos adicionais (multiplicação de grãos).

Existem 3 (três) processos principais para a obtenção do refino de grão: SUPERRESFRIAMENTO é o método direto de refino de grão sem adições, através do aumento da Taxa de Nucleação. É pouco prático, pois em peças pequenas, mesmo coquilhadas, a reprodutibilidade de tamanho de grão (e das propriedades que são função deste) será deficiente pelo menos em condições de produção industrial. Enquanto que nas peças grande não se consegue estrutura uniformemente refinada, o refino de grão por ADIÇÃO DE INOCULANTES é o método mais comum efetivo e reprodutível de controle do tamanho de grão. Esses inoculantes são geralmente pequenas partículas de fases secundárias, que aumentam a taxa de Nucleação Heterogênea. A grande preferência pelas adições como meio de refino de grão, deve-se ainda à pequena variação dos resultados diante de variações na técnica vazamento e moldagem. O refino de grão por AGITAÇÃO é uma processo que se baseia na quebra mecânica da parte sólida inicial, multiplicando estas partes sólidas, gerando com isso um número grande de sólidos em crescimento. Diversas técnicas podem ser empregadas no aumento da multiplicação de grãos. Em geral elas envolvem a fragmentação das dendritas em crescimento na interface sólido - líquido e redistribuição dos fragmentos pelo metal líquido por um fluxo forçado de fluido. Por isso, vibrações mecânicas, campos magnéticos alternados, vibrações ultrasônicas e muitas outras técnicas podem ser usadas.

Atualmente um processo de agitação tem despertado um grande interesse no mundo inteiro, devido à sua grande perspectiva na aplicação industrial: a REOFUNDIÇÃO. Esse processo surgiu do trabalho pioneiro de M. C. Flemings (2), em 1972, no Massachusetts Institute of Technology (MIT - USA). O processo consiste da agitação mecânica do metal ou liga metálica dentro do intervalo de temperatura entre líquidos e sólidos, produzindo uma massa viscosa com estrutura não dendrítica. Verificou-se que as dendritas parcialmente solidificadas são fragmentadas através da agitação mecânica, resultando em uma estrutura globulítica homogênea, obtendo-se com isso uma melhoria das propriedades mecânicas.

As experiências foram inicialmente realizadas com sistemas orgânicos e a seguir com ligas de baixo ponto de fusão.

As principais vantagens do processo são (3):

- maior grau de homogeneidade devido o refino de grão e a inexistência de macro-segregação.
- redução da tendência de surgimento de trincas a quente.
- redução do ataque térmico à coquilha ou à matriz de conformação, devido à temperatura baixa de vazamento.
- O material viscoso resultante pode ser diretamente usado em combinação com um processo de transformação mecânica.
- possibilidade de alto grau de automação.
- melhores propriedades mecânicas que os materiais fundidos convencionalmente.
- menos problemas com o aprisionamento de gases.

1.2 - Objetivos

O Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba - Campus II, na área de Materiais e Processos de Fabricação vem desenvolvendo atividades de pesquisas em tecnologia de fundição de ligas parcialmente

solidificadas - Reofundição contínua em ligas Sn - Pb visando o domínio desta nova tecnologia. Para tanto o presente trabalho objetiva projeto e construção de um sistema para reofundição contínua com capacidade de aproximadamente $0,005 \text{ m}^3$ (5 litros) de metais de baixa temperatura de fusão ($t_{\text{max}} \leq 773\text{K}$).

O sistema deverá permitir um controle preciso da taxa de cisalhamento, fração de sólidos e vazão do metal reofundido.

Para teste da funcionabilidade do sistema construído será utilizado a liga Pb - Sn. Essa liga foi escolhida por ser uma liga de baixa temperatura de fusão, o que simplifica o sistema a ser construído e também por ser uma liga já relativamente estudada em pesquisa de processos diversos de refino de grão (4),(5), o que possibilita uma comparação de resultados visando a otimização do sistema construído. Além disso, o sistema binário Pb - Sn é um típico eutético, com linhas bastante definidas de fases α e β , o que facilita no controle da fração de sólidos na zona entre temperatura sólidos e líquido.

CAPÍTULO - 2

O PROCESSO DE REOFUNDIÇÃO

CAPÍTULO - 2 - O Processo de Reofundição

2.1 - Conceitos Básicos do Processo

No processo reofundição, através da agitação mecânica dentro do intervalo de temperatura entre sólidos e líquidos da liga empregada (estado parcialmente solidificado), obtém-se um banho pastoso que com o aumento do tempo de agitação deixa de apresentar uma estrutura dendrítica para ter uma estrutura de aspecto globulítico (3), (Figura 2.1).

O produto final obtido por reofundição apresenta macroscopicamente granulometria equiaxial fina; microscopicamente sua estrutura é constituída de pequenos glóbulos homogêneos da fase primária, com reduzida taxa de segregação, cercados por fina rede dendrítica (6).

2. Os parâmetros de controle do processo são (7), o intervalo sólido - líquido disponível e a temperatura de agitação estabelecida (fração de sólidos f_s), tempo de agitação, velocidade de agitação, viscosidade η e velocidade de cisalhamento $\dot{\gamma}$ (7).

A figura 2.2 apresenta exemplos de sistemas binários com regiões ótimas para a reofundição (AlCu, AlMg, PbSn) (7). A massa sólido-líquida não mostra um comportamento linear (Newtoniano) e sim um comportamento tixotrópico que é ilustrado para a liga Sn - Pb na figura 2.3. A viscosidade aparente (η_a) decresce com aumento da taxa de cisalhamento (dependente do grau de rotação e da espessura do espaço anular de agitação). Para fração de sólidos de 0,5 e taxa de cisalhamento de 350 s^{-1} a viscosidade aparente permanece abaixo de 1Ns/m^2 (10 Poise). Isto possibilita a este material ser fundido na forma de lingote ou conformado por processo tal como fundição sob pressão.

2.2 - Processos

O metal pastoso reofundido pode ser produzido de modo intermitente ou de modo contínuo.

2.2.1 - Reofundição Intermitente

A figura 2.4 apresenta esquema de um equipamento para reofundição intermitente, construído por R. Mehrabian e M. C. Flemings (8). O processo se inicia com o aquecimento da liga metálica até acima da temperatura líquidus no forno de aquecimento resistivo. Os agitadores são então abaixados para dentro do banho e inicia-se a agitação. A temperatura do banho é abaixada a uma taxa pré-determinada, via controlador, até que o metal atinja a temperatura desejada no intervalo sólidos - líquidus. Nessa temperatura, a agitação continua à rotações de 400 rpm aproximadamente para os agitadores enquanto que o cadinho também rotaciona a 3rpm. O vazamento é feito com uma colher de fundição pré-aquecida. Alguns pesquisadores (2) acreditam que a reofundição intermitente com sua natureza de banho isotérmico não é atrativo para a indústria e propõem o uso da reofundição contínua.

2.2.2 - Reofundição Contínua

A figura 2.5 apresenta esquema de um equipamento para reofundição contínua, proposto por M. C. Flemings (9). O equipamento consiste de uma câmara cilíndrica para a fusão do material e uma câmara coaxial logo abaixo, para a sua agitação. No meio desta câmara existe um cilindro (agitador), que tem o canto inferior chanfrado para melhorar a eficiência da agitação. O agitador é rotacionado por velocidade ajustável por um motor acoplado na sua parte superior. As câmaras superior e inferior são aquecidas por fornos (indução ou resistivo) independentes. O gradiente de temperatura necessário dentro da câmara de agitação é alcançado com a ajuda de várias zonas de aquecimento, reguláveis independentemente, junto com um sistema local de refrigeração (água). O metal líquido flue para o espaço entre o agitador e a parede da câmara de agitação, onde ele é resfriado e no estado parcialmente solidificado é vigorosamente agitado. A pasta líquida formada é então vazada continuamente podendo ser então diretamente conformada, como mostra a figura 2.5.

Uma alternativa é o processo de tixofundição onde a propriedade tixotrópica do metal reofundido é explorada, como apresentada na figura 2.6. Neste processo o metal reofundido é primeiramente solidificado em lingotes. Posteriormente, cada lingote é seccionado em tamanhos adequados para a fundição sob pressão. As cargas podem ser mantidas à temperatura ambiente por tanto tempo quanto desejável e então reaquecidas para a fundição.

A carga é aquecida até que um "amolecimento" desejável é atingido (viscosidade de cerca 10^4 Ns/m²). Esta carga com consistência manipulável é levada a câmara de injeção. Quando submetida a uma deformação por cisalhamento, a carga assume rapidamente as características de líquido pastoso fluido resultando ótimo produto.

Uma outra possibilidade é a combinação com um processo de transformação mecânica. Por exemplo: Reofundição + Laminação = Rheorollcasting (figura - 2.7). Assim consegue-se economizar algumas etapas intermediárias e com isto, diminuir os custos de produção (material - energia) em relação a um ciclo convencional de produção.

2.3 - Vantagens Técnicas e Econômicas do Processo Reofundição

Através do processo reofundição pode-se evitar diversos tipos de defeitos de fundição e com isto obter uma série de melhoramentos em relação ao material fundido convencionalmente. Além do maior grau de homogeneidade devido o refino de grão e à inexistência de macro-segregação, a sanidade da peça reofundida ou tixofundida é melhor do que da peça fundida de maneira convencional. Isto se deve a duas razões (2): (a) o metal quando já parcialmente sólido quando entra no molde, a porosidade devido a contração é menor e mais homogeneamente distribuída. (b) O material pastoso sendo substancialmente mais viscoso do que o metal completamente líquido, espalha menos quando é injetado na cavidade do molde, aprisionando menos gases no molde. Outra grande vantagem para a fundição no estado semi-sólido é a melhoria da susceptibilidade a trincas à quente em ligas de alumínio, e da qualidade da superfície. Trincas à quente é o resultado de um suprimento não satisfatório de metal para preencher o espaço quando o esqueleto de dendritas contrai térmicamente. Uma vez que a agitação vigorosa adia a formação da rede contínua sólida, é esperado que o líquido remanescente é livre para se mover e contra atacar a tendência de trincas.

A possibilidade de alto grau de automação pela eliminação do manuseio do metal líquido, e particularmente do carregamento do metal líquido com colher de fundição para a câmara de injeção é mais uma vantagem oferecida por este novo processo. A produção pode ser aumentada uma vez que o metal semi-sólido contém menos calor do que o metal líquido podendo ser desmoldado em menos espaço de tempo. Redução do ataque térmico à coquilha ou à matriz de conformação, devido à temperatura baixa de vazamento. Menos porosidade por rechupe na peça fundida devido o metal ser vazado já parcialmente sólido.

Propriedades mecânicas de algumas ligas reofundidas foram investigadas (2) e enquanto para fundição convencional a razão resistência a compressão/resistência a tração (σ_c/σ_t) é somente de 2 / 3, para aços inoxidáveis reofundidos essa razão é de 7 e para a liga Al - 10% Cu é 4 / 5. De maneira geral as propriedades mecânicas dos materiais reofundidos foram melhores do que dos materiais fundidos convencionalmente.

2.4 - Variáveis de Processo e seus Efeitos na Estrutura e Propriedades de Ligas Reofundida Continuamente

As três variáveis de processo importante que afetam a estrutura e viscosidade das ligas reofundidas continuamente são:

2.4.1 - Taxa de Resfriamento

No processo de reofundição contínua duas taxas de resfriamento são definidas: a) taxa de resfriamento primário: é a taxa de resfriamento do metal da temperatura líquido até a temperatura no intervalo sólido - líquido. b) taxa de resfriamento secundário: é a taxa de resfriamento do metal reofundido até a temperatura ambiente. A taxa de resfriamento primário tem grande influência na estrutura da pasta semi-sólida. Com o aumento da taxa de resfriamento, tem-se partículas sólidas primárias mais uniformes e de menores tamanhos. Entretanto resulta num aumento da quantidade relativa de líquido preso em cada partícula, aumento da fração volumétrica efetiva de sólido, aumentando assim sua viscosidade.

Uma baixa taxa de resfriamento secundário aumenta a tendência de crescimento das partículas primárias. Durante esse resfriamento secundário, foi observado em ligas Al - 4,5% Cu (2) uma formação de uma camada de soluto nos contornos das partículas primárias. Essa camada de soluto desaparece com tratamento térmico.

2.4.2 - Taxa Média de Cisalhamento

A influência da taxa média de cisalhamento no tamanho das partículas e na uniformidade dos tamanhos dos grãos é observada quando a taxa de resfriamento é baixa. Em geral, o aumento da taxa média de cisalhamento reduz a quantidade de líquido preso nas partículas sólidas primárias, resultando no decréscimo da viscosidade.

2.4.3 - Fração Volumétrica de Sólidos

O aumento da fração volumétrica de sólidos resulta num aumento da viscosidade.

2.5 - Aplicações para Reofundição e Tixofundição

As aplicações técnicas da reofundição e tixofundição variam de material para material (10). Para o alumínio, por exemplo, o aumento da vida útil da matriz advindo desses processos é provavelmente menos importante do que o fato de se obter produtos de melhor qualidade.

Aplicações no setor automobilístico onde a resistência, usinabilidade, baixo peso e custo são importantes, são as de melhores perspectivas para reofundição e tixofundição de alumínio e suas ligas. Na fundição de latão e bronze onde o custo é alto devido à curta vida útil das matrizes e onde somente latão amarelo de baixa temperatura de fusão são fundidas sob pressão; o aumento da vida útil das matrizes resultante da reofundição podem ser de grande importância.

Em caso similar pode-se incluir os ferros fundidos e aços, onde a fundição a partir do aço líquido é anti-econômico devido à baixa vida útil das matrizes. A reofundição abre a possibilidade de produção de peças fundidas com grandes volumes com grãos refinados.

A forjabilidade de aços inoxidáveis 304 e 440 C se mostraram melhor para o material reofundido do que do material fundido convencionalmente. Outra possibilidade para a reofundição continua é a fabricação de materiais conjugados pela adição de partículas ou materiais fibrosos (SiC; Al_2O_3 ; MgO etc...) ao metal semi-sólido reofundido.

FIGURAS
CAPÍTULO - 2

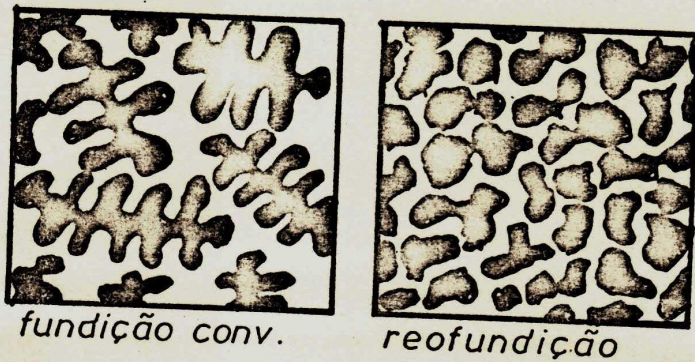
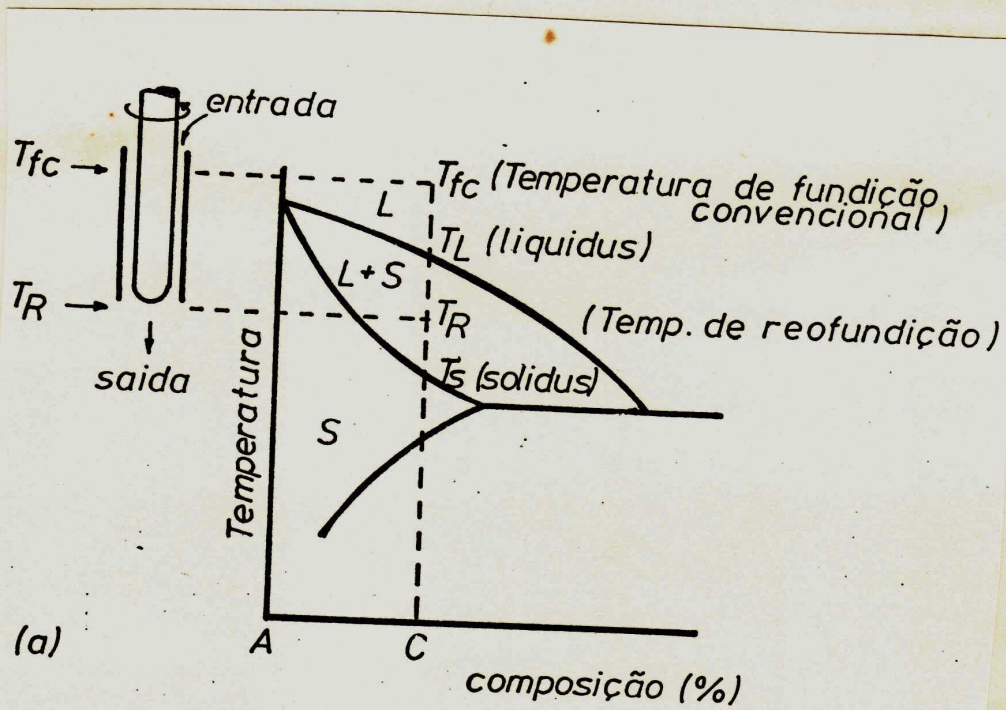


FIGURA - 2.1

Apresentação esquemática do processo de Reofundição (da Referência 3).

a - Região na qual o metal líquido é resfriado e sofre a ação da Agitação Mecânica.

b - Estrutura de um material fundido de maneira convencional (T_{fc}) e de um material reofundido (T_r)

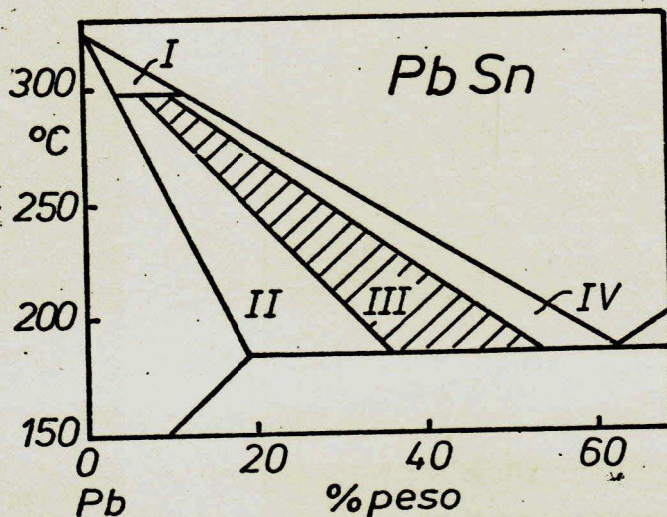
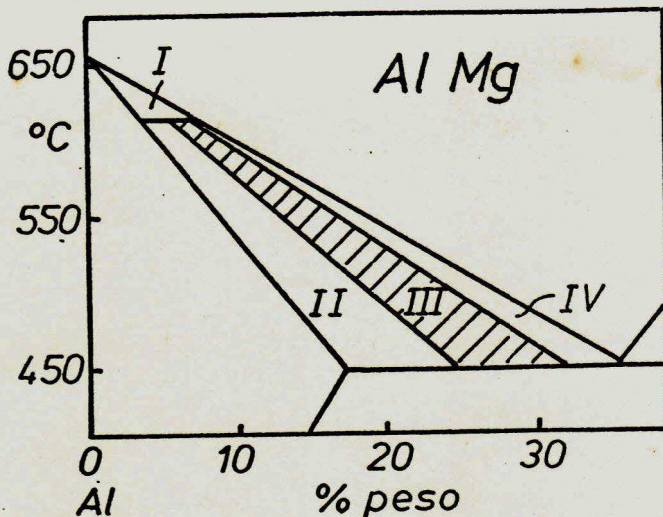
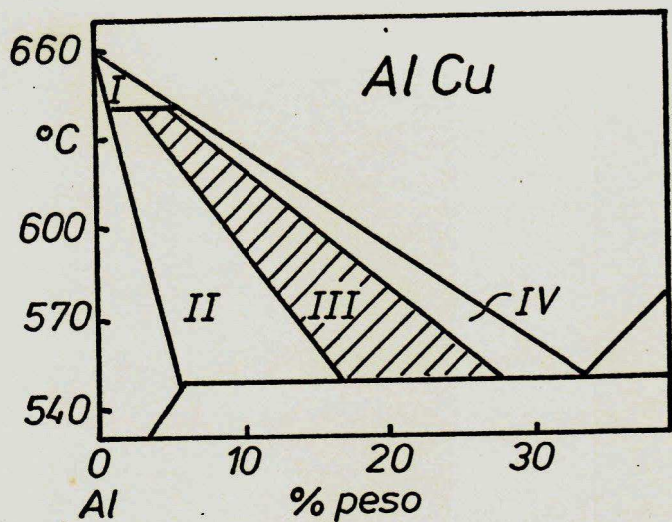


FIGURA - 2.2

Exemplos de regiões ótimas para Reofundição em sistemas binários Al-Cu, Al-Mg e Pb-Sn (Região III) (da Referência 7).

Região - I - Região de difícil controle devido ao alto valor de (df_s/dt) . Uma pequena oxilação de temperatura leva a essa grandeza variação de quantidade de partículas sólidas.

Região - II - Fluxo difícil devido a alta fração de sólidos.

Região - IV - Ineficiência da agitação devido a baixa fração de sólidos.

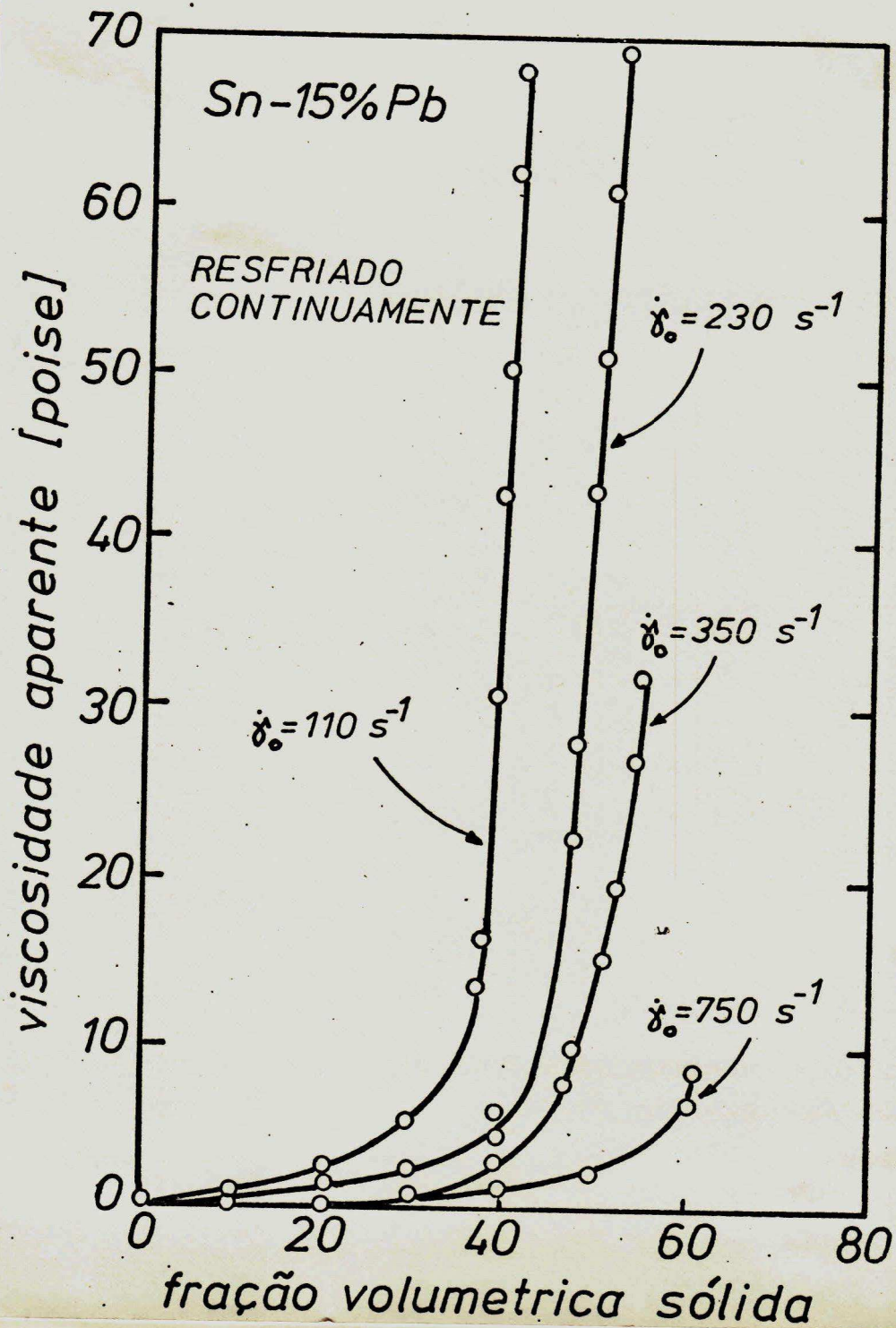


FIGURA - 2.3

Viscosidade aparente da liga Sn - 15% Pb reofundida para diferentes taxas de cisalhamento (grau de agitação) (da referência 7).

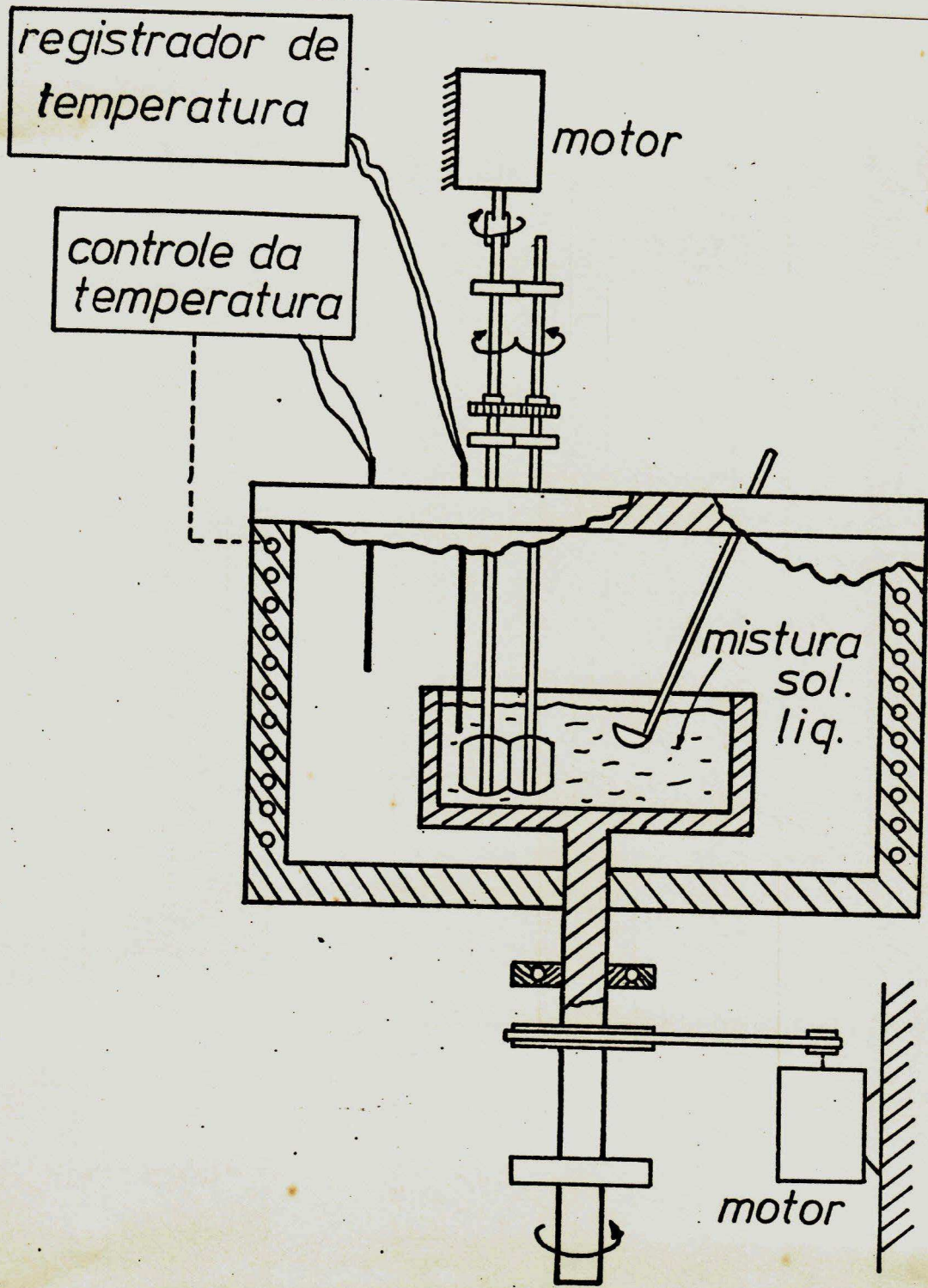
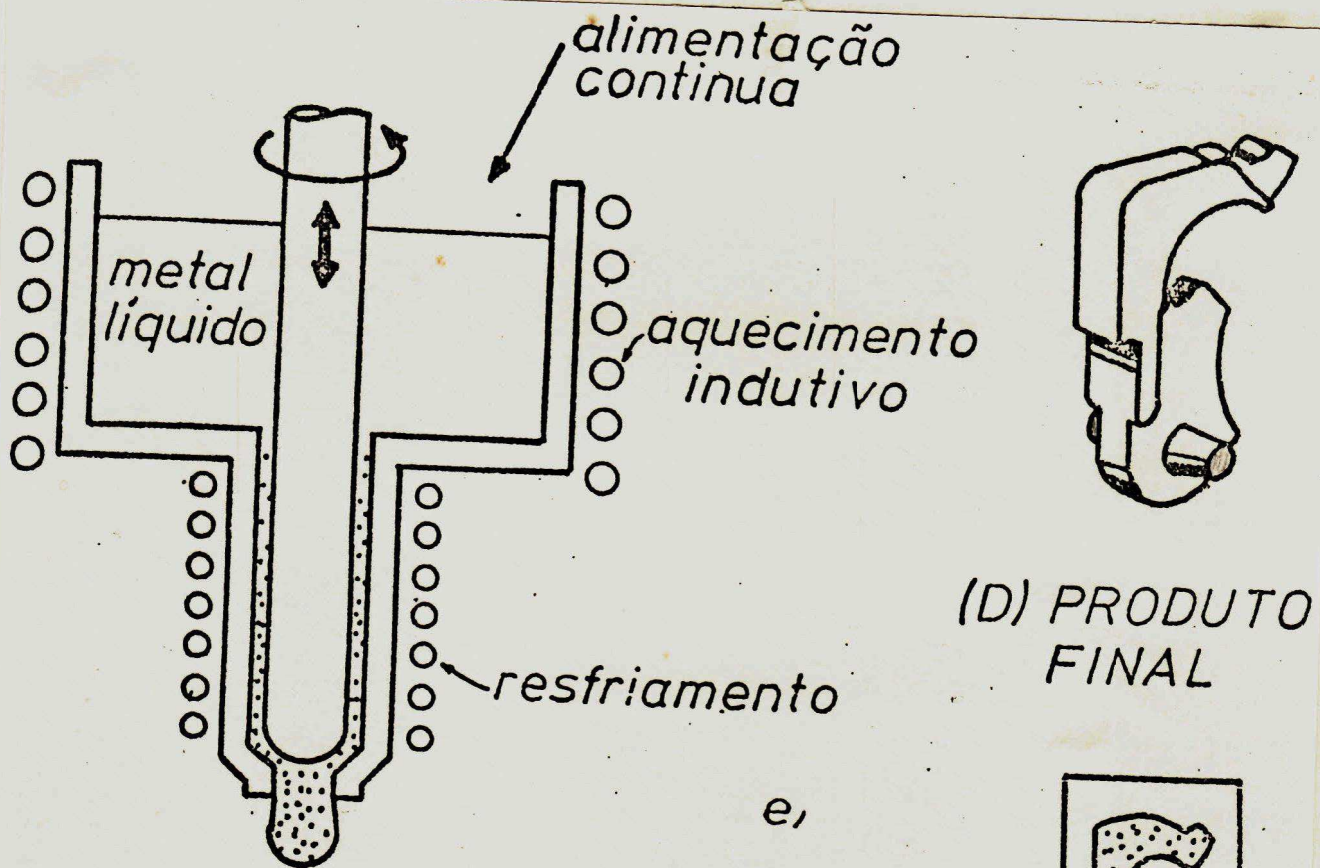
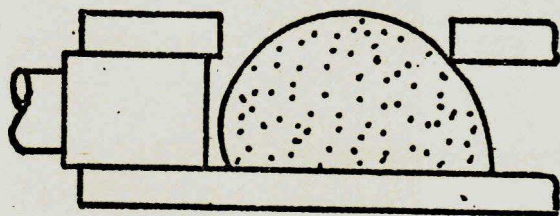


FIGURA - 2.4

Esquema do equipamento para Reofundição Intermitente (da Referência 8).

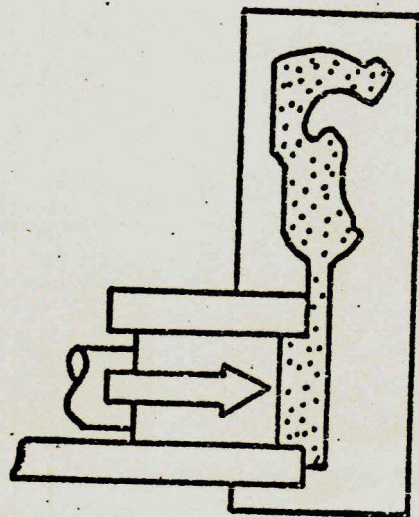


(A) REOFUNDIÇÃO CONTINUA



(B) PASTA NA CAMARA DE INJEÇÃO

e,



(C) PASTA INJETADA NA MATRIZ

FIGURA - 2.5

Esquema do Processo de Reofundição Contínua (da Referência 9).

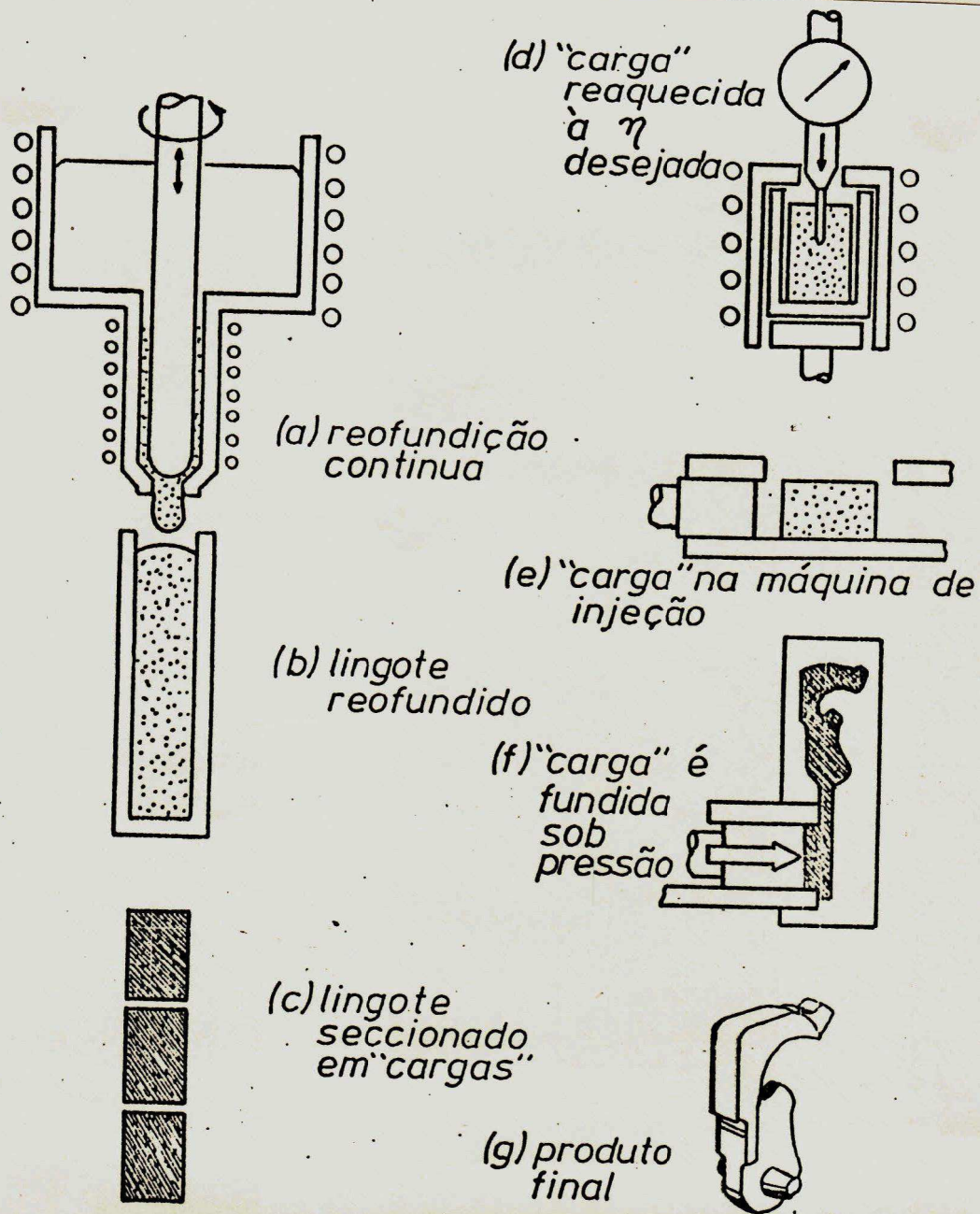


FIGURA - 2.6

Processo de Tixofundição (da Referência 10).

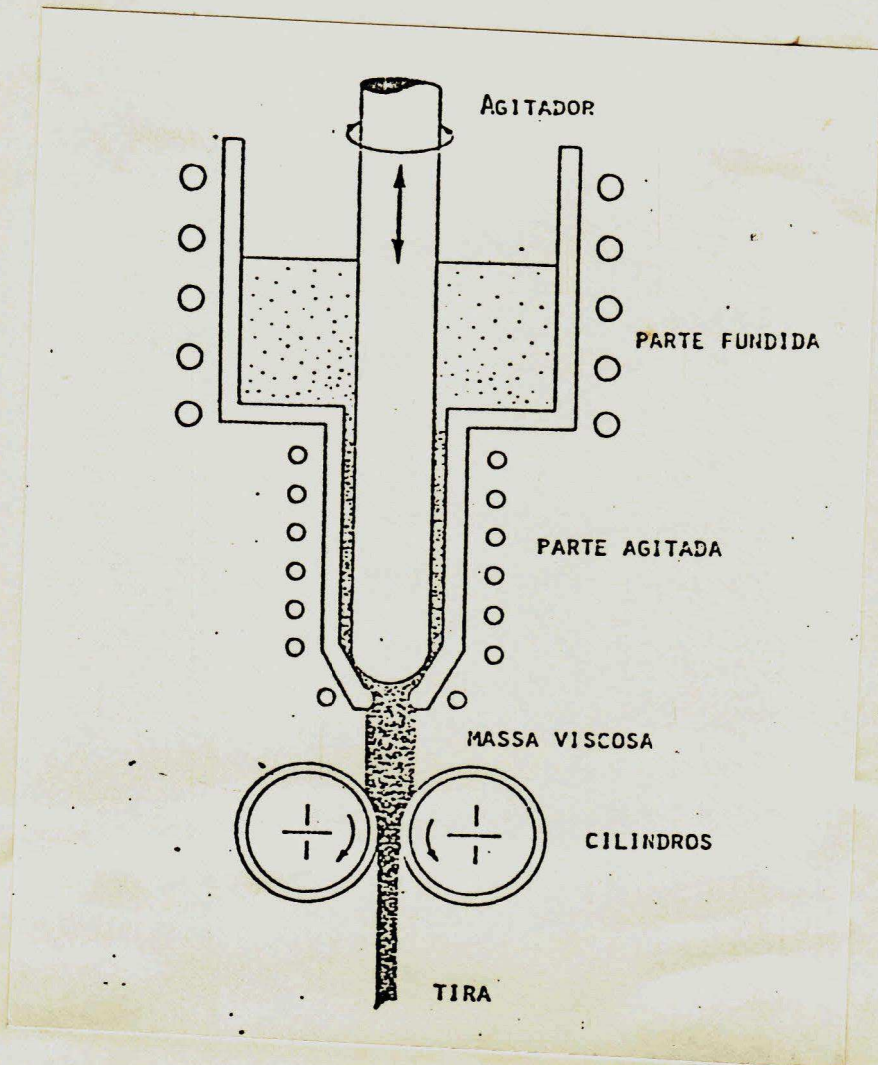


FIGURA - 2.7

Esquema do Processo de Reofundição em combinação com um processo de Transformação Mecânica (Laminação) (da Referência 7).

CAPÍTULO - 3

PROJETO

CAPÍTULO - 3 - Projeto

3.1 - Especificações do Projeto

As Especificações técnicas definidas para o projeto a ser desenvolvido são as seguintes:

- Sistema de Reofundição do tipo contínua.
- Utilização para metais de baixa temperatura de fusão [$T_f \leq 773 \text{ K (500}^\circ\text{C)}$].
- Capacidade do cadinho $0,005\text{m}^3$ (5 litros).
- Contrôles precisos da temperatura no:
Forno de Fusão
Forno de Agitação
- Controle preciso da vazão do metal reofundido.
- Vazão média de $0,0006\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ($0,61 \cdot \text{min}^{-1}$)
- Controle preciso da velocidade de agitação e taxa de cisalhamento.
- Velocidade de agitação na faixa de 1000 rpm.

3.2 - Sistema de Reofundição Contínua

O sistema a ser projetado está esquematizado na figura 3.1. O mesmo é composto de duas unidades: Unidade de Processamento e Unidade de Controle.

Na Unidade de Processamento o metal será fundido (sistema de fusão) posteriormente resfriado até uma determinada temperatura, resultando em determinada fração de sólidos. Esse metal parcialmente solidificado é antes agitado com determinada taxa de cisalhamento (sistema de agitação) e finalmente vazado (sistema de vazamento). Para o controle preciso das temperaturas nos três sistemas cada um deles terá fonte de potência e controlador/medidor de temperatura independentes.

O controle da vazão será realizado usando o dispositivo único agitador/controle de vazão. Para isso o agitador é dotado de movimento vertical tendo sua extremidade inferior forma semi-esférica para permitir um perfeito fechamento da abertura de entrada do canal de vazamento.

Na Unidade de Controle todos os equipamentos e dispositivos de acionamento serão concentrados, visando possibilitar a operação e controle do sistema projetado de maneira confortável.

3.3 - Unidade de Processamento

3.3.1 - Sistema de fusão

a - Cadinho

Para a especificação das dimensões do cadinho foram levadas em consideração os seguintes pontos:

- Volume especificado $0,005m^3$ (5 litros).
- Necessita-se de um volume maior do que o necessário, com a finalidade de evitar que o metal transborde, quando da agitação e/ou a alimentação.
- Eficiência no aquecimento.
- Pressão metalostática necessária para garantir o bom fluxo do metal para o sistema de agitação e canal de vazamento.
- Experiência prévia em trabalho similar realizado por A. W. M. Assar (2).
- Minimização de oxidação do cadinho, isto é, não contaminação do banho pelo cadinho.

Levando-se em consideração todos os pontos acima projetou-se um cadinho cilindro com as seguintes dimensões: 0,257m de altura, 0,212m de diametro e 0,00317m de espessura da parede em aço inoxidável austenítico ABNT 304. A figura 3.2 (a) apresenta o cadinho projetado.

b - Forno de Fusão

Devido à baixa temperatura de operação especificada 773 K (500°C) optou-se por um aquecimento resistivo.

Considerando $0,005\text{m}^3$ (5 litros) da liga Pb - 26% Sn que será utilizada em nossas experiências a quantidade de calor necessário para a fusão é de $59,91 \cdot 10^3$ J. Os dados físicos e os cálculos referentes à determinação da quantidade de calor estão detalhados nos APÊNDICES I(A), I(B) e II respectivamente.

Considerando 1 (uma) hora como um tempo razoável para a fusão da liga e uma eficiência do forno de aquecimento resistivo de 40% (12), uma potência de 4000 W é requerida.

Para a potência de 4000 W, temperatura máxima de 773 K e tensão de 220 V, o resistor a ser utilizado tem as seguintes características:

- Material: Liga KANTHAL DSD
- Diâmetro do fio: $0,00205$ m
- Comprimento do fio: 27,28 m
- Resistência: $12,10 \Omega$
- Diâmetro interno das espiras: $0,0123$ m
- Espaçamento entre as espiras: $0,008$ m

Os cálculos da resistência de aquecimento para o forno de fusão estão apresentados no APÊNDICE III (A).

Para envolver o cadinho de fusão isolando-o da resistência, um tubo cerâmico com $d_1 = 0,23\text{m}$ e $e = 0,007\text{m}$ foi especificado. Um espaço indesejável sob o ponto de vista de transmissão de calor, resulta entre a parede externa do cadinho e o tubo cerâmico (de aproximadamente $0,004\text{m}$). Isto é devido à não disponibilidade no comércio de tubo cerâmico com as dimensões exatas para o cadinho projetado. Contudo este espaço resultante previne possíveis problemas de dilatação superficial do cadinho, bem como facilita na montagem final do forno.

Para isolante térmico foi selecionado flocos Kaowool fabricados pela A BABCOCK & WILCOX que são obtidos à partir de matérias primas silico - aluminosas de alta pureza. A preferência sobre este isolante térmico deveu-se a sua trabalhabilidade e facilidade de instalação. A espessura da

parede de isolamento térmico calculada foi de 0,18m. Os cálculos referentes à esse dimensionamento estão apresentados no APÊNDICE IV (A).

A carcaça foi projetada utilizando chapa de aço-carbono ABNT 1020 de espessura de 0,0015m nas dimensões de $d_w = 0,565$ e $h = 0,27$ m.

Na parte externa da carcaça projetou-se uma pequena caixa nas dimensões de 0,11m X 0,08m X 0,035m visando proteger um conector (sindal) responsável pela ligação resistor - cabo de energia.

O controle da temperatura é realizado através de um controlador de temperatura ligado a um termopar instalado dentro do cadinho de fusão.

A figura 3.5 (a) mostra o sistema de fusão projetado.

3.3.2 - Sistema de Agitação

a - cadinho

Para a especificação das dimensões do cadinho foram levados em consideração os seguintes pontos:

- espaço entre a parede interna do cadinho e o agitador de modo que ocorra uma maior e melhor turbulência da massa pastosa.
- eficiência do aquecimento.
- minimização de oxidação do cadinho, isto é, não contaminação do banho pelo cadinho.

A. W. M. Assar (2) projetou um sistema de reofundição contínua similar ao do presente trabalho, onde utilizou espaçamento de 0,002m entre o agitador e a parede interna do cadinho que tinham respectivamente diâmetros de 0,0356m e 0,0396m. Considerando que o autor acima obteve sucesso no processamento da liga Bi - Pb, liga esta de característica similar a liga Pb - Sn a ser processada no presente trabalho, as dimensões acima foram tomadas como referência para o dimensionamento do agitador e cadinho de agitação do presente trabalho. Esse pequeno espaçamento é confirmado por M. C.

Flemings (12), que conclue de suas experiências que grande espaçamento entre parede interna do cadinho e o agitador implica em ineficiência do sistema.

O cadinho cilindro projetado teve as dimensões de 0,205m de altura, 0,043m de diametro interno e 0,003m de espessura da parede, como mostra a figura 3.2 (b), em aço inoxidável austenítico ABNT 304.

b - agitador

O agitador projetado foi dividido em duas partes: a parte que fica diretamente em contato com o metal fundido, agitando-o e a outra que está em contato direto com o eixo do motor através de um acoplamento.

A parte que está em contato direto com o metal fundido foi projetada levando em consideração trabalho realizado anteriormente por Assar (2), conforme discutido no item anterior, sendo assim as dimensões para esta parte do agitador são as seguintes: 0,59m de altura e 0,037m de diametro, em aço inoxidável austenítico ABNT 304. Para melhorar a eficiência no rendimento da agitação, realizamos quatro desbastes nesta parte do agitador, da extremidade inferior até a altura do cadinho de agitação. A extremidade inferior desta parte do agitador foi projetada numa forma semi-esférica para possibilitar o fechamento do canal de vazamento quando realização da agitação do metal fundido.

Para a união das duas partes projetou-se uma flange para cada parte com a existência de três furos de 0,006m com rôsca, para três parafusos "allen" de 0,0254m X 0,0063m (1" X 1/4").

A outra parte foi projetada conforme as dimensões de 0,380m de altura e 0,020m de diametro, sendo que numa das extremidades a dimensão será de 0,015m X 0,046m, para a confecção de uma das flanges. Na outra extremidade projetou-se um rasgo de chaveta de 0,040m X 0,005m X 0,003m para o encaixe e deslizamento no acoplamento.

A união do agitador ao eixo do motor dar-se por intermédio de um acoplamento. Este acoplamento foi projetado como uma espécie de bucha, onde uma parte do mesmo é fixa ao eixo do motor por intermédio de uma chaveta existente no proprio eixo de modo que não exista a menor folga possível quando da união dos memos. O restante do acoplamento é preso no complemento do agitador através de uma chaveta existente no mesmo, possuindo uma folga minima que permita a realização do deslizamento do complemento do agitador no acoplamento.

A figura 3.3 e 3.4 mostram o agitador e o acoplamento projetado.

c - forno de agitação

Considerando que a liga Pb - 26%Sn será agitada quando parcialmente solidificada com fração de sólidos na faixa de 15% - 55% a temperatura do forno de agitação deverá ser na faixa de 528 K - 493 K. Como no caso do forno de fusão o forno de agitação foi projetado com aquecimento resistivo estabelecendo uma potência de 1500 W. A potência é menor do que a do forno de fusão (4000 W), pois o metal passará por este forno já no estado fundido.

Para potência de 1500W, temperatura de 528K (temperatura máxima na faixa de fração de sólidos da liga a ser trabalhada) e tensão de 220 V, o resistor a ser utilizado tem as seguintes características:

- Material: Liga KANTHAL DSD
- Diâmetro do fio: 0,001024 m
- Comprimento do fio: 19,44 m
- Resistência: 32,25 Ω
- Diâmetro externo da espiral: 0,0065 m
- Espaçamento entre as espiras: 0,003 m

Os cálculos da resistência de aquecimento para o forno de agitação estão apresentados no APÊNDICE III (B).

Envolvendo o cadinho de agitação existe além do aquecimento resistivo regulável, um sistema de refrigeração, visando o estabelecimento homogêneo e controlado da temperatura do metal no forno de agitação. Isto porque a temperatura do metal deve ser abaixada do nível acima de T_f até temperatura nos intervalos sólido - líquido. Esta refrigeração é obtida com uma serpentina de cobre confeccionada com tubo de $d_e = 0,008m$ e $d_i = 0,006m$.

Baseado no trabalho de A. W. M. Assar (2) onde estudou a influência da taxa de resfriamento do metal fundido e também da fração de sólidos do número de espiras refrigerantes, especificou-se um número de onze (11) espiras espaçadas de 0,020m, totalizando 0,22m de serpentina. A alimentação d'água será feita neste projeto diretamente de uma torneira, estando previsto numa etapa próxima a utilização de uma

bomba para controle preciso da vazão e de um reservatório refrigerado.

Envolvendo esta serpentina foi projetado um tubo de aço inoxidável de espessura $0,001m$, fixo por intermédio de três parafusos $0,012m \times 0,005m$ ($1/2 \times 3/16$) na tampa superior da carcaça do forno de agitação, com a finalidade de proteger o resistor de possíveis vazamento da serpentina.

Para envolver o tubo de aço inoxidável foi especificado um tubo cerâmico, com $d_i = 0,075m$ e $d_e = 0,085m$ a fim de isolar o resistor do tubo de aço inoxidável.

O isolante térmico especificado foi o mesmo do forno de fusão, a espessura da parede de isolamento térmico do mesmo é de: $0,12m$.

Os cálculos referentes a dimensão da espessura da parede de isolante térmico estão apresentados no APÊNDICE IV (B).

A carcaça foi projetada utilizando chapa de aço-carbono ABNT 1020 de espessura de $0,0015m$ nas dimensões de: $d_e = 0,375m$ e $h = 0,215m$.

Na parte externa da carcaça projetou-se uma pequena caixa, nas dimensões de: $0,11 \times 0,08m \times 0,035m$ visando proteger um conector (sindal), responsável pela ligação resistor - cabo de energia.

Para um controle preciso da temperatura ao longo da altura do forno de agitação, projetou-se a instalação de forma equidistante de $0,06m$ ao longo da altura, de quatro tubos de cobre de $d_i = 0,003m$ e $d_e = 0,006m$, da parede externa da carcaça até o tubo de cerâmica, para servir de canal para a colocação de quatro termopares. A figura 3.5 (b) mostra o sistema de agitação projetada.

d - motor

Considerando o número máximo de rotações desejadas (1000 rpm) dimensões e material especificado para o agitador foi especificado um motor de $0,736 \text{ W}$ (1 CV). Detalhes dos cálculos realizados estão apresentados no APÊNDICE V.

Um motor de corrente contínua foi especificado pela facilidade e precisão que se teria para estimar a viscosidade do metal parcialmente solidificado em agitação através da medida da variação das características elétricas do motor (3). Um tacômetro e controlador de velocidade de rotação

também foi especificado para o estabelecimento e controle preciso da rotação de agitação desejada.

3.3.3 - Sistema de Vazamento

a - canal de vazamento

Como o controle de vazão estabelecido foi através do movimento vertical do agitador, o canal de vazamento em sua parte superior deve ter a geometria compatível, com a extremidade inferior do agitador. Isso para permitir um assentamento perfeito, ocasionando com isso um fechamento perfeito do canal de vazamento quando da agitação do metal fundido.

O canal de vazamento cilíndrico especificado com mesmo material dos cadinhos, foi projetado com as dimensões de: 0,083m de altura, 0,012m de diâmetro interno e 0,006m de espessura da parede. A figura 3.2 (c), mostra o canal de vazamento projetado.

b - forno do canal de vazamento

Para garantir que a temperatura de vazamento seja igual a temperatura de fusão e também para contornar possíveis casos de entupimento por solidificação de metal no canal de vazamento, um forno de aquecimento resistivo foi projetado para manter aquecido a temperatura desejada este canal. Uma potência de 500 W foi especificada pelo seu pequeno tamanho e pelas suas funções. Da potência de 500 W, temperatura de 773 K (temperatura máxima do forno de fusão) e tensão de 220 V foi especificado o resistor que tem as seguintes características:

- Material: Fio KANTHAL DSD
- Diâmetro do fio: 0,0045 m
- Comprimento do fio: 11 m
- Resistência: 96,91 Ω
- Diâmetro externo da espiral: 0,0030 m
- Espaço entre as espiras: 0,0015m

Os cálculos da resistência de aquecimento para o forno canal de vazamento estão apresentados no APÊNDICE III (C).

Um tubo cerâmico de $d_i = 0,028\text{m}$ e $d_e = 0,035\text{m}$, foi especificado para isolar o canal do resistor.

O isolante térmico especificado foi o mesmo utilizado para os outros fornos. A espessura da parede de isolante térmico calculado foi de: $0,09\text{m}$.

Os cálculos referentes a dimensão da espessura da parede de isolante térmico estão apresentados no APÊNDICE IV (C).

A carcaça foi projetada utilizando chapa de aço-carbono ABNT 1020 de espessura $0,0015\text{m}$ nas dimensões de: $d_e = 0,22\text{m}$ e $h = 0,085\text{m}$.

Na parte externa da carcaça projetou-se uma pequena caixa de mesmo material da carcaça nas dimensões de $0,07\text{m} \times 0,06\text{m} \times 0,03\text{m}$, visando proteger um conector (sinal), responsável pela ligação resistor - cabo de energia.

Não é necessário um controle preciso da temperatura no canal de vazamento, uma vez que, o mesmo só será utilizado para controlar possíveis casos de entupimento nos outros fornos. A temperatura do mesmo será a mesma do forno de fusão 773K .

A figura 3.5 (C) mostra o sistema de vazamento projetado.

c - controle da vazão

O movimento vertical do agitador é o responsável direto pelo controle da vazão do metal reofundido. Para a realização deste movimento vertical, diversas alternativas tais como: sistema similar ao de uma furadeira com o uso de cremalheira, rolamentos axiais etc...; deslocamento do motor em guias de deslizamento, em sistema similar ao funcionamento do cabeçote de uma plaina, foram levadas em consideração com a finalidade de selecionar a melhor que se adaptasse mecânica e economicamente ao sistema projetado.

Considerando que o curso de deslizamento é relativamente pequeno ($0,02\text{m}$) e a simplicidade na construção, a alternativa escolhida foi de usar um bloco de apoio dividido em duas partes, com uma cavidade central interna que permita o deslocamento de um disco fixo ao complemento do agitador, aproximadamente no tamanho do curso desejado. Este deslocamento é

feito por intermédio de uma alavanca e um pino excêntrico. A medida que a alavanca for deslocada para baixo o pino excêntrico tende a deslocar o disco para cima, ocorrendo conseqüentemente o deslocamento do agitador e a vazão do metal. Este bloco é fixo em um suporte na própria estrutura de sustentação da unidade de processamento. A figura 3.6 mostra a alternativa escolhida projetada.

3.4 - Estrutura de Sustentação da Unidade de Processamento

A estrutura de sustentação esta dividida em duas partes: uma parte inferior e outra superior. A parte inferior projetada em forma de mesa, nas dimensões de 0,90m X 0,085m X 1,05m confeccionada em cantoneiras de abas iguais (0,05m X 0,05m X 0,006m) e chapa (0,004m de espessura) de aço-carbono ABNT 1020. É nesta parte onde o conjunto do cadinho de fusão, cadinho de agitação e canal de vazamento serão fixados por quatro abas fixas ao cadinho de fusão por intermédio de solda e aparafusadas através de quatro parafusos 0,0381m X 0,0095 (1.1/2" X 3/8"). Nesta parte inferior, serão também montadas, o forno de fusão e, aproveitando os mesmos parafusos de fixação do conjunto de cadinhos, o forno de agitação. O canal de vazamento é preso através de quatro parafusos 0,0254m X 0,0063m (1" X 1/4") fixos na tampa inferior do forno de agitação. A parte superior projetada nas dimensões de 0,70m X 0,85m X 0,80m confeccionada em contoneira de abas iguais (0,036m X 0,036m X 0,004m) e chapa (0,004m de espessura) de aço-carbono ABNT 1020. Esta parte superior é fixada na parte inferior através de oito parafusos de 0,0254m X 0,0063m (1" X 1/4). Nesta parte serão montados, o motor e o bloco de apoio para a realização do movimento vertical do agitador.

A figura 3.8 mostra a estrutura de sustentação projetada.

3.5 - Unidade de Contrôlo

A unidade de contrôlo será responsável pelo comando e contrôlo do processamento. Para facilitar essa tarefa foi projetado um painel de contrôlo que reunisse todos equipamentos e dispositivos dos sistemas de fusão, agitação e vazamento.

3.5.1 - Sistema de Fusão

No sistema de fusão os equipamentos existentes são variador de voltagem, controlador de temperatura, contator, termopar, amperimêntro e chave liga-desliga.

Visando dar maior versatilidade ao forno com aquecimento resistivo especificou-se o variac de potência de 6KW, enquanto que os cálculos 3.3.1 (b) calculou-se como 4KW a potência necessária para a fusão das ligas de interêsse. O transformador variador de voltagem alimenta o circuito formado pelo resistor de $12,10\Omega$ sendo que a voltagem pode ser variável permitindo assim variar a potência dissipada pelo resistor. A corrente no circuito é indicada no amperimêntro. O comando do circuito de potência é feito diretamente pela chave tipo volante do transformador variador e voltagem embutido no painel.

O contrôle da temperatura do forno é feito por um controlador de temperatura que, tendo um termopar dentro do forno, mantêm a temperatura deste a uma temperatura desejada, ligando e desligando a alimentação de corrente do resistor do forno. A abertura e o fechamento do circuito de alimentação do forno é feita por uma chave magnética (contator).

Como a temperatura máxima de trabalho do forno é de 773 K (500°C) o termopar mais indicado é o Tipo J, Ferro-Constantan.

Uma chave do tipo liga-desliga é a responsável pelo acionamento do sistema.

3.5.2 - Sistema de Agitação

No sistema de agitação os equipamentos existentes são: variador de voltagem, controlador de temperatura, contator, amperimêntro, termopares, tacômetro e chave liga-desliga.

A potência necessária para a agitação da liga é de 1,5KW como ficou especificado nos cálculos em 3.3.2 (b). Visando dar maior versatilidade ao forno com aquecimento resistivo especificou-se um variac de potência de 3,0KW. O transformador variador de voltagem alimenta o circuito formado pelo resistor de $32,25\Omega$, sendo que a voltagem pode ser variável, permitindo assim variar a potência dissipada pelo resistor. A corrente no circuito é indicada no amperimêntro.

O circuito elétrico é aberto ou fechado pela chave magnética (contator) conforme o sinal dado pelo controlador de temperatura. O controlador de temperatura é ajustável a temperatura desejada e uma série de quatro termopares instalados equidistantes ao longo do forno de agitação é ligado à ele, fornecendo-lhe as variações de temperatura ao longo do forno.

Como a temperatura máxima do sistema de agitação é de 528 K (255°C), os termopares mais indicados são o tipo J, Ferro - Constantan.

O tacômetro é o responsável pelo controle e leitura da velocidade de rotação do agitador.

Uma chave do tipo liga-desliga é a responsável pelo acionamento do sistema.

3.5.3 - Sistema de Vazamento

Numa etapa posterior do projeto está previsto a instalação de um variador de voltagem, contator e controlador de temperatura para que se possa estudar todos os parâmetros relacionados a este sistema.

Nesta etapa inicial, o projeto do sistema de vazamento conta apenas com um amperimetro para a leitura da corrente, e para acionamento do mesmo, uma chave liga-desliga.

3.5.4 - Painel de Contrôles

O painel de controle foi projetado com chapas de 0,0015m de espessura e cantoneiras de abas iguais de 0,0254m X 0,254m X 0,004m todos de aço-carbono ABNT 1020, apoiado sobre quatro rodízios de 0,1m de diâmetro, sendo dois giratórios.

A figura 3.8 mostra ^{o projeto} o painel de controle projetado.

O circuito elétrico do painel de controle é mostrado na figura 3.9.

Deve-se observar que os aspectos ergonômicos não foram considerados na execução do projeto do painel de controle. Devido a grande importância que tem esses aspectos ergonômicos, não só na facilidade de operação mas também no domínio pelo operador de todos os comandos e dados de leitura, na próxima etapa deste projeto está previsto a análise ergonômica, tanto na unidade de controle como da unidade de processamento.

FIGURAS
CAPITULO - 3

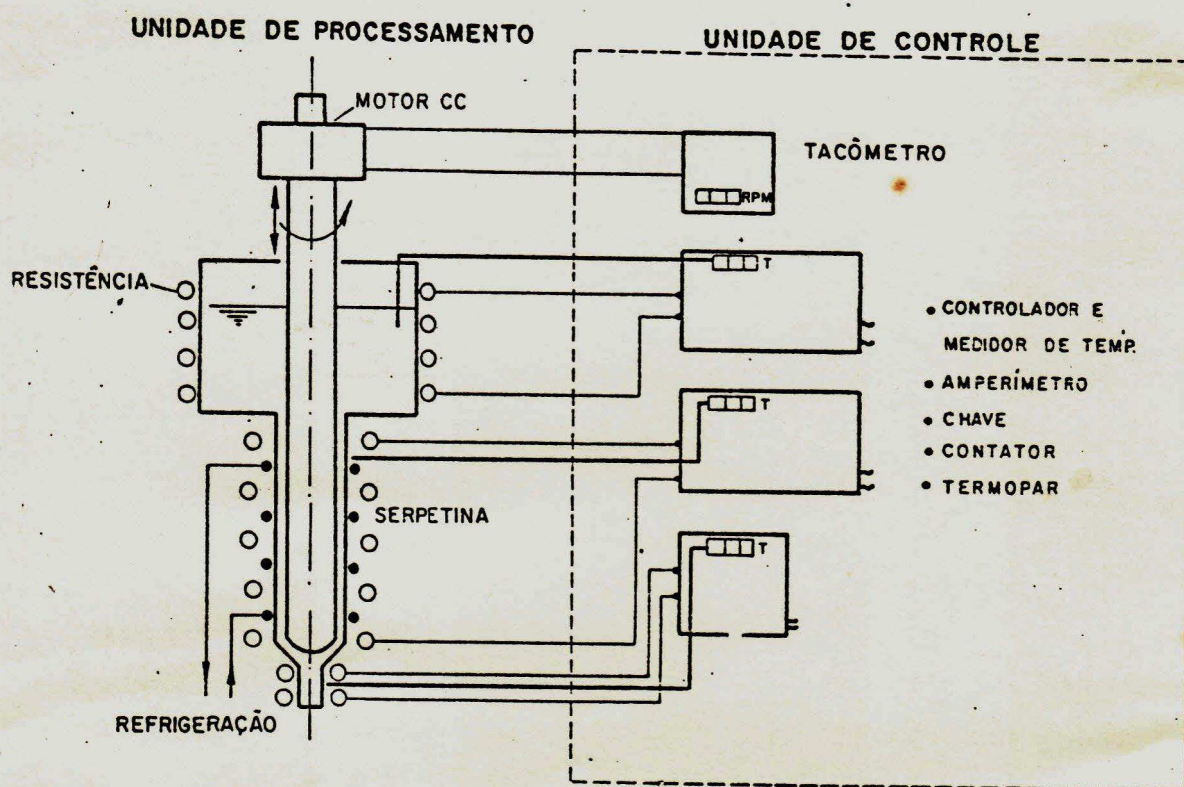


FIGURA - 3.1

Projeto
Esquema do sistema de Reofundição contínua projetado.

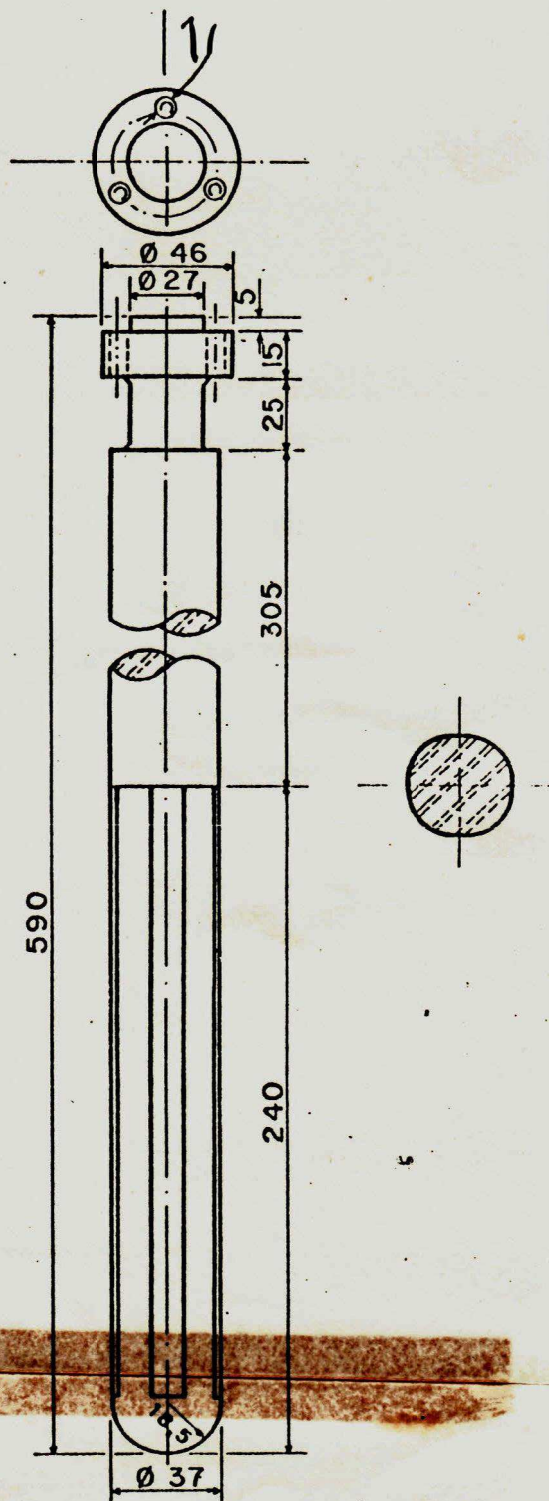


FIGURA - 3.3

Agitador (parte que fica diretamente em contato com o metal fundido).

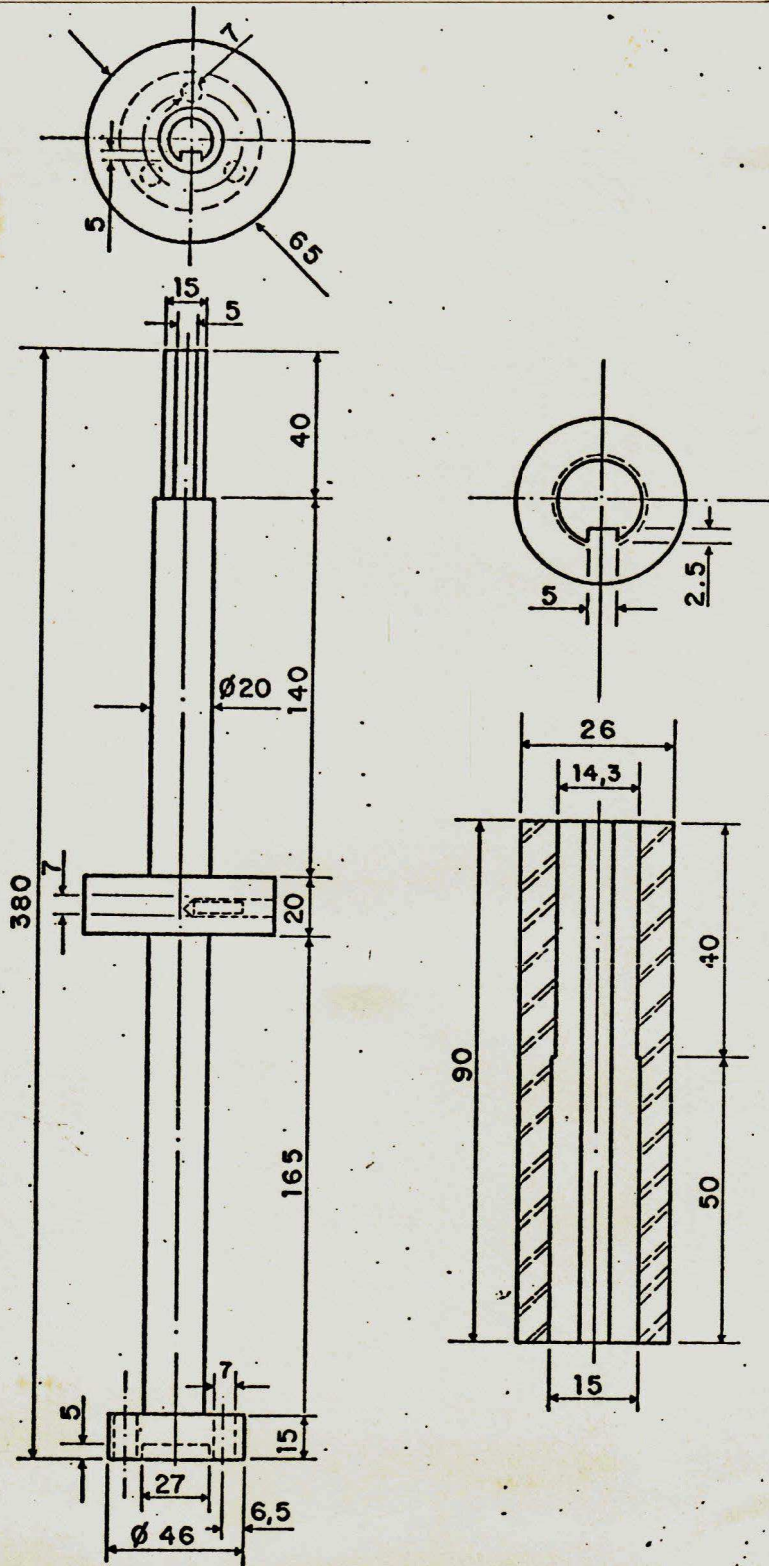


FIGURA - 3.4

Complemento do Agitador e Acoplamento.

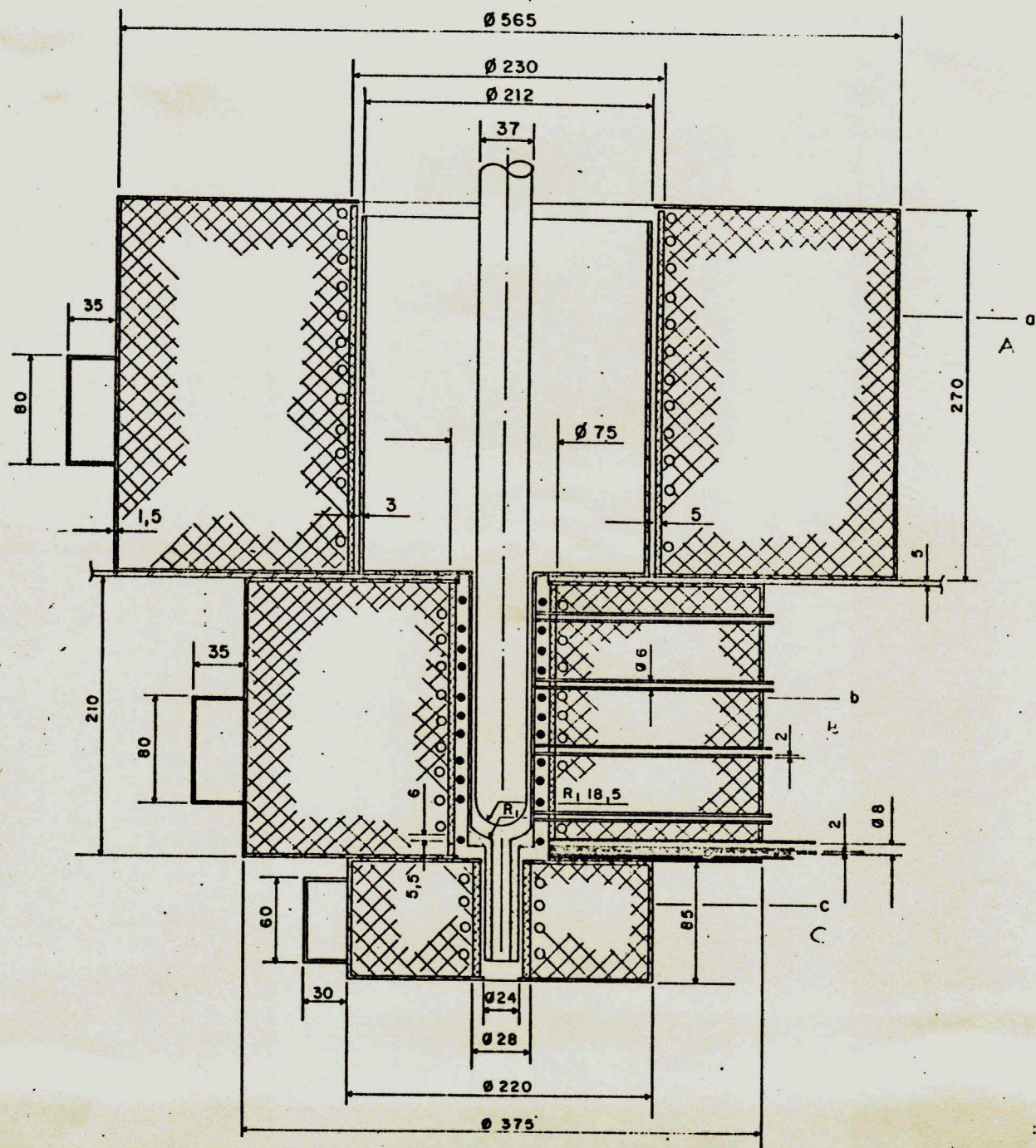


FIGURA - 3.5

Apresentação de todos os componentes existentes em cada sistema.

- a - Sistema de fusão
- b - Sistema de agitação
- c - Canal de vazamento

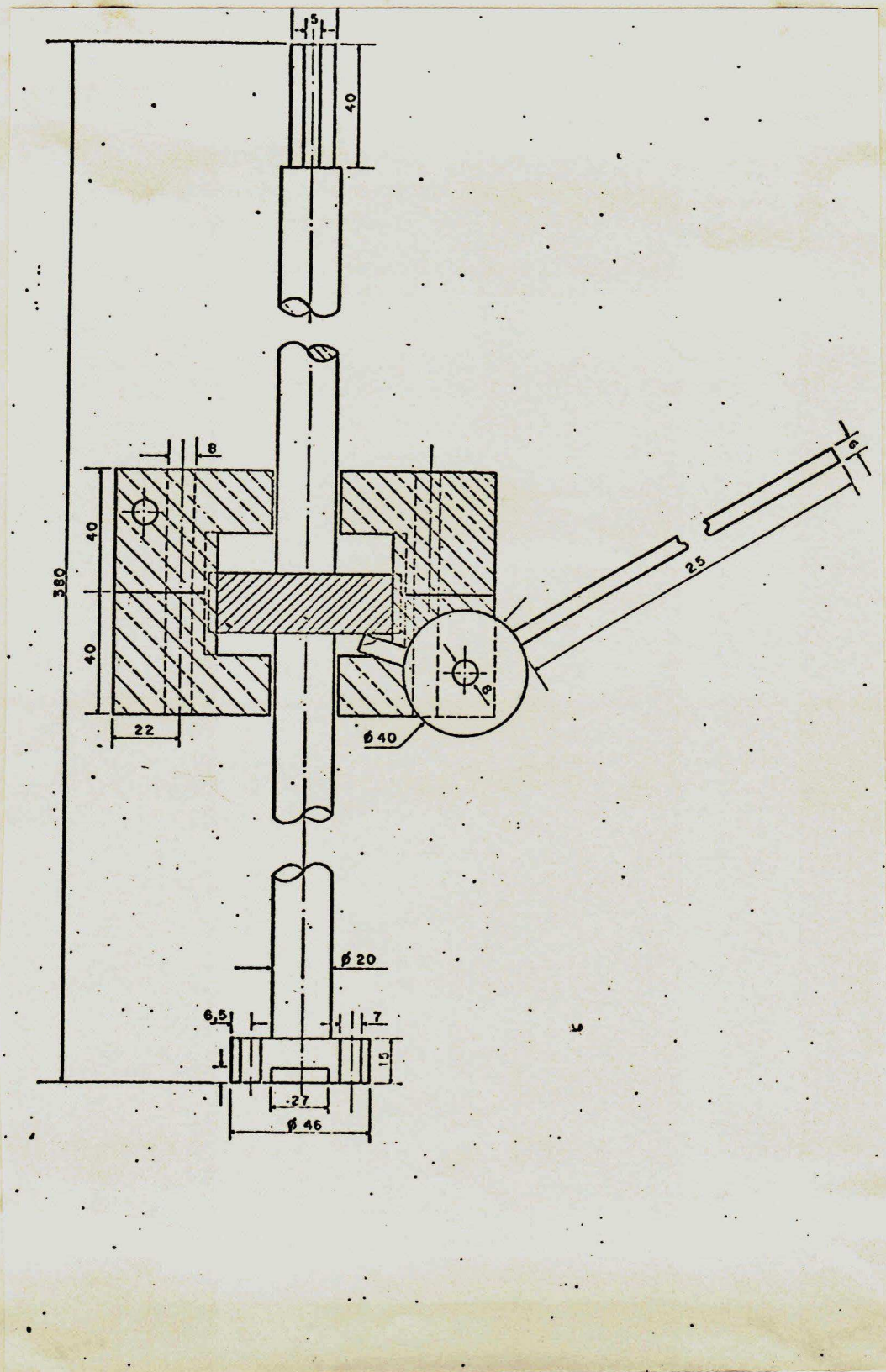


FIGURA - 3.6

Apresentação da alternativa escolhida para a realização do movimento vertical do agitador.

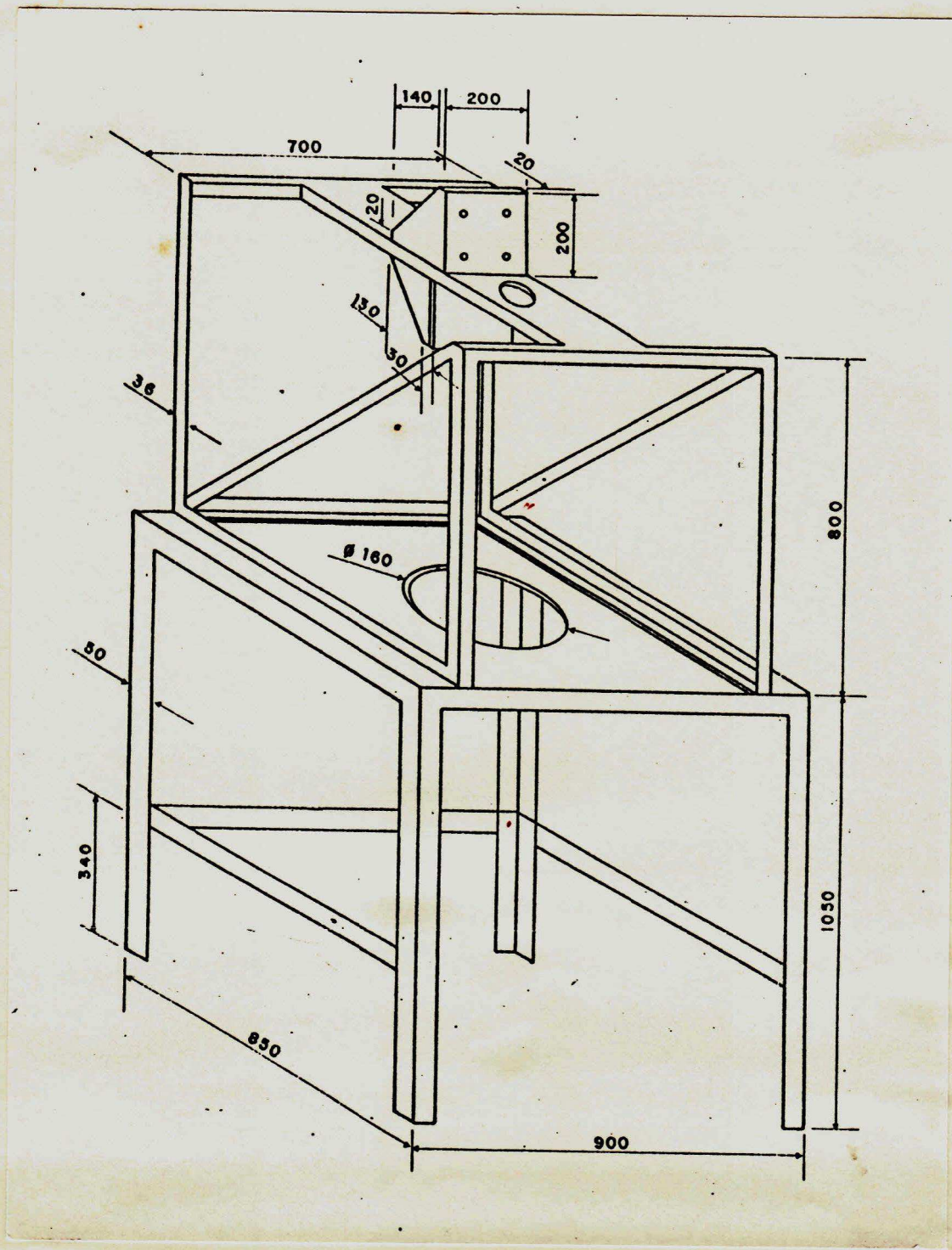


FIGURA - 3.7

Apresentação da estrutura de sustentação da unidade de processamento projetada.

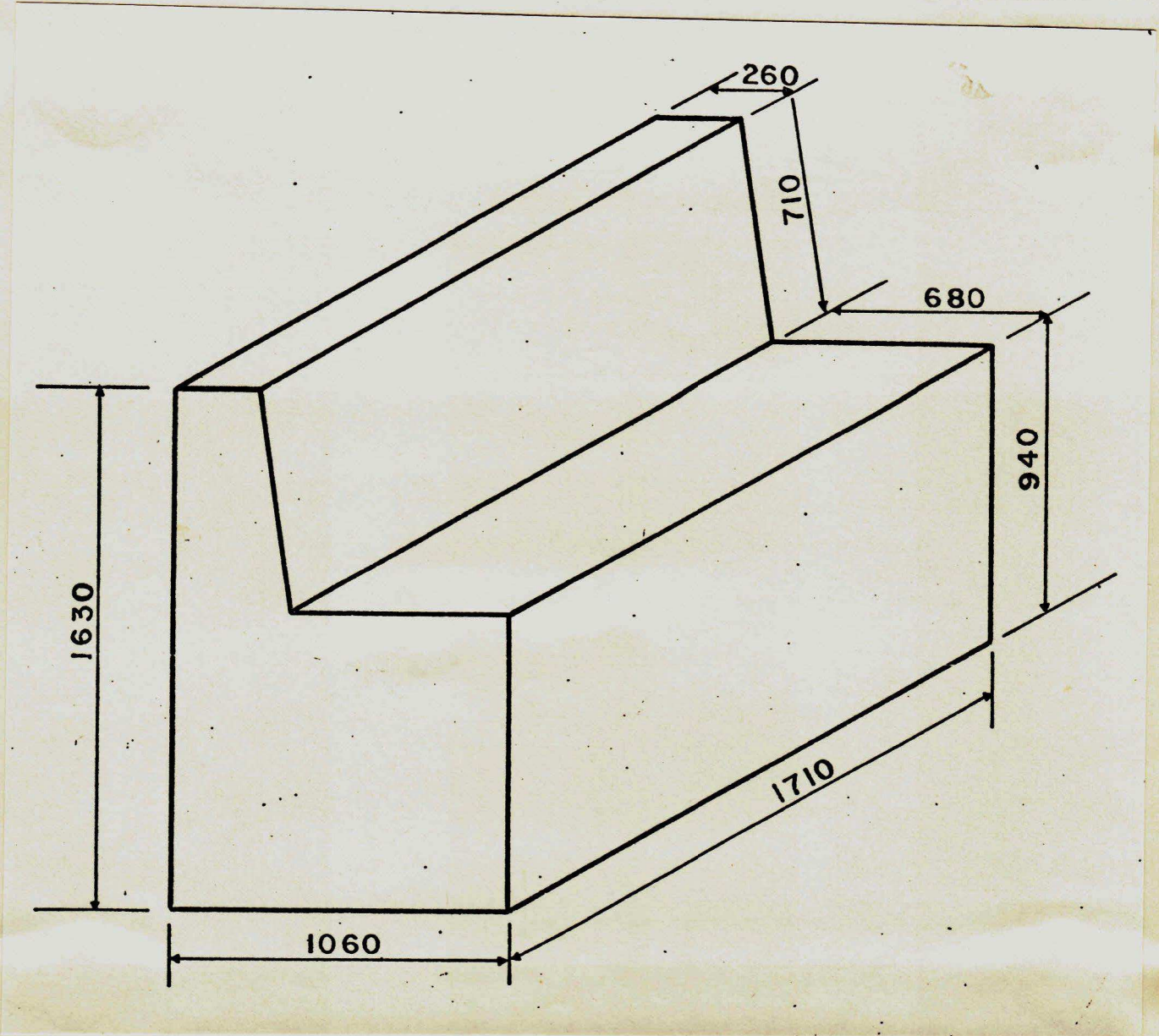


FIGURA - 3.8

Projeto
Apresentação da estrutura do painel de controle projetada.

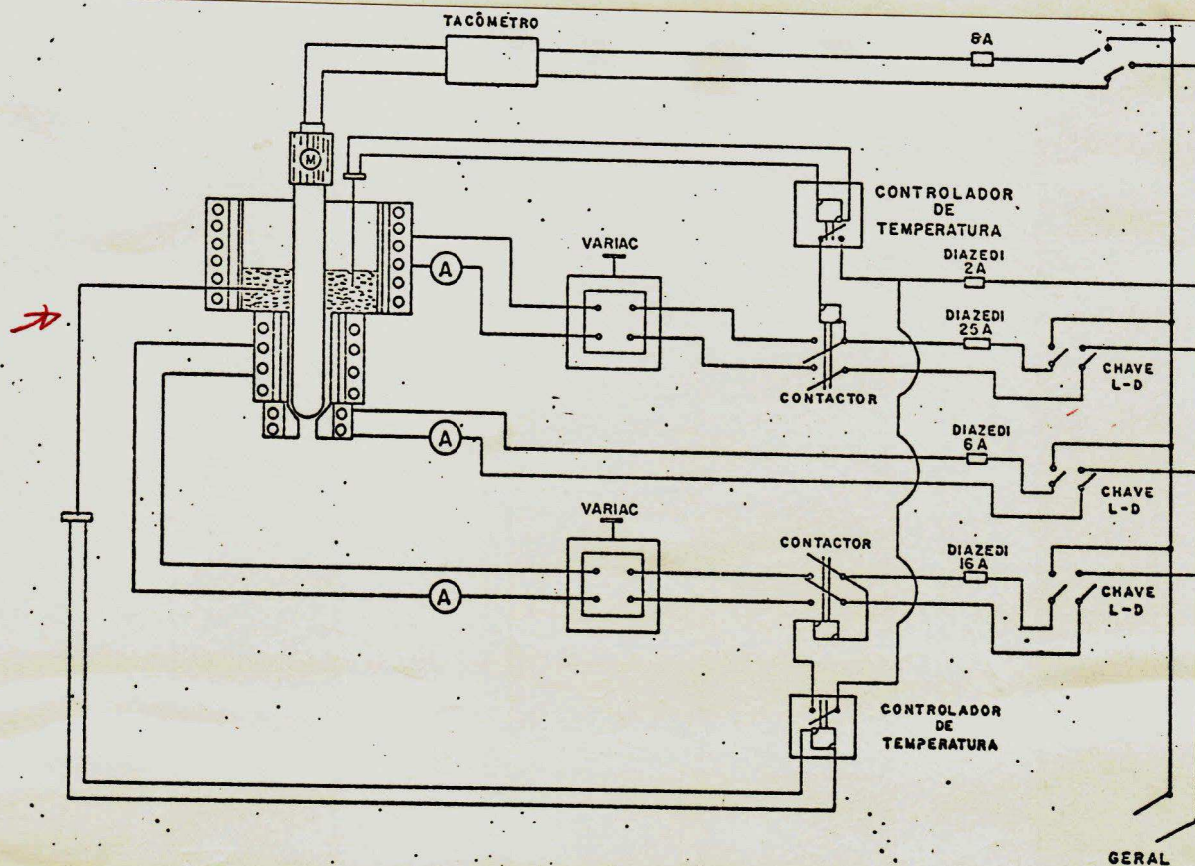


FIGURA - 3.9

Esquema do circuito elétrico da unidade de controle para o sistema de reofundição contínua.

CAPÍTULO - 4

CONSTRUÇÃO E MONTAGEM

CAPÍTULO - 4 - Construção e Montagem

4.1 - Unidade de Processamento

4.1.1 - Cadinhos e Canal de Vazamento

a - cadinho do sistema de fusão

O cadinho foi construído à partir da calandragem de chapa de aço-inoxidável ABNT 304 de 0,003m de espessura. A costura e a fixação da tampa inferior foi realizada utilizando solda elétrica com eletrôdos E 308-16 apropriados para aço inoxidável.

b - cadinho do sistema de agitação

O cadinho foi construído à partir de uma barra de aço inoxidável ABNT 304 de diâmetro 0,050m e comprimento de 0,220m torneando-a externa e internamente nas dimensões desejadas.

c - canal de vazamento

O canal de vazamento foi construído à partir de uma barra de aço inoxidável ABNT 304, de diâmetro 0,040m e comprimento 0,110m, torneando-a externamente na forma desejada e furando-a internamente no diâmetro estabelecido para a saída do metal reofundido.

A união dos dois cadinhos mais o canal de vazamento, foi realizada utilizando solda elétrica com eletrôdos E 308-16 apropriados para aço inoxidável.

A fixação deste conjunto à estrutura de sustentação foi feita através de quatro abas de aço inoxidável 0,220m X 0,030m X 0,003m soldadas com solda elétrica e eletrôdos E 308-16 diretamente ao cadinho de fusão e aparafusadas na estrutura de sustentação.

A figura 4.1 mostra o conjunto de cadinhos e canal de vazamento construído.

4.1.2 - Fornos

a - forno do sistema de fusão

O forno com aquecimento resistivo foi construído para ser fixado sobre a parte inferior da estrutura de sustentação.

O fio do resistor foi enrolado em espiral e enrolado ao tubo cerâmico que possui ao longo do mesmo, uma cavidade em forma de espiral para melhor acomodação do resistor. O isolamento térmico entre a parede interna da carcaça e o resistor foi feita com flocos isolantes.

A carcaça foi construída à partir da calandragem de chapa de aço-carbono ABNT 1020, de espessura 0,0015m nas dimensões de $d_w = 0,565m$ e $h = 0,27m$. A costura e a fixação da tampa inferior da carcaça foi realizada utilizando-se solda elétrica com eletródos E 7018. A tampa superior foi fixada a parede da carcaça por intermédio de seis abas soldadas na tampa superior e presa na carcaça através de seis parafusos.

Na parte exterior da carcaça fixou-se a pequena caixa, protetora da ligação elétrica através de quatro parafusos.

b - Forno do sistema de agitação

O forno com aquecimento resistivo foi construído para ser fixado à parte inferior da estrutura de sustentação através de quatro parafusos (os mesmos que fixam o conjunto cadinhos e vazamento).

O fio resistor foi enrolado em espiral e enrolado ao tubo cerâmico. O isolamento térmico entre a parede interna da carcaça e o resistor foi feita com os flocos isolantes.

O sistema de refrigeração que envolve o cadinho de agitação foi colocado pela parte inferior do sistema de agitação.

A carcaça foi construída à partir da calandragem de chapa de aço-carbono ABNT 1020, nas dimensões especificadas no projeto. A costura, a fixação da tampa superior da carcaça e a fixação das quatro abas de sustentação do forno de agitação, foi realizada através de solda elétrica com eletródos

E 7018. A tampa inferior foi fixada a parede da carcaça, por quatro abas soldadas a mesma e presa na carcaça com quatro parafusos especificados no projeto. Foram feitos quatro furos de 0,006m de diâmetro para a passagem dos tubos de cobre, para a entrada dos termopares.

Na parte exterior da carcaça, fixou-se a pequena caixa protetora da ligação elétrica, através de quatro parafusos.

c - forno do canal de vazamento

O forno com aquecimento resistivo, foi construído para ser fixado na tampa inferior da carcaça do forno de agitação.

O fio do resistor foi enrolado em espiral e enrolado ao tubo cerâmico. O isolamento térmico entre a parede interna da carcaça e o resistor foi feito com flocos isolantes.

A carcaça foi construída à partir de chapa de aço-carbono ABNT 1020, calandrada nas dimensões especificadas no projeto. A costura, a fixação da tampa inferior da carcaça e a fixação de oito abas na tampa superior da carcaça foram realizadas utilizando solda elétrica com eletrodos E 7018.

4.1.3 - Agitador: Movimento de Rotação e Vertical

O agitador está dividido em duas partes: a parte que fica em contato direto com o material fundido e a outra que está em contato direto com o eixo do motor, através de um acoplamento.

A parte que está em contato permanente com o metal fundido, foi construída à partir de uma barra de aço inoxidável de diâmetro 0,05m e comprimento de 0,60m, torneando-a até as dimensões especificadas no projeto.

A figura 4.2 mostra esta parte do agitador construída.

A outra parte, foi construída à partir de uma barra de aço ABNT 4340, de diâmetro 0,05m e comprimento de 0,40m torneando-a até as dimensões especificadas conforme projeto.

A união das duas partes foi feita por flanges com três furos passantes, com rêsca em uma delas para parafusos allen, conforme especificado no projeto.

Um parafuso allen de 0,0084m X 0,0063m (2/3" X 1/4"), foi usado para a fixação do disco de ferro fundido nas dimensões especificadas no projeto para o movimento vertical.

O bloco de apoio foi construído plainando um bloco de aço-carbono ABNT 1020, de dimensões de 0,130m X 0,130m X 0,09m. Após a confecção do furo central de diâmetro de 0,022m, o bloco foi seccionado ao meio com a finalidade de confeccionar os detalhes requeridos no projeto. O bloco de apoio foi preso em um suporte na própria estrutura de sustentação da unidade de processamento por dois parafusos 0,0254m X 0,0095m (1" X 3/8").

A alavanca foi construída à partir de um tarugo de aço-carbono ABNT 1020, nas dimensões de 0,25m X 0,015m.

4.1.4 - Motor

É o responsável direto pelo movimento de rotação do agitador e foi fixado em um suporte na parte superior da estrutura de sustentação da unidade de processamento por quatro parafusos 0,038m X 0,0063m (1 1/2" X 1/4").

A especificação do equipamento é a seguinte:

- Tensão: 180 Volts
- Potência: 0,736 W (1CV) CC
- Corrente: 5,1 Amperes
- Rotação: 3600 rpm
- Fabricante: Industria e Comércio Lavill Ltda.

4.1.5 - Estrutura de Sustentação da Unidade de Processamento

A estrutura de sustentação está dividida em duas partes. A parte inferior foi confeccionada com cantoneiras de abas iguais de aço-carbono ABNT 1020.

A soldagem elétrica foi realizada com eletrodos E 7018.

A parte superior, fixada sobre a parte inferior, através de oito parafusos de $0,0254\text{m} \times 0,0063\text{m}$ ($1'' \times 1/4''$), foi confeccionada da mesma forma que a parte inferior.

A figura 4.2 mostra a unidade de processamento construída, já fixada na estrutura de sustentação.

4.2 - Unidade de Contrôlo

4.2.1 - Painel de Contrôlo

O painel de controle foi construído com chapas e cantoneiras de abas iguais de aço-carbono ABNT 1020, conforme projeto. As chapas laterais foram soldadas com solda elétrica e eletrodos E 7018 e as frontais fixas com parafusos $0,0063\text{m} \times 0,0047\text{m}$ ($1/4'' \times 3/16''$). O acabamento foi feito com tinta anti-corrosiva, massa plástica e tinta martelada.

Os equipamentos foram instalados no painel procurando-se separar os vários sistemas que compõem o projeto.

a - sistema de fusão

As especificações dos equipamentos para controle e comando são as seguintes:

1 - Pirômetro Indicador / Controlador

Escala: $0 - 600^{\circ}\text{C}$

Modelo: SP - G30

Sensor: Tipo J, Ferro - Constantan

Alimentação: 220 VAC \pm 10% - 60 KZ

Fabricante: IOPE - Instrumentos de Precisão
Ltda

2 - Termopar

Tipo: J, Ferro - Constantan

Capa Protetora: Inox 18-B de diâmetro 3mm

Diâmetro do Cabo: 1,5mm

Quantidade: 1 Termopar

Fabricante: ECIL S.A

3 - Transformador Variador de Voltagem (VARIAC)

Modelo: Varivolt VM - 260

Tensão de Entrada: 220 V - 60 HZ

Tensão de Saída: 0 - 240 V

Corrente Máxima: 25 A

Potência Máxima: 6 KVA

Fabricante: Sociedade Técnica Paulista S.A

4 - Chave Magnética - Contator

Tipo: 3TB43

Tensão Nominal: 220V

Corrente Nominal: 30A

Potência Máxima: 4KW

Fabricante: SIEMENS S.A

5 - Amperímetro

Modelo: Linha Redonda

Escala: 0 - 3- A (23 divisões)

Fabricante: KRON - Brasil

6 - Chave para Acionar e Desligar o Sistema

Corrente Nominal: 30A

Tensão: 220V

Tipo: Liga-Desliga

Fabricante: Primelétrica Ltda

b - sistema de agitação

As especificações dos equipamentos para controle e comando são as seguintes:

1 - Pirômetro Indicador / Controlador

Escala: 0 - 600°C

Modelo: SP - G30

Sensor: Tipo J, Ferro - Constantan

Alimentação: 220 VAC \pm 10% - 60 KZ

Mostrador: Digital

Fabricante: IOPE - Instrumentos de Precisão Ltda

2 - Termopar

Tipo: J, Ferro - Constantan

Capa Protetora: Inox 18-B de diâmetro 3mm

Diâmetro do Cabo: 1,5mm

Quantidade: 4 Termopares

Fabricante: ECIL S.A

3 - Transformador Variador de Voltagem (VARIAC)

Modelo: Monofásico - VM - 260

Tensão de Entrada: 220 V - 60 HZ

Tensão de Saída: 0 - 240 V

Corrente Máxima: 12,5A

Potência Máxima: 3,0 KVA

Fabricante: Sociedade Técnica Paulista S.A

4 - Chave Magnética - Contator

Tipo: 3TB 41

Tensão Nominal: 220V

Corrente Nominal: 12A

Potência Máxima: 1,5KW

Fabricante: SIEMENS S.A

5 - Amperímetro

Modelo: Linha Redonda

Escala: 0 - 20 A (23 divisões)

Fabricante: KRON - Brasil

6 - Tacômetro / Variador de Velocidade

Modêlo: NW - VE08

Corrente Nominal: 8A

Tensão: 220V

Fabricante: NEWTRONIC TECNOLOGIA Ltda

7 - Chave para Acionar e Desligar o Sistema

Corrente Nominal: 15A

Tensão: 220V

Tipo: Liga-Desliga

Fabricante: Primelétrica Ltda

c - sistema de canal de vazamento

As especificações dos equipamentos para comando e controle são as seguintes:

1 - Amperímetro

Modelo: Linha Redonda

Escala: 0 - 5 A (16 divisões)

Fabricante: KRON - Brasil

2 - Chave para Acionar e Desligar o Sistema

Corrente Nominal: 15A

Tipo: Liga-Desliga

Tensão: 220V

Fabricante: Primelétrica Ltda

A figura 4.3 mostra a unidade de controle construída com todos os equipamentos.

4.3 - Custo do Equipamento

O custo para construção e montagem do equipamento de Reofundição contínua, foi calculado num total de: 458,79 DTN'S, sem levarmos em consideração o custo referente ao desenvolvimento do projeto e mão de obra já que parte desta foi realizada através de funcionários dos laboratórios do D.E.M e outra parte, entregue para terceiros dificultando desta forma, uma precisão quanto o custo da mesma.

O apêndice VI mostra como este custo foi obtido.

FIGURAS
CAPÍTULO - 4

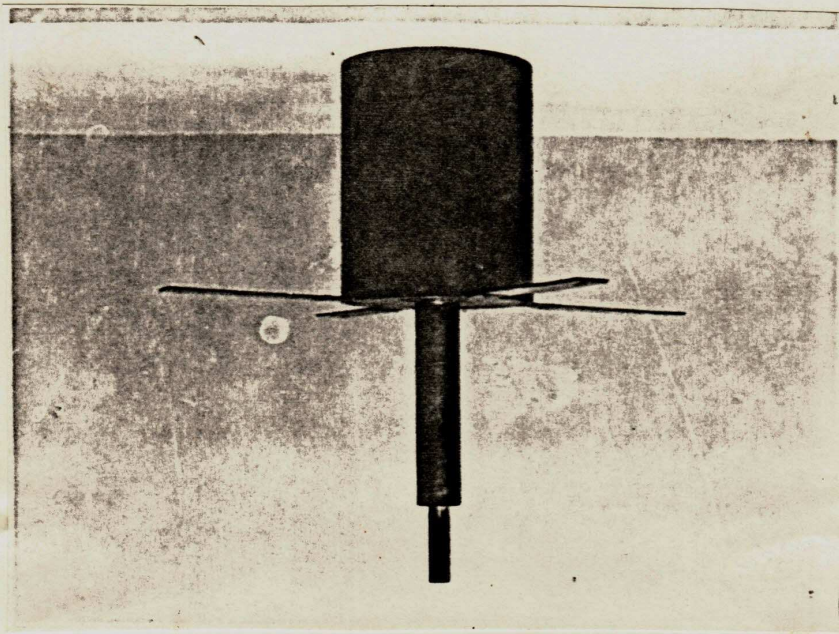


FIGURA - 4.1
Conjunto de cadinhos e canal de vazamento
construido.

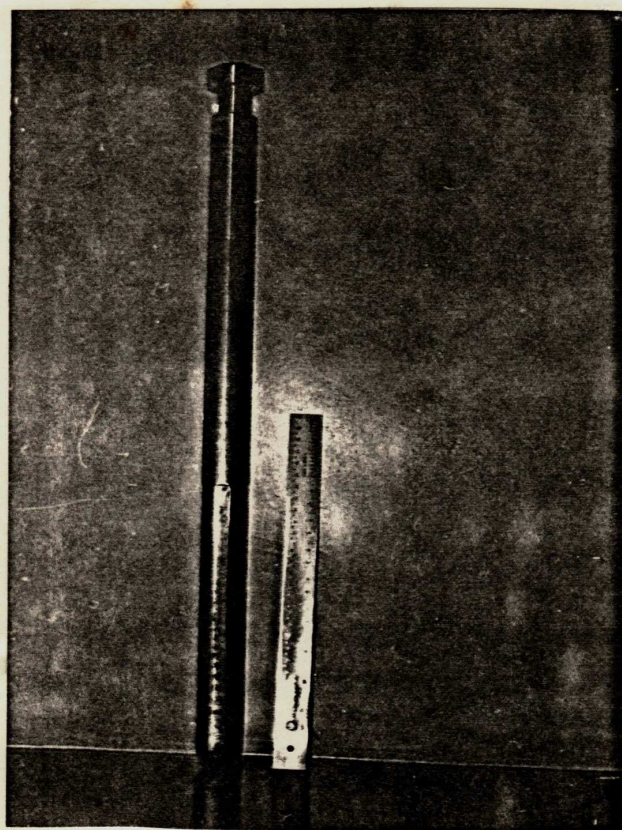
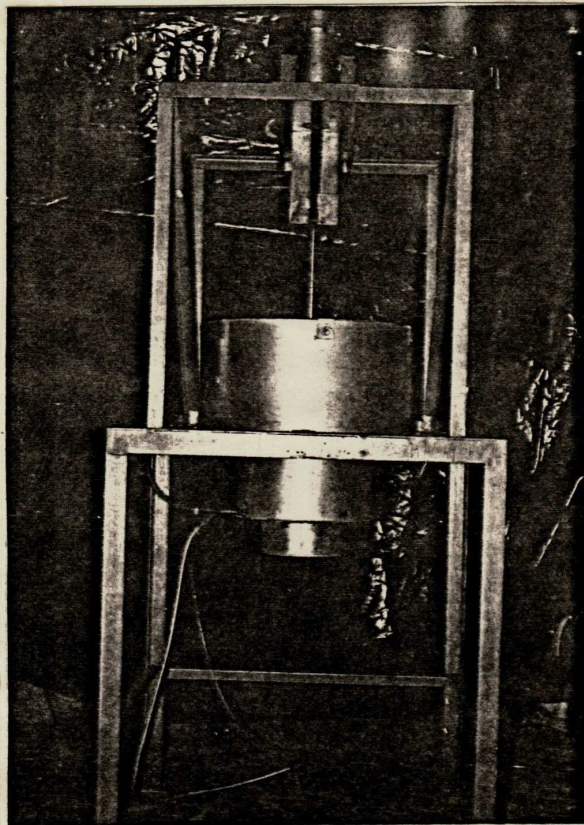


FIGURA - 4.2

Parte do agitador que fica em contato direto com o metal fundido.



F I G U R A - 4.3

Unidade de processamento construída, já fixada na estrutura de sustentação.

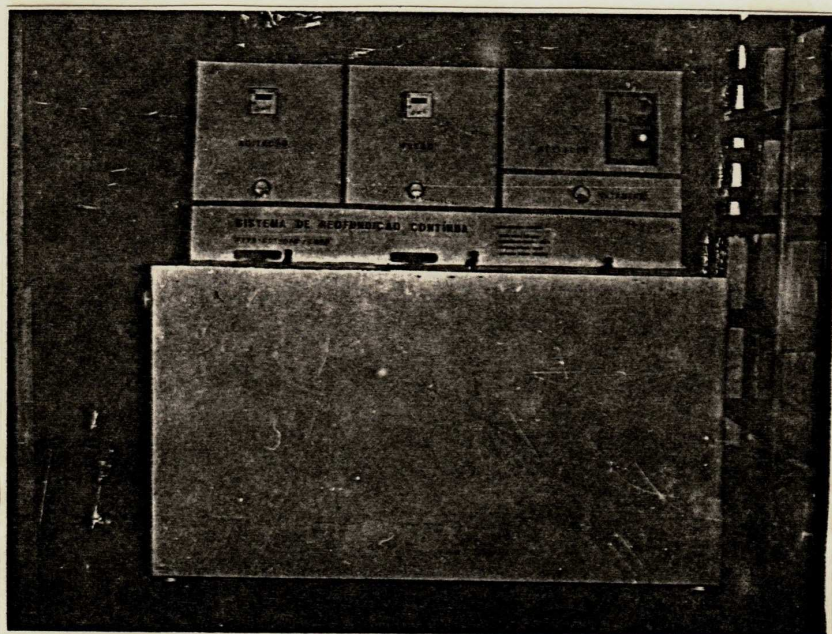
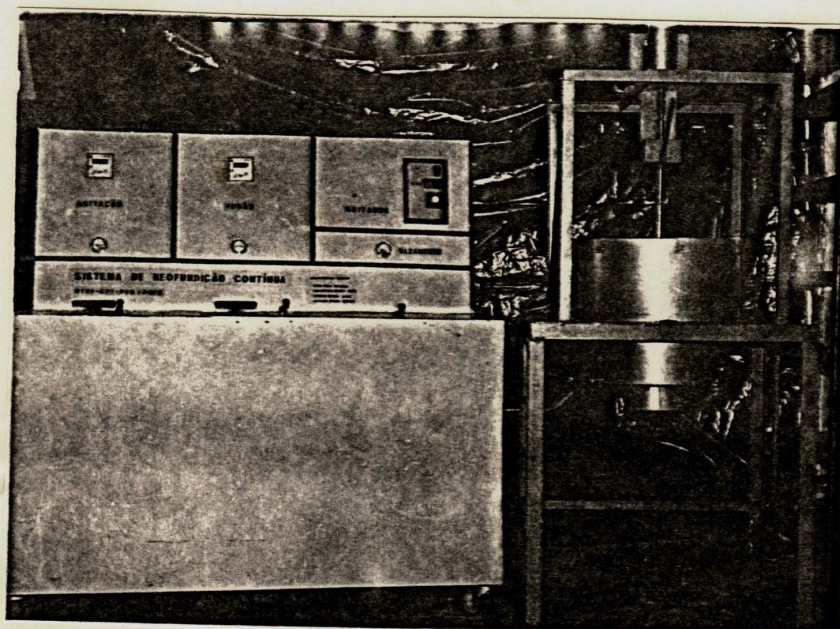


FIGURA - 4.4

Unidade de contrôle construída, com todos os equipamentos instalados.



F I G U R A - 4.5

Unidade de processamento e unidade de controle com todos os seus componentes.

CAPÍTULO - 5

REOFUNDIÇÃO DA LIGAS Pb - Sn

CAPÍTULO - 5 - Reofundição da Liga Pb - Sn

5.1 - Preparação da Liga

Para testar a funcionabilidade do sistema construído foi utilizada uma liga Pb - 26% em peso Sn.

A figura 5.1 apresenta o diagrama de equilíbrio da liga Pb - Sn(15).

Essa liga foi escolhida por ser uma típica liga com reação eutética de baixa temperatura de fusão, e por isso adequada para o sistema construído e para a reofundição por apresentar ótimas regiões de fração de sólidos.

49 kg da liga foi preparada a partir da fusão em forno elétrico de lingotes de chumbo e estanho de purezas 99,60% e 99,75% respectivamente (13). Especial atenção foi dada para a homogeneização da liga. A liga fundida foi vazada em coquilhas de pequenos tamanhos para facilitar o carregamento do sistema de reofundição.

5.2 - Reofundição da Liga

5.2.1 - Parâmetros de Processo Estabelecido:

- Temperatura de aquecimento = 593 K (320°C)
superaquecimento de 50K
- Velocidade de agitação da liga: 1000 rpm
- Temperatura de agitação da liga 503 K
(230°C)
- Fração de sólidos da liga: 36%
- Tempo de agitação: 5 min

5.2.2 - Procedimento para a realização da Reofundição

- a - O cadinho foi carregado com a liga preparada.
- b - No sistema de fusão o controlador de temperatura e o transformador variador de voltagem (VARIAC) foram ligados, ajustando o primeiro para uma temperatura de 593K (320°C) e o segundo a uma voltagem de 220 V, o que resultou numa corrente de 12 A.
- c - As mesmas condições de temperatura e potência do sistema de fusão, foi ajustada para o sistema de agitação e em seguida também foi acionado. O termopar foi colocado no canal inferior do sistema de agitação correspondente a zona próxima do canal de vazamento.
- d - Após a fusão da liga, uma amostra da mesma foi colhida e vazada em molde cilíndrico de areia com dimensões de: $h = 0,08m$, $d_w = 0,06m$ e a espessura da parede de $0,012m$, para posterior análise e comparação com a amostra reofundida.
- e - O agitador foi acionado, ajustando a velocidade do mesmo em 1000 rpm.
- f - O sistema de refrigeração foi ligado e o controlador de temperatura do sistema de agitação foi ajustado para 503K (230°C) para o estabelecimento de um gradiente de temperatura ao longo do forno de agitação e uma fração de sólidos de 36% próximo ao canal de vazamento. A vazão da água de refrigeração utilizada foi de $0,0001m^3 \cdot min^{-1}$ ($0,1 l \cdot min^{-1}$).
- g - Após atingir o estado estacionário na temperatura da câmara de agitação, o metal parcialmente solidificado foi agitado por 5 minutos e então vazado. Para o vazamento, o agitador foi levantado gradualmente. Com o vazamento

relativamente estabilizado, foi colhida amostra em molde de areia igual ao descrito anteriormente.

- h - Medidas de temperaturas ao longo da altura do sistema de agitação foram realizadas antes do vazamento para medir o gradiente de temperatura estabelecido. Como uma possível alteração da temperatura na zona inferior do forno de agitação fosse possível com o início do vazamento, um acurado acompanhamento da temperatura nesse local foi realizado.
- i - Para avaliar a diferença de temperatura do metal em agitação e a temperatura onde o termopar de controle está localizado (junto à resistência e à cerâmica), um segundo termopar foi colocado dentro do metal, isto é internamente na zona intermediária da zona de agitação (local correspondente ao 2º canal para termopar de baixo para cima vide figura 6.1).
- j - O restante da liga reofundida foi vazada em lingoteiras para reaproveitamento em trabalhos futuros.

5.3 - Análise Metalográfica

Para o exame metalográfico, as amostras fundidas de maneira convencional e reofundida foram seccionadas transversalmente e uma das partes lixadas mecânica e sucessivamente em lixas: nº 280, 320, 360, 400 e 600 parafinadas e úmidas. O polimento foi realizado manualmente em feltro usando pasta polidora.

O ataque químico foi realizado por aplicação de ácido acético glacial 98% (14).

A análise micrográfica foi realizada num banco metalográfico PME OLYMPUS.

FIGURAS
CAPITULO - 5

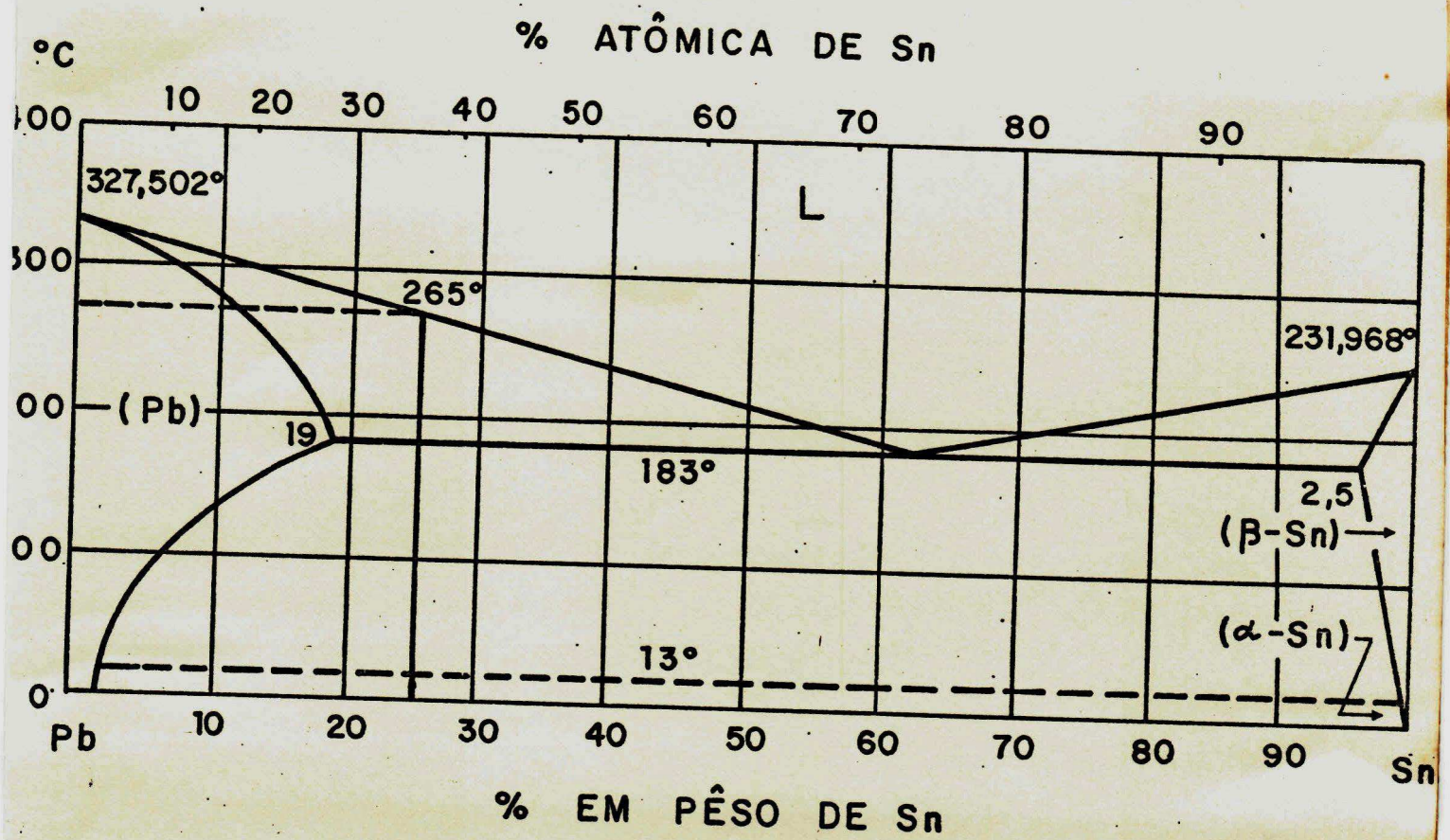


FIGURA 5.1

Diagrama de equilibrio da liga Pb-Sn(15).

CAPITULO - 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

CAPÍTULO - 6 - Resultados e Discussões

6.1 - Reofundição da Liga

O sistema projetado e construído apresentou bons resultados quanto ao funcionamento dos três fornos: fusão, agitação e vazamento. A oscilação da temperatura em torno da temperatura ajustada nos controladores de temperatura dos fornos de fusão e agitação foi muito pequena ($\pm 5K$), indicando que temos um ótimo controle dos fornos quanto a temperatura de ajuste. O tempo para fundir a liga foi em torno do estimado no projeto (uma hora).

Para a agitação da liga o tacômetro permitiu um rápido e preciso estabelecimento da rotação desejada. Quanto a vibração do agitador, observada quando de testes sem metal, com o metal fundido a vibração foi mínima. Isso foi possível devido ao alinhamento e apoio dado pelo metal fundido ao longo de todo agitador. Quanto ao movimento vertical do agitador foi impossível controlá-lo devido ao fato do peso do agitador não ser suficiente para vencer a pressão hidrostática do metal fundido no canal de vazamento. Assim, uma vez iniciada a abertura, o agitador foi elevado pela pressão do metal líquido para a posição superior máxima, sendo então impossível o controle da vazão e mesmo do fechamento. Um novo sistema de comando do movimento vertical do agitador se faz necessário, onde a descida do mesmo não seja somente dependente de sua força de gravidade. Esse problema pode ser contornado adaptando uma alavanca com um pino excêntrico tendendo abaixar o agitador. Semelhante a alavanca já existente responsável pelo deslocamento do agitador para cima.

A serpentina do sistema de refrigeração funcionou bem, diminuindo a temperatura ao longo do forno de agitação. Temperaturas ao longo do sistema de agitação em quatro pontos diferentes foram medidas, para avaliar o perfil de temperatura ao longo da altura do forno de agitação.

A figura 6.1 mostra as temperaturas obtidas ao longo da altura do forno de agitação. Observa-se o gradiente esperado, visto que o calor do metal do forno de fusão aquece a zona superior do forno de agitação. Uma não esperada "zona fria" foi medida na zona superior do forno de agitação. Uma análise do projeto e do sistema construído explica esse fato, pois nessa zona de transição do forno de fusão para o forno de agitação, além da inexistência de fios de resistência, um bom acoplamento do sistema de agitação ao sistema de fusão não foi conseguido. Entretanto o mais importante para a reofundição é a temperatura na zona inferior do forno de agitação onde a fração de sólidos

é determinada. É claro que um pequeno gradiente de temperatura é desejável pois, isso aumentaria a eficiência da agitação da fração de sólidos presentes. A melhoria do projeto na eliminação da "zona fria" e uma otimização da refrigeração, resultaria certamente em uma minimização do gradiente de temperatura ao longo do forno de agitação.

Uma diferença de 40K foi observado entre as temperaturas do metal no forno de agitação e do termopar de controle instalado na altura intermediária desse forno. É uma diferença muito grande que deve ser considerado no estabelecimento dos parâmetros de processo. Essa diferença pode ser minimizada pela introdução do termopar de controle mais próximo ao cadinho. Se essa diferença for aplicada a zona inferior do forno, isso indicaria que o metal neste local estaria a temperatura de fusão ($503K + 40K = 543K$). Entretanto análise micrográficas a serem discutidas adiante, mostram que sólidos existem neste local durante a agitação. Assim sendo essa diferença não pode ser extrapolada a região inferior do forno de agitação junto ao vazamento. Mesmo assim a fração de sólidos da liga processada fica então indeterminada. Uma acurada medição da temperatura deste local é necessária. O controle da temperatura neste local é imprescindível para ter-se o controle da fração de sólidos do metal reofundido.

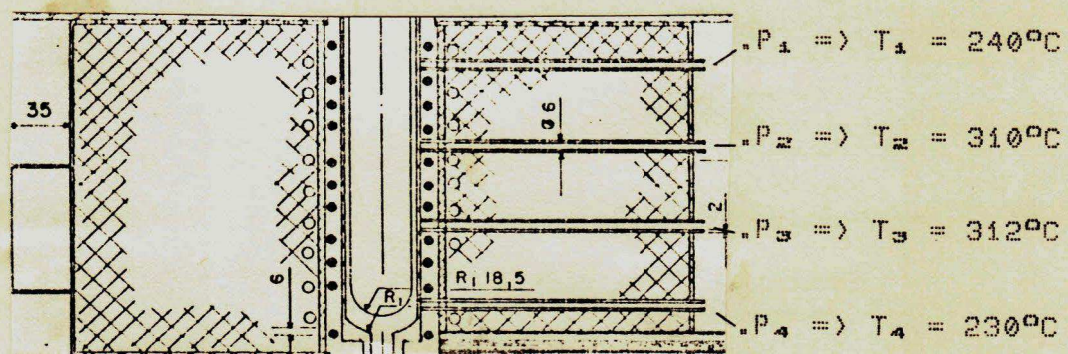
Não foi observada sensível alteração da temperatura na zona inferior do forno de agitação (próximo ao canal de vazamento) com o início do vazamento. Isso indica que a fração de sólidos estabelecida no estado estacionário sem vazamento se mantém constante durante o vazamento.

6.2 - Análise Metalográfica

As figuras 6.2 e 6.3 apresentam micrografias das amostras fundidas de modo convencional e reofundidas respectivamente. A amostra fundida convencionalmente apresenta estrutura típica de dendritas de fase α rica em Pb e interdendritas de Sn e fase α . Dentro da fase primária, observa-se a precipitação da fase rica em Sn devido a diminuição da solubilidade deste no Pb. A amostra reofundida apresenta não mais uma estrutura dendrítica mas uma estrutura de aspecto globulítico de tamanho e distribuição homogênea na matriz eutética.

Fica então comprovado a eficiência do processo de reofundição na melhoria da microestrutura do metal fundido.

FIGURAS
CAPÍTULO - 6



Sistema de Agitação

FIGURA - 6.1

Variação da temperatura em diversos pontos ao longo do sistema de agitação.

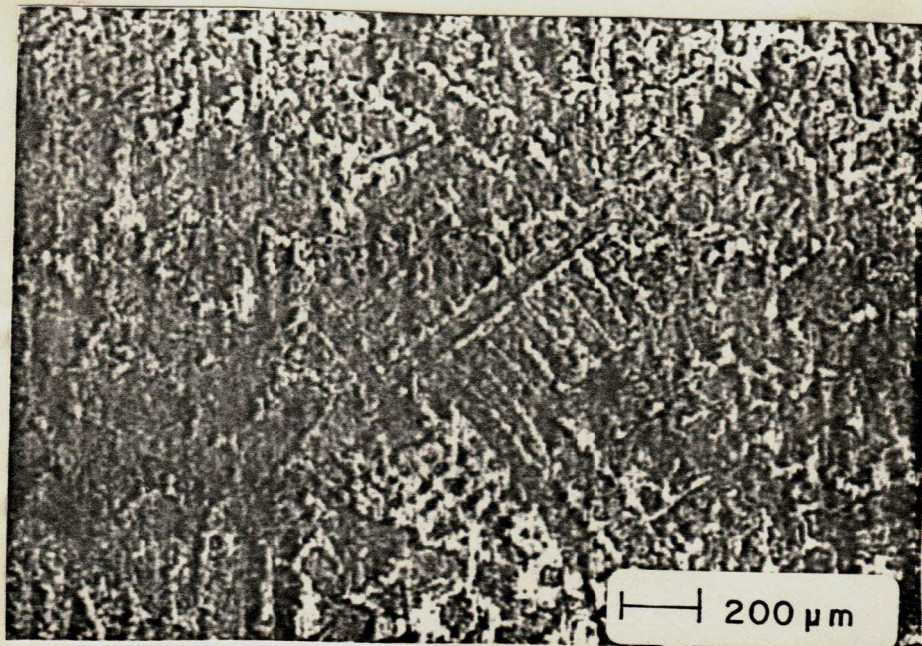
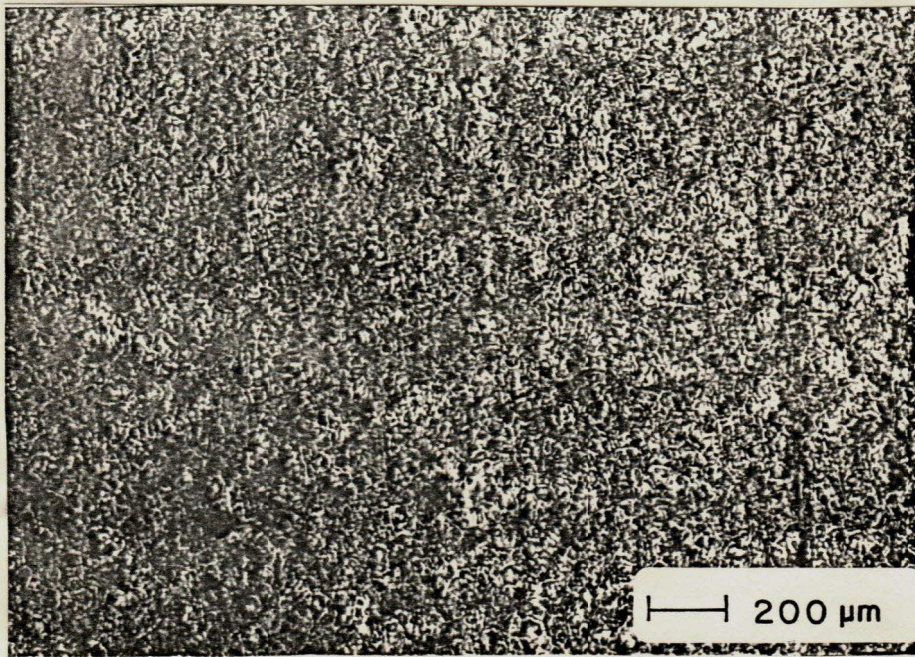


FIGURA - 6.2

Estrutura da amostra da liga Pb - 26% Sn obtida utilizando processo convencional de fundição.



F I G U R A - 6.3

Estrutura da amostra da liga Pb - 26% Sn obtida utilizando o processo de reofundição.

CAPÍTULO - 7
CONCLUSÕES

CAPÍTULO - 7 - Conclusões

- 1 - O sistema de reofundição projetado e construído teve bom desempenho no processamento da liga Pb-Sn, no que se refere a qualidade do metal obtido.
- 2 - Na operação do sistema foi observado um bom controle da temperatura nos fornos, assim como bom controle do agitador.
- 3 - O controle da vazão pelo movimento vertical do agitador não pode ser realizado, necessitando para isso alteração no sistema de comando do deslocamento do agitador.
- 4 - O controle preciso da fração de sólidos do metal reofundido não foi possível ser feito, devido ao inadequado posicionamento do termopar de controle no sistema de agitação, que não permitiu a leitura da temperatura real da pasta em agitação.

CAPÍTULO - 8
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

CAPÍTULO - 8 - Sugestões para Trabalhos Futuros

Da experiência adquirida no desenvolvimento do presente trabalho, são aqui sugeridas algumas ideias para futuros trabalhos.

- Desenvolvimento de experiência similar com outras ligas metálicas.
- Verificar a influência dos parâmetros seguintes na estrutura e propriedade de ligas reofundidas continuamente.
 - a - velocidade de agitação
 - b - taxa de resfriamento
 - c - vazão de liga metálica reofundida
- Algumas alterações no equipamento de reofundição construído.
 - a - colocação de buchas de bronze sobre e sob o bloco de apoio visando um melhor alinhamento e centralização do agitador.
 - b - um método mais confiável para controle da vazão do metal reofundido, não utilizando o movimento vertical do agitador.
 - c - levar em consideração aspectos ergonômicos tanto para unidade de processamento como para a unidade de controle.
 - d - instalação de uma mola, envolvendo a parte do agitador que fica acima do disco de ferro fundido dentro da cavidade central do bloco de apoio, para melhor retorno do agitador a posição inicial.
 - e - existência de uma determinada inclinação na tampa inferior do cadinho de fusão, para um melhor escoamento do metal para o cadinho de agitação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 - Reed-Hill, R. E. "Princípios de Metalurgia Física" Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois S.A., 1982.
- 02 - Assar, A. W. M. "Casting and solidification of semisolid Alloy", Tese de Doutorado, Faculty of Engineering, Ain Shams University, Egito, 1985.
- 03 - Bruck, R. S. e Kaup, T. "Rheocasting Ponto de partida para novos Processos de Fundição e Solidificação", série Monográfica nº 4, Ministério das Relações Exteriores, Setor de Ciência e Tecnologia SECTEC da Embaixada do Brasil em Bonn W. Germany, 1986.
- 04 - El - Kharbotly, A., El - Mahallawy, N. e Taha, M.A. 2 nd. Cairo University, MDP Conference, 1982.
- 05 - Johnston, W.C., Kotler G. T. e Tiller, W. A. "Trans. of the Metallurgical Society of Aime", V. 227 p. 890, 1963.
- 06 - Kattamis, T. Z., "Casting of Semi-Solid Metals", p. 189-201.
- 07 - Kaup, T. e Sahm, P., "Rheogießen - Ausgangspunkt für neuartige Giess - Und Erstarrungsprozesse", Giessereitechnik, 33, Jahrgang, Heft 7/1987, 226 - 231.
- 08 - Mehrabian, R. e Flemings, M. C., "Die Casting of Partially Solidified Alloys", Trans. American Foundrymen's Soc, 80 (1972), p. 173 - 182.
- 09 - Flemings, M. C. "New Solidification Processes and Products", Sheffield International Conferene on Solidification and Casting, Sheffield University, 1977.
- 10 - Flemings, M. C. e Young, K. P., "Rheocasting", Mc. Graw Hill Year Book of Science e Technology, 1978.
- 11 - Manual KANTHAL, "Material de Resistência e de Aquecimento Elétrico", Bulten Kanthal AB, 1971, Suécia.

- 12 - Kiminami, C. S., "Projeto, Construção e Utilização de Fornos para Fusão de Ligas Fe - Ti e Mg - Ni para Armazenagem de Hidrogênio", Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campina - UNICAMP - São Paulo, 1981.
- 13 - Santiago, A. V. e Pereira, R. L., "Metais não Ferrosos e suas Ligas" Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 1975.
- 14 - Coutinho, T. A., "Metalografia de não Ferrosos - Análise e prática", São Paulo - Edgard Blucher, 1980, pp 104.
- 15 - Metals Handbook., "Metallography, Structures and Phase Diagrams", volume 8, 8th Edition, American Society for Metals, Ohio, 1973, p.330.

APÉNDICES

A P Ê N D I C E I (A)

PROPRIEDADES FÍSICAS DO CHUMBO

Número atômico -----	82
Massa atômica -----	207,19
Densidade a 20°C (kg.m ⁻³) -----	11,34.10 ³
Ponto de fusão (°C) -----	327,4
Ponto de ebulição (°C) -----	1744
Calor latente de fusão (J.kg ⁻¹) -----	2,619.10 ⁴
Calor específico (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹) -----	129,704
Coeficiente de dilatação térmica linear a 20°C (°C ⁻¹) ---	29,3.10 ⁻⁶
Condutividade térmica a 20°C (W.cm ⁻¹ °C ⁻¹) -----	83.10 ⁻³
Resistividade elétrica a 20°C (Ω .cm) -----	20,65
Forma cristalina -----	C F C

A P Ê N D I C E I (B)

PROPRIEDADES FÍSICAS DO ESTANHO

Número atômico -----	50
Massa atômica -----	118,69
Densidade a 20°C (kg.m ⁻³) -----	7,3.10 ⁻³
Ponto de fusão (°C) -----	232
Ponto de ebulição (°C) -----	2270
Calor latente de fusão (J.kg ⁻¹) -----	6,066.10 ⁴
Calor específico (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹) -----	225,94
Coeficiente de dilatação térmica linear (°C ⁻¹) ----	23.10 ⁻⁴
Condutividade térmica a 20°C (W.cm ⁻¹ °C ⁻¹) -----	15.10 ⁻²
Resistividade elétrica a 20°C (Ω .cm) -----	11,5
Forma cristalina -----	Tetragonal

A P Ê N D I C E II

CÁLCULO PARA DETERMINAR A QUANTIDADE NECESSÁRIA DE CALOR PARA A FUSÃO DA LIGA Pb - 26%Sn.

A quantidade de calor necessário para a fusão de 50Kg da liga Pb - 26%Sn é dada pela equação*

Q = quantidade de calor para a fusão de M (kg) da liga.

M = massa da liga = 50kg.

C = calor específico da liga = $154,72 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

T_f = temperatura de fusão da liga 575,3 K (302,3°C)

T_m = temperatura ambiente 301 K (28°C)

L_v = calor latente de fusão da liga $3,515 \cdot 10^4 \text{ J.kg}^{-1}$

$$* \quad Q = M \cdot C \cdot (T - T_m) + M \cdot L$$

$$Q = 50 \text{ kg} \cdot 154,72 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 547,30 \text{ K} + 50 \text{ Kg} \cdot 3,515 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$Q = 4233912,80 \text{ J} + 1757500 \text{ J} = 5991412,8 \text{ J}$$

$$Q = 59,91 \cdot 10^5 \text{ J}$$

$$Q = 5992 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ kcal} \text{ ---} \rightarrow 4180 \text{ J}$$

$$x \text{ ---} \rightarrow 5992000 \text{ J} \quad x = 1432 \text{ kcal}$$

$$1 \text{ kcal h}^{-1} \text{ ---} \rightarrow 1,162 \text{ W}$$

$$1432 \text{ kcal h}^{-1} \text{ ---} \rightarrow x' \quad x' = 1664 \text{ W}$$

$$5992 \text{ kJ} \approx 1664 \text{ W}$$

A P Ê N D I C E I I I (A)

CÁLCULO DA RESISTÊNCIA PARA O FORNO DE FUSÃO COM AQUECIMENTO RESISTIVO

- Dados básicos

a) Potência do resistor (P_e) = 4000 W

b) Tensão (E) = 220 V

c) Temperatura máxima requerida = 500°C

O fio da liga KANTHAL DSD é o mais adequado para o forno em questão levando em consideração a temperatura requerida.

O valor da "carga de superfície admissível" (p) para esse material à temperatura de serviço do forno é 3,0 watts.cm⁻².

- Cálculo da intensidade de corrente do resistor.

$$1. \quad I_e = \frac{P_e}{E_e} \quad \dots \quad I_e = \frac{4000}{220} = 18,18 \text{ A}$$

- Cálculo da resistência ôhmica do resistor em estado quente:

$$2. \quad R = \frac{E_e}{I_e} \quad \dots \quad R_e = \frac{220}{18,18} = 12,10 \Omega$$

- Cálculo da superfície irradiante (S_i) do material de resistência mais indicada:

$$3. \quad S_i = \frac{I^2 \times C_T}{P}$$

onde C_T é o fator de temperatura para o material KANTHAL DSD à 500°C que é 1,032

$$S_i = \frac{(18,18)^2 \times 1,032}{3} = 113,69 \quad \dots$$

$$S_i = 113,69 \text{ cm}^2 \cdot \Omega^{-1}$$

o fio KANTHAL DSD de diâmetro 1,9 mm tem susuperfície irradiante $S_i = 125,4 \text{ cm}^2/\Omega$ sendo um valor aproximado e superior a S_i requerida. Assim sendo, este fio é o indicado.

Observação:

Por falta no comércio do fio KANTHAL DSD com 1,9 mm de diâmetro, optamos pelo fio KANTHAL DSD com 2,052 mm.

- Cálculo do comprimento do resistor.

$$4. \quad L = \frac{R_T}{r_{20} \cdot C_T}$$

onde R_{20} é a resistência métrica do fio escolhido a 20°C que é igual à $0,4297 \Omega / \text{m}$

$$L = \frac{12,10}{0,4297 \times 1,032} \quad \dots \quad L = 27,28 \text{ m}$$

Devido ao fato da superfície irradiante do fio escolhido não ser exatamente igual a S, calculada, é necessário controlar a carga de superfície (p).

- Cálculo da carga de superfície definitiva.

$$5. \quad p = \frac{I^2 \cdot C_T}{S} \quad p = \frac{(18.18)^2 \cdot 1,032}{146.2}$$

$$p = 2,33 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$$

Como esse calor é menor que $3,0 \text{ Watts} \cdot \text{cm}^{-2}$ que é o limite de p para a liga KANTHAL a temperatura de serviço, o resistor a ser utilizado tem as seguintes características.

Material = Liga KANTHAL DSD

Diâmetro do fio = $0,002052 \text{ m}$

Comprimento do fio = $27,28 \text{ m}$

Resistência = $12,10 \Omega$

Diâmetro externo da espiral = $0,0123 \text{ m}$

Espaçamento entre as espiras = $0,008 \text{ m}$

A P Ê N D I C E I I I (B)

CÁLCULO DA RESISTÊNCIA PARA O FORNO DE AGITAÇÃO COM AQUECIMENTO RESISTIVO

- Dados básicos

a) Potência do resistor (P_e) = 1500 Watts

b) Tensão (E_e) = 220 Volts

c) Temperatura máxima requerida = 300°C

O fio da liga KANTHAL DSD é o mais adequado para o forno em questão levando em consideração a temperatura requerida.

O valor da "carga de superfície admissível" (p) para esse material à temperatura de serviço do forno é de 3,0 watts.cm⁻².

- Cálculo da intensidade de corrente do resistor.

$$1. \quad I_e = \frac{P_e}{E_e} \quad . \quad . \quad I_e = \frac{1500}{220} = 6,818 \text{ A}$$

- Cálculo da resistência ôhmica do resistor em estado quente:

$$2. \quad R_T = \frac{E_e}{I_e} \quad . \quad . \quad R_T = \frac{220}{6,818} = 32,25 \Omega$$

- Cálculo da superfície irradiante (S_i) do material de resistência mais indicada:

$$3. \quad S_i = \frac{I_e^2 \times C_T}{P}$$

onde C_T é o fator de temperatura para o material KANTHAL DSD à 300°C que é 1,012

$$S_{iL} = \frac{(6,82)^2 \times 1,012}{3} = S_i = 15,69 \text{ cm}^2 \cdot \Omega^{-1}$$

o fio KANTHAL DSD de diâmetro 1,0 mm tem superfície irradiante (S_i) = 18,28 $\text{cm}^2 \cdot \Omega^{-1}$ sendo um valor aproximado e superior a superfície de irradiação requerida. Assim sendo, este fio é o indicado.

Observação!

Por falta no comércio do fio KANTHAL DSD com 1,0 mm optamos pelo fio de diâmetro 1,024 mm - Sendo assim o fio escolhido foi o fio KANTHAL DSD com 1,024 mm de diâmetro.

- Cálculo do comprimento do resistor.

$$4. \quad L = \frac{R_T}{r_{ze} \cdot C_T}$$

onde R_{ze} é a resistência métrica do fio escolhido a 20°C que é igual à 1,639 $\Omega \cdot \text{m}^{-1}$

$$L = \frac{32,25}{1,6397 \times 1,012} \quad L = 19,44\text{m}$$

Devido ao fato da superfície irradiante do fio escolhido não ser exatamente igual a S, calculada, é necessário controlar a carga de superfície (p).

- Cálculo da carga de superfície definitiva.

$$5. \quad p = \frac{I_e^2 \cdot C_T}{S} \quad p = \frac{(6,818)^2 \cdot 1,012}{19,92} = 2,36$$

$$p = 2,36 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$$

Como esse calor é menor que 3,0 Watts \cdot cm^{-2} que é o limite de p para a liga KANTHAL DSD a temperatura de serviço, o resistor a ser utilizado tem as seguintes características.

Material = fio KANTHAL DSD

Diâmetro do fio = 0,001024 m

Comprimento do fio = 19,44 m

Resistência = 32,25 Ω

Diâmetro externo da espiral = 0,0065 m

Espaçamento entre as espiras = 0,003 m

A P Ê N D I C E I I I (C)

CÁLCULO DA RESISTÊNCIA PARA O FORNO DO CANAL DE VAZAMENTO COM AQUECIMENTO RESISTIVO

- Dados básicos

a) Potência do resistor (P_e) = 500 Watts

b) Tensão (E) = 220 V

c) Temperatura máxima requerida = 500°C

O fio da liga KANTHAL DSD é o mais adequado para o forno em questão levando em consideração a temperatura requerida.

O valor da "carga de superfície admissível" (p) para esse material à temperatura de serviço do forno é 3,0 watts.cm⁻².

- Cálculo da intensidade de corrente do resistor.

$$1. \quad I_e = \frac{P_e}{E_e} \quad . \quad . \quad I_e = \frac{500}{220} = 2,27 \text{ A}$$

- Cálculo da resistência ôhmica do resistor em estado quente:

$$2. \quad R_T = \frac{E_e}{I_e} \quad . \quad . \quad R_T = \frac{220}{2,27} = 96,91$$

$$R_T = 96,91 \Omega$$

- Cálculo da superfície irradiante (S_i) do material de resistência mais indicada:

$$3. \quad S_i = \frac{I_e^2 \times C_T}{P}$$

onde C_T é o fator de temperatura para o material KANTHAL DSD à 500°C que é 1,032

$$S_i = \frac{(2,27)^2 \times 1,032}{3,0} = 1,665 \text{ cm}^2 \cdot \Omega^{-1}$$

$$S_i = 1,665 \text{ cm}^2 \cdot \Omega^{-1}$$

o fio KANTHAL DSD de diâmetro $0,450 \text{ mm}$ tem superfície irradiante $S_i = 1,665 \text{ cm}^2 \cdot \Omega^{-1}$ que é o valor igual a superfície irradiante requerida. Sendo assim o diâmetro do fio escolhido é $d = 0,450 \text{ mm}$.

- Cálculo do comprimento do resistor.

$$4. \quad L = \frac{R_T}{r_{20} \cdot C_T}$$

onde R_{20} é a resistência métrica do fio escolhido a 20°C que é igual à $8,488 \text{ } /\text{m}^{-1}$

$$L = \frac{96,91}{8,488 \times 1,032} \quad \therefore \quad L = 11,06 \text{ m}$$

- Cálculo da carga de superfície definitiva.

$$5. \quad S_i = 3,0 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$$

Características final do resistor a ser utilizado.

Material = fio KANTHAL DSD

Diâmetro do fio = 0,00045 m

Comprimento do fio = 11 m

Resistência = 96,91 Ω

Diâmetro externo da espiral = 0,0030 m

Espaçamento entre as espiras = 0,0015 m

* Detalhes referentes ao procedimento destes cálculos da resistência e características das ligas KANTHAL podem ser obtidas no "MANUAL KANTHAL" Edição 1971 - Bulten Kanthal AB - Suécia /11/.

A P Ê N D I C E I V (A)

CÁLCULO DA ESPESSURA DA PAREDE DE ISOLANTE DO
FORNO DE FUSÃO

- Material: Flocos Isolantes Kaowool
- Condutividade térmica: $K = 0,1 \text{ Kcal.h}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
- Temperatura quente: $T_q = 500^{\circ}\text{C}$
- Temperatura da superfície interna da fibra
 $T_s = 495^{\circ}\text{C}$
- Temperatura da superfície externa da fibra
 $T_e = 25^{\circ}\text{C}$

Cálculo do coeficiente de transmissão superficial referente à parede interna E_c .

$$E_e = F_c + M_e R_e$$

$$F_c = K \sqrt[4]{\Delta T} \quad \text{onde: } \Delta T = T_q - T_s$$

$$\Delta T = 500 - 495 = 5^{\circ}\text{C}$$

$R_e = 4$, para os flocos isolantes

$K = 2,2$ para a superfície interna

$$F_c = 2,2 \sqrt[4]{5} \quad \therefore F_c = 3,29 \text{ Kcal.h}^{-1} . \text{m}^{-1} . \text{°C}^{-1}$$

$$M_e = \frac{\left(\frac{T_q + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_s + 273}{100}\right)^4}{T_q - T_s}$$

$$M_e = \frac{3570 - 3478}{500 - 495} = \frac{92}{5}$$

$$M_c = 18,4$$

$$\text{Logo } E_e = 3,29 + 4 \times 18,30 \quad \dots$$

$$E_e = 76,49 \text{ Kcal.m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

A quantidade de calor que entra por convecção é igual a quantidade de calor que passa pelos flocos isolantes por condução:

$$E_e A (T_q - T_s) = \frac{K A (T_s - T_e)}{L}$$

$$76,49 (500 - 495) = \frac{0,1 (495 - 25)}{L}$$

$$382,45 L = 47 \quad \dots \quad L = 47/382,45$$

$$L = 0,123 \text{ m} = 123 \text{ mm}$$

Logo a espessura da parede de isolante térmico é de 0,123 m.

Tomando-se 1,5 como fator de segurança temos que a espessura da parede de isolante térmico é de 0,18 m.

A P Ê N D I C E I V (B)

CÁLCULO DA ESPESSURA DA PAREDE DE ISOLANTE DO
FORNO DE AGITAÇÃO

- Material: Flocos Isolantes Kaowool
- Condutividade térmica: $K = 0,1 \text{ Kcal.h}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
- Temperatura quente: $T_q = 300\text{°C}$
- Temperatura da superfície interna da fibra
 $T_{\text{e}} = 293\text{°C}$
- Temperatura da superfície externa da fibra
 $T_{\text{e}} = 25\text{°C}$

Cálculo do coeficiente de transmissão superficial referente à parede interna E_e .

$$E_e = F_c + M_e R_e$$

$$F_c = K\sqrt[4]{\Delta T} \quad \text{onde: } \Delta T = T_q - T_s \quad \dots$$

$$\Delta T = 300 - 293 = 7\text{°C}$$

$R_e = 4$, para os flocos isolantes

$K = 2,2$ para a superfície interna

$$F_c = 2,2\sqrt[4]{7} \quad \dots \quad F_c = 3,58 \text{ Kcal.h}^{-1} . \text{m}^{-1} . \text{°C}^{-1}$$

$$M_c = \frac{\left(\frac{T_q + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_s + 273}{100}\right)^4}{T_q - T_s}$$

$$M_c = \frac{1078 - 1026}{7} = \frac{52}{7}$$

$$Mc = 7,43$$

$$\text{Logo } Ee = 3,58 + 7,43 \times 4$$

$$Ee = 33,30 \text{ Kcal.m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$$

A quantidade de calor que entra por convecção é igual a quantidade de calor que passa pelos flocos isolantes por condução:

$$Ee A (Tq - Te) = \frac{K A (Te - Tc)}{L}$$

$$33,30 (300 - 293) = \frac{0,1 (293 - 25)}{L}$$

$$233,1 L = 26,8 \quad L = 0,115 \text{ m} = 11,5 \text{ cm}$$

Logo a espessura da parede de isolante térmico para o forno de agitação é de: 0,12 m.

A P Ê N D I C E I V (C)

CÁLCULO DA ESPESSURA DA PAREDE DE ISOLANTE PARA O
CANAL DE VAZAMENTO

- Material: Flocos Isolantes Kaowool
- Condutividade térmica: $K = 0,1 \text{ Kcal.h}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
- Temperatura quente: $T_q = 500\text{°C}$
- Temperatura da superfície interna da fibra
 $T_s = 492\text{°C}$
- Temperatura da superfície externa da fibra
 $T_e = 25\text{°C}$

Cálculo do coeficiente de transmissão superficial referente à parede interna E_e .

$$E_e = F_c + M_e R_e$$

$$F_c = K \sqrt[4]{\Delta T} \quad \text{onde: } \Delta T = T_q - T_s$$

$$\Delta T = 500 - 492 = 8\text{°C}$$

$R_e = 4$, para os flocos isolantes

$K = 2,2$ para a superfície interna

$$F_c = 2,2 \sqrt[4]{8} \quad \therefore F_c = 3,70 \text{ Kcal.h}^{-1} . \text{m}^{-1} . \text{°C}^{-1}$$

$$M_e = \frac{\left(\frac{T_q + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_s + 273}{100}\right)^4}{T_q - T_s}$$

$$M_e = \frac{3570 - 3424}{8} = \frac{146}{8}$$

$$M_c = 18,25$$

$$\text{Logo } E_e = 3,70 + 18,30 \times 4$$

$$E_e = 76,70 \text{ Kcal.m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$$

A quantidade de calor que entra por convecção é igual a quantidade de calor que passa pelos flocos isolantes por condução:

$$E_e A (T_q - T_e) = \frac{K A (T_e - T_c)}{L}$$

$$76,70 (500 - 492) = \frac{0,1 (492 - 25)}{L}$$

$$613,60 L = 46,70 \quad \therefore \quad L = \frac{46,70}{613,60} = 0,076 \text{ m}$$

$$L = 0,076 \text{ m}$$

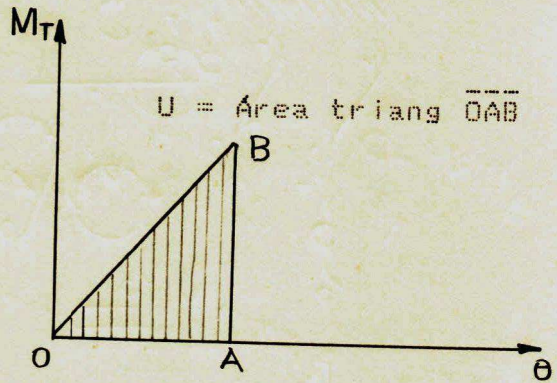
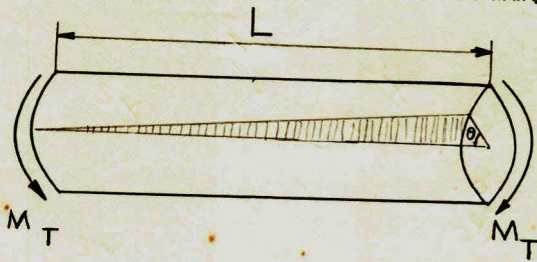
Tomando-se 1,2 como fator de segurança temos que a espessura da parede de isolante térmico de $L = 0,090 \text{ m}$.

APÊNDICE V

CÁLCULO PARA A DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA DO MOTOR A SER UTILIZADO NO SISTEMA

- Método de energia de deformação.

Relações entre o trabalho realizado pelas forças externas e a energia interna armazenada durante o processo de deformação.



$$\theta = \frac{M_T \cdot L}{G \cdot J_p}$$

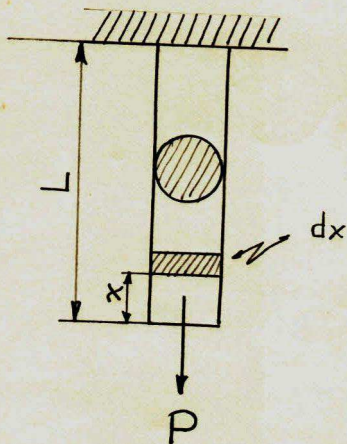
$$U = \frac{M_T \cdot \theta \text{ (trabalho)}}{2}$$

$$U = \frac{M_T \cdot M_T \cdot L}{2 \cdot G \cdot \frac{\pi \cdot d^4}{32}}$$

$$J_p = \frac{\pi \cdot d^4}{32}$$

$$U = \frac{M_T^2 \cdot L}{2G \cdot J_p} \quad (I)$$

- Energia de deformação acumulada numa barra de seção circular.



$$du = \frac{p^2 \cdot dx}{2 A E}$$

$$\left. \begin{aligned} p &= A \cdot x \cdot \gamma \\ A &= \pi \cdot \frac{d^2}{4} \end{aligned} \right\}$$

$$U = \int_0^L du = \int_0^L \frac{(Ax \cdot \gamma)^2 \cdot dx}{2 A E} = \int_0^L \frac{A^2 x^2 \gamma^2}{2 A E}$$

$$\therefore U = \frac{A^2 \cdot L^3 \cdot \gamma^2}{6 E}$$

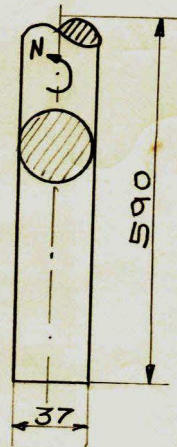
$$U = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot \gamma^2 \cdot L^3}{24 E} \quad \text{(II)}$$

igualando I e II temos:

$$U_{\text{trabalho}} = \frac{16 M_T^2 \cdot L}{\pi \cdot d^4 \cdot G} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot \gamma^2 \cdot L^3}{24 \cdot E} = U_{\text{energia}}$$

$$M_T^2 = \frac{\pi^2 \cdot d^4 \cdot \gamma^2 \cdot L^2 \cdot G}{384 E} \quad \text{(III) Expressão deduzida}$$

- Dados do Projeto:



$$N = 1000 \text{ rpm}$$

$$d = 3,7 \text{ cm}$$

$$L = 59 \text{ cm}$$

$$\gamma = 7,8 \cdot 10^{-9} \text{ Kg/cm}^2 \text{ (aço)}$$

$$E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ Kg/cm}^2$$

$$G = 8,25 \cdot 10^5 \text{ Kg/cm}^2$$

Substituindo em III, temos:

$$M_T^2 = \frac{\pi^2 \cdot (3,7)^4 \cdot (7,8 \cdot 10^{-9})^2 \cdot 59^2 \cdot 8,25 \cdot 10^5}{384 \cdot 2,1 \cdot 10^4} = 5,48$$

$$M_T = \sqrt{5,48} \quad \therefore \quad M_T = 2,34 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

$$M_T = \frac{72.600 \cdot \text{Pot, cv}}{N, \text{ rpm}} \quad \therefore \quad \text{Pot} = \frac{N \cdot M_T}{72.600}$$

$$\text{Pot} = \frac{1000 \cdot 2,34}{72.600} = 0,032$$

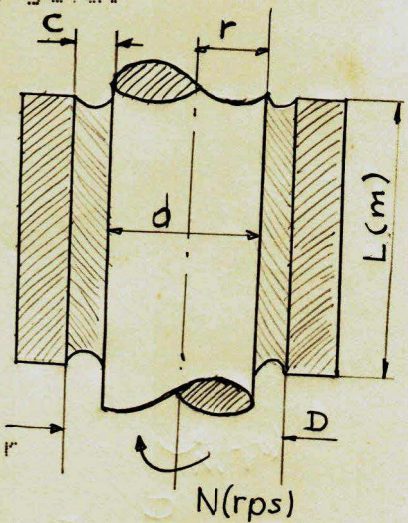
$$\text{Pot} = 0,032 \text{ cv} \quad *$$

Árvore Vertical girando em mancal guia.

$$V_T = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot N \quad (\text{m/s})$$

$$\tau = \mu \cdot \frac{V_T}{c} \Rightarrow \tau = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \mu \cdot N}{c}$$

$$T = F \cdot A = \tau \cdot A \cdot r = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \mu \cdot N}{c} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \cdot r$$



$$T = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^3 \cdot l \cdot \mu \cdot N}{c} \quad (\text{IV})$$

Dados:

$$r = d/2 = 0,0185 \text{ m}$$

$$2c = D - d = 43 - 37 = 6 \quad \therefore \quad 2c = 6 \rightarrow c = 3$$

$$c = 0,003 \text{ m}$$

$$N = \frac{1000 \text{ rpm}}{60 \text{ s}} \quad \therefore \quad N = 16,67 \text{ rps}$$

$$L = 0,59 \text{ m}$$

$$\mu = 6 \text{ Pas}$$

Substituindo estes valores na equação IV, temos:

$$T = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot (0,0185)^3 \cdot 0,59 \cdot 6 \cdot 16,67}{0,003} = 4,90$$

$$T = 4,90 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$1\text{N} = 0,102 \text{ Kg}$$

$$1\text{m} = 100 \text{ cm}$$

$$T = 4,90 \cdot 0,102 \text{ Kg} \cdot 100 \text{ cm}$$

$$T = 50 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

$$\text{Pot} = \frac{T \cdot N}{72.600} = \frac{50 \cdot 100}{72.600} = 0,69$$

$$\text{Pot} = 0,69 \text{ cv}$$

- Potência total

$$P_{\tau} = 0,32 + 0,69 = 0,722 \text{ cv}$$

Adotando-se um fator de segurança = 1,38

FS = 1,38 temos que:

- Potência do motor = 1 cv.

APÊNDICE - VI - LEVANTAMENTO DE CUSTO PARA CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO DE REOFUNDIÇÃO CONTINUA

QUANT.	EQUIPAMENTO	CUSTO (OTN)
01	Motor de 1cv - c/c	42,44
01	Variador eletrônico de velocidade	47,02
05	Termopares	30,24
02	Controladores de temperatura	98,60
01	Contator 3TB43 - 17	5,83
01	Contator 3TB41 - 17	4,08
01	Transformador tipo VM 260 (VARIAC)	81,02
01	Transformador tipo VM 260 (VARIAC)	63,87
03	Amperímetros	7,03
03	Chaves Liga-desliga	8,00
01	Chave Blindada	5,00
05	Fusíveis Diazedi (Conjunto Completo)	4,30
03	Tomadas e garfos	2,00
2 Kg	Resistores	7,20
22,7 Kg	Material isolante (flocos)	18,21
180 Kg	Chapas e cantoneiras	19,50
3 m	Tubo de cobre $\emptyset = 5/16"$	0,75
1 m	Tubo de cobre $\emptyset = 3/16"$	0,20
40 m	Fios e cabos	2,05
0,5 m	Barra de aço inoxidável ABNT 304 $\emptyset = 2"$	9,95
	Diversos-----	1,50
	TOTAL-----	458,79

Observação : Não foi levado em consideração nos cálculos, o custo referente ao projeto do sistema, de Reofundição contínua.

Custo do sistema: 458,79 OTN