

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE EQUIPAMENTO PARA A PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS PARTICULADOS DE LIGAS NÃO FERROSAS

Autor: **Adolfo Cristovam Martins**

Orientadora: **Maria Helena Robert**

04/96

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Adolfo Cristovam
Martins E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 12/04/96.

Helena
ORIENTADOR

UNIDADE	78C
N.º CHAMADA	7/UNICAMP
M366p	
V.	Ex
TOMBO BC	28454
PROC.	667/96
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	04/09/96
N.º CPD	C.M.0009.15.86-4

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

M366p Martins, Adolfo Cristovam
Projeto e construção de equipamento para a produção de compósitos particulados de ligas não ferrosas / Adolfo Cristovam Martins.--Campinas, SP: [s.n.], 1996.

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

1. Materiais Compostos. 2. *Compo-fundição. 3. *Reofundição. 4. Fundição. 5. Processos de fabricação. 6. Metais. I. Robert, Maria Helena. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE
EQUIPAMENTO PARA A PRODUÇÃO
DE COMPÓSITOS PARTICULADOS
DE LIGAS NÃO FERROSAS**

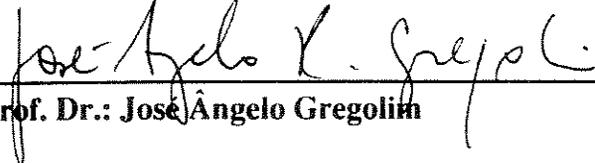
Autor: Adolfo Cristovam Martins

Orientador(a): Maria Helena Robert



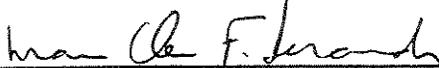
Profa. Dr.(a): Maria Helena Robert, Presidente

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS



Prof. Dr.: José Ângelo Gregolin

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS



Profa. Dr.(a): Maria Clara F. Ierardi

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Campinas, 12 de abril de 1996

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

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE
EQUIPAMENTO PARA A PRODUÇÃO
DE COMPÓSITOS PARTICULADOS
DE LIGAS NÃO FERROSAS**

Autor: Adolfo Cristovam Martins

Orientadora: Maria Helena Robert

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

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

**Campinas, 1996
S.P-Brasil**

DEDICATÓRIA

Dedico meu trabalho

A meus pais Adolpho Rios Martins e
Leonísia Biondo Martins.

A meus colegas de trabalho ,

A São Alberto Magno, protetor dos cientistas;

**E a todas as
pessoas de espírito paciente.**

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos:

À professora Dra. **Maria Helena Robert**, orientadora deste trabalho, pelo apoio e tolerância demonstrados;

Ao professor Dr. Rezende Gomes dos Santos que me orientou no primeiro ano de mestrado;

Aos meus pais Adolpho e Leonisia sem os quais este trabalho não seria possível;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Fabricação: Emílcio Cardoso, Claudomiro Alves, Aristides Magri, Marília do Amaral, Ruth Moreno, Luciene Maeno; do Departamento de Materiais: Rita Helena Buso Jacon; e às funcionárias da SCPG-EM: Vera Lúcia Pontes e Denise Villela; do Sifem : Carlos Eduardo Pereira, Maria Raquel Aguiar, Fernando Pinelli Cardoso, Aguinaldo Rodrigues Dias, Adriana Aparecida Valadão.

E em especial ao grande companheiro e amigo Jonas Robeto da Cunha sem cuja ajuda a dissertação não ficaria pronta em sua forma final.

Aos meus amigos pelo incentivo e confiança;

Ao Departamento de Engenharia de Fabricação da FEM-UNICAMP pelo provimento dos recursos materiais e serviços necessários durante o desenvolvimento desse trabalho;

Ao CNPq e à CAPES, pelo provimento de bolsas de mestrado utilizadas durante este trabalho;

À Engenharia Química da UNICAMP por ceder o uso de seus laboratórios.

Às empresas COPEBRAS, CARBORUNDUM e COMIL pelo fornecimento de materiais e literatura para os testes.

À empresa ASSISTEC de meus primos Marcos e Valdemir Ravagnanni pelo uso de seus computadores.

A Maria Cecília Masselli pelo auxílio na digitação da tese.

A Wilton Furkin pelos desenhos técnicos apresentados no Capítulo V da dissertação.

E à UNICAMP de modo geral pelo acolhimento e fornecimento de condições e incentivo à pesquisa.

*Vejo o futuro como uma espécie de micromecânica do contínuo do espírito
propagado na matéria, no espaço e no tempo.*

*Vim a este mundo buscar uma flôr para fazer um remédio para uma
criança e acabei ficando ... agora estou indo...*

C.Ken.

RESUMO

MARTINS, Adolfo Cristovam, *Projeto e Construção de Equipamento para a Produção de Compósitos Particulados de Ligas Não Ferrosas*, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1996. 110 p. Tese (Mestrado)

Este trabalho apresenta o projeto e construção de um equipamento para a compo-fundição de ligas não ferrosas de médio ponto de fusão. O equipamento é constituído de um forno para a fusão e processamento do compo-fundido, com capacidade de aquecimento de até 1073K (800°C) e capacidade de carga de 800g de Al, de um rotor provido de pás para promoção de agitação da liga durante a solidificação e sistema de refrigeração do lingote produzido. O trabalho descreve os diferentes constituintes do equipamento construído e apresenta resultados de seu comportamento mecânico, elétrico e térmico quando em operação. O trabalho apresenta ainda resultados de produtos reofundidos e compo-fundidos obtidos no equipamento construído. O equipamento mostrou-se eficiente na obtenção de pastas reofundidas da liga Al-3,4Si-2,8Cu e de compósitos desta liga reforçada com 1,25 e 2,5% em peso de grafite ou negro de fumo na forma de pós. As condições utilizadas foram: velocidade de agitação de 800 a 1000 rpm, temperatura de processamento de 853K (580°C), pré-agitação para homogeneização do material de 3 minutos e agitação com adição de reforço de 5 minutos. O reofundido obtido apresentou fase sólida perfeitamente globularizada e os compósitos obtidos apresentaram boa incorporação e dispersão dos reforços adicionados. O equipamento, portanto, mostrou-se adequado à compo-fundição.

Palavras chave

Materiais Compostos, Compo-fundição, Reofundição, Processos de Fabricação, Metais.

ABSTRACT

MARTINS, Adolfo Cristovam, *Projeto e Construção de Equipamento para a Produção de Compósitos Particulados de Ligas Não Ferrosas*, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1996. 110 p. Tese (Mestrado).

This work presents the development of an equipment for compo-casting of medium melting point non ferrous alloys. The equipment holds a melting and processing furnace, with heating capacity of 1073K (800°C) and mass capacity of 800g Al, stirring device and cooling coil. The work describes the components of such equipment and presents results concerning its performance during operation. The work also presents results concerning its suitability to produce rheocast slurries and composites. Results showed that the equipment is efficient in producing Al-3,4Si-3Cu rheocasting slurries as well as composites with graphite or carbon-black as reinforcement. Conditions used are as follows: stirring speed 800-1000rpms, stirring temperature 853K (580°C), total stirring time 8min and amount of reinforcement 1,25 and 2,50%wt. Obtained rheocast slurries showed globularized solid phase and obtained composites showed good incorporation and dispersion of reinforcement for both carbon-black and graphite. Therefore, the equipment is appropriate for compo-casting.

Key Words

Metal Matrix Composites, Compo-casting, Rheocasting, Metals.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1	
1	INTRODUÇÃO GERAL	1
2	OBJETIVOS GERAIS	2
3	METAS A SEREM ATINGIDAS	3
CAPÍTULO II - CONCEITOS BÁSICOS SOBRE COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA	4	
1	DEFINIÇÃO	4
2	PERFIL ATUAL DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA , SUA IMPORTÂNCIA, CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES	5
2.1	Utilização de compósitos na indústria automotiva	7
2.2	Utilização de compósitos nas indústrias aeroespacial e aeronáutica	8
2.3	Utilização de compósitos na indústria naval	8
2.4	Utilização de compósitos em equipamentos de comunicação	8
3	CLASSIFICAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA	10
3.1	Classificação dos compósitos de matriz metálica segundo morfologia dos reforços	10
3.2	Classificação dos compósitos de matriz metálica segundo o seu processo de fabricação	12
3.2.1	Obtenção de compósitos por processamento de matriz líquida	14
	A) Infiltração por compressão	14
	B) Infiltração por injeção	14
	C) Infiltração por ação de gases pressurizados no líquido	15
	D) Fundição sob centrifugação	15
3.2.2	Obtenção de compósitos por processamento de matriz sólida	16
	A) Metalurgia do pó	16
	B) União por difusão	17

	C) Extrusão conjunta matriz/reforço	18
	D) Laminação conjunta matriz/Reforço	20
3.2.3	Obtenção de compósito por processamento da matriz no estado de vapor	21
3.2.4	Deposição da matriz por jato de plasma	21
3.2.5	Obtenção de compósitos por processamento de matriz no estado semi-sólido	22

CAPÍTULO III - PRINCÍPIOS BÁSICOS DE REO E COMPO-FUNDIÇÃO 23

1-	INTRODUÇÃO	24
2	PROCESSOS DE REO E COMPO-FUNDIÇÃO	25
3	EQUIPAMENTOS PARA REO E COMPO-FUNDIÇÃO	25
3.1	Equipamento tipo viscosímetro rotacional ou de Couette	25
3.2	Equipamentos com rotores	27
3.3	Equipamentos com propulsores	28
4	INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DOS PROCESSOS NAS ESTRUTURAS REO E COMPO-FUNDIDAS	32
4.1	Efeito da temperatura de trabalho	33
4.2	Efeito do tempo de agitação	33
4.3	Efeito da velocidade de agitação	34
4.4	Efeito do método de adição do reforço à matriz	34
4.5	Efeito da taxa de resfriamento durante o processamento	35
4.6	Efeito da taxa de resfriamento durante a solidificação	35

CAPITULO IV- LIGAS E REFORÇOS UTILIZADOS NESTE TRABALHO:

	COMPÓSITOS DO TIPO LIGA DE AI +C	36
1	INTRODUÇÃO	36
2	COMPÓSITOS DE AI (LIGAS)+C	37
3	PROPRIEDADES GERAIS DO COMPÓSITO AI (LIGAS)+C	37
4	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DE COMPÓSITOS DE AI(LIGAS)+C	38

5	INCORPORAÇÃO DO C_p NO ALÍQUIDO	39
6	ESCOLHA DA LIGA E REFORÇO PARA TRABALHO	41

CAPÍTULO V - PROJETO E CONSTRUÇÃO DE EQUIPAMENTO PARA COMPO-FUNDIÇÃO **43**

1	DESCRIÇÃO GERAL DO EQUIPAMENTO CONSTRUIDO	43
2	DESCRIÇÃO DAS PARTES CONSTITUINTES	47
	a) estrutura	47
	b) rotor de agitação e caixa de engrenagens	50
	c) motor	53
	d) forno	53
	e) cadinho	55
	f) sistema de refrigeração	55
	g) sistema de monitoramento térmico	57
	g1) controle da temperatura do forno	57
	h) controlador de torque	59

CAPÍTULO VI - DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL **60**

1	MATERIAIS EMPREGADOS	60
1.1	Liga utilizada	60
1.2	Reforços utilizados	62
	a) negro-de-fumo	62
	b) grafite	64
2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	65
2.1	Testes preliminares de funcionamento do equipamento	65
2.2	Experimentos de compo-fundição	66
3.	Procedimento para análise metalográfica	67

CAPÍTULO VII - RESULTADOS OBTIDOS	68
1	COMPORTAMENTO DO EQUIPAMENTO CONTRUIDO 68
1.1	comportamento mecanico 68
1.2	comportamento térmico 69
2	COMPORTAMENTO TÉRMICO DO MATERIAL DURANTE O PROCESSAMENTO 72
3	PRODUTOS OBTIDOS 74
3.1	Pasta reofundida produzida sem reforço 74
3.2	Adição de reforço à liga líquida 75
3.3	Compósitos produzidos 76
CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES E SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
1	CONCLUSÕES 82
1.1	desempenho do equipamento construido 82
1.2	capacidade de produzir pastas reofundidas 83
1.3	capacidade de produzir compósitos 83
1.3.1	Característica dos lingotes obtidos 83
1.3.2	Compósitos Al+ grafite 83
1.3.3	Compósitos Al+ negro-de-fumo 84
1.4	Considerações sobre as metas propostas 84
2	SUGESTÕES PARA TABALHOS FUTUROS 85
BIBLIOGRAFIA	86
APÊNDICES	
APÊNDICE A	93
CÁLCULOS PARA A DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA DO MOTOR A SER UTILIZADO NO SISTEMA DE COMPO-FUNDIÇÃO	93

1	SIMBOLOGIA UTILIZADA	93
2	FÓRMULAS MATEMÁTICAS UTILIZADAS	94
3	SOLUÇÃO	95
4	CÁLCULOS	95
APÊNDICE B		99
CÁLCULO DA POTÊNCIA TÉRMICA DO FORNO		99
1	SIMBOLOGIA UTILIZADA.	99
2	POTENCIA NECESSARIA PARA O AQUECIMENTO, FUSÃO E SUPERAQUECIMENTO DE DADA MASSA DE Al.	100
2.1	Cálculos.	101
3	CÁLCULO PARA VÁRIAS PAREDES.	101
4	CÁLCULO PARA A GEOMETRIA CILINDRICA DO FORNO COM VÁRIAS PAREDES.	102
5	CÁLCULO DAS PERDAS NO TOPO DO FORNO.	106
6	CÁLCULO DAS PERDAS NA BASE DO FORNO.	106
7	PERDA DE CALOR PELO EIXO DO ROTOR PARA O AMBIENTE.	107
8	PERDA DE CALOR PELO SUPORTE INFERIOR PARA O AMBIENTE.	107
9	POTÊNCIA CALCULADA.	108
10	CONSIDERANDO UM FATOR DE SEGURANÇA.	108
11	POTÊNCIA DO FORNO.	108
12	CÁLCULO DOS ELEMENTOS DE AQUECIMENTO.	108
13	RESULTADOS.	110

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I	(SEM FIGURAS)	1
CAPÍTULO II		4
FIGURA II.1 - Microestrutura típica de Compósito particulado A356+40% em volume de SiC.		12
FIGURA II.2 - Microestrutura Típica de Compósito Fibrado Al-5,7Cu+30% em volume de Al ₂ O ₃ .		13
FIGURA II.3 - Esquema representativo do processo de fabricação de compósitos pôr adesão-difusão.		19
FIGURA II.4 - Esquema representativo do processo de fabricação de compósitos pôr extrusão conjunta matriz-reforço.		20
FIGURA II.5 - Esquema representativo do processo de fabricação de compósitos pôr deposição da matriz pôr jato de plasma sobre o reforço.		22
CAPÍTULO III		23
FIGURA III.1 - Esquema representativo do equipamento para reofundição tipo viscosímetro de Couete.		26
FIGURA III.2 - Esquema representativo de equipamento para produção de pastas reofundida ou compósitos, com rotor.		27
FIGURA III.3 - (Série de esquemas)		
A) agitação com pá simples		29
B) agitação com pá simples, destacando-se o processo de retirada de material		30
C) agitação com pá simples sob vácuo		30
D) agitação com pá dupla com rotação simultanea do cadinho		31
E) agitação com palhetas múltiplas		32

CAPÍTULO IV	36
FIGURA IV.1 - Representação do ângulo de molhamento de uma partícula de reforço pela matriz líquida.	40
CAPÍTULO V	43
FIGURA V.1 - Esquema geral do equipamento para compofundição projetado e construído.	44
FIGURA V.2 - Fotografia do equipamento construído para compo-fundição.	46
FIGURA V.3 - Desenho geral do equipamento para compo-fundição construído, destacando-se a sua estrutura.	48
FIGURA V.4 - Desenho geral do equipamento para compo-fundição construído (vista lateral)	49
FIGURA V.5 - Desenho dos rotores duplos com sucos helicoidais.	51
FIGURA V.6 - Fotografia do rotor simples com hélice propulsora, utilizado na compo-fundição.	52
FIGURA V.7 - Fotografia da caixa de engrenagens, rotor e polia.	52
FIGURA V.8 - Desenho do forno (reator de mistura) do equipamento de compofundição construído.	54
FIGURA V.9 - Fotografia do cadinho para o processamento da compo-fundição.	55
FIGURA V.10-Desenho do cadinho do equipamento de compo-fundição.	56
FIGURA V.11-Fotografia de parte do equipamento construído mostrando a serpentina de refrigeração do cadinho.	57
FIGURA V.12-Cicuito elétrico do forno e controlador de temperatura.	58
CAPÍTULO VI	60
FIGURA VI.1 - Microestrutura da liga Al-Si-Cu no estado fundido.	61
FIGURA VI.2 - Curva de resfriamento durante a solidificação da liga utilizada.	61
FIGURA VI.3 - Fotografia do negro-de-fumo (STATEX 125).	63
FIGURA VI.4 -Distribuição granulométrica do grafite utilizado.	64

FIGURA VI.5 - Fotografia dos granulos de grafite utilizado	65
FIGURA VI.6 - Esquema indicando a região onde foram retiradas as amostras para análise metalografica dos lingotes de compósito obtidos.	67
CAPÍTULO VII	68
FIGURA VII.1 - Curva de aquecimento até 1063K (790°C) do forno construido.	70
FIGURA VII.2 - Variação da temperatura no interior do cadinho vazio com o tempo de manutenção a 843K (570°C), em diferentes posições.	71
FIGURA VII.3 - Variação da temperatura com o tempo no matrial em processamento	73
FIGURA VII.4 - Microestrutura da liga Al-Si-Cu aós processamento sob agitação de 800-1000 rpm a 853K (580°C), durante 5 minutos.	74
FIGURA VII.5 - Microestrutura da liga Al-Si-Cu com adição de 3% de grafite no estado líquido.	75
FIGURA VII.6 - Lingotes típicos de compósito de Al-Si-Cu+C produzidos no equipamento construido.	77
FIGURA VII.7 - Seção transversal de lingotes Al-Si-Cu.	78
FIGURA VII.8 - Microestrutura dos compósitos Al-Si-Cu+C produzidas no equipamento construido.	79
FIGURA VII.9- Microestrutura dos compósitos Al-Si-Cu+ negro-de-fumo, produzidos no equipamento construido.	81
CAPÍTULO VIII (SEM FIGURAS)	82
APÊNDICES	
APÊNDICE A	93
FIGURA A.1 - Representação esquemática do problema de torção-deformação de um eixo árvore circular.	93
FIGURA A.2 - Relação entre τ e $\dot{\gamma}$ para uma fração sólida de 0,45, liga Sn-15Pb	95
FIGURA A.3 - Propriedades reológicas da liga Sn-15Pb reofundida pôr Joly e	

Meharabiam: Viscosidade aparente em função da fração sólida e da tensão aplicada.	96
FIGURA A.4 - Relação entre o limite de ruptura e a dureza Brinell(HB) para os aços nas condições de temperado e revenido, normalizado, ou laminado	97
APÊNDICE B	99
FIGURA B.1 - Representação esquemática da transferência de calor através de estruturas compostas	101
FIGURA B.2 - Representação esquemática das paredes internas do forno entre a fonte de calor e o centro do forno.	103
FIGURA B.3- Representação esquemática das paredes internas do forno entre a fonte de calor e o ambiente externo.	103

LISTA DE TABELAS

CAPITULO II

TABELA II.1 - Exemplo de compósitos com matriz metálica e reforços cerâmicos e suas aplicações.	9
---	---

CAPITULO IV

TABELA IV.1 - Exemplos de compósitos Al(ligas)+C	38
--	----

APENDICE B

TABELA B.1 - Valores das resistências e condutibilidades térmicas das paredes internas ao forno.	104
TABELA B.2 - Resultados.	110

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1. INTRODUÇÃO GERAL

As necessidades crescentes de melhoria do comportamento de materiais de uso em engenharia, para utilização em condições cada vez mais severas levaram ao desenvolvimento, nos últimos anos, dos materiais compósitos, dentre eles os compósitos constituídos de matrizes metálicas reforçados com fibras ou particulados cerâmicos.

Estes materiais tiveram sua origem para, principalmente, o atendimento de necessidades da indústria aeronáutica e automobilística, a partir da década de 70, no que se refere à combinação dos requisitos reduzido peso, estabilidade dimensional e resistência à abrasão à elevadas temperaturas de trabalho. Assim, a grande maioria de compósitos de matriz metálica desenvolvidos e já aplicados comercialmente é constituída de ligas leves à base de Al reforçados com particulados e fibras de Al_2O_3 , SiC, C, e outras.

Nos últimos 20 anos muito se tem trabalhado no desenvolvimento de processos de fabricação e na caracterização de propriedades de materiais compósitos. Processos de fabricação envolvendo matrizes no estado líquido, sólido, vapor ou mesmo semi-sólido podem se tornar cada vez mais populares à medida que problemas técnicos relacionados principalmente com a dissimilaridade dos componentes envolvidos sejam resolvidos.

Problemas como falta de interação entre a matriz e o reforço (falta de molhamento), excesso de interação (reações de interface indesejadas), má dispersão do reforço na matriz são típicos do universo dos compósitos de matriz metálica e são responsáveis pela ainda limitada utilização destes materiais.

Algumas dificuldades relacionadas, por exemplo, com a interface reforço/matriz podem ser total ou parcialmente contornadas pelo uso de recobrimentos apropriados nos reforços, adições à liga que estimulam ou inibem reações indesejadas, o controle de parâmetros como tempo e temperatura de contato entre os componentes; ou ainda pela produção de compósitos do tipo *in situ*.

Os mais econômicos e diretos processos de fabricação de compósitos de matriz metálica envolvem a adição de reforços particulados ou na forma de pós ou fibras curtas em

ligas líquidas sob agitação. Nestes processos um sério problema diz respeito à diferença de densidades entre a matriz e o reforço: decantação ou flutuação pode ocorrer quando a agitação é cessada, comprometendo a boa dispersão do reforço e conseqüentemente a isotropia do produto.

A utilização da matriz no estado pastoso reofundido pode prevenir a má dispersão do reforço, resultando em produtos de boa qualidade. O processo é denominado *compo-fundição*.

Pastas metálicas reofundidas são constituídas de uma suspensão de partículas sólidas globulares em meio líquido, estado este que lhes confere particulares características reológicas: quando agitadas apresentam elevada fluidez, podendo receber uma certa quantidade de aditivos na forma de particulados, pós ou mesmo fibras curtas; quando, no entanto, a agitação é cessada, a pasta se torna altamente viscosa, engolfando os aditivos e prevenindo o seu movimento.

A *compo-fundição* pode se constituir, portanto, na solução de problemas de distribuição de reforços em compósitos de matriz metálica, oferecendo um processo de baixo custo e fácil operação.

2. OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho tem por objetivos gerais o projeto e construção de um equipamento de *compo-fundição* para a produção de pequenas quantidades de compósitos com matrizes de ligas com médio ponto de fusão.

O desenvolvimento de um equipamento não disponível no mercado, que seja de reduzido custo de construção, de fácil operação, permitirá futuros estudos, visando o domínio de parâmetros de qualidade de compósitos e da sua dependência com relação a parâmetros de processo.

A disponibilidade de tal equipamento permitirá ainda o estímulo ao desenvolvimento de áreas incipientes no país, qual sejam a reofundição e os materiais compósitos, ambos envolvendo tecnologias de ponta de reconhecida importância por países mais desenvolvidos.

3. METAS A SEREM ATINGIDAS

As seguintes metas orientam o projeto e construção do equipamento de compo-fundição:

a) desenvolver um equipamento destinado à produção de pastas reofundidas de ligas não ferrosas com temperatura de trabalho da ordem de 650°C, contendo dispositivo para adição de partículas sólidas à liga reofundida;

b) o equipamento deve se prestar à produção de quantidades definidas de material compo-fundido, da ordem de 800 gramas por corrida;

c) o equipamento deve possibilitar a análise de parâmetros térmicos e mecânicos do processamento, bem como o controle de parâmetros como velocidade e tempo de agitação, tipo, quantidade e forma de adição do reforço a ser utilizado;

d) o equipamento deve ser de fácil construção, operação e manutenção, dentro do possível utilizando materiais e componentes disponíveis no mercado, de modo que sejam possíveis a sua reprodução, aprimoramento e redução de custos;

e) o equipamento será testado para a produção de compósitos de liga Al-Si-Cu contendo como reforço dois diferentes teores de grafite ou de negro de fumo na forma de pós.

CAPÍTULO II

CONCEITOS BÁSICOS SOBRE COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA

CAPÍTULO II - CONCEITOS BÁSICOS SOBRE COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA

1. DEFINIÇÃO

O conceito de material composto, conjugado ou compósito é bastante amplo, e seu estudo pode envolver conhecimentos de metalurgia, tecnologia de polímeros e ainda de materiais cerâmicos; abrange, portanto, tanto as ciências dos materiais quanto a engenharia de materiais.

No entanto, para a restrição do campo de estudos, um conceito prático de compósito pode ser adotado: um compósito é uma combinação de materiais dissimilares produzida com o objetivo de se obter propriedades particulares diferentes dos componentes isolados.

Pode-se então definir compósitos como sendo:

a) um novo material composto de dois ou mais materiais fisicamente distintos e mecânica ou quimicamente separáveis;

b) pode ser obtido por combinação de materiais distintos de modo que se possa controlar a dispersão do material reforçante no outro conhecido como matriz, para se obter melhores propriedades;

c) suas propriedades gerais (ou conjunto de propriedades) são superiores e/ou únicas quando comparadas com as dos componentes individuais.

Um compósito é constituído de dois componentes básicos:

a) matriz - não é necessariamente o componente predominante em peso ou volume; é o componente que faz a coesão do reforço ou aditivo;

b) aditivo, reforço ou carga - material adicionado à matriz; fornece as características particulares desejadas ao compósito.

Este trabalho se atém aos compósitos de matriz metálica (CMMs), material constituído por uma matriz metálica (em geral ligas leves, não ferrosas) à qual foi adicionado reforço cerâmico, na forma de particulados.

Os reforços para CMMs mais utilizados são fibras ou particulados de C, B, vidro, SiC, Al₂O₃, fibras orgânicas, fibras de W, de B₄C (Bracke, P.; 1983 e Rohatgi, P. K.; 1990).

2. PERFIL ATUAL DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA, SUA IMPORTÂNCIA, CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES

A moderna tecnologia tem dado lugar a um aumento na demanda de materiais, com requisitos de qualidade crescentemente rigorosos.

Esta necessidade por melhores materiais é particularmente aguda na área de estruturas dinâmicas, onde não somente alta resistência é necessária mas também baixo peso.

A eficiência de estruturas dinâmicas como máquinas para manufatura de alta velocidade, equipamentos de geração de energia e componentes para indústria aeroespacial e aeronáutica pode ser afetada por melhorias no desempenho dos materiais empregados na sua construção.

Exemplos de grandes estruturas incluem aviões, cilindros de grandes dimensões para a indústria de celulose e têxtil e grandes turbinas de geração de energia elétrica por vapor.

O problema chave no projeto de grandes estruturas é relativo à relação quadrático/cúbica, isto é, a resistência e a rigidez de uma estrutura aumentam com o quadrado da dimensão linear (seção transversal), entretanto o peso aumenta com o cubo da dimensão linear.

A rigidez de uma estrutura está relacionada com a correspondente propriedade do material que é o módulo específico (razão entre o módulo elástico e a densidade).

Os requisitos de resistência e rigidez sob carga e reprodutibilidade das propriedades têm levado a uma geral aceitação das ligas metálicas como matéria prima para fabricação de grandes estruturas dinâmicas, apesar destes materiais não apresentarem elevado módulo específico devido geralmente à sua alta densidade.

Além do problema crítico da rigidez, materiais para estruturas deste tipo devem apresentar elevada durabilidade sob condições de serviço, com boas propriedades de resistência sob fadiga a alta temperatura, corrosão, crescimento de trincas, etc.

Embora as ligas metálicas tenham sido melhoradas consideravelmente por vários mecanismos de endurecimento, estes frequentemente sacrificam a durabilidade sob condições de serviço, o que, associado ao elevado peso de estruturas metálicas, tem aberto o interesse cada vez maior no uso de associações metal-cerâmicos para a fabricação de estruturas onde um aumento na relação rigidez/densidade é requerida.

Materiais como B e C apresentam ligações covalentes e como consequência elevados módulos específicos quando comparados com materiais com ligações metálicas ou iônicas, o que os tornam interessantes perspectivas para aplicação em estruturas.

Outros materiais com alta fração de ligações covalentes como carbonetos de B, carbonetos de Si, óxidos de Al, também apresentam alto módulo específico. Não somente uma alta fração de ligações covalentes é desejada em materiais candidatos a reforços, mas também que o material tenha baixo número atômico de modo a possuir maior módulo específico.

Infelizmente materiais com alto módulo específico como B e carbonetos não podem ser fabricados na forma de grandes estruturas; são ainda frágeis e muito sensíveis à trincas e falhas. Estes materiais podem, no entanto, ser combinados com ligas metálicas constituindo compósitos com propriedades que associam as características individuais de ambos (elevado módulo, alta rigidez, reprodutibilidade de propriedades).

Uma das principais metas no projeto de materiais compósitos é diminuir a sensibilidade à trincas e falhas com aumento da resistência estática e dinâmica. O aumento na resposta ao carregamento dinâmico nestes materiais é obtido pela absorção do carregamento pela parte elástica do compósito ao invés da deformação plástica do metal a qual poderia ocasionar cumulativos danos no material.

Matrizes dúcteis como ligas de Al, Ti e Ni-Cr absorvem energia durante o impacto por deformação plástica, o que é muito importante em aplicações dinâmicas e estruturais.

A ductilidade da matriz também é importante para evitar trincas e concentrações de tensões que levariam à fratura frágil do compósito (Broutman, L. J.; 1974).

Além de vantagens nas propriedades mecânicas, importantes desenvolvimentos na área de compósitos têm levado a melhorias nas propriedades magnéticas, elétricas, e propriedades anti-fricção de materiais (Ames, W.; 1995).

Assim, materiais com associações de propriedades como alta resistência, alto módulo, alta rigidez e boas propriedades de impacto, baixa sensibilidade a variações de temperatura, alta durabilidade e baixa sensibilidade a falhas superficiais, alta condutividade elétrica e térmica, excelente reprodutibilidade de propriedades, entre outras importantes características, como excelente usinabilidade, têm sido desenvolvidos nos últimos anos (Rohatgi, P. K.; 1992; Quak, C. J.; 1994; Vedani, M.; 1994).

Alguns compósitos apresentam uma faixa de aplicação desde criogênica até aplicações refratárias, com uma temperatura máxima de serviço maior que a possível a cada um dos componentes isoladamente (Chawla, K. K.; 1987).

Além do requisito qualidade, o desenvolvimento comercial de novos materiais tem sido dirigido por dois frequentemente conflitantes requisitos: aumento do desempenho versus redução nos custos, com objetivo de aumentar a competitividade do produto.

A ainda elevada sofisticação de processos de fabricação de CMMs tem, no entanto, limitado a utilização comercial destes materiais apesar de sua imensa potencialidade e sua enorme versatilidade.

2.1. Utilização de compósitos na indústria automotiva

A necessidade de construir motores mais leves, silenciosos e econômicos tem levado ao re-estudo de materiais e processos de fabricação de componentes como cilindros e partes de válvulas, e compósitos de matriz metálica são interessantes candidatos a estas aplicações. Entretanto o custo desses materiais permanece como o maior obstáculo à sua implantação.

Algumas aplicações contudo têm encontrado sucesso comercial, a exemplo de anéis para pistões com maior resistência à fadiga térmica e ao desgaste. Pode ser citado o exemplo da companhia japonesa Art Metals Co, que reporta a manufatura correntemente de mais de 100.000 pistões reforçados por mês (Trumper, R. L.; 1987) de ligas Al-Si reforçadas com fibras de Al_2O_3 .

Também é citado (Vaccari, J. A.; 1991) o lançamento de cilindros reforçados com compósitos Al/ Al_2O_3 e SiC para motores a Diesel, por companhias alemãs.

2.2. Utilização de compósitos nas indústrias aeroespacial e aeronáutica

Em contraste com a indústria automotiva, o elevado custo dos compósitos é considerado aceitável em razão das vantagens oferecidas pelos mesmos, para aplicações em estruturas e componentes para indústria aeronáutica e aeroespacial.

Por exemplo o trem de aterrisagem de um avião representa excesso de peso quando o avião está no ar, que pode ser reduzido pelo uso de metais reforçados com partículas ou whiskers. Estudos têm sido feitos no sentido da utilização de ligas de Al reforçadas para trens de pouso de helicópteros de modo a reduzir o peso sem perder o desempenho e aumentando a resistência, além de outros exemplos apresentados por Trumper, R. L.; 1987.

Para aplicações críticas em aeronaves, ligas de Ti e aços de alta resistência são utilizados, devido à sua elevada resistência a alta temperatura e superior tenacidade à fratura. No entanto, apresentam a desvantagem de alta densidade. Ligas de Al reforçadas com fibras cerâmicas são promissoras para este fim.

Ligas convencionais de Al reforçadas com B e SiC na forma de fibras contínuas ou semi-contínuas são consideradas para reduzir a espessura de estruturas em aviões.

A presente geração de motores a jato está se aproximando de um nível de desempenho limitado pelos materiais conhecidos; o desenvolvimento, portanto, de novos materiais pode trazer novas perspectivas na área (Trumper, R. L.; 1987).

2.3. Utilização de compósitos na indústria naval

Maior impulso, eficiência e redução dos custos de navios podem ser conseguidos pela utilização de motores envolvendo uma combinação de maior pressão e menor número de estágios compressores. O desenvolvimento destes motores poderá resultar na necessidade de materiais com maior rigidez e resistência a altas temperaturas, combinando maior capacidade de suportar fadigas térmicas e mecânicas.

2.4. Utilização de compósitos em equipamentos de comunicação

Compósitos de ligas Al/Mg reforçadas com fibras de grafite de alto módulo são utilizados na fabricação de satélites onde a combinação de alta rigidez e resistência específica são requeridas em combinação com alta estabilidade dimensional (Chawla, K. K.; 1987).

Também compósitos de Al reforçado com fibras de C são já utilizados na fabricação de colunas de sustentação de antenas para telescópios espaciais segundo o mesmo autor, uma vez que as fibras de C apresentam a estabilidade dimensional com o aquecimento pelo sol e a rigidez necessárias em tais estruturas.

Têm sido ainda desenvolvidos compósitos do tipo metal-metal, onde fios de metais refratários ou de alta resistência mecânica são adicionados ao metal base de elevada ductilidade, para uso nestas estruturas.

Como ilustração, a Tabela II.1 apresenta de maneira geral exemplos de compósitos com vários tipos de matriz metálica e de reforços, e aplicações características (Rohatgi, P. K.; 1990; Chawla, K. K.; 1987).

Tabela II.1 - Exemplos de compósitos com matriz metálica e reforços cerâmicos, e suas aplicações.

MATRIZ	REFORÇO	CAMPO DE APLICAÇÃO
Al e ligas	B, C	indústria aeronáutica e aeroespacial, material estrutural
Al e ligas	SiC	indústria aeronáutica e automobilística, componentes p/ trabalho a elevadas temperaturas, pás de turbina
Al e ligas	Al ₂ O ₃	indústria aeronáutica e automobilística
Mg e ligas	Al ₂ O ₃	pás de turbinas, eixos
Ni/Co Al	C (grafite; C amorfo)	pás de turbinas
Mg ou ligas	C	pás de turbina, vasos de pressão, placas de vedação
Ti e ligas	SiC	placas de compressores, superfícies de aerofólios

3. CLASSIFICAÇÃO DOS COMPOSITOS DE MATRIZ METÁLICA

Diversas são as possíveis classificações dos materiais compósitos de matriz metálica, como por exemplo de acordo com a natureza dos reforços, se naturais ou sintéticos; com sua morfologia, se na forma de fibras curtas, longas ou particulados; quanto ao processo de fabricação, quanto à aplicação e outros critérios.

A literatura apresenta comumente dois tipos de classificação geral: de acordo com a morfologia do reforço e de acordo com o método de obtenção do compósito.

3.1. Classificação dos compósitos de matriz metálica segundo morfologia dos reforços

Compósitos de matriz metálica podem ser reforçados por partículas tridimensionais (particulados), bi-dimensionais (lâminas, placas) ou ainda uni-dimensionais (fibras). O reforço pode ser tanto uma fase da própria liga, com características particulares como intermetálicos, quanto reforços propositalmente adicionados.

Cada uma destas classes de compósitos tem suas próprias características, adequadas à sua aplicação específica, não somente devido às suas distintas propriedades mecânicas intrínsecas como também às diferentes propriedades advindas da técnica utilizada em sua fabricação (Broutman, L. J.; 1974).

Compósitos reforçados por partículas da própria liga são entendidos como aqueles que contém reforço na forma de fase dispersa, com diâmetro das partículas e de espaçamento entre elas muito maiores do que os diâmetros e espaçamentos característicos de metais endurecidos por dispersão.

Os compósitos deste tipo, denominados do tipo *in-situ*, apresentam em geral perfeita interação entre matriz e reforço, uma vez que ambos os constituintes são de mesma natureza; são evitados, com estes compósitos, problemas de má interação metal-reforço, o que pode comprometer seu comportamento pelo destacamento do reforço ou o aparecimento de trincas na interface quando o material é submetido a esforços mecânicos.

Um exemplo de compósito do tipo *in-situ* é o Al reforçado com partículas poligonais do intermetálico $NbAl_3$. A presença do reforço fornece ao Al excelentes propriedades mecânicas em tração e de resistência ao desgaste (Urtiga, S. L.; 1994).

Também são exemplos de compósitos do tipo *in-situ* sistemas eutéticos lamelares, como por exemplo o constituído de matriz Al reforçada com o intermetálico NiAl₃, obtido por solidificação unidirecional (Gücer, D.; 1989). Neste caso o reforço tem morfologia fibrosa.

Reforços cerâmicos diversos com diferentes morfologias podem ser propositalmente adicionados à ligas metálicas para constituir compósitos com características específicas. São os metais ou ligas artificialmente reforçados.

Uma significativa quantidade de sistemas reforçados por fibras ou partículas cerâmicas tem sido utilizada industrialmente. Estes últimos incluem cermetos usados na indústria eletrônica para trilhas de precisão em resistores variáveis, carbonetos de W e Co para pontas de ferramentas de alta velocidade (Trumper, R. L.; 1987) e outros materiais abrasivos (Masounave, J.; 1990), além dos bastante populares compósitos à base de ligas de Al reforçados com baixas frações volumétricas (10-30% de fração volumétrica) de SiC para uso como material estrutural e na produção de componentes diversos para a indústria automobilística (Bowman, R.; 1989).

Estes materiais mostram significativa melhoria na rigidez às custas de redução da ductilidade e menor resistência à fratura com relação às ligas sem reforço (Trumper, R. L.; 1987).

São ainda exemplos típicos de compósitos reforçados por adição de particulados, diferentes ligas de Al e outros metais leves aos quais são incorporados pós e particulados de Al₂O₃, B, C, etc; para diferentes aplicações na indústria automobilística e aeronáutica (Rohatgi, P. K.; 1990, Chawla, K. K; 1987, Masounave, J.; 1990).

A morfologia do reforço tipo partícula pode ser variável: ela pode ter seção circular, quadrada, ou até mesmo triangular, mas a dimensão de seus lados aproximadamente iguais é o que a distingue do reforço tipo fibra, onde a dimensão longitudinal predomina sobre a transversal. Fibras de C, de Al₂O₃, de SiC e outras têm sido bastante populares no emprego como reforços de ligas de Al, Ti e outros metais, conforme apresentado nos exemplos da Tabela II.1.

Qualquer que seja a morfologia do reforço empregado, uma estrutura típica de compósito de matriz metálica apresenta uma certa irregularidade na distribuição do reforço. Esta irregularidade é consequência da diferença de densidade entre os dois constituintes do material e à movimentação das partículas ou fibras durante o processamento do compósito. As Figuras II.1 e II.2 apresentam microestruturas típicas de compósitos particulados e fibrados, para simples ilustração.

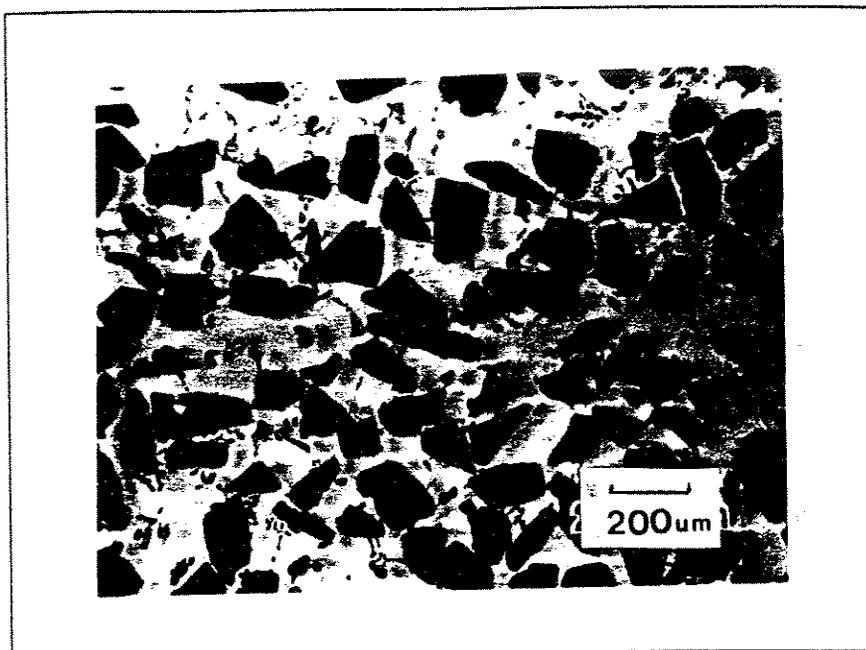


Figura II.1 - Microestrutura típica de compósito particulado A 356 + 40% em volume de SiC, (Masounave, J.; 1990).

3.2. Classificação dos compósitos de matriz metálica segundo o seu processo de fabricação

Inúmeros são os processos já desenvolvidos para a fabricação de materiais compósitos; estas tecnologias continuam no entanto em desenvolvimento, dadas as incontáveis possibilidades de combinação matriz/reforço que se apresentam viáveis para a produção de materiais compósitos.

Alguns exemplos dos processos já conhecidos de obtenção de diferentes tipos de compósitos é apresentado a seguir, visando permitir uma comparação com o método a ser estudado neste trabalho.

Uma classificação bastante aceita dos processos de fabricação de CMMs é baseada no estado inicial da matriz: sólido, líquido, semi-sólido ou vapor.

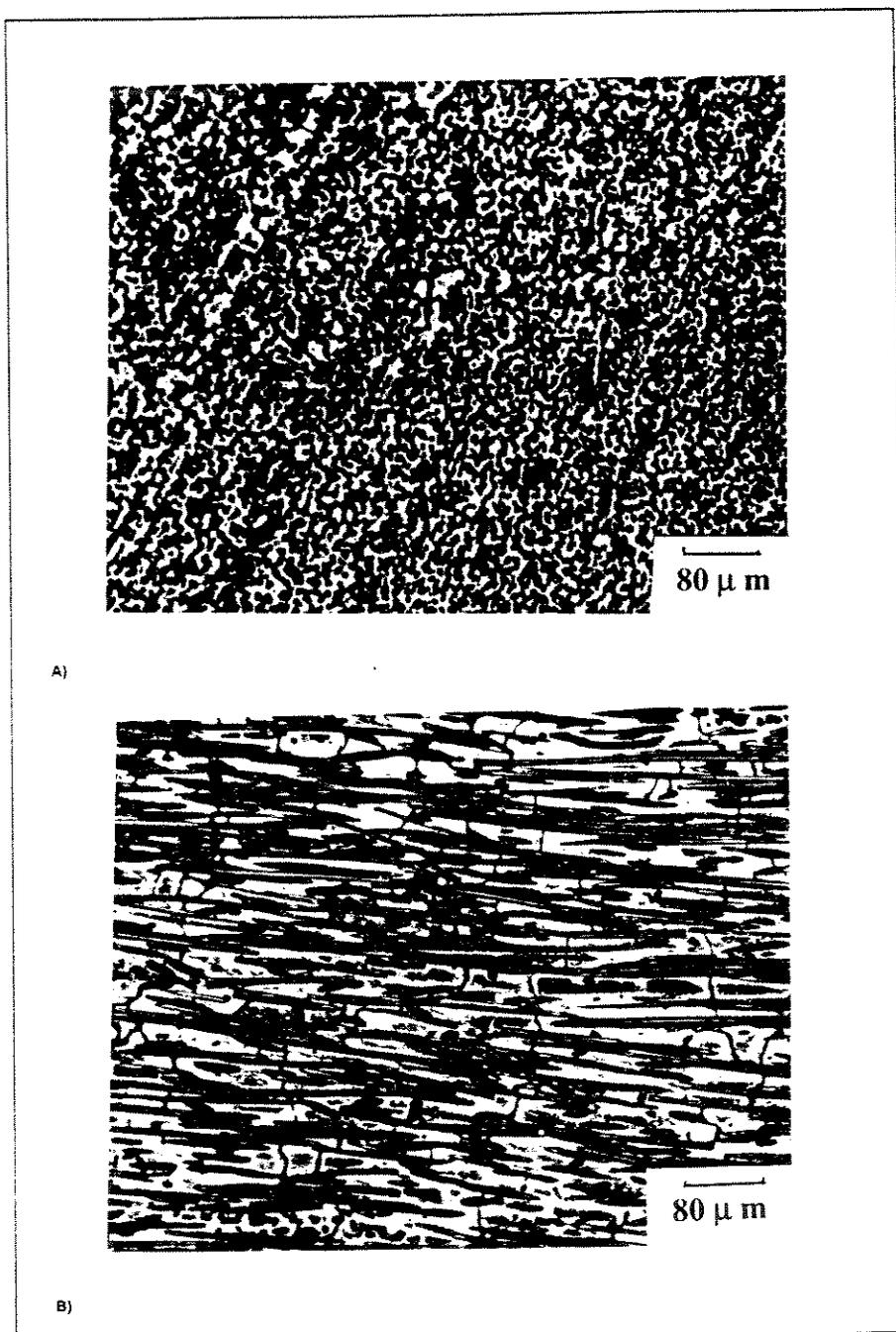


Figura II.2 - Microestrutura típica de composto fibrado Al-5,7Cu+30% vol de Al₂O₃: a) seção transversal, b) seção longitudinal, (Carvalho, B.; 1993)

3.2.1. Obtenção de compósitos por processamento de matriz líquida

Metais como Al, Mg, Pt ou Cu têm sido usados como materiais para matriz metálica para processamento a partir do estado líquido devido ao seu relativamente baixo ponto de fusão. O processo consiste basicamente da infiltração da matriz líquida em pré-formas semi-compactadas de fibras do reforço.

Devido ao pequeno espaço entre fibras a ser preenchido pelo metal líquido, este deve ser infiltrado sob pressão, de modo a garantir o contato líquido/reforço. Diferentes técnicas podem ser utilizadas:

A) Infiltração por compressão

O processo de infiltração por compressão nada mais é que a aplicação do processo convencional de fundição por compressão, processo este desenvolvido com o objetivo de aumentar a qualidade do fundido pela redução de micro-porosidades (Williams, C.; 1983, Caron, S.; 1990).

A tecnologia tem por princípio básico "forjar" um metal líquido em um molde fechado. O metal líquido é então solidificado rapidamente sob pressões da ordem de 70 a 100 MPa. Na produção do compósito, pré-formas de fibras compactadas são colocadas no interior do molde previamente ao vazamento.

O processo de infiltração por compressão tem a vantagem de reduzir a porosidade do produto devido à ação da pressão hidrostática. É um processo simples e rápido já de ampla utilização industrial na fabricação de componentes de ligas de Al.

B) Infiltração por injeção

Compósitos podem ser fabricados também pelo método convencional de fundição por injeção, onde pressões da ordem de 15MPa são típicas para a produção de componentes de ligas de Al para a indústria automobilística.

O processo permite maior complexidade de geometria que na infiltração por compressão (Fukunaga, H.; 1982).

A produção de compósitos por injeção também implica na colocação de pré-formas no interior do molde previamente à injeção do líquido. A pressão exercida força o líquido a penetrar nos espaços entre as fibras da pré-forma. Para a fabricação de compósitos por esta técnica, a pressão necessária depende da quantidade de reforço a ser incorporado. Suganuma, K.; 1994, utiliza pressões da ordem de 50MPa para a fabricação de compósitos Al-15 a 25% vol fibras Al_2O_3 .

C) Infiltração por ação de gases pressurizados no líquido

Metais líquidos podem ser pressurizados por ação de gases inertes que os empurram para o interior do molde (Abe, Y.; 1982, Maire, J.; 1971). O processo foi desenvolvido para infiltração por pressão unidirecional em uma pré-forma de fibras sob controladas condições de processamento, por Bowman, R.; 1989, para a fabricação de compósitos de Al- Al_2O_3 .

O equipamento de infiltração desenvolvido pelo autor consiste de dois componentes principais: o vaso de pressão contendo um forno de fundição contendo cadinho com metal líquido e o molde, fechado, onde é posicionada a pré-forma de fibras do reforço.

O princípio de operação do processo consiste em pressurizar gás N_2 de modo que este force o metal fundido em direção ao molde evacuado que contém a pré-forma de fibras. Pressões da ordem de 3MPa são utilizadas, bem inferiores, portanto, às utilizadas em processos de fundição por compressão.

Ligas contendo 18% e 24% em volume de fibra de Al_2O_3 têm sido fabricadas por este processo pelo autor (Bowman,R. 1989).

D) Fundição sob centrifugação

A centrifugação durante a solidificação de um determinado componente pode ser efetivamente usada para segregar partículas adicionadas ao metal ou liga líquida. O fundido resultante poderá assim apresentar partículas do reforço em suas camadas externas.

O processo é bastante simples: ligas metálicas líquidas contendo partículas de reforço são submetidas à solidificação sob a ação de forças centrífugas (o molde é colocado em uma centrífuga), resultando num compósito com uma camada externa rica de partículas do reforço segregadas.

A utilização de metais líquidos em processos de infiltração para a produção de compósitos é limitada pela disponibilidade de escolha de matriz e material de reforço: a degradação de muitas fibras a altas temperaturas limita o uso de matrizes líquidas.

Outra consideração a ser feita é a molhabilidade dos reforços pelo metal líquido, nem sempre praticável.

No entanto, o processamento por solidificação tem sido largamente considerado por prometer ser mais econômico do que os processos por deformação.

De qualquer modo compósitos obtidos por fundição sofrem muitos dos mesmos defeitos e deficiências dos metais convencionalmente fundidos quando comparados a componentes extrudados e forjados.

As propriedades de compósitos fundidos contendo reforços descontínuos são geralmente inferiores às dos extrudados ou forjados produzidos, por exemplo, por metalurgia do pó (Maire, J.; 1971), processo a ser apresentado em item posterior.

3.2.2. Obtenção de compósitos por processamento de matriz sólida

Compósitos podem ser fabricados a partir de matrizes no estado sólido, na forma de pós, chapas, placas ou mesmo tarugos para extrusão.

Diferentes técnicas para a incorporação de reforços em matrizes sólidas podem ser utilizadas, alguns exemplos são dados a seguir.

Estas técnicas foram desenvolvidas principalmente para matrizes de elevado ponto de fusão, podendo apresentar alternativas à restrição do seu processamento no estado líquido.

A) Metalurgia do pó

Técnicas de metalurgia do pó, envolvendo a compactação de matrizes e reforços na forma de pós, têm sido utilizadas tanto para a fabricação de compósitos com matrizes cerâmicas quanto metálicas.

Produtos resultantes de processamento por tais técnicas apresentam constituição mais homogênea do que ligas produzidas por fusão e solidificação (Stone, I. C.; 1993). Neste último caso a segregação de componentes e fases que frequentemente ocorre durante a solidificação resulta em heterogeneidades da dispersão do reforço na matriz.

Desde que a fusão ou fundição não é envolvida, o processo do pó é mais econômico que muitas outras técnicas de fabricação. Neste processo, os pós de materiais cerâmicos ou metálicos são primeiramente preparados e então inseridos no molde na forma desejada. Pressão é então aplicada de modo a compactar o pó.

Para facilitar a adesão das partículas de pó o compactado é frequentemente aquecido à uma temperatura abaixo da temperatura de fusão, mas suficiente para desenvolver significativa difusão sólida, ou a fusão de ligantes apropriados. A força motriz para a sinterização é o aquecimento e a redução da energia superficial das partículas. A exposição a altas temperaturas e pressões por longos períodos pode, no entanto, ser danosa para alguns compósitos.

Materiais metálicos como Cu, Ni, Al, Co e aço são frequentemente usados no processo da metalurgia do pó como matrizes para compósitos. A matriz metálica em forma de pó é misturada com fibras curtas, fibras picadas ou particulados. A combinação é então consolidada por pressão, sinterização, extrusão a quente ou calandragem para o aumento da densidade e resistência do compósito (Vinson, J. R.; 1975).

Exemplos típicos de compósitos obtidos pelo método de metalurgia do pó são as ligas Ti-Al-V contendo partículas de TiC como reforço, para aplicações em trabalho a alta temperatura (Masounave, J.; 1990), ou ligas de Cr ou Mo reforçados com SiC, para uso em pás de turbinas (Bracke, P.; 1983).

B) União por difusão

Ao contrario da sinterização, etapa do processo de fabricação de compósitos por metalurgia do pó, o processo chamado união por difusão é realizado sob alta pressão e elevada temperatura.

Neste processo, filamentos de aço inoxidável, B e SiC têm sido usados como reforços de matrizes de ligas de Al e Ti (Nicolaou, P. D.; 1995).

Diferentemente da metalurgia do pó, no entanto, a matriz utilizada na união por difusão apresenta forma de chapas, e o reforço é utilizado na forma de filamentos.

O processo consiste da construção de arranjos reforço/matriz e seu aquecimento sob pressão para promoção da difusão.

Inicialmente as fibras são colocadas sobre as chapas de metal com uma pré-determinada orientação e espaçamento. Uma alternada colocação de chapas metálicas e fibras de reforço pode ser arranjada para o desejado conteúdo de reforço.

Naturalmente para o total desenvolvimento das forças de adesão entre as chapas elas devem ser totalmente limpas. Em seguida as placas com reforço são colocadas em uma caixa metálica, a qual é selada sob vácuo. Todo o conjunto é então aquecido e pressionado para facilitar a união por difusão entre as placas metálicas e filamentos.

Excessiva temperatura, pressão ou tempo de processamento pode causar uma queda na resistência mecânica do compósito obtido, devido à possibilidade de formação de compostos intermetálicos nas proximidades da interface fibra/matriz.

O processo de adesão pode também ser utilizado para consolidar fitas pré-formadas produzidas por outros métodos como jateamento por plasma, laminação a quente e deposição por vapor; as fitas obtidas são de fácil manuseio e podem ser arranjadas em pré-determinadas orientações, produzindo o compósito desejado (Davis, L. W.; 1967).

A Figura II.3 apresenta esquematicamente o processo de união por difusão para a produção de compósitos (Snide, J. A.; 1968).

C) Extrusão conjunta matriz/reforço

Compósitos podem ser fabricados por processo conhecido como co-extrusão, no qual não é necessária a aplicação de alta temperatura.

No processo a matriz e o reforço são extrudados conjuntamente, formando barras com multi-filamentos do reforço (Vinson, J. R.; 1995).

A Figura II.4 esquematiza uma ferramenta de extrusão para a produção de compósitos pela simultânea alimentação do filamento de reforço e extrusão da matriz de Al (Davis, L. W.; 1967).

Segundo o autor, é possível trabalhar tanto com a matriz na forma de pós quanto de blocos ou lingotes.

Fios de compósitos fabricados desta maneira podem ser posteriormente utilizados como reforços para produção de compósitos por união por difusão, conforme descrito no item B anterior.

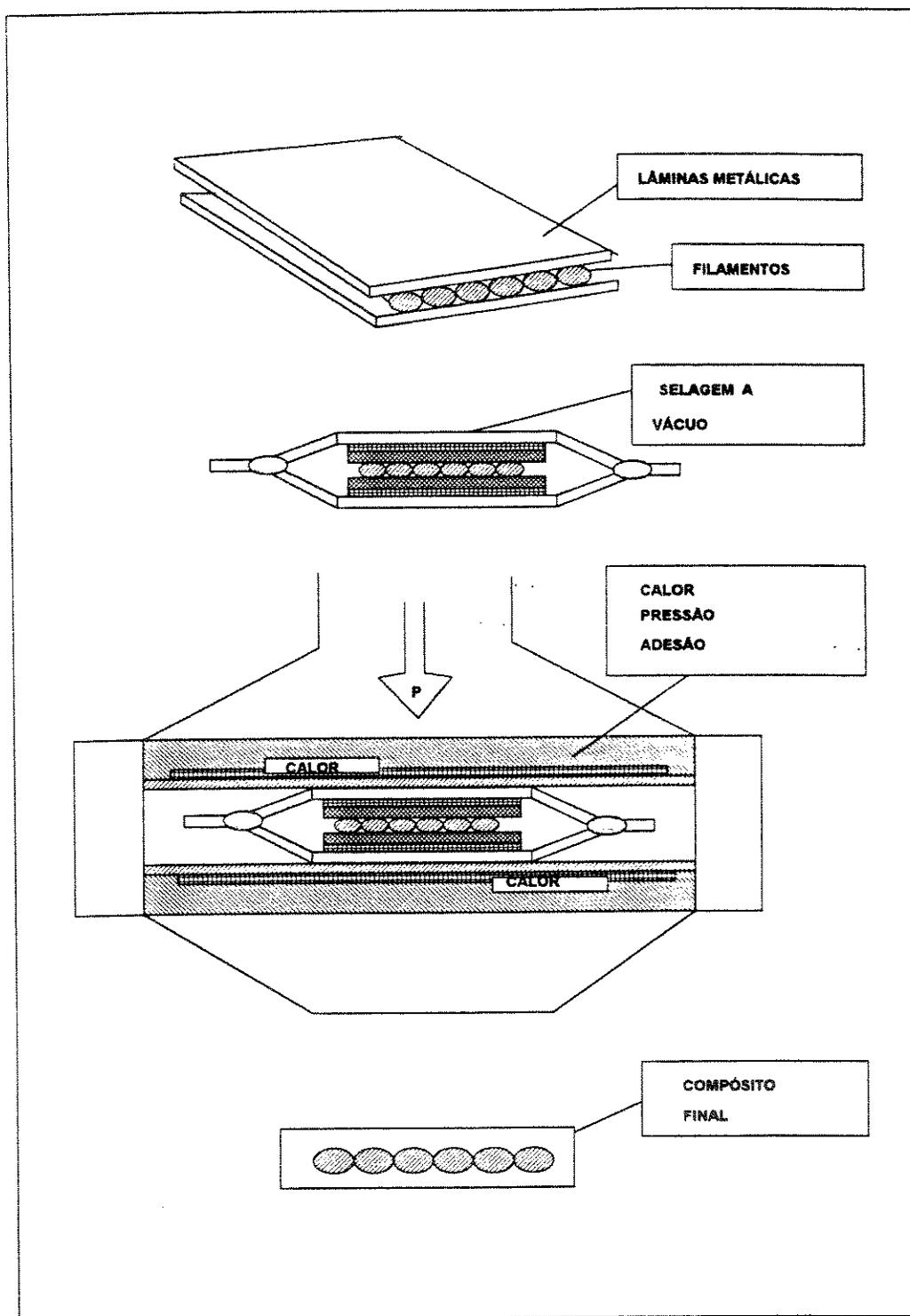


Figura II.3 - Esquema representativo do processo de fabricação de compósitos por adesão por difusão (Snide, J. A.; 1968).

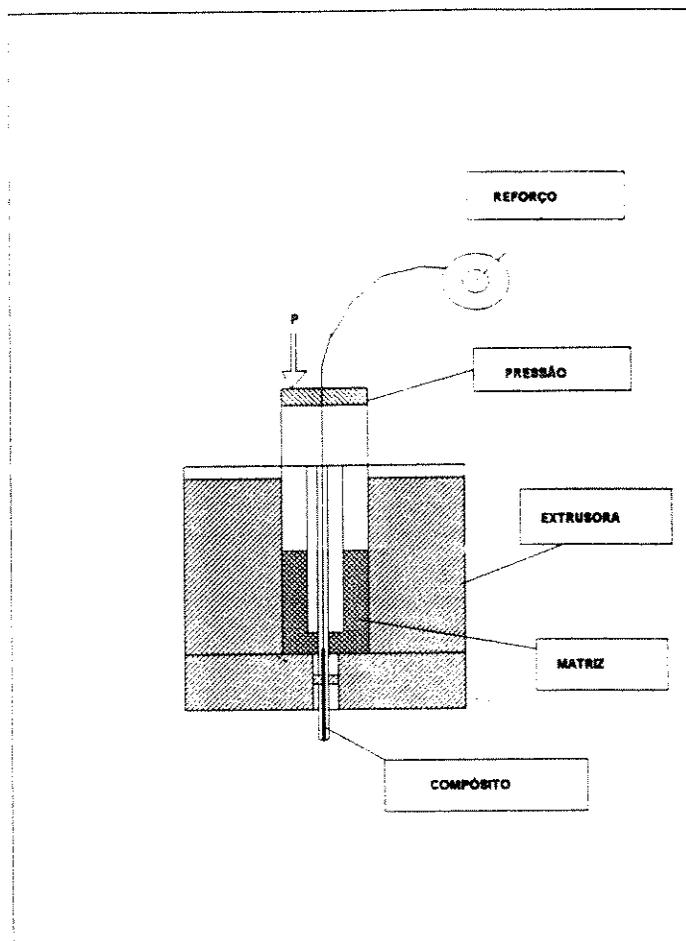


Figura II.4 - Esquema representativo do processo de fabricação de compósitos por extrusão conjunta matriz/reforço (Davis, L. W.; 1967).

D) Laminação conjunta matriz/reforço

Técnicas de laminação a quente ou a frio podem ser empregadas para incorporar filamentos, fibras, tecidos ou até fitas metálicas ou cerâmicas em ligas metálicas, constituindo chapas ou placas laminadas de compósitos.

Nesta técnica as fibras e fitas são alimentadas continuamente entre placas ou chapas de matriz, sendo em seguida laminadas sob pressão e temperatura controladas.

A pressão e a temperatura servem para acelerar o processo de adesão por difusão, embora o tempo de contato do compósito sob aplicação de pressão e temperatura sejam relativamente curtos (Vinson, J. R.; 1975).

As chapas de metal podem ser entalhadas de modo a proporcionar um preciso alinhamento das fibras ou filamentos.

A construção de camadas superpostas de fitas contínuas e chapas da matriz pelo processo de laminação é restrito a poucas camadas de espessura. Alguns exemplos de aplicação deste processo podem ser citados: Broutman, L. J.; 1974, reporta a obtenção de compósitos Al/fibras de B envolvendo moderadas temperaturas e pressões; enquanto Piggott, M. R.; 1980, apresenta compósitos de metais refratários Nb e Ta reforçados com óxidos de Mg, Th ou Zr fabricados pela técnica.

3.2.3. Obtenção de compósitos por processamento da matriz no estado de vapor

Compósitos podem ainda ser fabricados a partir da matriz no estado de vapor. São processos envolvendo a deposição de ligas metálicas, no estado de vapor, sobre o reforço .

O reforço pode se apresentar na forma de filamentos contínuos ou fibras curtas arranjadas aleatoriamente ou como tecidos.

Altas frações em volume de fibras podem ser conseguidas por este processo. A principal vantagem desta técnica é a redução da degradação das fibras, uma vez que seu contato com o metal a elevadas temperaturas é reduzido.

Entretanto, a lentidão e o custo do processo por deposição de vapor são duas grandes desvantagens da técnica. Compósitos com matrizes de Al e Ni depositadas na forma de vapor sobre tecidos podem ser fabricados.

3.2.4. Deposição da matriz por jato de plasma

Compósitos podem ser produzidos a partir de fitas constituídas de um arranjo de filamentos agregados por uma fina camada de matriz depositada por jato de plasma.

Estas fitas são então consolidadas por união por difusão, processo que tem se tornado importante como método de consolidação. O uso de SiC tem se dado como cobertura de proteção sobre filamentos de B para preparação de compósitos Borsic/Al (Kreider, K. G.; 1968).

Um equipamento típico para adesão por jato de plasma é ilustrado na Figura II.5: um mandril cilíndrico contendo matriz na forma de uma folha metálica é coberto com filamentos do reforço alinhado, sendo o espaçamento dos filamentos controlado através de

espaçadores. O mandril gira em frente de um arco de plasma o qual assim deposita uniformemente uma camada de material da matriz na forma de minúsculas gotas líquidas, solidificando rapidamente sobre o material enrolado no mandril. O processo é conduzido em atmosfera de Ar e o tempo de contato do metal fundido com o filamento é suficientemente pequeno para evitar sérias degradações nos filamentos.

Componentes e peças complexas podem ser feitas, já que não há limitações proibitivas, a não ser a necessidade de grandes câmaras de proteção, as quais podem se constituir em limitação para o processo.

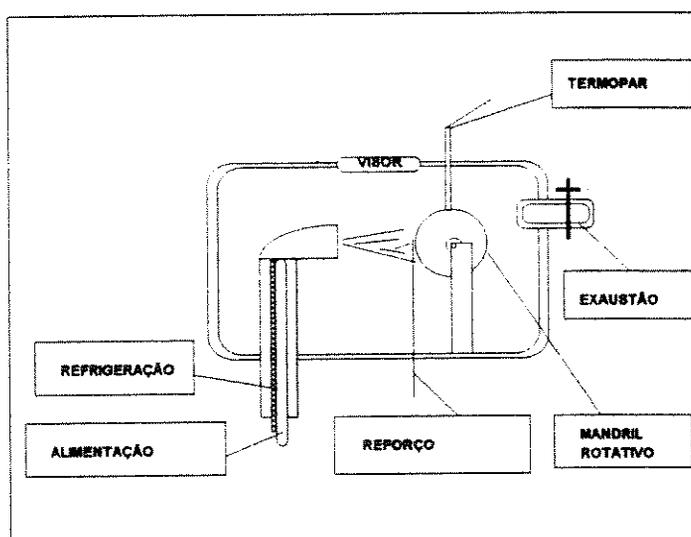


Figura II.5 - Esquema representativo do processo de fabricação de compósitos por deposição da matriz por jato de plasma sobre o reforço (Alexander, J. A.; 1969).

3.2.5. Obtenção de compósitos por processamento de matriz no estado semi-sólido

De desenvolvimento a partir dos anos 70, a fabricação de compósitos por adição de reforços particulados em matrizes no estado semi-sólido reofundido tem encontrado aplicação prática principalmente para ligas de Al reforçadas com pós de grafite, SiC, cinzas, Al_2O_3 , para uso em materiais auto lubrificantes e materiais resistentes à abrasão.

O assunto, tema deste trabalho, é tratado com detalhes no Capítulo III.

CAPÍTULO III

PRINCÍPIOS BÁSICOS DE REO E COMPO-FUNDIÇÃO

CAPÍTULO III - PRINCÍPIOS BÁSICOS DE REO E COMPO-FUNDIÇÃO

1. INTRODUÇÃO

O processo de adição de partículas em matrizes no estado semi-sólido reofundido para fabricação de compósitos é chamado *compo-fundição*.

A *compo-fundição* é um método eficiente para a preparação de MMCs reforçados por fibras descontínuas, whiskers ou partículas.

Flemings, M. C.; 1976, deu início ao campo da reofundição, no início da década de 70, ao agitar vigorosamente uma liga metálica durante a solidificação, e obtendo como consequência uma pasta contendo sólido com uma especial estrutura não dendrítica.

A este processo que consiste na obtenção de pastas metálicas com características estruturais particulares (sólido globular em suspensão em líquido) chamou-se *reofundição*.

As características particulares da pasta reofundida levam a propriedades de escoamento específicas: a massa sólido/líquido apresenta um comportamento reológico não Newtoniano e tixotrópico. Estas pastas podem apresentar elevada fluidez mesmo contendo frações sólidas tão altas como 60%, sob tensões; no entanto, quando em repouso apresentam elevada viscosidade (Spencer, D. B.; 1972, Young, K. P.; 1979).

Estas propriedades são interessantes no momento da incorporação de partículas sólidas: estas partículas são facilmente misturadas na pasta em agitação e, ao cessar o movimento, são engolfadas imediatamente pela pasta reofundida ao se solidificar.

A alta viscosidade da pasta previne sua decantação e uma razoável dispersão do reforço adicionado é obtida no produto. Sedimentação, flotação e aglomeração das partículas do reforço são também prevenidas pela presença dos glóbulos sólidos na matriz pastosa reofundida.

Mehrabian, R.; 1975 usou o termo *compo-fundição* para descrever a aplicação da reofundição na produção de materiais compósitos, termo que vem sendo utilizado até os dias atuais.

No processo de *compo-fundição*, partículas ou fibras curtas são incorporadas na liga parcialmente sólida e o compósito pode ser em seguida fundido em moldes.

Compósitos obtidos por compo-fundição podem apresentar porosidade aumentando proporcionalmente à fração em volume de partículas adicionadas, atribuída à incorporação de gases presentes na superfície das partículas e do próprio procedimento de agitação.

No entanto, o problema de porosidade excessiva pode ser contornado ao se submeter o compósito à conformação por forjamento, o que acarreta melhoria de suas propriedades por fechamento de poros.

É ainda frequente a ocorrência de aglomerados de partículas do reforço no compósito, decorrentes do procedimento de fabricação empregado.

2. PROCESSOS DE REO E COMPO-FUNDIÇÃO

A obtenção de um compósito por reofundição significa a produção da pasta reofundida da matriz, seguida da adição do reforço e resfriamento do conjunto.

De maneira geral pode-se dizer que um reofundido é obtido pela interferência no fenômeno de solidificação de um líquido, com o objetivo de modificar a estrutura em formação, de dendrítica para globular.

Esta interferência na solidificação significa a promoção de agitação vigorosa do líquido durante o crescimento do sólido, isto é, na região *sólidus-liquidus*. Esta agitação pode ser contínua, desde a temperatura *liquidus* até a temperatura requerida para a obtenção da desejada fração sólida, ou isotérmica isto é, mantida por tempo determinado à temperatura pré-estabelecida.

A agitação, efetuada em equipamentos especialmente desenvolvidos para este fim (reatores), provoca o dobramento de ramos dendríticos em formação, seu rompimento, separação e liberação para o líquido, onde sofrem globularização natural para redução de tensões superficiais.

À estas pastas são adicionadas as partículas ou fibras curtas de reforço, enquanto são agitadas pelo tempo necessário à sua incorporação.

As pastas do compósito descarregadas e solidificadas rapidamente em moldes refrigerados podem ser armazenadas para posterior utilização; neste caso devem ser reaquecidas à temperatura da qual foram descarregadas do reator, para o restabelecimento do

estado pastoso, sendo então processadas. Neste caso o processo é chamado *tixofundição* do compósito.

No caso de utilização da pasta diretamente do reator que a produziu, o processo é chamado de reofundição do compósito ou compo-fundição.

No reprocessamento, cuidado especial deve ser tomado quanto à redistribuição do reforço na matriz.

3. EQUIPAMENTOS PARA REO E COMPO-FUNDIÇÃO

A agitação do líquido em solidificação para a produção de pastas pode ser promovida por ação mecânica ou eletromagnética. Para o uso em compo-fundição onde é necessária a adição de particulados, os processos mais populares são aqueles envolvendo ação mecânica.

Diferentes equipamentos têm sido desenvolvidos para a fabricação de compósitos de matriz metálica via compo-fundição.

3.1. Equipamentos tipo viscosímetro rotacional ou de Couette

O primeiro equipamento utilizado para obtenção de pastas reofundidas foi um reator tipo viscosímetro de Couette, por Spencer, D. B.; 1971.

A Figura III.1 esquematiza o viscosímetro adaptado para altas temperaturas e utilizado pelo autor a cima para o estudo da influência da agitação em líquidos em solidificação, isto é, para o estudo da formação de pastas com estrutura sólida globular.

O equipamento consiste basicamente de um cadinho refrigerado contendo em seu interior um eixo cilíndrico ou cônico, concêntrico com o cadinho, de modo que apenas um estreito espaço anelar possa ser ocupado pelo líquido.

O líquido é vazado no equipamento a uma temperatura apropriada; ao ser atingida a temperatura adequada, é iniciada a rotação do cadinho enquanto o eixo interno é mantido fixo.

No viscosímetro de Couette, tanto a parede externa do eixo central quanto a parede interna do cadinho que contém o metal líquido são providos de ranhuras para aumentar o atrito ou o cisalhamento de camadas de líquido adjacentes, evitando o seu escorregamento. Segundo o autor, com este artifício é aumentada a eficiência na promoção da globularização do sólido.

Rotações da ordem de 800 a 1000rpm são utilizadas para a obtenção de sólido com morfologia em forma de rosetas ou glóbulos.

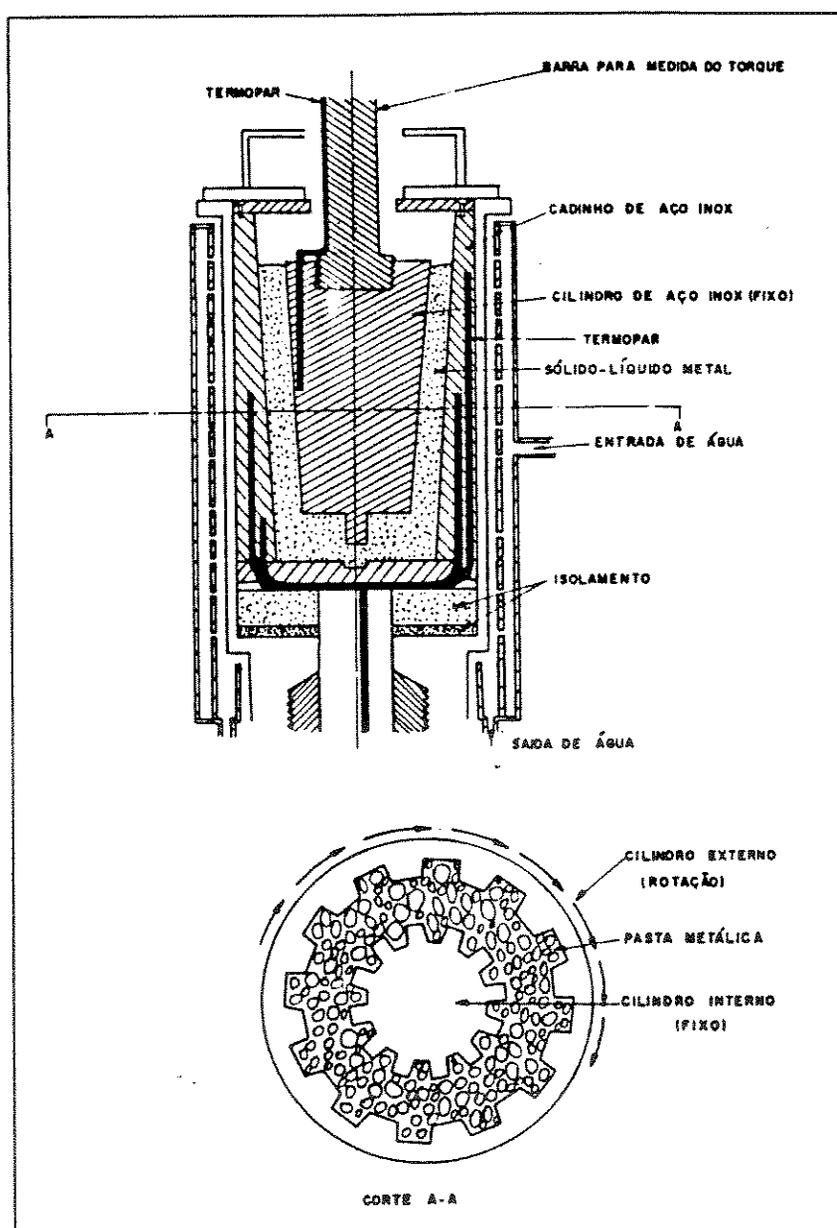


Figura III.1 - Esquema representativo de equipamento para a re fundição, tipo viscosímetro de Couette (Spencer, D. B.; 1971)

3.2. Equipamentos com rotores

Uma variação do equipamento utilizado por Spencer, D. B.;1971, pode também ser empregado para a obtenção de pastas reofundidas e compósitos; neste caso, a agitação do líquido é promovida por um eixo interno ao cadinho, enquanto este é mantido fixo (Clegg, J.; 1991).

O equipamento é apresentado esquematicamente na Figura III.2.

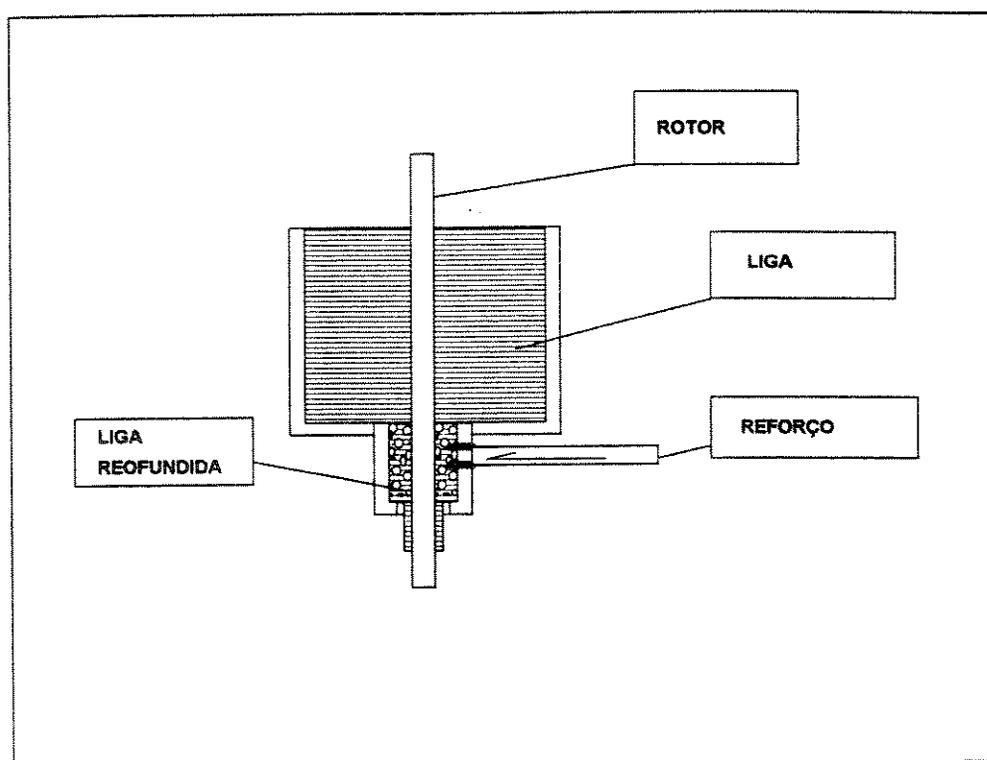


Figura III.2 - Esquema representativo de equipamento para a produção de pastas reofundidas ou compósitos, com rotor. (Clegg, J.; 1991).

De maneira semelhante ao que ocorre nos equipamentos tipo viscosímetro, as forças cisalhantes no líquido provocam a modificação da estrutura em solidificação, produzindo a pasta reofundida à qual pode ser acrescentado reforços produzindo-se compósitos.

Cadinho e rotor podem sofrer severo desgaste mecânico, devendo, por isto, ser revestidos com materiais resistentes à abrasão (óxidos cerâmicos).

O espaço anelar entre o cilindro interno e o cadinho varia de 3 a 9mm (Mehrabian, R.; 1974). As velocidades de rotação utilizadas são da ordem de 1000rpm.

Segundo Vogel, A.; 1977, velocidades superiores a 1000rpm podem ocasionar retenção de ar no material.

Estes sistemas podem ser utilizados tanto para a obtenção de quantidades definidas quanto podem ser adaptados para a produção contínua de pasta reofundida.

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

A utilização deste tipo de equipamento e também do viscosímetro para a produção de compósitos reforçados com particulados enfrenta dois problemas: a dificuldade de adição do particulado durante o processamento da pasta devido ao pequeno espaçamento anelar, e o consequente baixo teor de reforço passível de obtenção.

3.3. Equipamentos com propulsores

Equipamentos contendo propulsores tipo pás podem também ser utilizados para a produção de reofundidos. Nestes casos, a agitação do metal semi-sólido contido no cadinho é promovida pela ação de pás, por um tempo e à temperatura previamente determinados. Bons resultados foram obtidos com este tipo de equipamento, por Mehrabian, R.; 1974, e outros (Prasad, P. R.; 1982), já nas décadas de 70 e 80.

Os propulsores, que podem ser constituídos de uma ou mais pás, são revestidos com materiais resistentes à abrasão, podendo ou não ser retirados do cadinho após o processamento.

As velocidades de rotação empregadas para estes tipos de reatores também são da mesma ordem de grandeza das utilizadas para os reatores tipo viscosímetro: variam de 700 a 1000rpm.

Diferentes equipamentos utilizando o mesmo princípio foram utilizados por diferentes pesquisadores (Fascetta, E. F.; 1973, Mehrabian, R.; 1974, Skibo, M. D.; 1986, Clegg, J.; 1991).

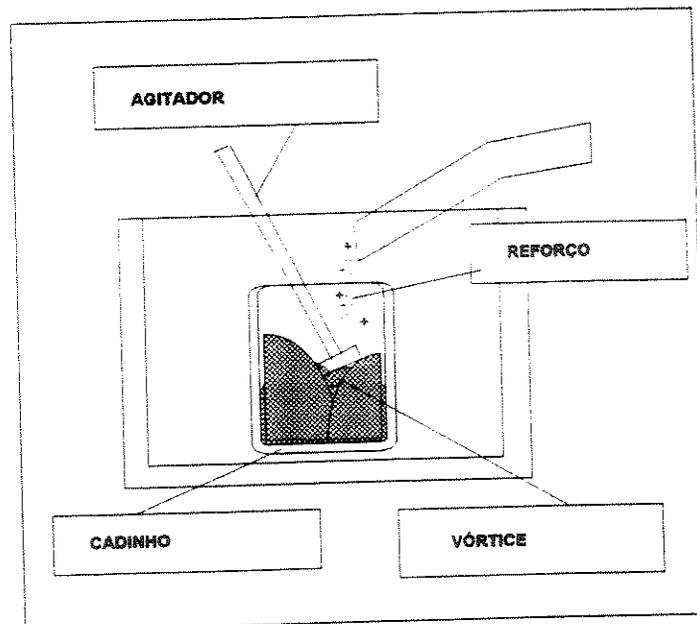
A Figura III.3 mostra alguns destes equipamentos desenvolvidos.

Pode-se observar a semelhança entre os distintos projetos, sendo somente variadas a geometria, distribuição e número de pás. Ainda uma outra variação diz respeito à proteção atmosférica, para prevenir a entrada de gases e oxidação do material durante adição do reforço e agitação do material para a promoção de sua incorporação à matriz.

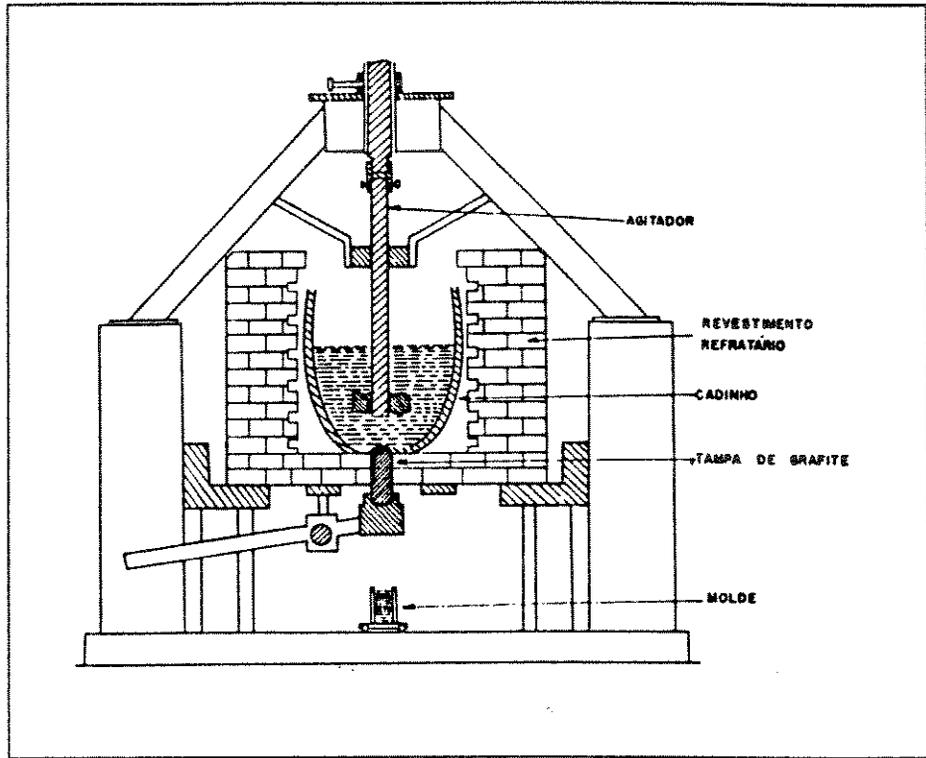
Mehrabian, R.; 1974, introduz uma modificação no sistema (Figura III.3d), ao promover rotação simultânea do cadinho contendo o líquido.

O autor obtém pastas reofundidas às quais adiciona óxidos cerâmicos e carbonetos para a produção de compósitos. O sistema duplo de agitação parece ser mais efetivo na promoção da incorporação dessas partículas sólidas não metálicas, no metal semi-sólido, segundo o autor.

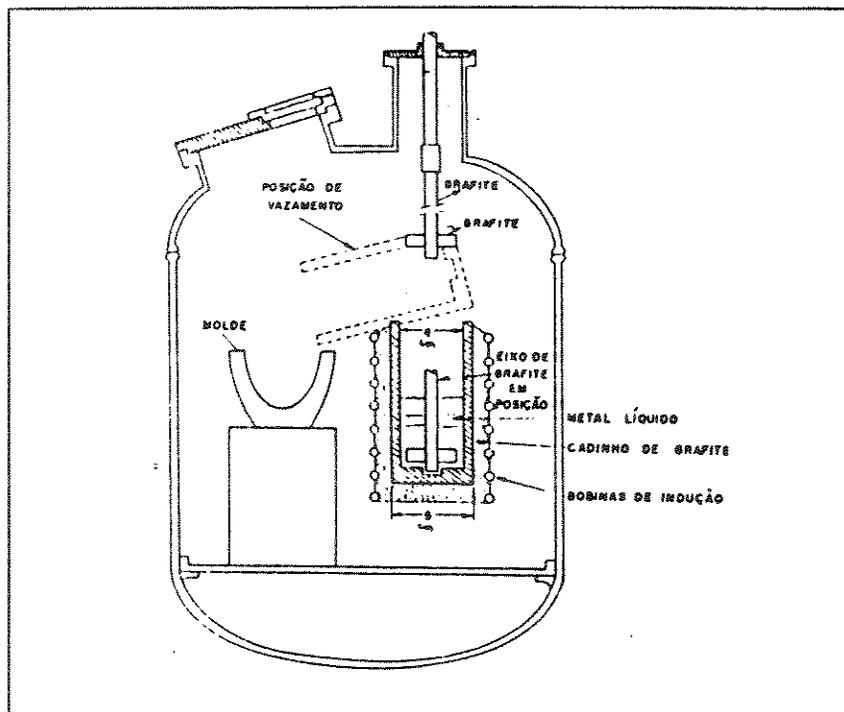
O principal inconveniente apresentado nos equipamentos com propulsores é a não uniformidade da agitação promovida em todo o volume de material, comprometendo o controle e a qualidade do reofundido obtido. Pastas com sólido não globular podem ser obtidas, o que prejudica a incorporação do reforço, uma vez que pastas nestas condições podem apresentar elevada viscosidade.



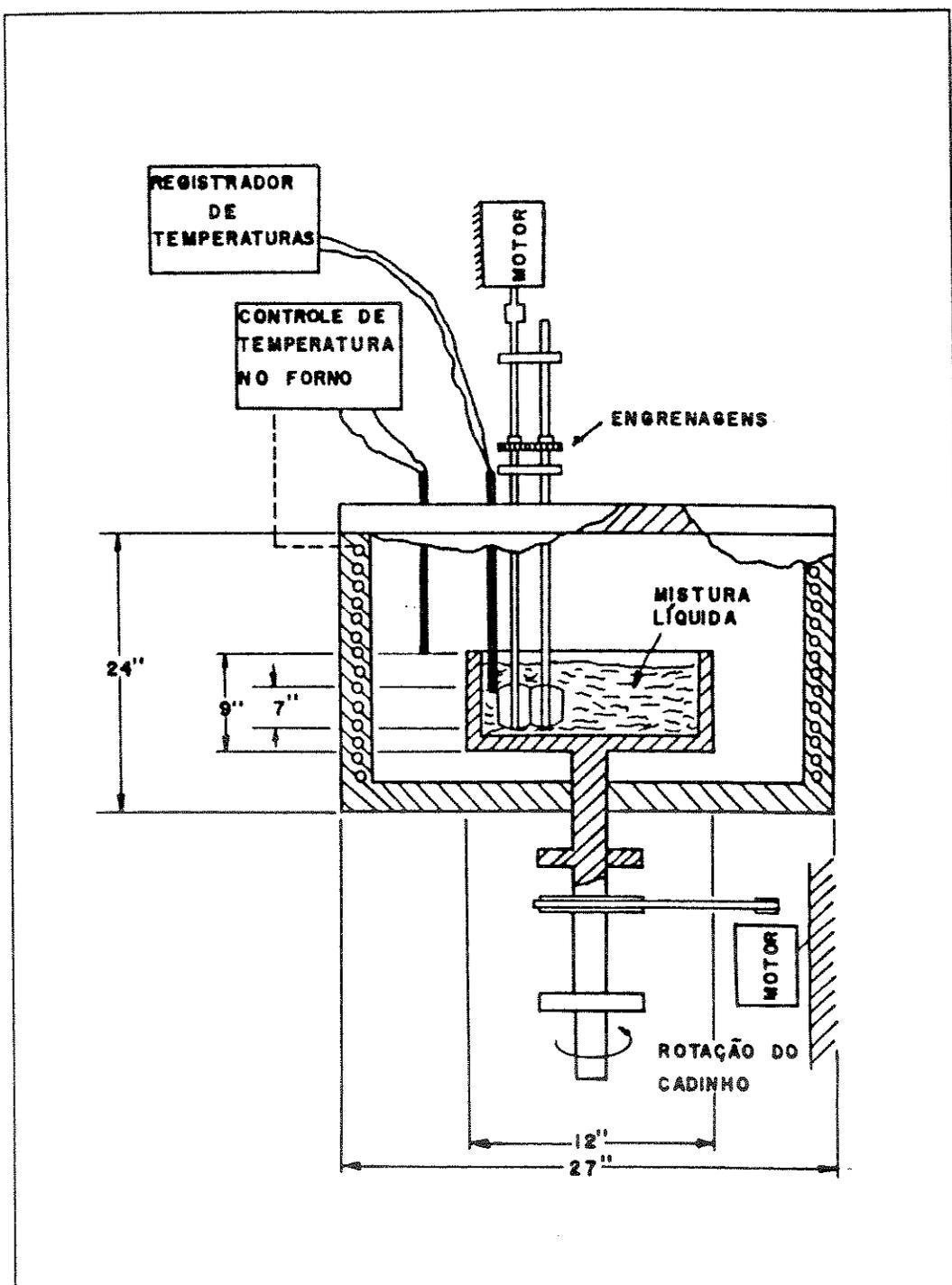
a) agitação com pás simples (Clegg, J., 1991).



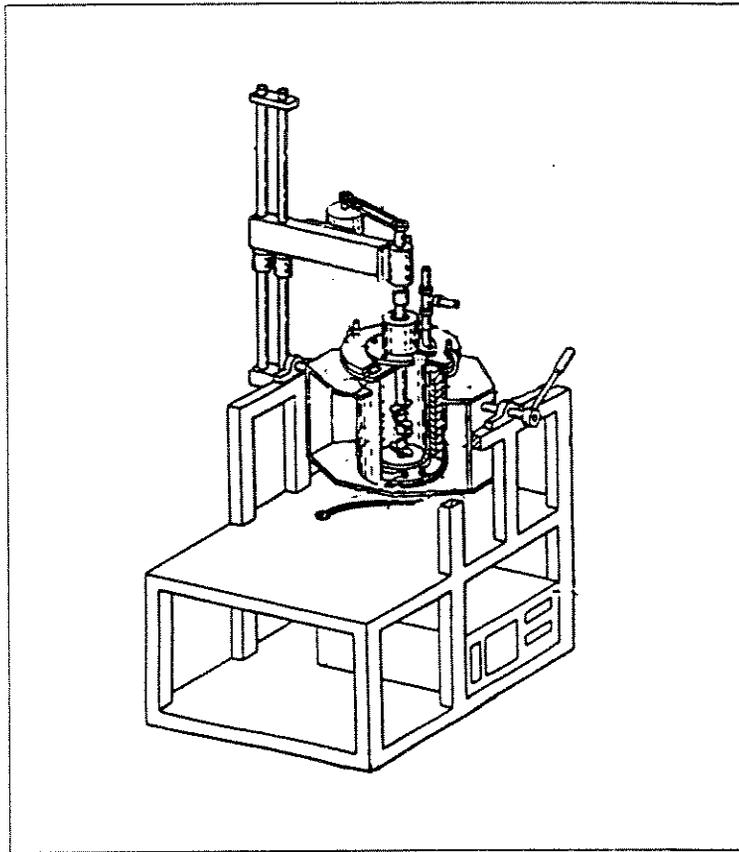
b) agitação com pás simples - destacando-se o processo de retirada do material (Banerji, A.; 1983).



c) agitação com pás simples sob vácuo (Fascetta, E. F.; 1973).



d) agitação com pás duplas com rotação simultânea do cadinho
(Mehrabian, R.; 1974).



e) agitação com palhetas múltiplas (Skibo, M. D. 1986).

Figura III.3 - Esquemas representativos de equipamentos com propulsores utilizados para a fabricação de compósitos por reofundição.

4. INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DOS PROCESSOS NAS ESTRUTURAS REO E COMPO-FUNDIDA

Os principais parâmetros que afetam tanto a operacionalidade quanto a qualidade de materiais obtidos por compo-fundição são: temperatura de trabalho; tempo de agitação; velocidade de agitação; método de adição do reforço à matriz; taxa de resfriamento durante o processamento e taxa de resfriamento durante a solidificação.

4.1. Efeito da temperatura de trabalho

A temperatura na qual a pasta é agitada, no caso de agitação isotérmica, ou a taxa de resfriamento, no caso da agitação contínua, definem a relação entre as quantidades de sólido e líquido presentes seja no reofundido, seja no compo-fundido, sendo que a presença do reforço interage no processo, facilitando a produção do material sólido globular.

Altas temperaturas de processamento significam baixas frações sólidas na pasta metálica, o que pode também significar pobre globularização deste sólido e possibilidade de decantação do reforço, prejudicando a sua dispersão no produto. Por outro lado, elevados teores de sólido (com reduzida temperatura do processo) podem acarretar em pobre globularização, principalmente se a agitação for do tipo isotérmica e com reduzidas velocidades (Joly, P. A.; 1976, Assar, A.; 1982). Como resultado podem ainda acarretar produtos com baixa incorporação e pobre dispersão do reforço.

4.2. Efeito do tempo de agitação

O tempo de agitação do material no reator tem fundamental importância na globularização da estrutura dendrítica em formação no reofundido e portanto, nos compósitos compo-fundidos.

Tempos insuficientes podem levar à produção de sólidos com morfologia intermediária entre dendrítica e globular, e portanto não fornecendo a viscosidade adequada para a perfeita retenção do reforço na pasta. Por outro lado, tempos elevados de agitação podem levar ao excessivo crescimento dos glóbulos sólidos da liga reofundida por permitir a ocorrência de mecanismos de engrossamento (Joly, P. A.; 1976), prejudicando a dispersão das partículas do reforço adicionadas, que se localizam nos contornos de glóbulos reofundidos.

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

A presença do reforço durante a agitação implica numa interação da pasta semi-sólida com o reforço levando à uma melhor e mais rápida globularização das partículas sólidas da matriz (Cornie, J. A.; 198, 1990).

4.3. Efeito da velocidade de agitação

A velocidade de agitação influencia fortemente a atuação dos mecanismos de formação e crescimento da estrutura reofundida e conseqüentemente do produto compo-fundido.

Altas velocidades de agitação significam uma diminuição no diâmetro das partículas do sólido primário inerente à pasta reofundida. Esta condição desestimula a aglomeração e a coalescência de glóbulos sólidos da pasta, ao passo que baixas velocidades de agitação estimulam os fenômenos de engrossamento, significando um aumento do diâmetro dos glóbulos sólidos da liga (Joly, P. A.; 1976).

Altas velocidades levam ao surgimento de excessiva turbulência no líquido acarretando poros no material (Assar, A.; 1982).

Na produção de compósitos, o aumento do teor de reforço produz aumento na viscosidade da pasta reofundida, resultando na necessidade de maiores velocidades de agitação para a manutenção da adequada fluidez requerida à sua incorporação à matriz (Quaak, C. J.; 1995).

Também Vivés, C.; 1993, observa a necessidade de maiores velocidades de agitação na compo-fundição, com o aumento do teor de reforço empregado.

4.4. Efeito do método de adição do reforço à matriz

A questão sobre como adicionar o reforço à matriz semi-sólida ainda é discutível; a adição pode se dar gradualmente, isto é, simultaneamente à produção da pasta reofundida; ou pode ser adicionado após a produção da pasta, mantida a sua agitação (pois se cesar a agitação a pasta aumenta de viscosidade impedindo a entrada do reforço)..

É preciso notar que se o reforço é adicionado após a formação da pasta reofundida, a sua interferência no processo de globularização do sólido dendrítico é inexistente; no entanto como a presença do reforço pode ter uma influência positiva no processo de globularização, é conveniente iniciar o processo de agitação já com o reforço adicionado, pois este pode interagir mecânicamente com a pasta em formação resultando em um produto de melhor qualidade (Cornie, J. A.; 1990).

4.5. Efeito da taxa de resfriamento durante o processamento

A taxa de resfriamento aplicada ao compo-fundido tem influência na cinética dos mecanismos de crescimento da estrutura reofundida, os quais por sua vez afetam a distribuição do reforço, localizado nas regiões inter-glóbulos da pasta reofundida.

Altas taxas de resfriamento acarretam uma redução no tamanho do sólido primário globular formado, pois há menor tempo para o crescimento (Joly, P. A.; 1976), resultando em compósitos com fina dispersão do reforço.

Em oposição, dispersões grosseiras são obtidas em compósitos com elevado tamanho de glóbulo do sólido primário obtidos com baixas taxas de resfriamento.

4.6. Efeito da taxa de resfriamento durante a solidificação

Este efeito é similar ao efeito da taxa de resfriamento durante o processamento. Altas taxas de resfriamento acarretam uma redução no tamanho do sólido primário globular formado. Em oposição, dispersões grosseiras são obtidas em compósitos com elevado tamanho de glóbulo do sólido primário obtidos com baixas taxas de resfriamento.

A influência da taxa de resfriamento do compósito durante sua solidificação é estudada por Kolsgaard, A.; 1993. O autor observa a melhoria da dispersão do reforço SiC particulado na liga Al-Si-Mg, com o aumento da taxa de resfriamento do material.

CAPITULO IV

**LIGA E REFORÇOS UTILIZADOS NESTE TRABALHO:
COMPÓSITOS DO TIPO LIGAS DE Al + C**

CAPÍTULO IV - LIGA E REFORÇOS UTILIZADOS NESTE TRABALHO: COMPÓSITOS DO TIPO LIGAS DE Al+ C

1. INTRODUÇÃO

A grande maioria dos compósitos de matriz metálica utiliza Al ou ligas desse metal como matriz, o que pode ser compreendido dada a própria origem da tecnologia dos materiais compósitos de matriz metálica, como comentado anteriormente.

Atualmente os compósitos de matriz metálica se difundem para a confecção de componentes para a indústria aeronáutica, aeroespacial, automobilística, componentes elétricos, com o uso também de ligas de Cu, Mg, e Ti como matrizes às quais são incorporados reforços, além das originais ligas de Al.

Reforços típicos utilizados podem ser citados: fibras contínuas, semi-contínuas, particulados, pós de materiais cerâmicos como B, C, Al_2O_3 , TiB_2 , TiO_2 , e outros (Balasubramanian, P. K.; 1990), com propriedades interessantes e particulares como por exemplo elevada resistência à abrasão, as quais fornecem ao conjunto as propriedades particulares requeridas.

Estes reforços são materiais em geral de elevado custo pois sua fabricação envolve muitas vezes processos que fazem uso de tecnologia sofisticada, sendo raramente disponíveis no mercado nacional.

Com o objetivo de reduzir os custos e tornar mais popular a utilização de materiais compósitos, novas combinações têm sido testadas com o uso de reforços mais baratos e de maior disponibilidade no mercado.

Assim, fibras vegetais naturais, cinzas, argilas, areias silicosas, pós de conchas marítimas têm sido utilizadas como reforços para ligas de Al e também para aços (Rohatgi, P. K.; 1990, 1994). Nesta linha têm sido estudados compósitos reforçados com C na forma de grafite em pó, para diferentes aplicações (Rohatgi, P. K.; 1992, Ames, W.; 1995).

O reduzido custo e disponibilidade do grafite industrializado, associado às interessantes propriedades do produto compósito justificam o desenvolvimento de processos de obtenção destes materiais.

2. COMPÓSITO DE Al (LIGAS) + C

Um tipo de compósito de significativa importância, principalmente quando o requisito custo é relevante, é a combinação de ligas de Al com grafite particulado.

Este tipo de compósito, bem como ligas reforçadas com fibras de C (de mais elevado custo que o grafite particulado), teve seu desenvolvimento no Japão, Índia, EUA e Europa nos últimos 15 anos, para aplicações como materiais anti-fricção (Okada, A.; 1983, 1984).

A disponibilidade do grafite, tanto mineral como na forma industrializada, torna este tipo de material interessante para uso em compósitos, principalmente em países em desenvolvimento, onde muitas vezes a tecnologia de fabricação de fibras cerâmicas não está disponível.

Tem sido demonstrado que pistões, revestimentos de cilindros, mancais, bem como diferentes artigos esportivos podem ser fabricados diretamente por fundição de compósitos particulados Al-C. O uso de pistões e revestimentos desses compósitos resultam em considerável economia de combustível em motores de combustão interna e redução do desgaste dos componentes que os utilizam (Ames, W.; 1995, Blau, P. J.; 1994).

Compósitos de matrizes de Al reforçados com grafite particulado podem substituir mancais mais pesados e caros fabricados usualmente em bronzes.

Além disto, muitos dos materiais lubrificantes em uso atualmente são baseados em dispersões finas de elementos tóxicos como Pb em matrizes de Cu ou Sn e suas ligas. O uso de C ao invés de Pb elimina a toxidez e reduz os custos dos materiais lubrificantes (Rohatgi, P. K.; 1990).

3. PROPRIEDADES GERAIS DO COMPÓSITO Al (LIGAS) + C

A adição de C à ligas de Al produz significativas modificações em suas propriedades, a destacar o efeito de redução do coeficiente de atrito, tornando o material auto-

lubrificante e com elevada resistência ao desgaste: partículas macias de grafite no interior da estrutura atuam como lubrificante sólido.

Além disso, devido ao reduzido coeficiente de expansão térmica do grafite (aproximadamente zero), o compósito apresenta reduzida dilatação térmica; apresenta ainda elevada rigidez, alta capacidade de amortecimento, retendo esta característica mesmo à elevada temperatura (Rohatgi, P. K.; 1990).

A adição de C leva ainda a um aumento nas propriedades anti-adesão do Al, aumentando sua resistência ao agarramento. Há, no entanto, uma redução na dureza e no limite de resistência à tração, na situação como fundido de Al, pela incorporação de C.

4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DE COMPÓSITOS Al (LIGAS) + C

Na Tabela IV.1 são apresentados alguns tipos de compósitos que utilizam C na forma de fibras (C_f) ou particulados (C_p), seu método de fabricação e aplicações mais correntes (Rohatgi, P. K.; 1990, Chawla, K. K.; 1987).

Tabela IV.1 - Exemplos de compósitos Al (ligas) + C.

REFORÇO	MATRIZ	MÉTODO DE OBTENÇÃO	APLICAÇÕES
C_f recobertos com boretos de Ti, Zr	Ligas de Al (Mg, Zn, Cu, Sn, Pb)	infiltração líquida	componentes para indústria aeronáutica
C_f recobertos com $SiO_2 + SiC$	Al	infiltração líquida; metalurgia do pó.	
C_p	Ligas Al-Si Ligas Al-Cu	mistura no líquido seguida de compressão sólida quente; compo-fundição	pistões, hélices, e inúmeros outros componentes.

5. INCORPORAÇÃO DO C_p NO Al LÍQUIDO

A tecnologia convencional para a fabricação de compósitos Al-C_p consiste basicamente da introdução de partículas de grafite em banhos de ligas de Al, utilizando equipamentos tradicionais de fundição, seguido de vazamento por injeção, centrifugação ou mesmo por gravidade em moldes permanentes; isto é, não há necessidade de sofisticados processos ou equipamentos para a sua fabricação.

No entanto, o fabricante pode se deparar com sérios problemas de processamento que podem levar ao insucesso na tentativa de incorporação do grafite ao Al líquido.

O primeiro problema diz respeito à densidade do grafite: sendo menos denso que o metal, tende a flutuar no líquido. Uma interessante solução pode ser dada pela utilização do metal ou liga no estado pastoso refundido, ou seja, utilizando o processo de compo-fundição.

O segundo problema diz respeito à alta reatividade do C com o Al líquido, o que pode levar à rápida degeneração do reforço e até à sua completa dissolução por formação de carboneto do tipo Al₄C₃ (Kohara, S.; 1988). A presença desse carboneto, além de reduzir o teor de grafite na mistura, provoca a fragilização do compósito. Segundo Masson, J. J. (1991), a reação Al+C é rápida a temperaturas superiores a 773 K (500°C) por nucleação de Al₄C₃ em sítios favoráveis na superfície do reforço. Estes sítios de nucleação são, segundo observações do autor, pontos de início de trincas em processos de deformação.

Soluções para o problema de alta reatividade do C com Al líquido têm sido encontradas por diversos autores (Masson, J. J.; 1991, Leonhardt, G.; 1991, Okura, A.; 1988, Metcalfe, A. G.; 1974), ao adicionarem elementos de liga à matriz, com os objetivos de:

- a) reduzir a temperatura do banho durante o processamento, já que as reações de dissolução do C e de formação do carboneto Al₄C₃ são termicamente ativadas. Ligas mais recomendadas para utilização com reforços de C são as eutéicas Al-Si,
- b) promover a formação de carbonetos estáveis no Al líquido, que circundando a partícula de grafite, a protege do ataque pelo Al. Assim, elementos formadores de carbonetos como o Ti e outros metais de transição são adicionados à liga; estes elementos, durante a solidificação, são segregados para a superfície do reforço onde combinam com o C formando uma fina película (de espessura controlável) de TiC que evita a degeneração do C pelo Al líquido.

Estes carbonetos protetores podem também ser depositados (jateamento por plasma, deposição de vapor e outros métodos) na superfície das partículas do reforço previamente à sua introdução ao banho.

A alta reatividade do Al líquido e C têm levado ainda ao desenvolvimento de processos de fabricação desses compósitos que não envolvem elevadas temperaturas, como por exemplo a compressão a quente de fibras de C impregnadas por deposição de vapor de Al (Asanuma, H.; 1988).

O terceiro problema diz respeito à falta de molhabilidade entre o reforço e a matriz, o que pode ter como consequências o despreendimento do reforço, devido à sua não incorporação pela matriz, durante a sollicitação mecânica.

A molhabilidade é caracterizada pelo ângulo de contato ou ângulo de molhamento entre o líquido e a partícula sólida do reforço. O ângulo de molhamento, θ , apresentado esquematicamente na Figura IV.1 é dado por:

$$\cos \theta = (\gamma^s - \gamma^{sl}) / \gamma^l$$

onde:

γ^s : tensão superficial do reforço (partícula sólida)

γ^{sl} : tensão superficial entre o reforço e o metal líquido

γ^l : tensão superficial do metal líquido.

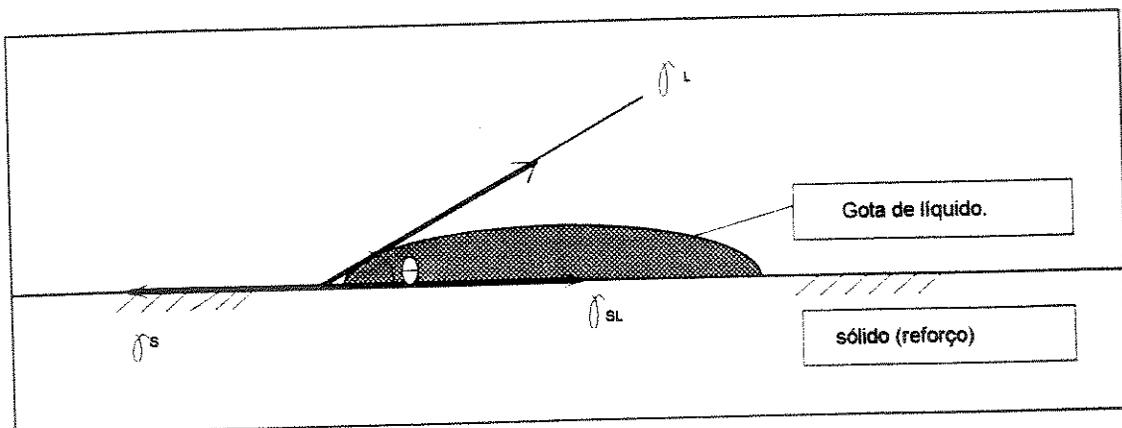


Figura IV.1 - Representação do ângulo de molhamento de uma partícula de reforço pela matriz líquida.

O molhamento de reforços de C por ligas de Al pode ser melhorado de várias maneiras (Broutman, L. J.; 1974, Choh, T.; 1987):

- a) pela presença de carbonetos de elementos de transição, depositados ou formados *in situ* na superfície do reforço; a maioria dos metais molham facilmente carbonetos;
- b) pela adição de elementos de liga ao banho, que modificam as características da camada de óxido geralmente presentes nas partículas do reforço e que dificultam o seu contato com o metal líquido. Como exemplo pode ser citado o Li, que reage com eventuais óxidos presentes na superfície de fibras ou pós de C;
- c) pela redução da tensão superficial entre o reforço e o líquido (γ^{sl}), o que pode ser obtido pelo tratamento da sua superfície para a retirada de gases absorvidos. A técnica utilizada pode ser tratamentos térmicos ou mesmo o ultra-som para o rompimento de filmes superficiais;
- d) pelo uso de recobrimentos metálicos, feitos por deposição, que promovem uma melhor interação, que passam agora a ser do tipo metal/metal.

6. ESCOLHA DA LIGA E REFORÇO PARA TRABALHO

Foram escolhidos para utilização neste trabalho liga a base de Al-Si-Cu de composição hipoeutética, como matriz, e como reforço C na forma de pó de grafite e negro-de fumo, pelos motivos a seguir expostos.

Ligas Al-Si de composições próximas da eutética e também ligas Al-Si-Cu têm sido utilizadas para a fabricação de componentes para a indústria automobilística, devido principalmente à sua elevada resistência mecânica e boa resistência à abrasão, entre as ligas de Al. Componentes como mancais, pistões de automóveis, sistemas de freios e outros são fabricados por processos de injeção dessas ligas.

De acordo com o exposto anteriormente, o sucesso na fabricação de compósitos Al (ligas) + C dependerá da obtenção de uma boa dispersão do reforço na matriz, portanto o processo de compo-fundição será utilizado neste trabalho; e de uma boa interação C/Al e portanto um formador de carboneto será utilizado na liga (Si).

A obtenção de estruturas reofundidas apropriadas depende da possibilidade de manipulação de parâmetros de reofundição; esta manipulação, por sua vez, somente é possível com a utilização de ligas que apresentam um razoável intervalo de solidificação. A utilização, neste trabalho, de ligas Al-Si-Cu ao invés de ligas Al-Si se deve, portanto, à maior operacionalidade em termos de reofundição, das primeiras em relação às segundas.

Além disto, a presença de Si na liga deve promover a formação do carboneto SiC na superfície da partícula de C, evitando o seu ataque e degeneração pelo Al líquido e promovendo a sua molhabilidade.

O uso de liga e não do Al puro se deve ainda à necessidade de redução da temperatura de trabalho, para evitar excessiva reação do líquido com o C.

Quanto ao uso do reforço C nas formas de grafite e de negro de fumo, as interessantes propriedades anti-fricção, baixa dilatação térmica, entre outras propriedades que podem oferecer à liga, somadas à sua disponibilidade no mercado e potencialidade de aplicação de compósitos reforçados com grafite definiram sua escolha. É objetivo deste trabalho utilizar materiais de reduzido custo e fácil disponibilidade.

CAPÍTULO V

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE EQUIPAMENTO PARA COMPO-FUNDIÇÃO

CAPÍTULO V - PROJETO E CONSTRUÇÃO DE EQUIPAMENTO PARA COMPO-FUNDIÇÃO

1. DESCRIÇÃO GERAL DO EQUIPAMENTO CONSTRUÍDO

O desenvolvimento do projeto do equipamento a ser construído teve início a partir do estudo de equipamentos já apresentados na literatura. Foram propostas modificações e adaptações visando melhorar o desempenho e facilidade operacional.

O equipamento construído se constitui, basicamente, de um forno para a fusão e manutenção do metal no estado líquido, um sistema de agitação para a promoção da globularização da estrutura em solidificação, isto é, para a reofundição e também para auxiliar a dispersão do reforço a ser adicionado, e de um sistema de refrigeração para resfriamento do compósito produzido, diretamente no cadinho onde foi produzido.

Fazem parte do equipamento controladores de temperatura para o forno de aquecimento, controladores de rotação do motor elétrico utilizado para movimentar o sistema de agitação e ainda registrador X x Y para monitoramento de temperaturas no banho.

A Figura V.1 apresenta esquema geral do equipamento projetado e construído.

O sistema de aquecimento projetado e construído se consistiu de um forno de aquecimento resistivo com boa estabilidade térmica, provido de controlador de temperatura do tipo liga-desliga. O forno, de geometria cilíndrica, foi construído aberto em ambas as extremidades visando permitir tanto a fácil adição do material do reforço quanto o descarregamento rápido do cadinho contendo o material processado, em direção ao sistema de refrigeração posicionado na parte inferior do equipamento.

Internamente ao forno é posicionado um cadinho onde se dá o processamento do compósito. O cadinho é mantido no interior do forno por meio de um suporte formado por um par de tubos concêntricos de aço, desenhados de modo a poder deslizar um dentro do outro.

O cadinho foi especialmente usinado de forma a permitir a desmoldagem do compósito, isto é, com geometria cilíndrica e paredes levemente cônicas; e apresentando paredes com pequena espessura para permitir um rápido resfriamento do material compósito produzido.

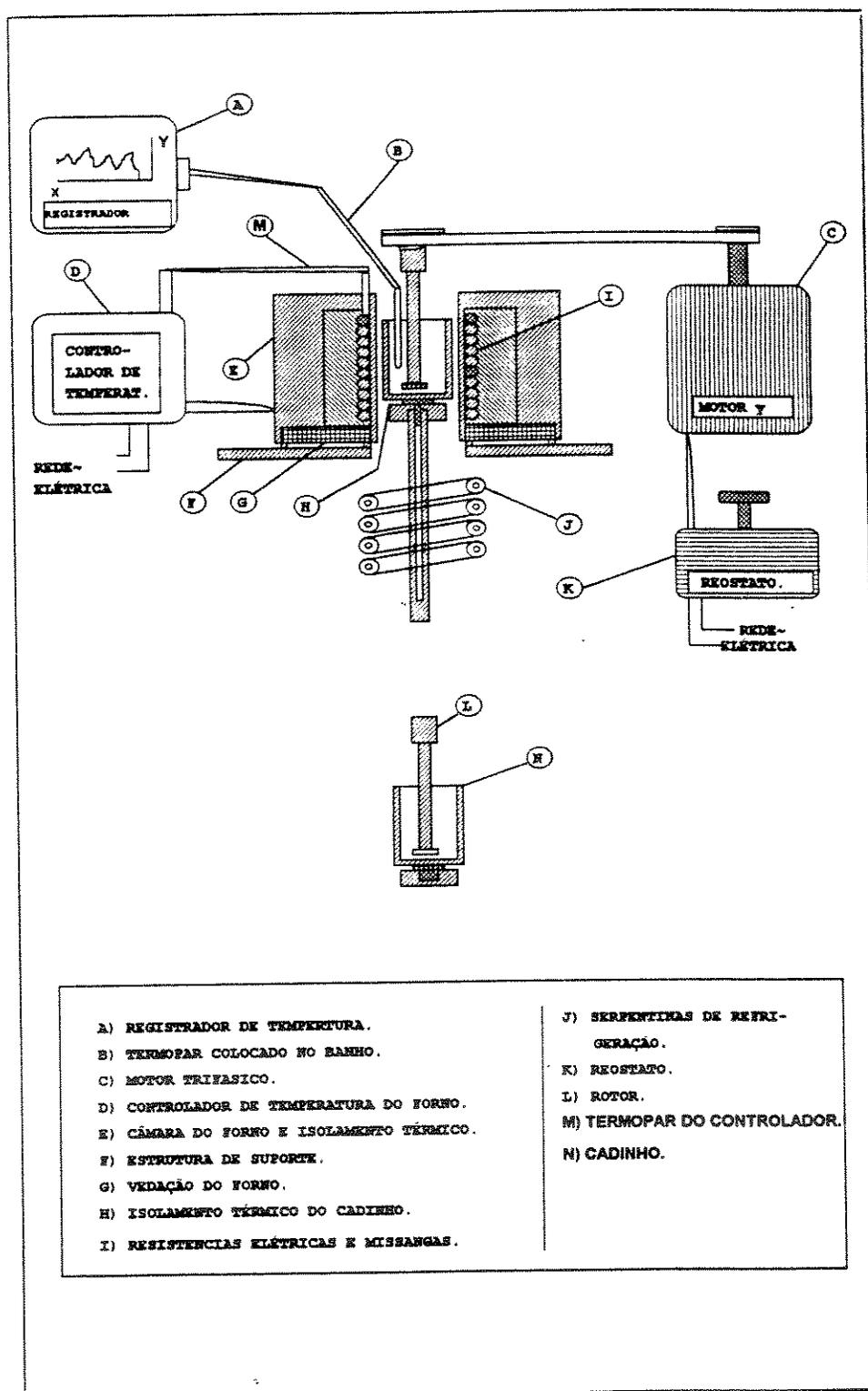


Figura V.1 - Esquema geral do equipamento para compo-fundição projetado e construído.

Quanto ao sistema de agitação da liga em solidificação, projetou-se um equipamento com capacidade para um ou dois eixos aos quais podem ser acoplados diferentes geometrias de agitadores. Um suporte superior ao forno mantém um sistema de engrenagens que permite o acoplamento do rotor simples ou duplo, que são movidos por um motor elétrico trifásico.

Foram construídos diferentes agitadores do banho: a) um par de rotores sulcados helicoidalmente, posicionados paralelamente no interior do cadinho contendo o metal líquido; b) um sistema com rotor único central, com dois tipos de geometrias de pás propulsoras soldadas à sua base. Durante o processamento com o uso de rotores duplos, estes giravam em sentidos contrários sob alta rotação, para a promoção da agitação da liga.

Buscou-se combinar princípios dos equipamentos com rotores, apresentados na Figura III.2 com o método de agitação envolvendo a formação de vórtice, apresentado na Figura III.3(a), no caso de utilização de dois rotores com sulcos helicoidais. Com isto se pretendeu combinar os bons resultados em termos de homogeneidade de cisalhamento e de estrutura do material reofundido obtidos no primeiro método com o excelente arraste do reforço conseguido com a presença de vórtice no líquido em agitação.

O sistema de refrigeração se constitui de uma serpentina de tubos de Cu perfurados ao longo de sua extensão, posicionada na parte inferior do equipamento, abaixo da base do forno. Ao terminar o processamento do compósito, o cadinho é rebaixado para o interior da serpentina, a qual, posicionada ao seu redor promove a sua refrigeração com jatos de água, possibilitando o resfriamento do compósito no próprio cadinho em que foi produzido, sem a necessidade de vazamento para moldes.

A Figura V.2 apresenta fotos mostrando o equipamento projetado e construído.

O equipamento assim projetado apresenta, comparativamente aos equipamentos apresentados na literatura, as seguintes características inovadoras:

a) sistema de refrigeração do material compo-fundido diretamente no cadinho de mistura, eliminando-se assim a necessidade do seu vazamento. Deve ser lembrada a elevada viscosidade de pastas reofundidas quando não submetidas a pressões, o que dificultaria o vazamento do compósito por gravidade;

b) possibilidade de uso de rotores intercambiáveis, podendo ser utilizados um ou dois, com diferentes geometrias de propulsores, buscando as condições de melhor cisalhamento no reofundido e de arraste do reforço.

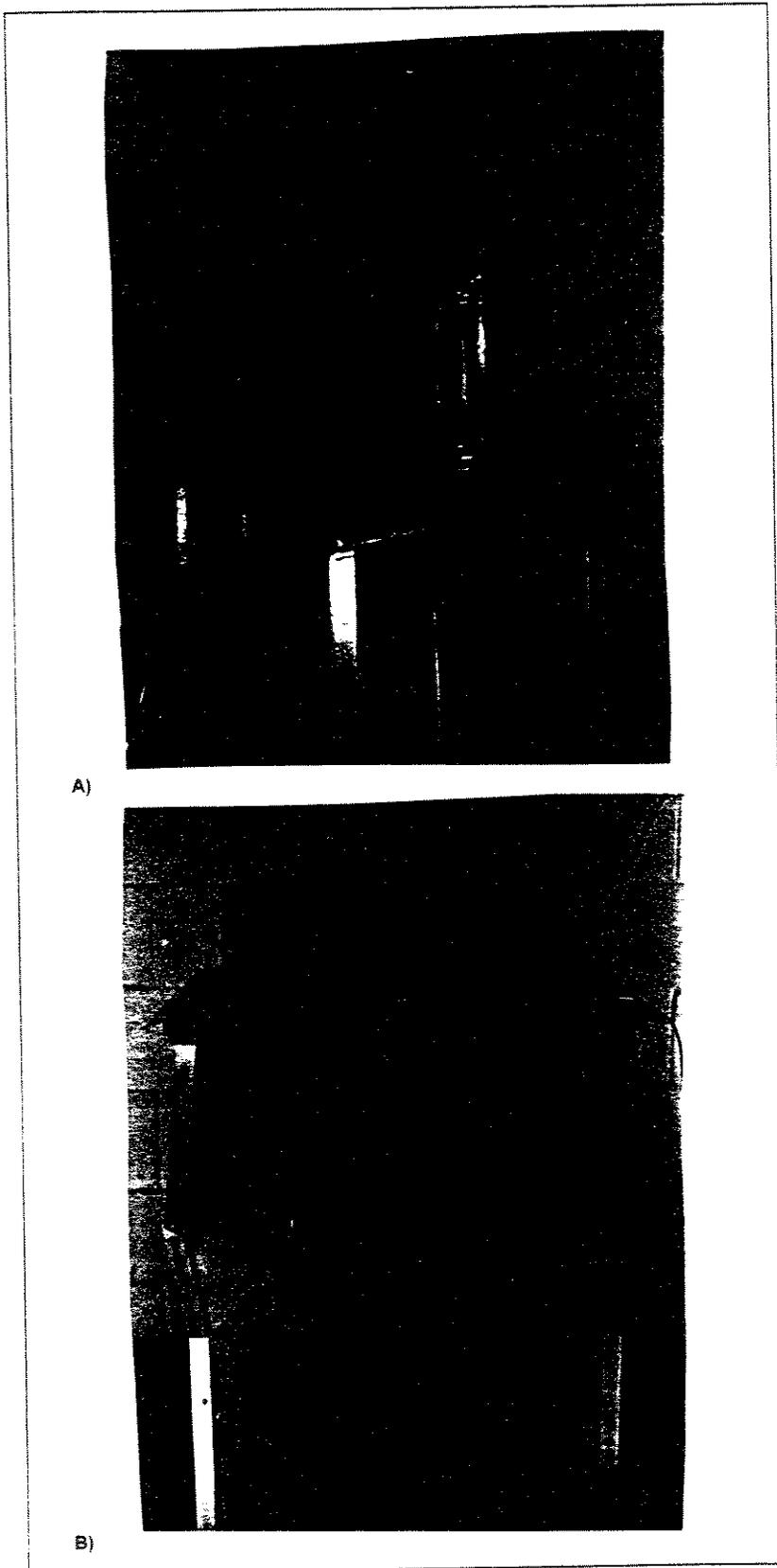


Figura V.2 - Fotografias do equipamento construído para compo-fundição: a) vista geral do equipamento; b) controladores e registrador de temperaturas.

2. DESCRIÇÃO DAS PARTES CONSTITUINTES

O equipamento de compo-fundição construído se constitui dos seguintes componentes:

- A) estrutura;
- B) rotor de agitação e caixa de engrenagens;
- C) motor;
- D) forno;
- E) cadinho;
- F) sistema de refrigeração;
- G) sistema de monitoramento térmico;
- H) controlador de torque.

A) Estrutura

A estrutura de sustentação do equipamento foi construída com cantoneiras de aço-C do tipo 1020, devidamente cortadas e soldadas.

Sobre esta estrutura são fixados o forno, o suporte superior do eixo e hélice de agitação, o motor, o sistema de refrigeração, o suporte do cadinho e o cadinho. Tanto o suporte do eixo e hélice de agitação quanto o forno estão apoiados sobre placas metálicas que deslizam sobre a mesa de trabalho permitindo o alinhamento do eixo central do forno com os agitadores, ou seja, é possível acoplar tanto um como dois agitadores.

O cadinho é mantido na posição correta para o uso, no interior do forno, com o auxílio de um suporte inferior constituído por um par de tubos cilíndricos de aço-C 1020, como eixos capazes de deslizar um sobre o outro. O tubo externo é preso à base do cadinho e o interno é apoiado e soldado sobre uma base que permite o ajuste da altura correta do cadinho no interior do forno ou na posição de resfriamento.

O suporte superior, construído a partir de vigas em U, devidamente cortadas e soldadas, mantém o rotor de agitação e o motor. Este suporte deve apresentar elevada rigidez mecânica e capacidade de efetuar o alinhamento entre os rotores e o centro do cadinho.

As Figuras V.3 e V.4 apresentam desenho geral do equipamento, com destaque para a sua estrutura.

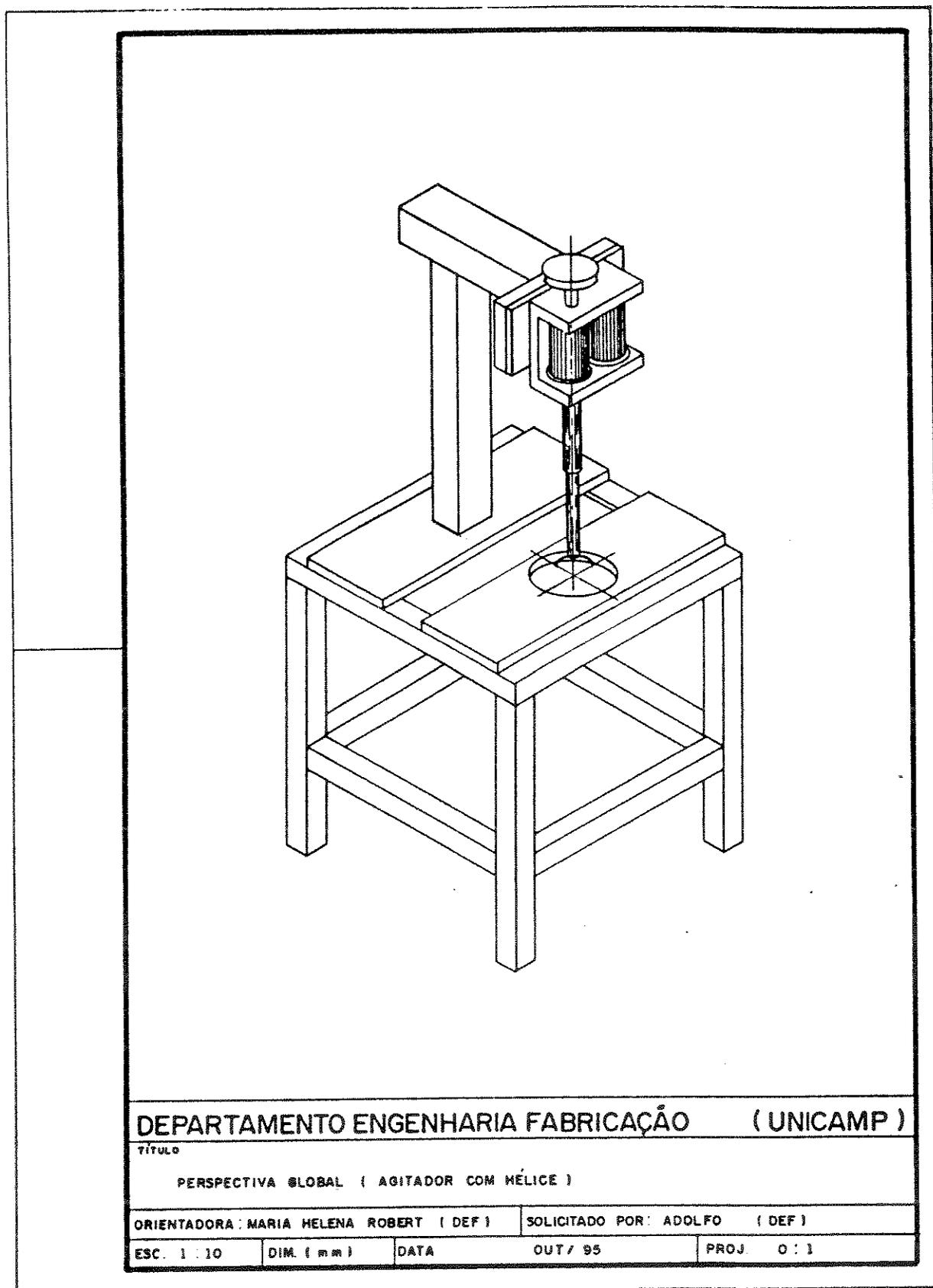
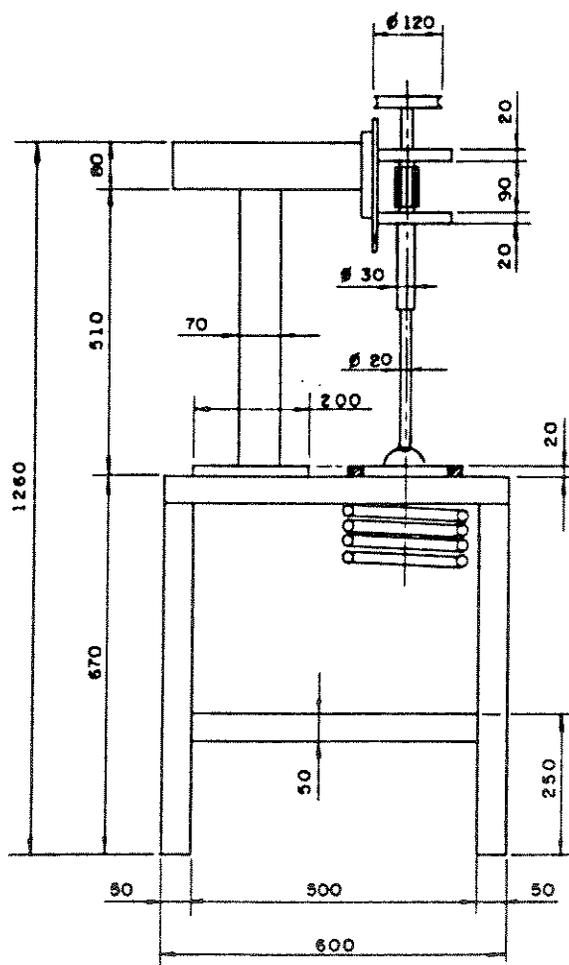


Figura V.3 - Desenho geral do equipamento para compo-fundição construído; destacando-se a sua estrutura.



DEPARTAMENTO ENGENHARIA FABRICAÇÃO (UNICAMP)

TÍTULO

VISTA LATERAL DO CONJUNTO SEM O FORNO

ORIENTADORA : MARIA HELENA ROBERT (DEF)

SOLICITADO POR: ADOLFO (DEF)

ESC. 1 : 10

DIM. (mm)

DATA

OUT / 95

PROJ. 1 : 1

Figura V.4 - Desenho geral do equipamento para compo-fundição construído (vista lateral).

B) Rotor de agitação e caixa de engrenagens

Foram construídos três tipos de sistemas para a agitação do metal em solidificação, conforme dito anteriormente: rotores duplos, na forma de eixos cilíndricos posicionados no interior do cadinho, rotores simples com pá ou hélice propulsora soldada em sua base.

Todos os rotores foram confeccionados por usinagem em aço resistente ao calor do tipo H13 (Aços Villares).

Os rotores duplos foram usinados para a formação de sucros helicoidais em sua superfície, para a promoção de maior arraste do reforço e promoção de maior cisalhamento no metal em solidificação, a fim de promover melhor re fundição.

Um dos rotores simples teve soldada à sua base uma pá com 4 abas; enquanto a um segundo rotor foi acoplada, também por soldagem, uma hélice com as extremidades voltadas para baixo. (Inicialmente foi testada hélice com pás voltadas para cima, sem sucesso, uma vez que as pás produziam o arraste de metal durante o abaixamento do cadinho, ocasionando um vazio central no lingote de composto obtido. A substituição por pás voltadas para baixo solucionou o problema, uma vez que estas permitem o escoamento livre da pasta semi-sólida quando o cadinho é rebaixado para a posição de refrigeração).

Com estes tipos de propulsores espera-se uma boa agitação no líquido, a formação de vórtice para a incorporação do reforço e consequente promoção de boa mistura do pó adicionado ao metal.

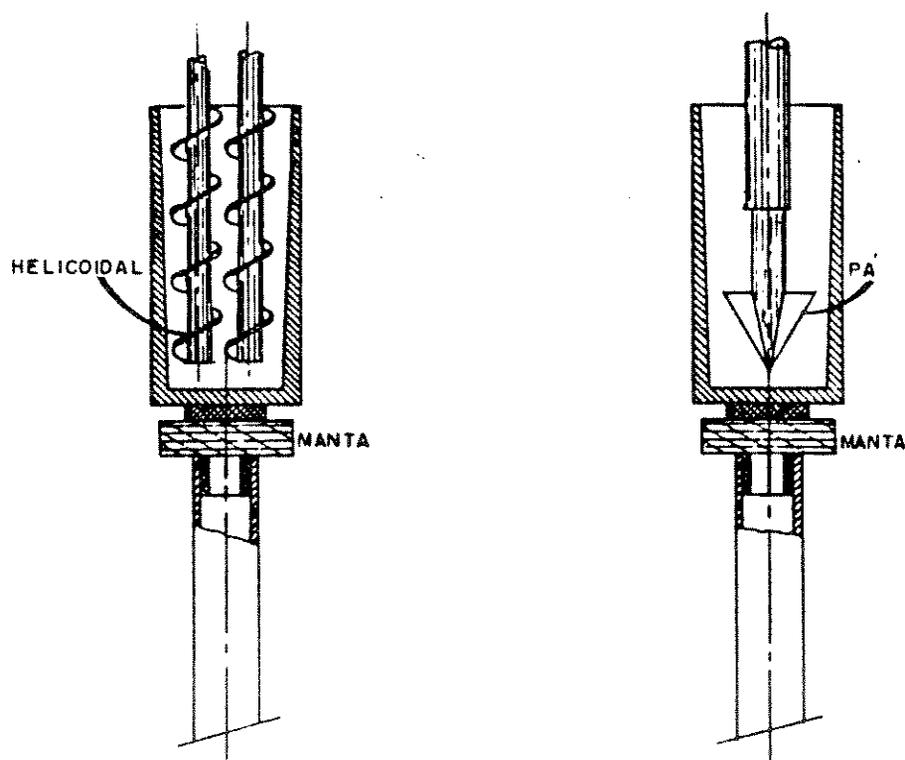
A Figura V.5 apresenta desenho dos rotores duplos helicoidais e de rotor simples com pá propulsora; enquanto na Figura V.6 é apresentada fotografia do rotor simples com hélice de agitação.

Para a fabricação da caixa de engrenagens foi utilizado aço-C 1020.

As polias utilizadas foram adquiridas no mercado e são confeccionadas em Al. A caixa de engrenagens foi construída de maneira a permitir o uso de dois eixos de rotação simultâneos.

Um fuso no canto direito superior permite o ajuste da altura da caixa de engrenagem facilitando sua colocação e uso.

A Figura V.7 apresenta fotografia da caixa de engrenagens.



DEPARTAMENTO ENGENHARIA FABRICAÇÃO (UNICAMP)

TÍTULO

PROJETO INICIAL HELICOIDAL E COM PÁ DE MISTURA

ORIENTADORA: MARIA HELENA ROBERT (DEF)

SOLICITADO POR: ADOLFO (DEF)

ESC. 1:5

DIM. (mm)

DATA

OUT/95

PROJ. 1:3

Figura V.5 - Desenho dos rotores duplos com sulcos helicoidais (a) e de rotor simples com pá propulsora (b), utilizados para a compo-fundição.

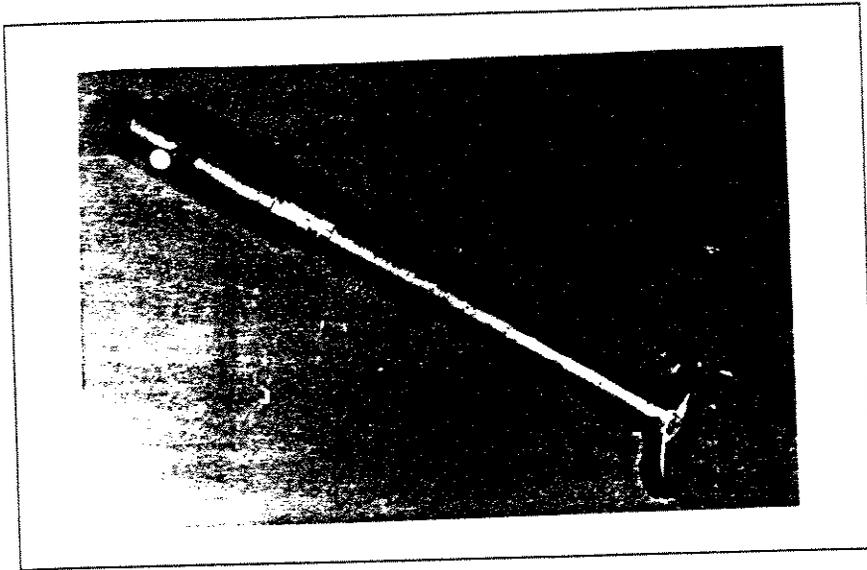


Figura V.6 - Fotografia do rotor simples com hélice propulsora, utilizado na compo-fundição.

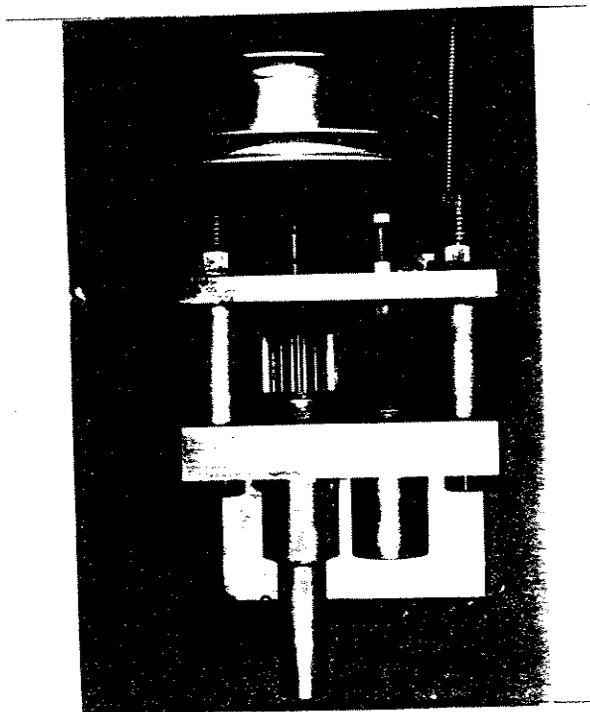


Figura V.7 - Fotografia da caixa de engrenagens, rotor e polia.

C) Motor

O motor é responsável pelo torque mecânico fornecido ao eixo de agitação. Foi utilizado um motor trifásico do tipo estrela-triângulo. Este motor foi escolhido devido aos seguintes fatores: a) fornece o torque necessário requisitado pelo equipamento; b) permite o controle de velocidade dentro dos limites exigidos pelos experimentos; c) disponibilidade no mercado.

O motor foi fixado no suporte superior e conectado a uma polia; a qual é conectada a uma polia pertencente a uma caixa de engrenagens que por sua vez aciona o eixo de agitação com a hélice.

Os cálculos da potência do motor são apresentados no apêndice A, onde temos como resultado um motor de 1/4 CV.

D) Forno

O dimensionamento do forno foi realizado levando-se em conta que este deveria atender de modo eficiente a uma série de requisitos do projeto, quais sejam: dimensões compatíveis com o cadinho que ficaria interno ao mesmo, de modo a minimizar as perdas de calor e permitir o deslizamento livre do cadinho em seu interior; capacidade de garantir a fusão de ligas de Al, levando-se em conta perdas térmicas para o eixo rotor e para a atmosfera do forno; ter capacidade de carga de cerca de 800g de Al ou suas ligas; apresentar estabilidade térmica durante o experimento.

Para o atendimento destes requisitos optou-se pela construção de um forno elétrico do tipo resistivo, utilizando como elemento resistivo fios do tipo Kantal A1.

A câmara do forno, de geometria cilíndrica, foi construída em aço inoxidável austenítico 316. Os fios foram isolados com missangas refratárias e recobertos com manta cerâmica Fiberbrax^R MT4. O conjunto foi fechado e revestido com placa de aço C 1010 laminado.

O cálculo da potência térmica requerida para o aquecimento e fusão da quantidade de material desejada é representado no Apêndice B.

A Figura V.8 apresenta desenho do forno, com as dimensões características.

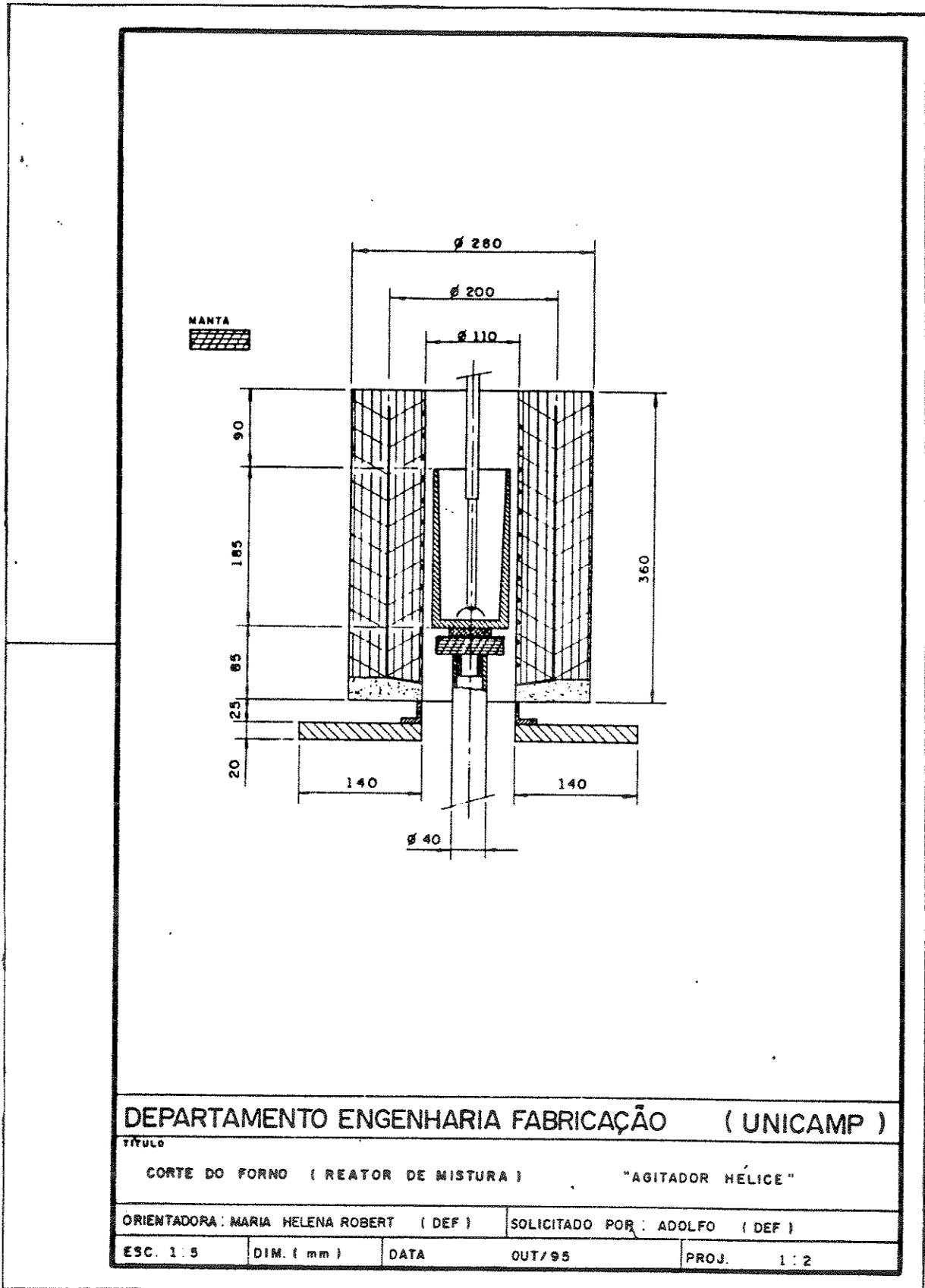


Figura V.8 - Desenho do forno (reator de mistura) do equipamento de compo-fundição construído.

E) Cadinho

O cadinho para contenção e processamento por agitação da liga metálica foi construído usinando-se um tubo cilíndrico sem costura, de aço inoxidável austenítico tipo 304, com 180mm de comprimento, 90mm de diâmetro e 5mm de espessura de parede média, ao qual foi soldado um fundo constituído por uma chapa do mesmo material, por solda tipo MIG.

Suas dimensões são apresentadas na Figura V.9., enquanto a Figura V.10 apresenta fotografia do cadinho construído. Internamente o cadinho teve as paredes usinadas com uma conicidade de 0,5 grau de modo a facilitar a desmoldagem; na sua base inferior foi soldado um encaixe cilíndrico que permite a acoplagem do cadinho a um eixo que o suporta e que o faz deslizar em direção ao sistema de resfriamento.

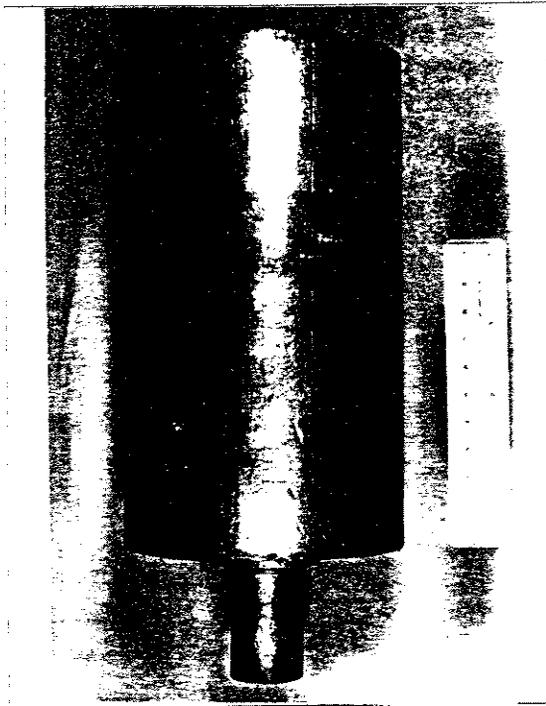
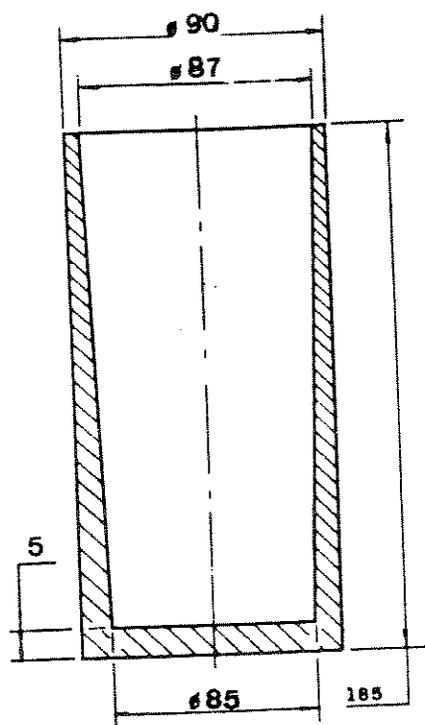


Figura V.9 Fotografia do cadinho construído para o processamento da compo-fundição.

F) Sistema de refrigeração

O sistema de refrigeração para o composto produzido é constituído de uma serpentina de Cu perfurada conectada a uma mangueira através da qual circula água liberando jatos de água em direção ao cadinho.



DEPARTAMENTO ENGENHARIA FABRICAÇÃO

(UNICAMP)

TÍTULO

CADINHO

ORIENTADORA: MARIA HELENA ROBERT (DEF)

SOLICITADO POR: ADOLFO (DEF)

ESC. 1 : 2

DIM. (mm)

DATA

FEV. / 96

PROJ.

Figura V.10 - Desenho do cadinho do equipamento de compo-fundição construído.

Para sua confecção foram utilizados tubos de Cu de diâmetro de 8mm. O sistema de refrigeração pode ser visto na base do equipamento, na fotografia mostrada na Figura V.11.

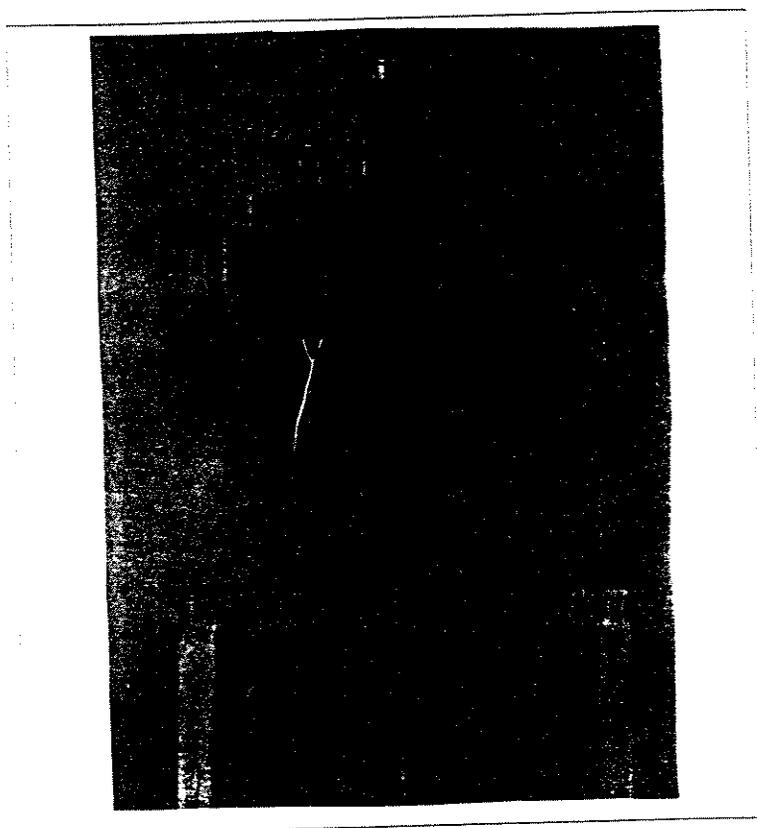


Figura V.11 - Fotografia de parte do equipamento construído mostrando a serpentina de refrigeração do cadinho.

G) Sistema de monitoramento térmico

G1) Controle da temperatura do forno

Para controle da temperatura do forno foi utilizado controlador tipo liga/desliga, com termopar posicionado na parede interna do forno, a uma altura de 7cm do topo, segundo indicação da Figura V.1 (termopar indicado na figura com a letra M). O esquema elétrico do controlador de temperatura do forno é apresentado na Figura V.12.

Utilizou-se termopar de ligas Cromel-Alumel tipo K para todas as medidas de temperaturas.

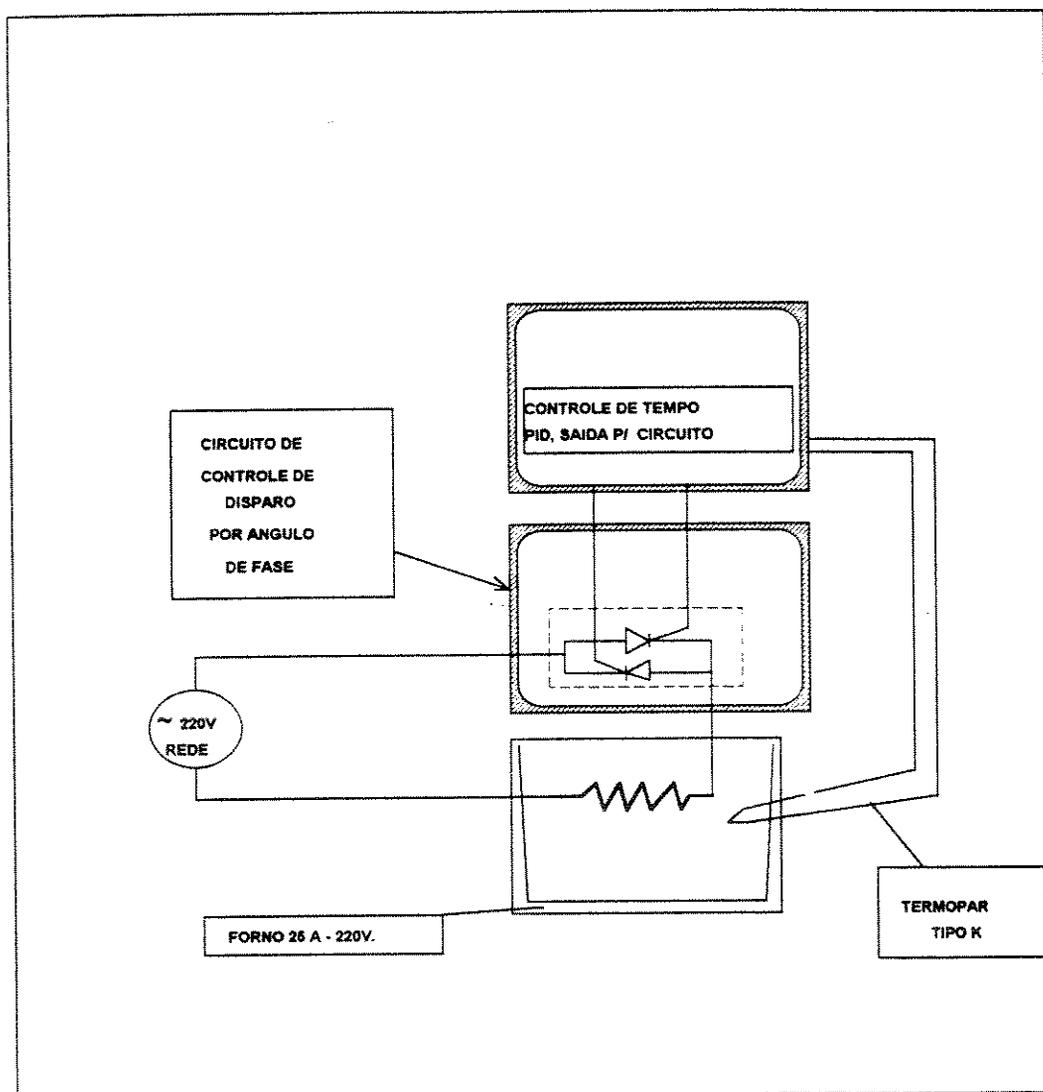


Figura V.12 - Circuito elétrico do forno e controlador de temperatura.

G2) Controle da temperatura do banho

O monitoramento térmico do metal durante o experimento foi feito com o auxílio de termopar posicionado no seu interior (indicado pela letra B na Figura V.1), conectado a registrador de temperatura do tipo X-Y, de modo a se ter controle das condições térmicas do experimento.

O monitoramento foi feito somente em um experimento padrão, pois o movimento do rotor tornava difícil a manutenção do termopar em posição. Este procedimento padrão foi adotado para todas as experiências.

O termopar utilizado foi da liga Cromel-Alumel, tipo K.

H) Controlador de torque

Utilizou-se um controlador elétrico de torque constituído de um reostato ligado ao motor. Este controlador elétrico fornece ao motor uma potência inferior à requerida para o seu funcionamento, pela redução da tensão de alimentação. No caso de um travamento evita a queima do motor (queima imediata) fornecendo tempo para seu desligamento; ou seja, protege o motor eletricamente.

CAPITULO VI

DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

CAPITULO VI - DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

1. MATERIAIS EMPREGADOS

1.1. Liga utilizada

Neste trabalho foi utilizada como matriz liga comercial Al-Si-Cu, adquirida no mercado. A sua composição química é apresentado na Tabela VI.1.

Tabela VI.1 - Composição da liga utilizada como matriz

elemento	Al	Si	Cu	Ti	Mg	Fe
% peso	balanço	3,36	2,8	0,01	0,07	0,99

A microestrutura típica da liga Al-Si-Cu utilizada no trabalho, no estado fundido, é apresentada na Figura VI.1. Pode ser observado que sua microestrutura é constituída basicamente da fase primária Al- α com morfologia dendrítica e da fase eutética Si, na forma de agulhas, nos contornos da fase primária; algum eutético CuAl_2 também pode ser observado (ataque químico utilizado: solução 0,5% de HF em água, por 15s).

Pelas dimensões e morfologia do Si, a liga não foi submetida a tratamentos de modificação comumente utilizados para a esferoidização e redução das dimensões da fase Si. Esta modificação geralmente é feita com adição de Na ou Sr.

Com o objetivo de se avaliar a faixa de solidificação e determinar as temperaturas *sólidas* e *líquidas* da liga utilizada, foi obtida a curva de resfriamento $T \times t$ durante a sua solidificação. A curva obtida é apresentada na Figura VI.2.

Podem ser observados os pontos de inflexão referentes às temperaturas *líquidas* e *sólidas* em torno de 873 K (600°C) e 814 K (540°C) respectivamente. A faixa de solidificação desta liga é, portanto da ordem de 60°C, o que garante uma ampla faixa de trabalho para a produção de pastas refundidas com diferentes frações de líquido.

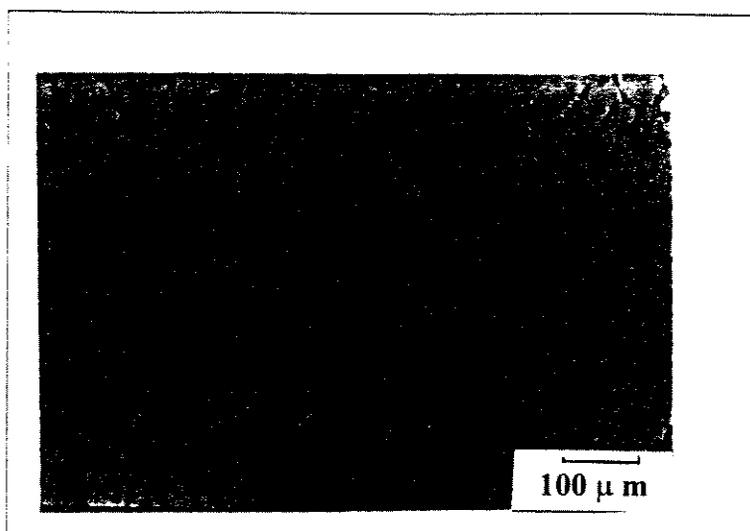


Figura VI.1 - Microestrutura da liga Al-Si-Cu no estado fundido.

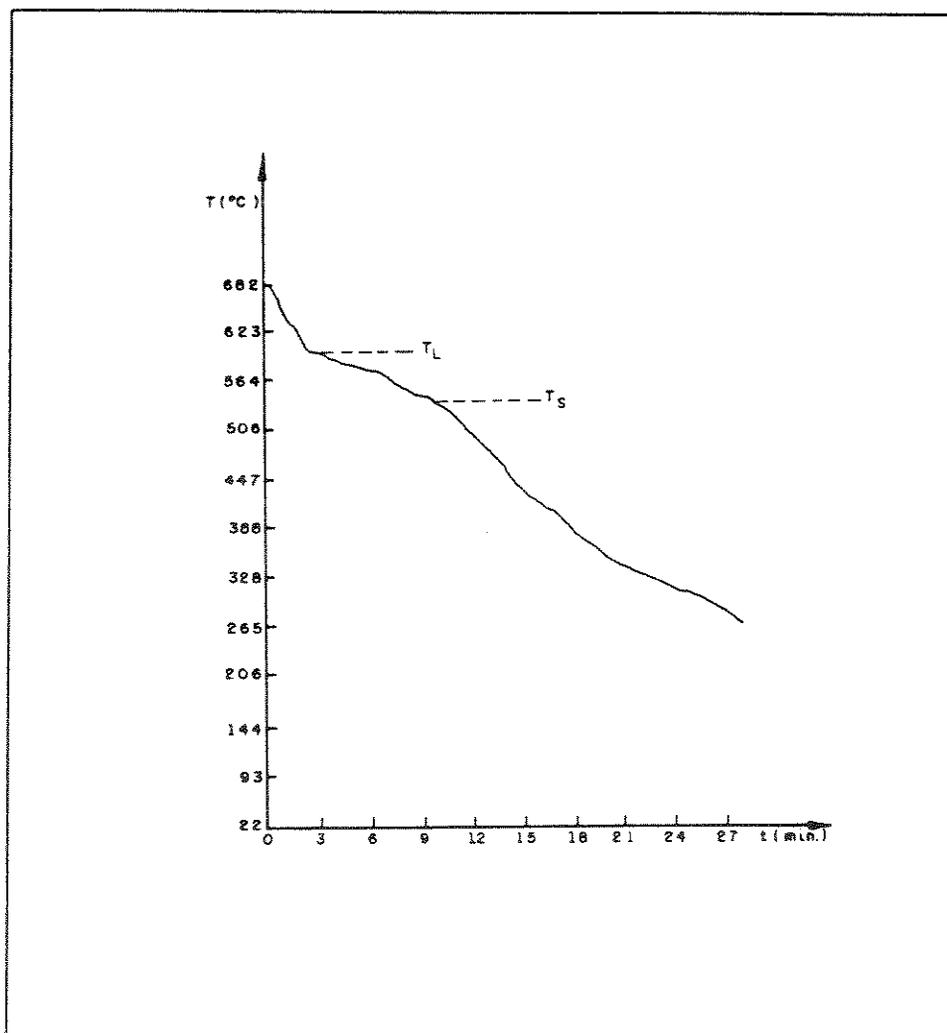


Figura VI.2 - Curva de resfriamento durante a solidificação da liga utilizada.

1.2 Reforços utilizados

Foram utilizados nos experimentos dois tipos de reforços a base de C: negro de fumo e grafite. Ambos apresentam distintas morfologias e dimensões de grãos. Os reforços foram adquiridos no mercado, na forma de pós e caracterizados quanto à morfologia e dimensões de seus grãos.

A) Negro de fumo

Negro de fumo é um termo genérico usado para identificar uma ampla variedade de materiais carbonáceos finamente divididos, produzidos através da pirólise de hidrocarbonetos gasosos ou líquidos. É largamente empregado como agente reforçante e como pigmento em borrachas, tintas industriais e de impressão, plásticos, papel, revestimentos protetores e em compostos condutores de eletricidade (Catálogo COPEBRAS, 1995).

O negro de fumo difere química e fisicamente de uma forma mais pura de C como o diamante e o grafite.

O usual pequeno tamanho de partícula (0-0,5 μ m) é sua mais importante característica, apresentando os pós áreas superficiais numa faixa de 6m²/g até 1200m²/g. O teor de C no negro de fumo pode variar de 83% a 99%, sendo oxigênio e hidrogênio os outros elementos complementares mais comuns segundo seus fornecedores.

No negro de fumo a distância entre camadas atômicas é cerca de 3,5 Å enquanto no grafite esta distância é de 3,35 Å; elas não estão ordenadas tridimensionalmente mas são para cristalinas em natureza (Catálogo COPEBRÁS). Um para-cristal possui um grau de ordem intermediário entre o verdadeiro estado cristalino e o amorfo. As partículas de negro-de-fumo mostram ser reticulados contínuos de camadas de grafite, tendo praticamente o mesmo espaço inter-camadas que o grafite.

Existem muitos tipos básicos de negro de fumo e seus derivados disponíveis para o usuário, sendo que estes derivados apresentam propriedades específicas e às vezes exclusivas, propriedades estas que dependem do seu processo de fabricação.

Historicamente a manufatura deste material foi iniciada nas antigas civilizações. No século XVII com o uso industrial de gases naturais, negros de fumo obtidos a partir do acetileno foram introduzidos comercialmente, quase exclusivamente como corantes devido ao

seu alto poder de pigmentação. Posteriormente descobriu-se que teria também excelentes características reforçantes em borracha natural.

A partir de 1922, negros de fumo passaram a ser também produzidos a partir de óleos em reatores especiais.

Com o advento dos plásticos descobriu-se que a introdução de teores da ordem de 2,5% de certos tipos de negros de fumo poderiam evitar a degradação do plástico por luz ultra violeta, como é o caso do PVC comercial.

Os negros de fumo de acetileno têm como característica importante alta condutividade elétrica e têm sido usados extensivamente em aplicações que requerem essa propriedade, como por exemplo pilhas elétricas. Como reforçantes de metais o emprego é novidade e ainda requer pesquisas.

Neste trabalho foi utilizado um tipo de negro de fumo conhecido pelo nome comercial de Statex 125, gentilmente cedido pela COPEBRAS S.A.

Morfologia do negro-de-fumo (Statex 125)

O Statex 125 é fornecido na forma de um fino pó cujo tamanho dos grãos pode ser estimado como sendo em torno de 1 a 25 μ m, segundo o fabricante. O aspecto morfológico dos grãos do Statex 125 é de esferas fibrosas como pode ser observado nas fotos da Figura VI.3, obtidas em microscópio eletrônico. Constata-se que o pó é constituído de grânulos esféricos.

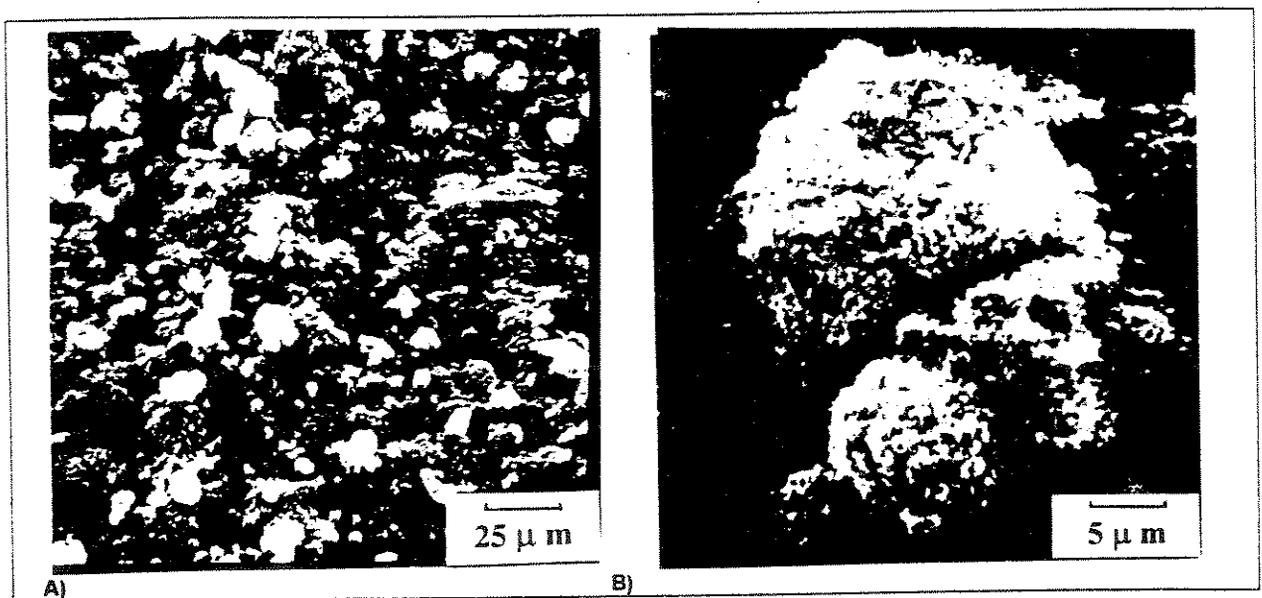


Figura VI.3 - Fotografias do negro de fumo utilizado - produto comercial Statex 125

B) Grafite

Grafite é um mineral negro, lustroso, que cristaliza no sistema hexagonal com simetria romboédrica e é mais macio que o talco. Os cristais têm forma tubular distribuídos em planos ou camadas, com distâncias entre camadas da ordem de $3,35 \text{ \AA}$. A densidade específica do grafite está em torno de $2,1$ a $2,3 \text{ g/cm}^3$ (Mantel, C. L., 1968).

O grafite utilizado neste trabalho foi fornecido pela **COMIL S.A** e, segundo especificação do fabricante, apresenta teor de C entre 68 a 75%, voláteis em torno de 5%, e 1% de umidade.

A fim de determinar as dimensões de seus grânulos, foi executada análise granulométrica em jogo de peneiras padrão, nos laboratórios da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP. O resultado é apresentado na Figura VI.4: pode ser observado que a maior porcentagem (60%) dos grânulos ficou retida nas malhas de 90 e $63 \mu\text{m}$. Apenas 0,04% ficou retido na malha de $250 \mu\text{m}$ e apenas 6,8 ficou retido na malha de $38 \mu\text{m}$. Com estes resultados pode-se calcular o valor médio do diâmetro do grafite como sendo de $77 \pm 18 \mu\text{m}$.

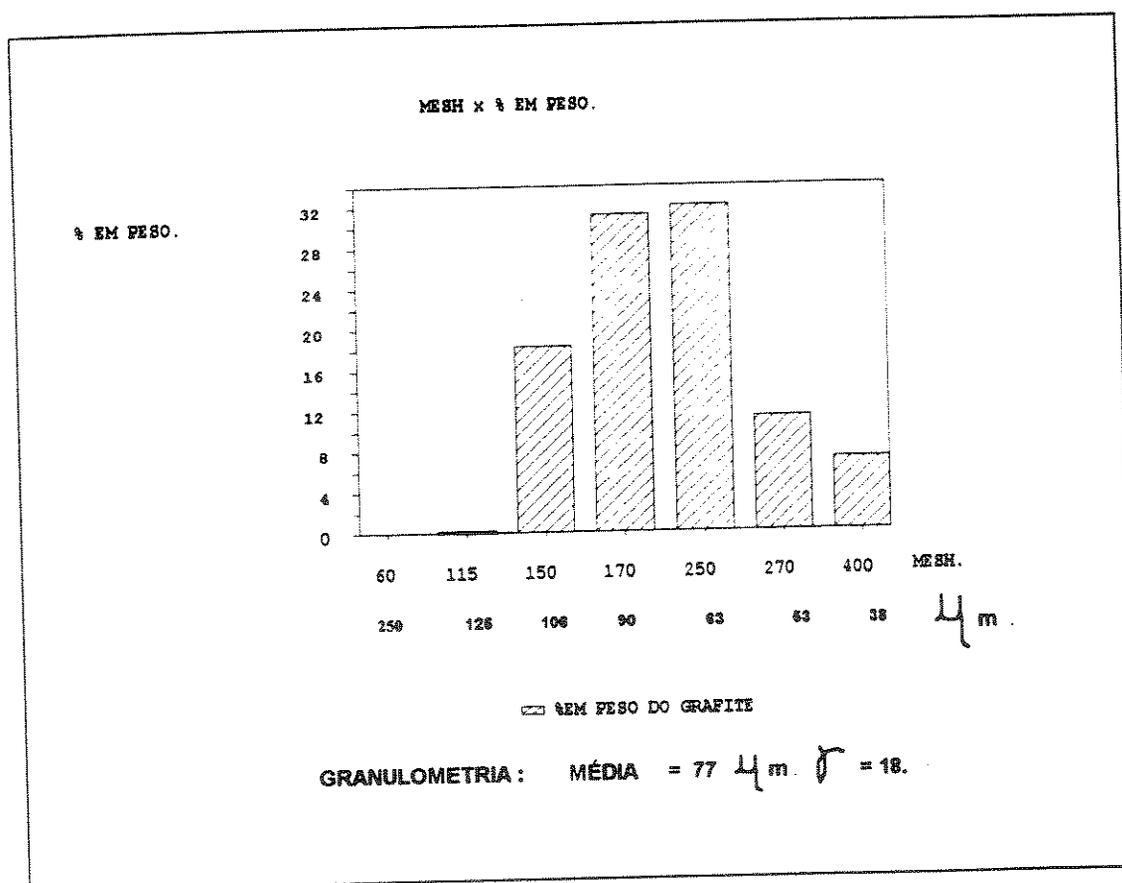


Figura VI.4 - Distribuição granulométrica do grafite utilizado.

A morfologia dos grânulos de grafite foi observada em microscópio eletrônico e é apresentada nas fotos da Figura VI.5. Pode-se observar a sua morfologia na forma de placas angulares .

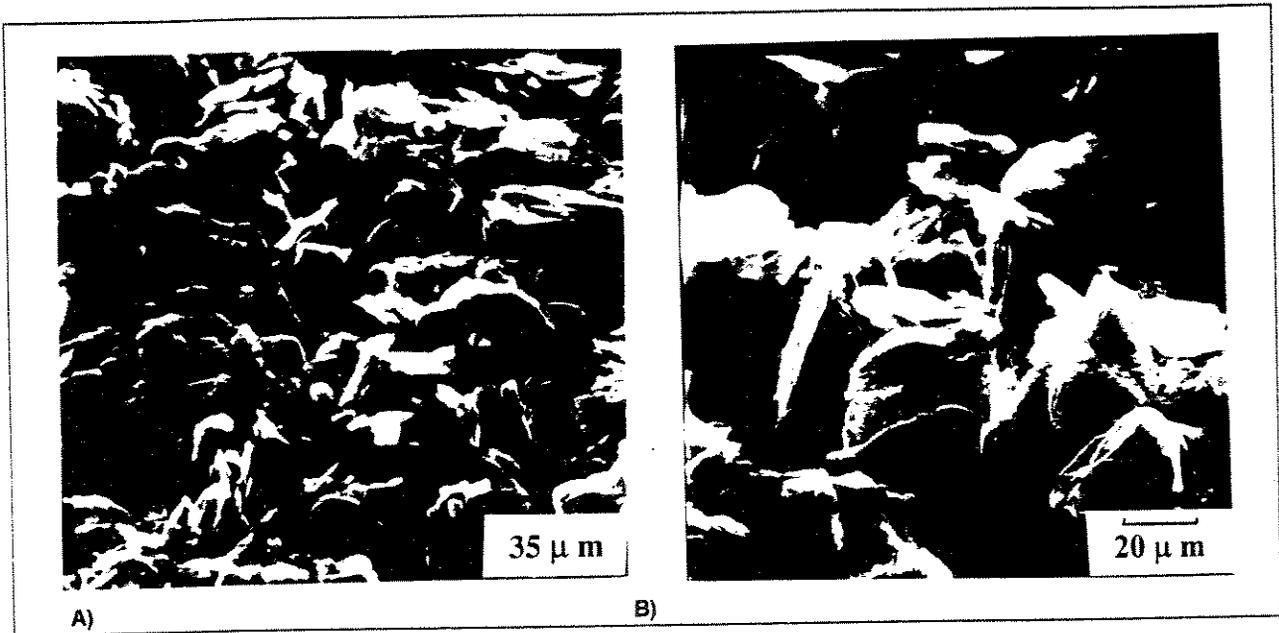


Figura VI.5 - Fotografias dos grânulos do grafite utilizado.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Testes preliminares de funcionamento do equipamento

Foram efetuados testes preliminares, com o forno vazio, para observação do comportamento dos sistemas de aquecimento, agitação e resfriamento.

Nos testes preliminares foi verificado o funcionamento geral do equipamento, caixa de engrenagens, motor, controlador de temperatura, forno, sistema de resfriamento e movimentação do cadinho, bem como foram feitos testes simples de agitação de Al líquido com os diferentes tipos de rotores construídos: rolos, pás e hélices.

Nesta etapa também foi analisado o comportamento térmico do forno, pelo monitoramento da variação de temperatura na câmara durante aquecimento e manutenção.

Estes testes preliminares não tiveram a preocupação de obter material semi-sólido e sim o de verificar o comportamento geral do equipamento quando em operação.

2.2. Experimentos de compo-fundição

Inicialmente foram feitos experimentos que visaram a familiarização com o equipamento e suas variáveis de operação. Foram feitas as primeiras tentativas de obtenção de reofundidos e em seguida de compósitos.

Nesta etapa foram testados os diferentes tipos de agitadores: rotores cilíndricos, pás e finalmente com hélices. Este último tipo de agitador foi o que apresentou melhores resultados, como comentado anteriormente.

Foi analisado o comportamento térmico do material durante o processamento de compo-fundição, em procedimento padrão, o qual foi repetido em todos os ensaios.

Estes experimentos iniciais permitiram estabelecer os parâmetros de operação a serem utilizados na etapa de fabricação dos compósitos.

Verificado o adequado funcionamento geral do equipamento e o melhor tipo de agitador a ser utilizado, foram iniciados experimentos objetivando produzir compósitos, em diferentes condições operacionais. Foram produzidos lingotes de aproximadamente 800g, com seção circular de 80mm de diâmetro e 100mm de altura.

As condições operacionais utilizadas na produção dos compósitos foram: temperatura de fusão e superaquecimento da liga - 953K (680°C); temperatura de adição do reforço - 853K (580°C) (tempo de pré-agitação de 3min para homogeneização do material a 580°C antes da adição dos pós); tempo de agitação após adição do reforço - 5 min; velocidade de agitação - 800 a 1000 rpm.

Foram variadas somente o tipo - negro de fumo ou grafite, e as quantidades dos reforços adicionados - 1,25 e 2,5 % em peso, em relação ao peso da liga.

Após o processamento do compósito o material no estado semi-sólido foi solidificado no próprio cadinho por meio do resfriamento rápido promovido pela bobina de refrigeração, e em seguida desmoldado para análise.

Por se tratar de pasta reofundida, isto é, um material que apresenta elevada viscosidade em repouso, o vazamento por gravidade seria bastante dificultado, optando-se por promover o resfriamento no próprio cadinho.

O lingote obtido foi em seguida desmoldado para análise metalográfica.

3. PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE METÁLOGRAFICA

Os lingotes de compósitos obtidos foram inicialmente limpos em jato de areia, em seguida cortados no sentido longitudinal, segundo corte A-A indicado na Figura VI.6, para retirada de corpos de prova para análise metalográfica.

Para preparo de amostras foi utilizada técnica metalográfica convencional: lixamento sequencial com lixas de granulometria 120, 220, 320, 400, 600 e 1200, seguido de polimento com pasta de diamante de 15, 6 e 1 μm .

Foi realizado ataque na região indicada com solução aquosa de HF (0,5%) durante 10 s. Micrografias foram feitas em microscópio ótico modelo Neophot 32, marca Zeiss-JENA.

Os lingotes foram ainda fotografados para observação da superfície externa (vistas: de topo e lateral) com e sem usinagem.

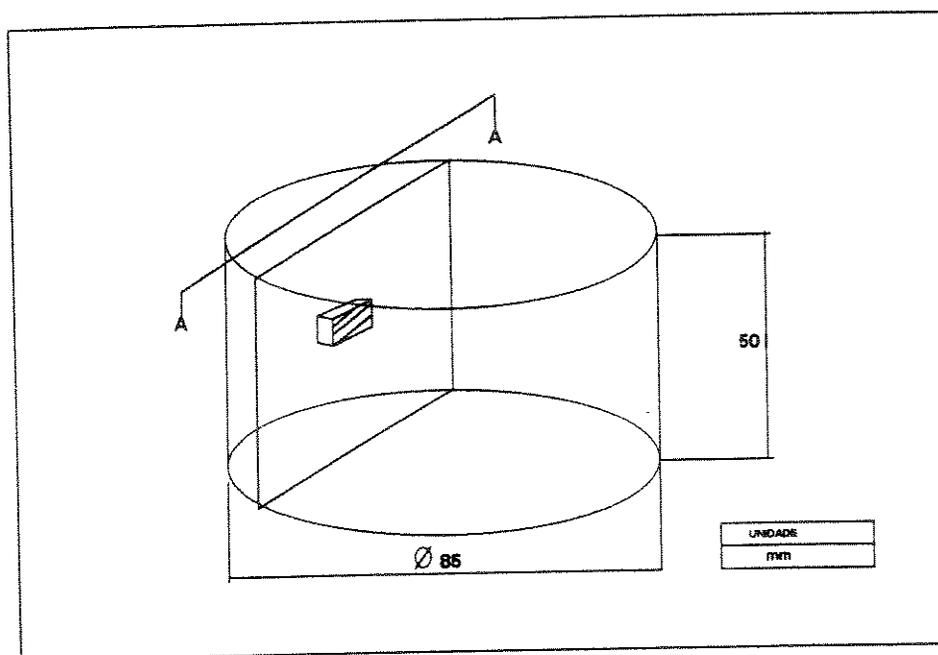


Figura VI.6 - Esquema indicando a região onde foram retiradas amostras para análise metalográfica dos lingotes de compósito obtidos.

CAPÍTULO VII

RESULTADOS OBTIDOS

CAPÍTULO VII - RESULTADOS OBTIDOS

1. COMPORTAMENTO DO EQUIPAMENTO CONSTRUÍDO

1.1. Comportamento mecânico

Quanto ao aspecto mecânico do equipamento projetado, o que se pode comentar é que sua construção é bastante robusta e feita em módulos encaixáveis de modo a facilitar a montagem e desmontagem, transporte e manutenção.

O fato do forno ser aberto em ambas as extremidades permitiu a fácil adição de reforço e facilitou o acompanhamento e visualização dos experimentos.

O equipamento apresentou boa estabilidade mecânica durante funcionamento, sendo somente observada pequena vibração na caixa de engrenagens para as maiores velocidades de rotação.

A potência do motor utilizada se mostrou adequada à promoção da agitação desejada.

Pode ser observado que o desenho do elemento promotor da agitação do líquido pode comprometer a produção do compósito. Os resultados obtidos com os três tipos de rotores apresentaram diferentes eficiências na incorporação do reforço:

➤ os rotores duplos, com geometria de cilindros sulcados, promoveu boa agitação no líquido mas a pequena distância entre eles e o grande volume ocupado no interior do cadinho prejudicaram a incorporação dos pós do reforço; além de constituírem uma massa elevada para a troca de calor, promovendo difícil controle térmico do material em processamento;

➤ no caso de rotores simples, com pás, a agitação conseguida se mostrou adequada à promoção de re fundição e à incorporação do reforço, mas devido à geometria da pá e à elevada viscosidade da pasta re fundida quando cessada a agitação, houve excessiva retenção do compósito em suas abas no momento da abaixamento do cadinho para a refrigeração, promovendo a formação de vazio no centro do lingote solidificado;

➤ os melhores resultados foram obtidos com rotores providos de hélices com pás voltadas para baixo; neste caso agitação adequada para a formação da estrutura re fundida e

para a incorporação do reforço foi obtida. A geometria da hélice também permitiu a sua retirada do compósito sem a promoção de grandes vazios no lingote.

Dados os melhores resultados obtidos com a hélice com pás voltadas para baixo, esta foi a solução adotada neste trabalho. Estruturas reofundidas puderam ser obtidas e pós de reforço puderam ser incorporados, produzindo-se o compósito desejado.

Os aspectos fluido-dinâmicos do processo de agitação merecem, no entanto, maior aprofundamento, visando uma maior eficiência na incorporação de reforços.

1.2. Comportamento elétrico

Quanto ao comportamento elétrico do equipamento, pode ser comentado que todos os componentes elétricos apresentaram desempenho a contento, indicando adequado dimensionamento.

Em particular o forno apresentou um bom comportamento elétrico chegando a trabalhar com corrente de 20A, obtendo-se potência em torno de 4 KW.

1.3. Comportamento térmico

O comportamento térmico do forno construído foi analisado com o levantamento de curvas de aquecimento com o forno vazio, para avaliação da taxa de aquecimento; e verificação da estabilidade térmica com o tempo em 3 posições no interior da câmara de agitação, após atingida uma pré-fixada temperatura.

A Figura VII.1 apresenta a curva de aquecimento obtida, para forno vazio, até a temperatura de 1063K (790°C) (temperatura superior a de trabalho utilizada). Pode ser determinada uma taxa de aquecimento da ordem de 22K (22°C) / min.

O comportamento térmico do forno com o tempo de manutenção a uma determinada temperatura - 843K (570°C) foi observado por meio de gráfico tempo x temperatura no interior do cadinho em diferentes pontos: no topo (a 2 cm da borda), no centro e no fundo (a 2 cm da base). Os resultados são apresentados nas figuras que se seguem.

A Figura VII.2 (a) apresenta a variação da temperatura no topo do cadinho com tempo, à temperatura de 843K (570°C).

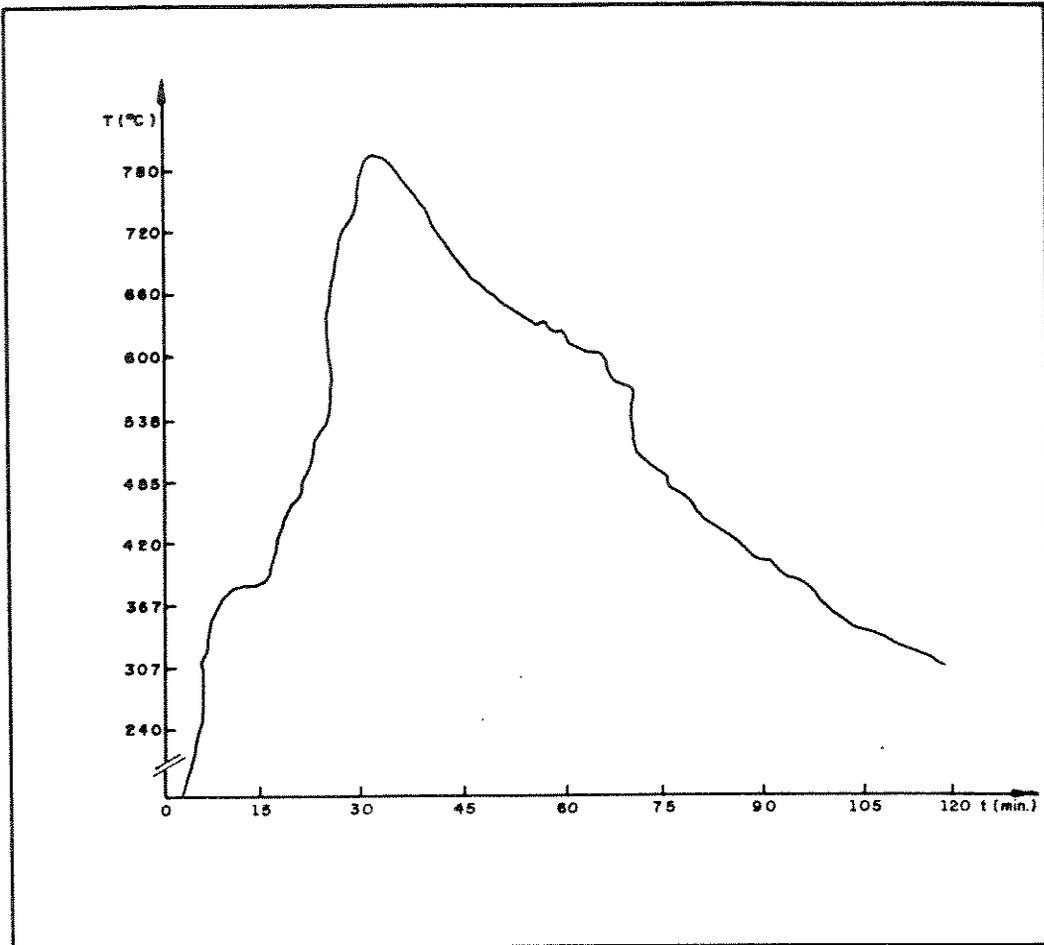


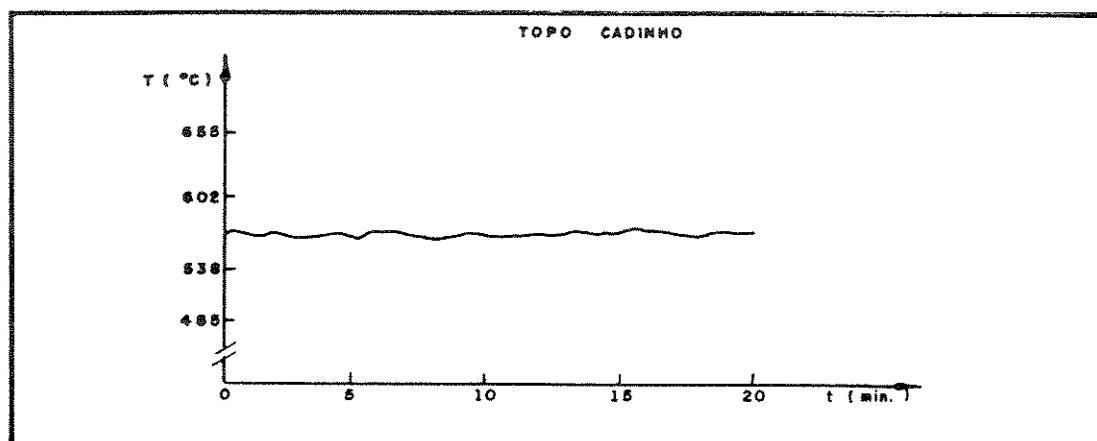
Figura VII.1 - Curva de aquecimento até 1063K (790°C) do forno construído.

Pode ser observada uma variação máxima de 6K (6°C) na temperatura no topo do cadinho, com a manutenção do forno à temperatura citada, por cerca de 20 minutos. A estabilidade térmica pode ser considerada elevada e adequada ao trabalho de obtenção de estruturas refundidas, já que intervalos de solidificação típicos para ligas para a re fundição são da ordem de 50°C.

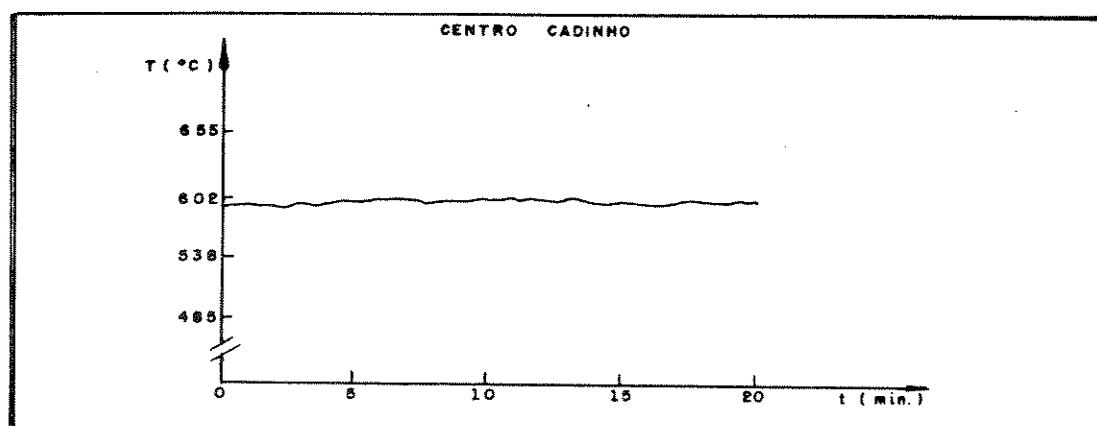
A Figura VII.2 (b) apresenta o comportamento térmico no centro do cadinho, por um tempo de aproximadamente 20 minutos, à mesma temperatura.

Pode ser observada também uma variação máxima de 6K (6°C). O centro do cadinho, no entanto, se apresenta a uma temperatura mais elevada que o topo, com uma diferença de 10K (10°C) observada entre as duas posições.

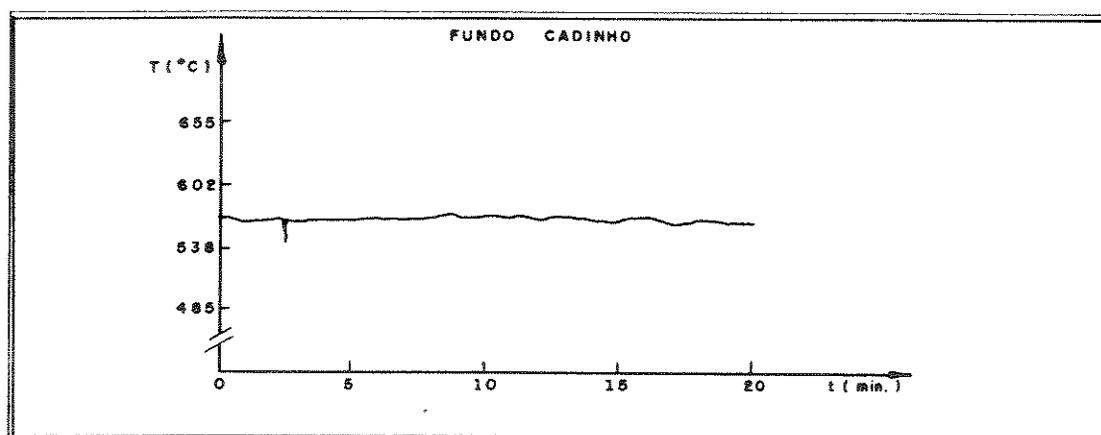
A Figura VII.2 (c) apresenta o comportamento térmico do fundo do cadinho, com o tempo de manutenção a 843K (570°C) de aproximadamente 20 minutos.



(a)



(b)



(c)

Figura VII.2 - Variação da temperatura no interior do cadinho vazio, com o tempo de manutenção a 843K (570°C), em diferentes posições: (a) a 2cm do topo; (b) no centro; (c) a 2cm da base.

Pode ser observada a elevada estabilidade da temperatura com o tempo de manutenção, também para esta posição no interior do cadinho. Variações da ordem de 3K (3°C) são notadas. A temperatura do fundo é semelhante a do topo do cadinho.

O efeito da diferença entre o centro e as extremidades do cadinho não deve ser significativa para o processo, o qual envolve agitação vigorosa do líquido. É de se esperar que esta agitação promova a homogeneização da temperatura do material.

Além disso a faixa de variação de temperatura está contida na faixa de solidificação da liga utilizada, isto é, não há o risco de solidificação total ou liquefação total da liga durante o processamento.

2. COMPORTAMENTO TERMICO DO MATERIAL DURANTE O PROCESSAMENTO

Foi realizado um experimento padrão com monitoramento da temperatura no interior do banho (termopar posicionado a cerca 3,5 cm do fundo do cadinho.)

Neste experimento padrão foi adicionado à liga semi-sólida, à temperatura de 853K (580°C), 2% em peso do reforço negro de fumo.

O monitoramento da temperatura do material é dificultado pela forte agitação e reduzido espaço para posicionamento adequado do termopar, por isto este monitoramento não foi repetido nos demais experimentos.

A reprodução cuidadosa dos procedimentos adotados, no entanto, pode garantir a repetibilidade das condições operacionais.

O resultado obtido é apresentado no gráfico da Figura VII.3.

Inicialmente a temperatura é elevada a 953K (680°C) para se proceder à fusão da liga, utilizando-se um superaquecimento de 80K (80°C) acima da sua temperatura *liquidus*, para acelerar a sua fusão.

A temperatura do forno é então reduzida gradualmente à temperatura de trabalho de 853K (580°C), temperatura esta no interior da faixa de solidificação da liga que é de 813K (540°C) a 873K (600°C), correspondendo, portanto, a uma fração líquida de cerca de 60%. Durante o resfriamento o metal é continuamente agitado.

À temperatura de 580°C a pasta é agitada por cerca de 3min para homogeneização do material, é então adicionado o reforço graduaente, sob agitação contínua por mais 5min, sendo o compósito em seguida descarregado e resfriado dentro do cadinho pela ação dos jatos de agua da bobina de resfriamento, conforme já descrito anteriormente.

Durante a fase de agitação o termopar sofre interferência da hélice, fornecendo picos na leitura da temperatura. Pode ser observado, no entanto, uma razoável estabilidade térmica no material durante a agitação.

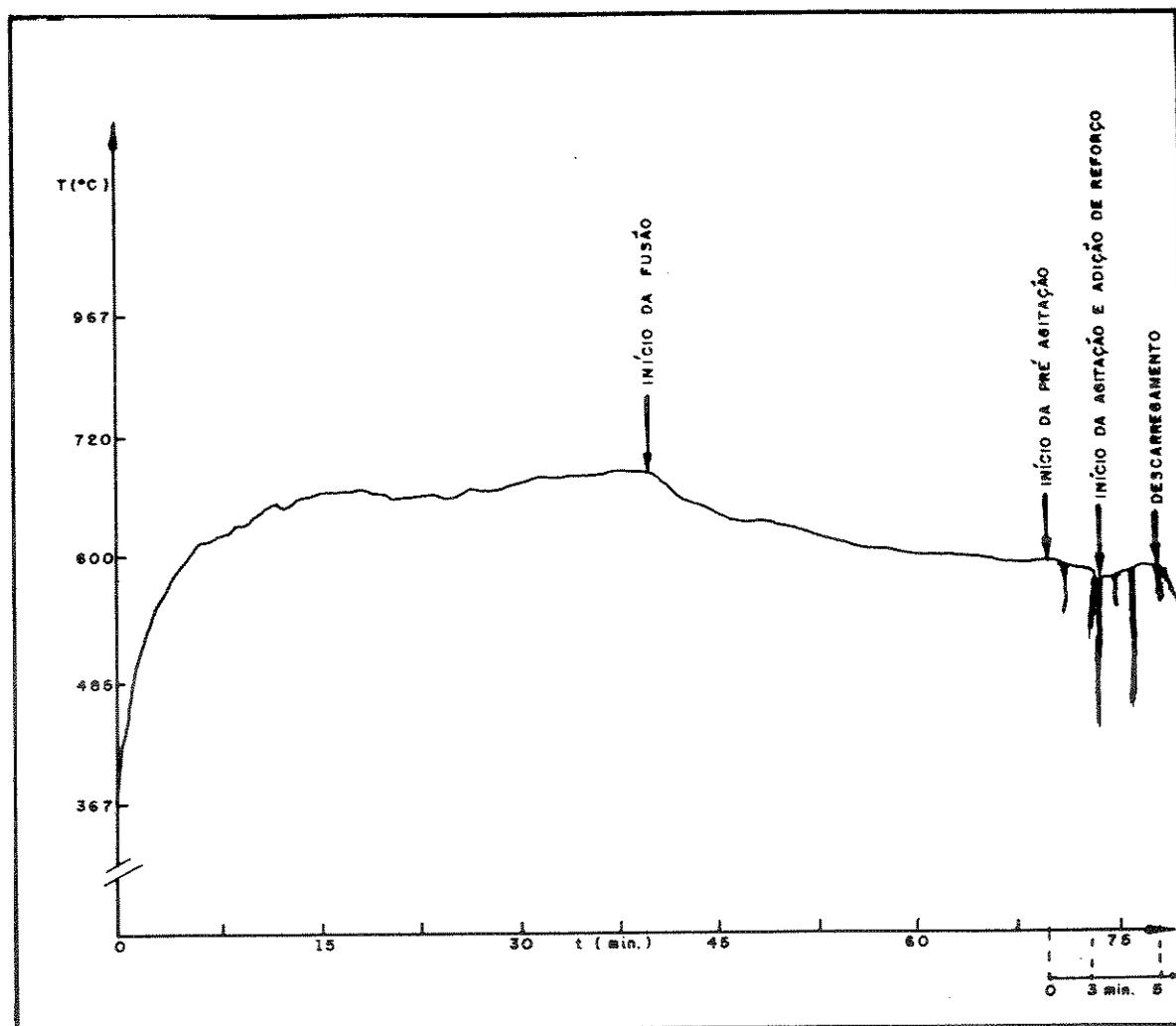


Figura VII.3 - Variação da temperatura com o tempo no material em processamento.

3. PRODUTOS OBTIDOS

Com o objetivo de verificar a adequação e eficiência do equipamento construído, na obtenção de pastas reofundidas e na possibilidade de incorporação de reforços na forma de pós, foram processados compósitos em diferentes condições operacionais.

Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

3.1. Pasta reofundida produzida, sem reforço

Inicialmente foi processada a liga sem adição de reforço para a verificação da eficiência da agitação e dos parâmetros utilizados (temperatura, tempo e velocidade de agitação) na promoção da estrutura reofundida necessária à incorporação do reforço.

A estrutura da pasta obtida, agitada à velocidade de 800 a 1000rpm, durante 5min, à temperatura de início de agitação de 853K (580°C), é mostrada na Figura VII.4.

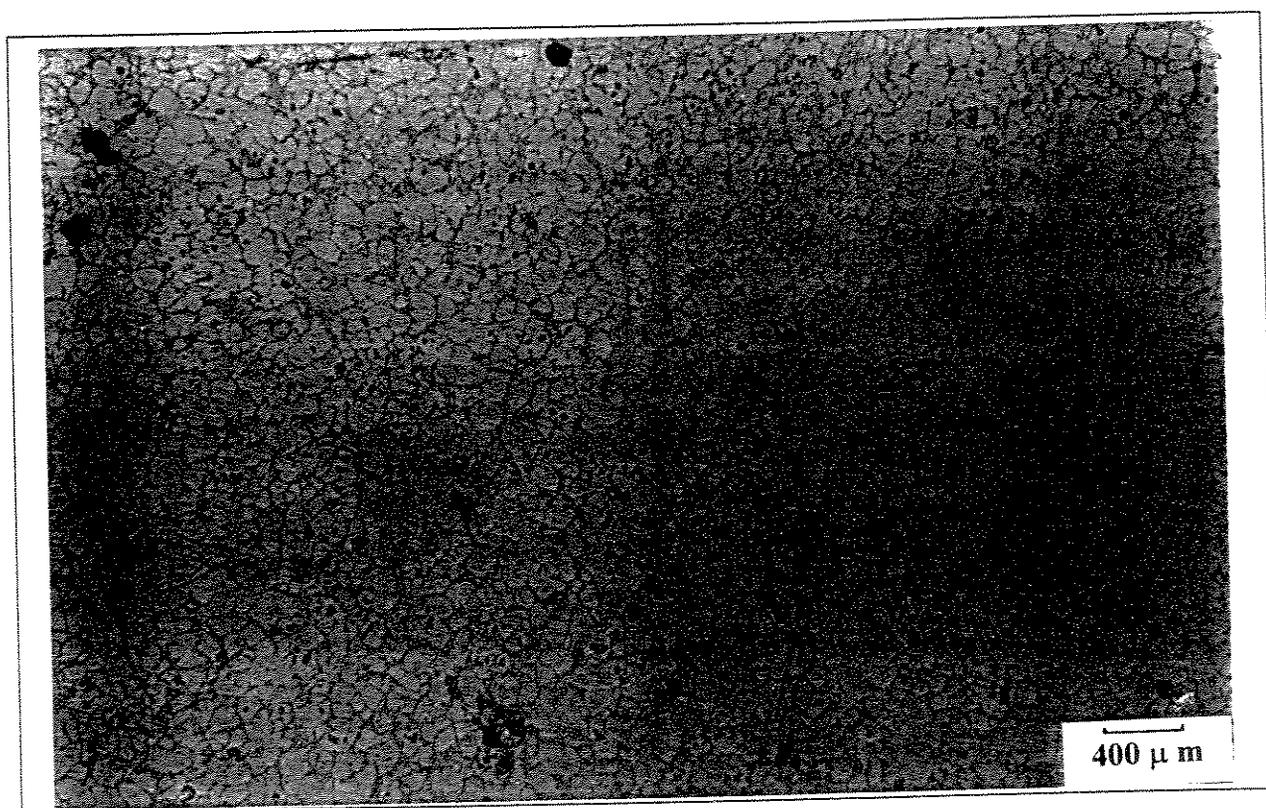


Figura VII.4 - Microestrutura da liga Al-Si-Cu após processamento sob agitação a 800-1000 rpm, a 580 °C, durante 5min.

Comparando-se com a estrutura da liga obtida por solidificação convencional (Figura VI.1) pode ser observada a estrutura totalmente globular, típica do estado reofundido obtida no processamento envolvendo agitação. A pasta é agora constituída de fase primária Al- α com morfologia de glóbulos e não dendrítica. A fase principal Si se encontra como partículas finas, indicando sua formação a partir do líquido remanescente na pasta quando do seu resfriamento rápido em água.

Por este resultado pode ser atestada a adequação do equipamento construído, para a produção de pasta com estrutura reofundida.

3.2 Adição de reforço à liga líquida

Para a verificação da possibilidade de incorporação de reforço ao material no estado líquido, foi feito experimento preliminar de adição de 3% em peso de grafite na liga totalmente líquida, a temperatura de 913K (640°C). O resultado obtido é apresentado na microestrutura da Figura VII.5. A foto foi tirada na região do topo do lingote obtido.

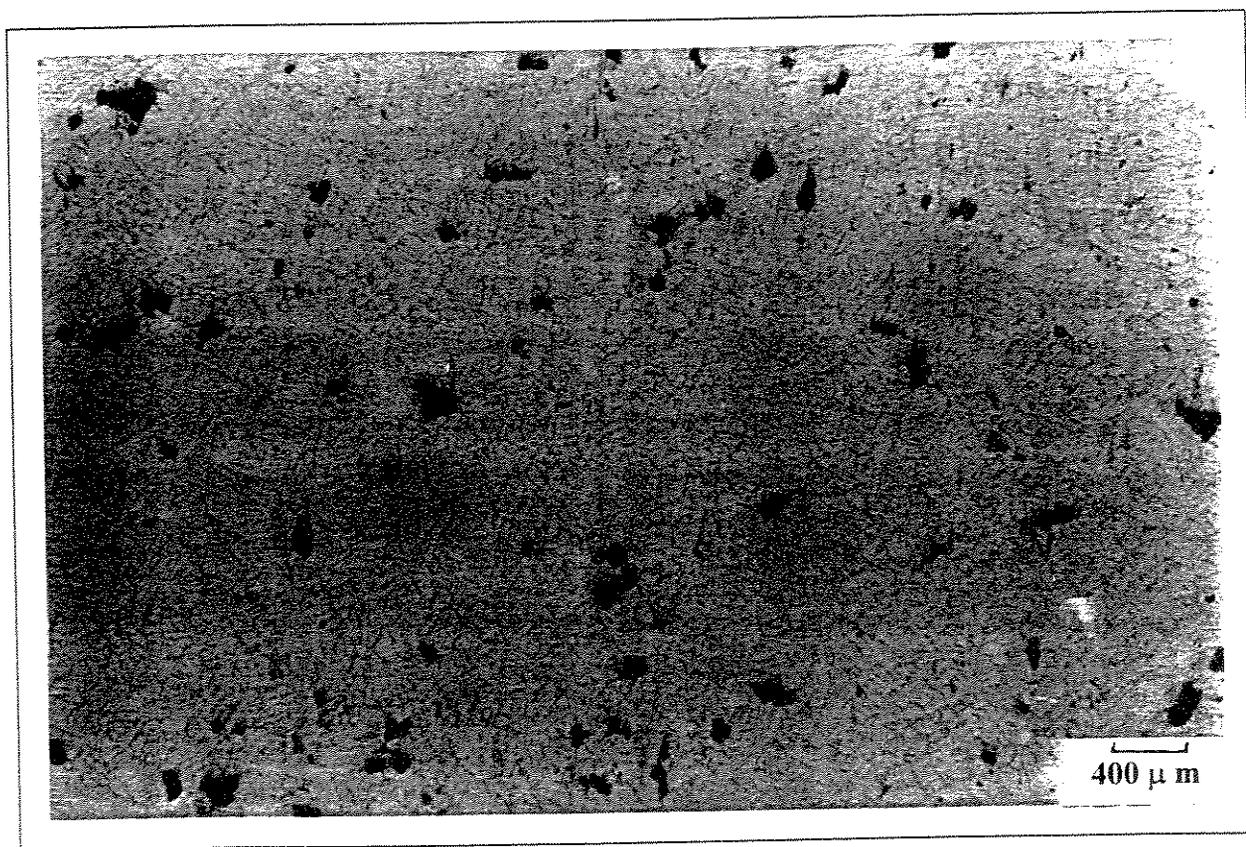


Figura VII.5 - Microestrutura da liga Al-Si-Cu com adição, no estado líquido, de 3% grafite.

O material sofreu agitação somente durante a operação de adição do reforço, sendo em seguida resfriado rapidamente.

Pretendeu-se com este experimento verificar comparativamente as possibilidades de incorporação de reforço à liga nos estados líquido e pastoso.

Pode ser observada a presença de partículas de grafite razoavelmente dispersas na matriz, na região de análise, no entanto somente uma faixa de cerca de 2cm de espessura, no topo do lingote, apresentou reforço, indicando a flutuação do pó de grafite no metal líquido.

3.3 Compósitos produzidos

A Figura VII.6 apresenta lingotes típicos de compósitos produzidos pela adição de grafite e negro de fumo à liga Al-Si-Cu no estado reofundido.

Todos os lingotes obtidos apresentaram macroporosidades e vazios, devido à forte agitação empregada em atmosfera não controlada e ainda devido ao arraste mecânico do material pastoso pela hélice de agitação, quando do abaixamento do cadinho em direção ao sistema de refrigeração.

Os lingotes de compósito reforçados com grafite apresentaram aparentemente melhor acabamento superficial que os reforçados com negro de fumo.

Não foi verificada sensível diferença na aparência dos lingotes produzidos com um dado reforço, para as duas diferentes concentrações utilizadas, dentro dos limites dos teores de reforço empregados.

A Figura VII.7 apresenta seção transversal usinada de lingotes típicos dos compósitos produzidos, podendo ser observada a presença de partículas de grafite ou negro de fumo por toda a seção, distribuídas de maneira bastante uniforme.

Podem também ser observadas porosidades produzidas pela retenção de ar no material; foi observado pequeno aumento na quantidade de poros no compósito, com o aumento do teor de reforço empregado.

Esta distribuição do reforço se repete na seção longitudinal dos lingotes, os quais portanto não apresentaram regiões enriquecidas de reforço, indicando a sua incorporação por todo o volume do metal.

As características de escoamento da liga no estado reofundido (comportamento não Newtoniano) permitem a retenção do reforço quando cessada a agitação: a sua elevada fluidez durante agitação permite a entrada do reforço; uma vez cessado o movimento, a pasta

tem sua viscosidade aumentada drasticamente, ocasionando o aprisionamento das partículas do reforço entre os glóbulos da fase sólida da pasta, não permitindo a sua decantação ou flutuação.

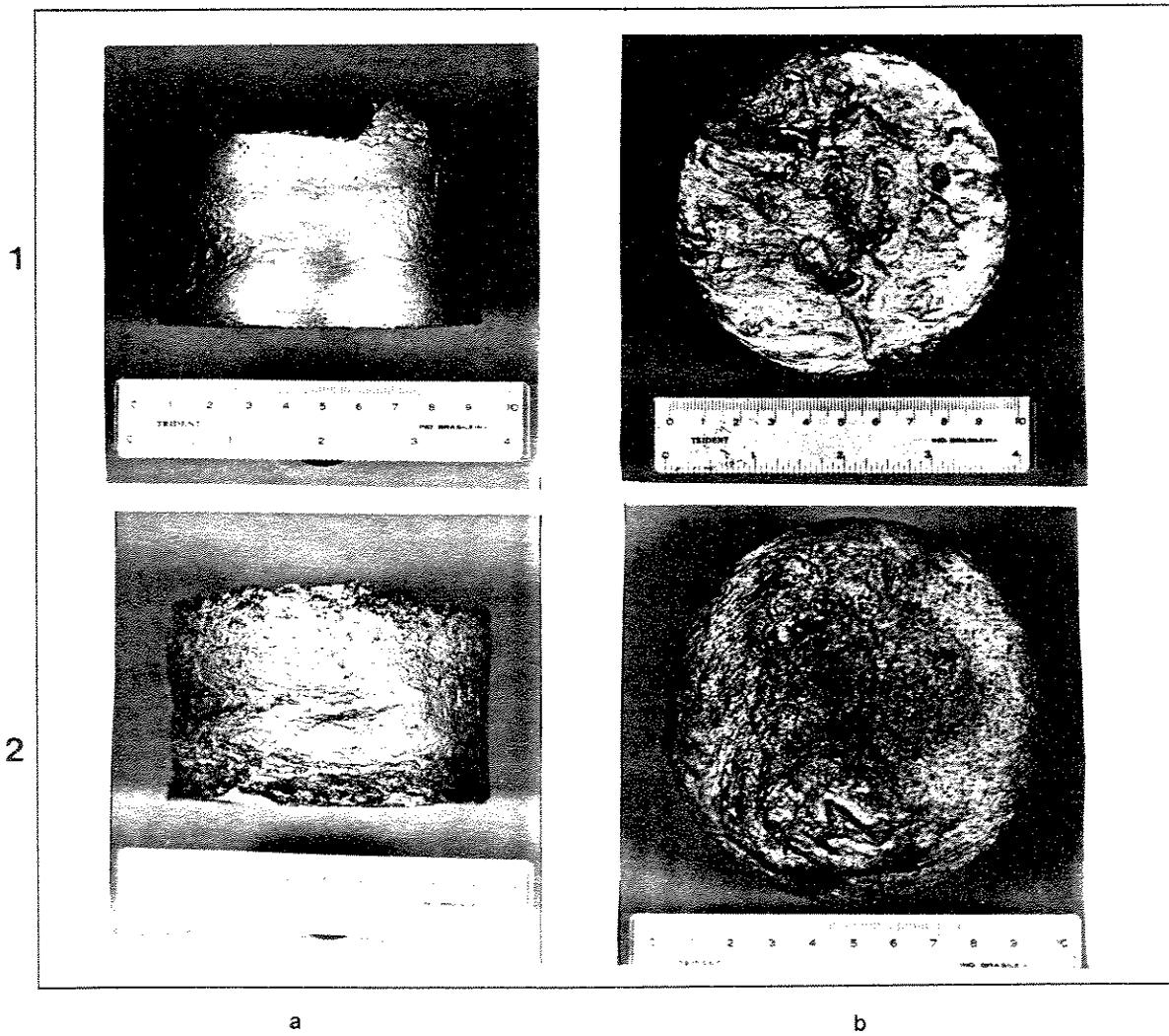


Figura VII.6 - Lingotes típicos de compósitos de Al-Si-Cu+ C produzidos no equipamento construído:

- a) vista lateral; b) vista de topo;
- 1) reforço: 2,5% em peso de grafite;
- 2) reforço: 2,5% em peso de negro de fumo.

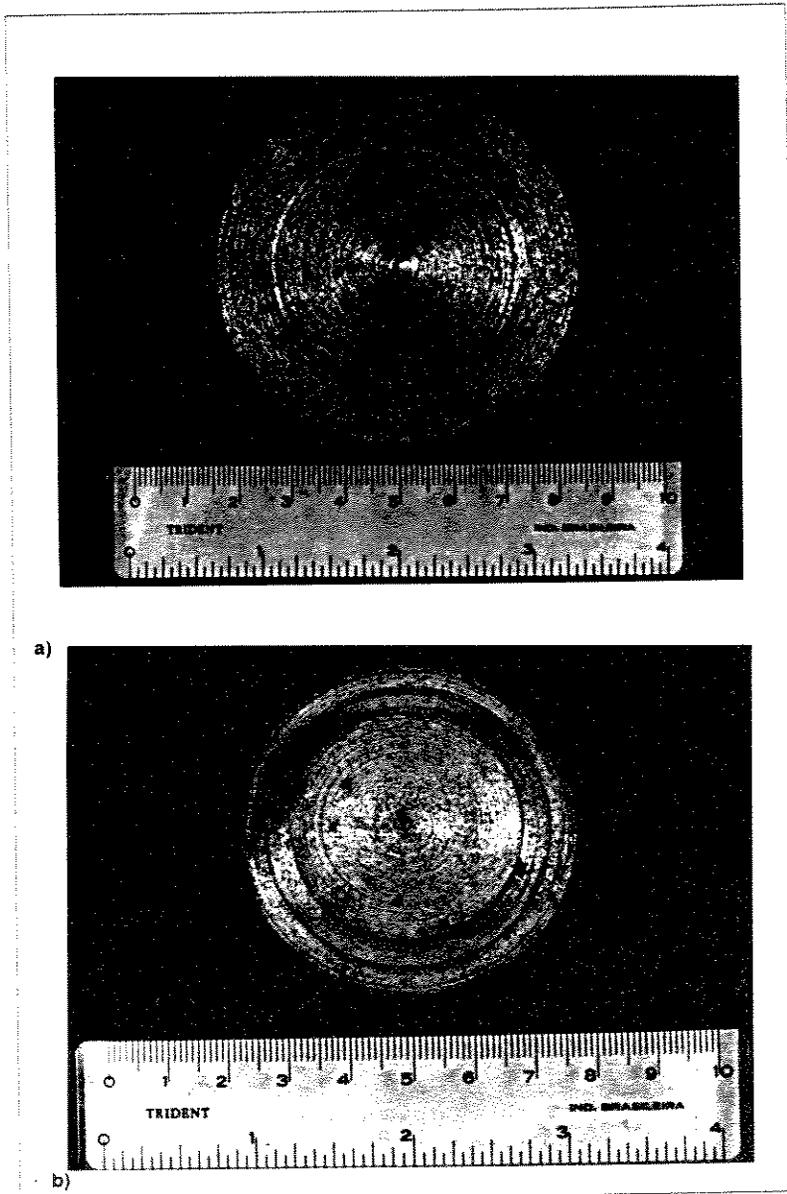


Figura VII.7 - Seção transversal de lingotes da liga Al-Si-Cu reforçada com a) 2,5% em peso de grafite; b) 2,5% em peso de negro de fumo.

Uma melhor análise da distribuição dos reforços nos compósitos produzidos pode ser feita pela observação das suas microestruturas, apresentadas a seguir.

Para o caso do reforço grafite (Figura VII.8) os resultados mostram uma dispersão apenas razoável do reforço na matriz, para ambos os teores empregados. Esta razoável dispersão, no entanto, não difere substancialmente de dispersões típicas apresentadas na literatura, para compósitos particulados fabricados por compo-fundição (Giot, F., 1987; Caron, S., 1990; Rohatgi, P., 1990; Miwa, K., 1992).

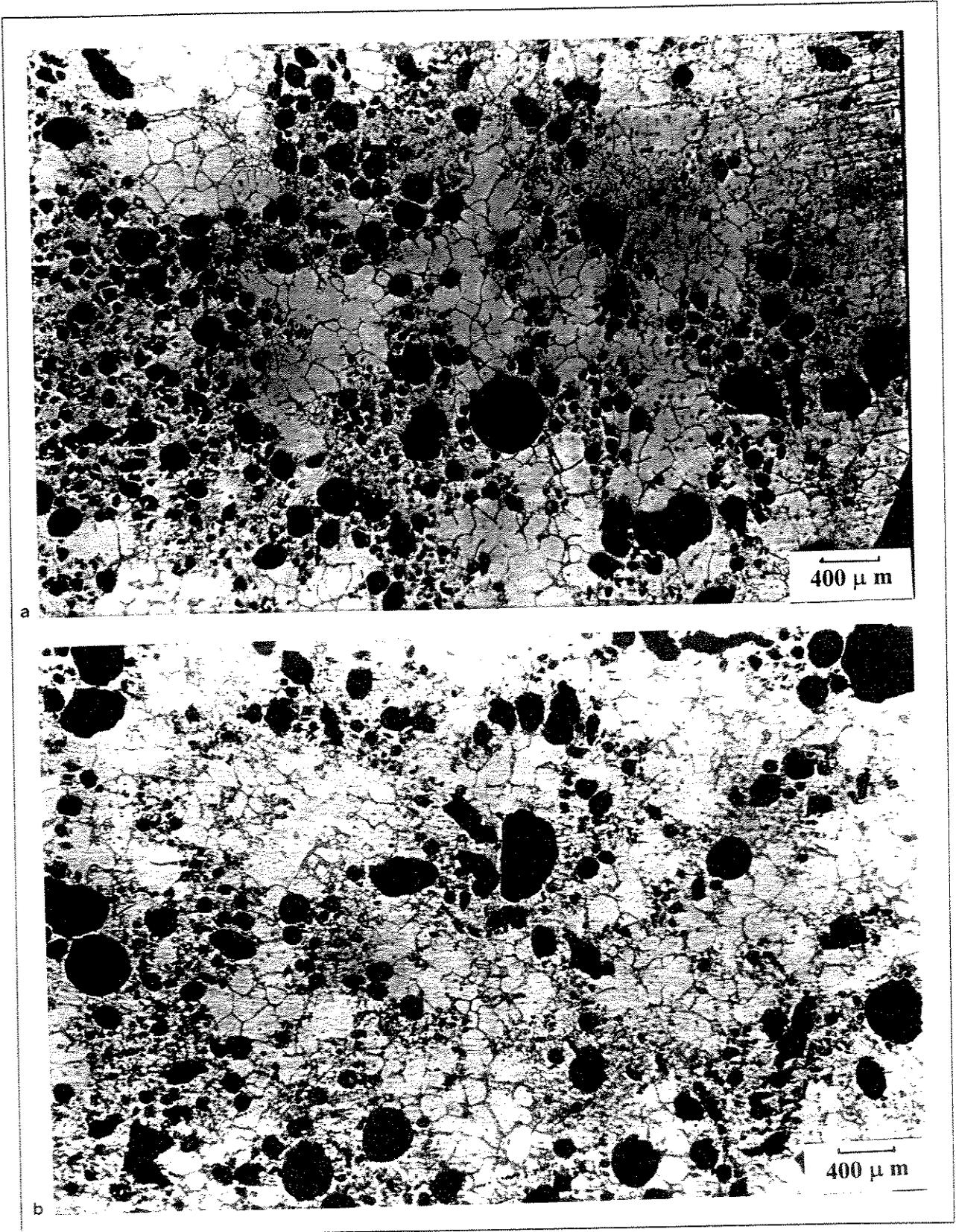


Figura VII 8 - Microestrutura dos compósitos Al-Si-Cu+ grafite produzidos no equipamento construído: a) 1,25% em peso de reforço; b) 2,5% em peso de reforço.

Pode ser observado no compósito produzido, uma certa tendência ao aumento da quantidade de partículas de grafite de grandes dimensões, com o aumento da quantidade de pó adicionado; indicando talvez menor eficiência na dispersão durante a operação de adição.

Comparando-se a Figura VII.8 com a Figura VII.5 pode-se comprovar a maior eficiência de incorporação do reforço na pasta reofundida do que no metal líquido. A microestrutura do compósito mostra claramente a morfologia globular da fase primária, típica de reofundidos.

No caso de compósitos reforçados com negro de fumo, cujas microestruturas são apresentadas na Figura VII.9, pode ser observada uma melhor dispersão do reforço, quando comparada com a do compósito reforçado com grafite. As reduzidas dimensões do pó de negro de fumo permitem sua acomodação no líquido contido entre os glóbulos da fase primária na pasta reofundida, resultando em uma melhor dispersão.

Também pode ser observada uma certa tendência à ocorrência de partículas de reforço de grandes dimensões com o aumento do teor de reforço adicionado. Os resultados obtidos com a adição do negro de fumo podem ser consideradas superiores aos obtidos com o emprego de grafite, em termos de sua distribuição na matriz metálica. Se comparados com dados da literatura (Girof, F., 1987; Caron, S., 1990; Rohatgi, P., 1990; Miwa, K., 1992), estes resultados podem ser considerados muito bons e atestam a eficiência do equipamento construído, na produção deste tipo de compósito.

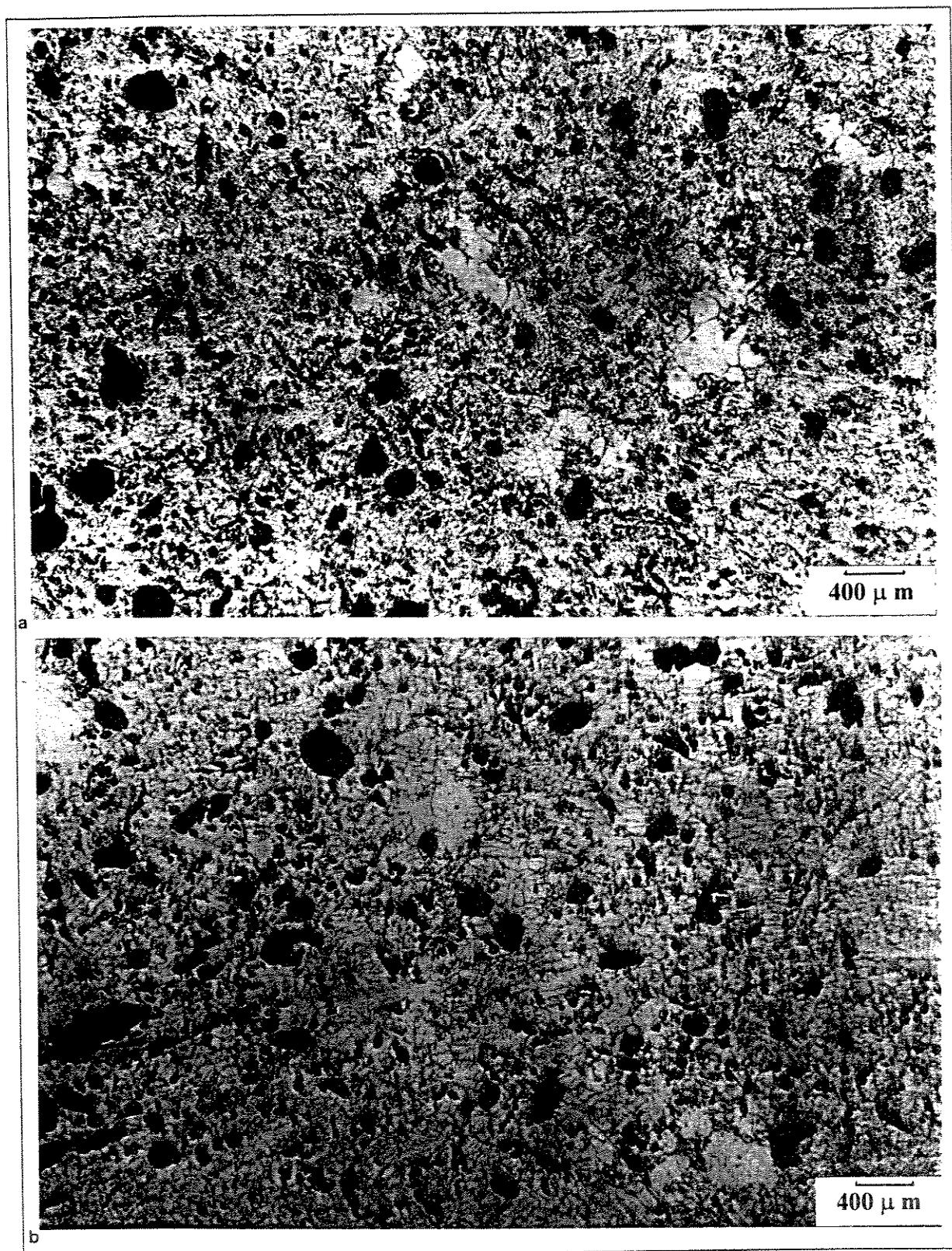


Figura VII.9 - Microestrutura dos compostos Al-Si-Cu + negro-de fumo, produzidas no equipamento contruido: a) 1,25% de reforço; b) 2,5% de reforço.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES

SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS

CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitem as seguintes conclusões:

1.1. Desempenho do equipamento construído

O equipamento construído se mostrou adequado à produção de pastas metálicas com estrutura reofundida e à produção de compósitos a partir destas pastas, isto é, por processo de compo-fundição.

Seu desempenho geral se mostrou apropriado, tanto no aspecto mecânico quanto no elétrico e no térmico.

O desenho do equipamento permite a produção de lingotes de reofundidos ou de compósitos, com cerca de 800g (para Al e suas ligas), no próprio cadinho de mistura, sem, portanto a necessidade de vazamento, o que seria dificultado dada a elevada viscosidade do material na condição reofundida, com ou sem reforço.

O desenho do equipamento permite uma boa visualização e acompanhamento do processamento, por ser realizado com forno aberto.

Outras características favoráveis do equipamento construído são: projeto bastante simples, facilidade de construção, baixo custo, facilidade de operação, versatilidade, podendo ser adaptado a diferentes condições de agitação e reprodutibilidade de resultados.

O melhor sistema de agitação testado, para a produção de compósitos, é o de rotor único com hélice na extremidade, contendo pás com bordas voltadas para baixo. Neste caso menor turbulência é provocada no metal, sem, no entanto, comprometer a qualidade da pasta reofundida obtida e a incorporação do reforço.

Uma desvantagem do equipamento está no fato do forno ser aberto, pois facilita a entrada de ar no compósito neste caso particular levando à oxidação do Al. O uso de atmosfera protegida com gases inertes resolveria o problema.

1.2. Capacidade de produzir pastas reofundidas

Os resultados obtidos, em termos de microestrutura das pastas e compósitos produzidos, constataram a eficiência do equipamento construído na promoção da adequada agitação para a promoção da globularização da estrutura em solidificação.

Pastas reofundidas com sólido perfeitamente globular, de pequenas e homogêneas dimensões, sem líquido retido em seu interior e ainda ausência de morfologias intermediárias tipo rosetas, foram obtidas, comprovando a eficiência do processamento no equipamento.

1.3. Capacidade de produzir compósitos

1.3.1 Características dos lingotes

Lingotes de compósitos da liga Al-3,4%Si-2,8%Cu contendo 1,25% e 2,5% em peso de grafite e negro de fumo foram obtidos com sucesso, com o reforço bem distribuído por todo o volume de metal; ao contrário dos lingotes aos quais o reforço foi adicionado à liga no estado líquido, o que resultou na sua presença apenas na parte superior do lingote, devido à sua flutuação.

O acabamento superficial dos lingotes reforçados com negro de fumo se apresentou pior que o dos reforçados com grafite.

Macroporosidade foi observada em todos os lingotes, sendo maior para os valores mais altos de reforço, para ambos os tipos de reforços empregados.

1.3.2. Compósitos Al+grafite

Os compósitos reforçados com grafite apresentaram microestrutura com aceitável dispersão do reforço por todo o volume da matriz de Al, para ambos os teores de pó utilizados.

O aumento do teor do reforço levou ao aumento da possibilidade de aglomeração de suas partículas, dificultando sua incorporação e prejudicando a sua dispersão na microestrutura.

1.3.3. Compósitos Al-negro de fumo

Os compósitos reforçados com negro de fumo apresentaram microestrutura com boa dispersão do reforço por todo o volume da matriz de Al, para ambos os teores de pó utilizados.

Neste caso a dispersão obtida foi superior à obtida para o compósito reforçado com grafite, dadas as menores dimensões do negro de fumo. Menor quantidade de aglomerados de também menores dimensões foram observadas, quando comparados com o compósito contendo grafite.

Também para o caso do negro de fumo o aumento do teor do reforço levou ao aumento da possibilidade de aglomeração de suas partículas, dificultando sua incorporação e prejudicando a sua dispersão na microestrutura do compósito.

1.4. Considerações sobre as metas propostas

Pelos resultados obtidos neste trabalho podemos considerar que as metas inicialmente propostas foram atingidas: foi construído um equipamento capaz de produzir reofundidos e compósitos da liga Al-3,4%Si-2,8%Cu, o qual pode, no entanto, ser utilizado para outras ligas não ferrosas com temperatura de trabalho da ordem de 923K (650°C).

O equipamento pode e deve ainda ser aperfeiçoado; tendo, no entanto, se mostrado eficiente, e vindo suprir a falta de equipamentos para a compofundição e consequentemente, permitir a continuidade das pesquisas nesta área.

2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Bruck (1986) utilizou uma substância orgânica, o succinitrile (SCN) com as seguintes propriedades: transparência no estado líquido; solidificação dendrítica, de maneira semelhante aos metais; solidificação à temperatura ambiente 286K (13°C); aparência esbraquiçada no estado sólido devido aos contornos de grãos, para o estudo de reofundição.

A sugestão no caso seria de se utilizar o mesmo produto para o estudo da compo-fundição, utilizando ainda cadinho transparente para facilitar a visualização do processo.

Outra sugestão está baseada nos estudos realizados e na experiência obtida com este trabalho e consiste basicamente em dividir o processo de compo-fundição em estágios ou etapas consecutivas, isto implicaria em reprojeter o equipamento, dividindo-o em três partes, a primeira responsável pela reofundição da liga metálica, a segunda responsável pela mistura e a terceira responsável pela homogeneização.

Para o primeiro e terceiro estágios poderiam ser utilizados cilindros e para o estágio intermediário poderia ser utilizada uma hélice.

Seria no caso conveniente o uso de um forno com três zonas de aquecimento independentes para melhor controle da temperatura, porém isto não é obrigatório.

Uma terceira sugestão seria o estudo de outros sistemas matriz/reforço e de parâmetros que influenciam o processo, utilizando o equipamento desenvolvido.

Sugere-se ainda o uso de hélices duplas e paralelas para promover o cisalhamento do metal entre hélices durante a agitação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABE, Y., KOHIRI, S., FUJIYAMA, K., ICHIHI, E. - "Progress in Science and Eng. of Composite Material" - edited by Hayashi et al., Tokyo - 1982.p56-60.

ABREU, N.T. - "Tabela de Fatores de Conversão de Unidades no Campo de Engenharia de Materiais"- Universidade Federal de São Carlos, 1989, p.67,109-110,112.

ALEXANDER, J. A., SHAVER, R. G. e WITHERS, J. C. - "Critical Analysis of Accumulated Experimental Data on Filament Reinforced Metal Matrix Composites" - AS Report NAS W- 1779, junho 1969.

AMES, W., ALPAS, A. T. - "Wear Mechanisms in Hybrid Composites of Graphite- 20 Pct SiC in A356 Al Alloy" - Metallurgical and Materials Trans. A; Vol. 26a., janeiro 1995, p. 85-98.

ASANUMA, H., OKURA, A. - "Studies on Fabrication of Carbon Fiber Reinforced Al Composites by The Plasma Spray and Roll Diffusion Bonding Method" - Report of the Research Group for Fiber-reinforced Al-MMC, Osaka, Japão, junho 1988, p. 61-69.

ASSAR, A., MAHALLAWY, N., TAHA, M. A. - "Influence of Processing Variables on Structure and Porosity in Stir-Casting Al-Cu Alloys" - Metals Technology, vol. 9, maio 1982, p.165-170.

BALASUBRAMAIAN, P. K., WEANER, S. C. - "Casting and Extrusion Characteristics of an Al-Zn-Mg Alloy Composite Containing TiO₂ Dispersions" - Composite Science And Technology vol.39, 1990, p.425-259.

BANERJI, A., SURAPPA, M. K., ROHRATIG, P. K. - "Cast Aluminium Alloy Containing Dispersion of Zincon Particles" - Metall. Trans. vol. 14B, junho 1983, p. 273-280.

BARNES, H.A., HUTTON, J.F., WALTERS, K. - "An Introduction to Rheology", Rheology series, 3, ed. Elsevier Science Publisher B.V., New York, 1989, p.20-21.

BLAU, P. J., MARTIN, R. L. - "Friction and wear of Carbon Graphit Materials against metal and ceramic interfaces"- Tribology International, vol. 27, n°6, 1994, p. 413-422.

BOWMAN, R., NOEBE, R. - "Up-and-coming MMCs" - Advanced Materials and Process, agosto 1989, p. 35-40.

BRACKE, P., SCHURMANS, H., VERHOEST, J. - "Inorganic fibers and Composite Materials" - Pergamon Press, Oxford, U.K. 1983.

BROUTMAN, L. J., KROCK, R. - "Composite Materials - Metallic Matrix Composites" - Editado por Kreider, G. K. - Academic Press, New York, 1974, vol. 4.

BRUCK, R. S., KAUP, T. - "Rheocasting - Ponto de Partida para Novos Processos de Fundição e Solidificação" - Relatório do Setor de Ciências e Tecnologia SECTEC da Embaixada do Brasil em Bonn, julho 1986.

CARON, S., MASOUNAVE, J. - "A Literature Review on Fabrication Techniques of Particulates Reinforced Metal Composite" - Proc Int. Conference on Fabrication of Particulates Reinforced Metal Composites, Montreal, Canadá- setembro 1990, p.79-86.

CARVALHO, B., ROBERT, M. H. - "Microstructural modifications in Al-5,7%Cu + 30% vol. fibers during isothermal heat treatment" - 2nd Annual Conference of Metallurgists, Quebec, Canadá, 1993, vol. 13, p. 227-239.

CATÁLOGO COPEBRÁS, (Negro-de-Fumo), 1995

CHAWLA, K. K. - "Composite Materials - Science and Technology" - Springer-Verlag, New-York, 1987.

CHOH, T., KAMMEL, R.; OKI, T. - "Wettability of graphite to liquid Aluminum and the effect of all aging elements on it" - Z. Metallkde, Bd. 78, H4--1987, p. 286-290.

CLEGG, J., CENG, M. S., et alli - "Cast Metal Matrix Composites" - The Foundryman, agosto-setembro 1991, p.318-324.

CORNIE, J. A et alii - "Processing of Metal and Ceramic Matrix Composites" - Cambridge, MA02139, Ceramic Bulletin, vol.65 n° 2, 1986, p.229-304.

CORNIE, J. A., MOON, H. K., FLEMINGS, M. C., - "A Review of Semi-Solid Slurry Processing of Al Matrix Composites", Cambridge, Proc.of Fabrication of Particulates, 1990, p. 63-78.

DAVIS, L. W. - "How Metal Matrix Composites Are Made" - Fiber Strengthened Metallic Composites, ASTM STP "427", American Society for Testing and Materials, 1967, p. 69.

DUBBEL - "Manual da Construção de Máquinas ", 13ª edição alemã, TOMO I, ed Hemus, 1974, p.406-407.

FASCETTA, E. F. et alii - "Die Casting Partially Solidified High Copper Content Alloy"- Die Casting Engineering - setembro-outubro 1973, p. 44-54.

FLEMINGS, M. C., RIEK, R. G., YOUNG, K. P. - "Rheocasting Material Science and Engineering, vol. 25, 1976, p. 103-117.

FLEMINGS, M. C., RIEK, R. G., YOUNG, K. P. - "Rheocasting Processes" - A.F.S. Int. Cast Metals Journal, 1976, vol.1, p. 11-22.

FUKUNAGA, H. OHDE, T. - "Progress in Science and Eng. of Composite", editado por Hayashi, K. et alii - ICCM IV, Tokyo - 1982, p. 1443.

GIECK, K. - "Manual de Fórmulas Técnicas", 3ª edição, ed. Hemus, Brasil, p.28

GIROT, F. A., et alii. - "Rheocasting Al Matrix Composites"- Journal of Metals - novembro 1987, p.

GÜCKER, D. et alii - "Effect of Growth Geometry on the Structure and Phase Orientation of Al₃Ni-Al *in situ* Composite"- Materials Science and Engineering AIII, 1989, p. 163-166.

JOLY, P. A., MEHRABIAN, R. - "The Rheology of Partially Solid Alloy"- Journal of Materials Science, 1976, vol.11, p. 1393-1418.

KOHARA, S., MUTO, N. - "Degradation of Carbon Fibers in Molten Al", Report of the Research Group for Fiber-reinforced Al-MMC, Osaka, Japão, junho 1988, p. 20-25.

KREIDER, K. G., PREWO, K. M. - "Metal Matrix Composites"- Series on Composite Materials, Academic Press, New York, 1974, vol. 4 .

KREIDER, K. G. et alii - "Plasma Sprayed Metal Matrix Fiber Reinforced Composites"- A.F.M.L.- T.R., julho 1968, p. 69-119.

KREITH, F. - "Principios de transmissão de calor", 3ª edição americana, ed Edgard Blucher LTDA, 1977, p.1-34, 247-292.

KOLSGAARD, A., ARNBERG, L., BRUSETHAUG, S., - "Solidification Microstructure of AlSi7Mg-SiC Particulate Composite" - *Materials Science and Eng. A173*, 1993, p. 243-250.

LEONHARDT, G., et alii - "Interface, Problems in Al MMCs Reinforced With Coated Carbon Fibres", *Materials Science and Engineering*, Vol. A135, março 1991, p.157-160.

MAIRE, J et alii - "Carbon Fibers: Their Composites and Application" - *Int Carbon Fibers Conference*, London, 1997, p.59.

MANTELL, C. L. - "Carbon and Grafite Handbook" - Copyright by John Wiley & Sons - New York, London, Sydney, Toronto, 1968, p. 61-71.

MASSON, J. J. et alii - "Optimization of Processing Parameters and Mechanical Behavior of C Fiber Reinforced Al Matrix Composite"- *Proc 12th R.I.S.O. Int. Symposium on Materials Science*, Roskilde, Denmark, 1991, p. 509-514.

MASOUNAVE, J. et alii - "Abrasion Behavior of Particulate Reinforced Composites", *Proc. Int. Conference on Fabrication of Particulates Reinforced Metal Composites*, Montreal, Canadá, setembro 1990, p. 271-276.

McADAMNS,W.H. - "Heat Transmission", 3^o ed., New York, Mcgraw-Hill Book Company Inc., 1954.

MEHRABIAN, R.; Riek, R. G.; FLEMINGS, M. C. - "Preparation and Casting of Metal Particulate Non-Metal Composites" - *Metallurgical Transaction*, 1974, p. 1899-1905.

MEHRABIAN, R., FLEMINGS, M. C. - "Casting of Semi-Solid Aluminium Alloy" - *Int. Conf. on Light Metals*, Leoben, Viena, 1975, p. 214-217.

METCALFE, A. G. - "Interfaces in MMC(s)" - vol. 1, Academic Press, London, 1974.

MIWA, K. - "Fabrication of SiC Whisker Reinforced Al-alloy Matrix Composites by Compocasting process", *M.I.T.*, 1992, p. 398-405.

NICOLAOU, P.D., SEMIATIN, S. L. e PIEHLER, H. R. - "Design of MMC consolidation practices based on the foil /fiber/ foil approach"- *Scripta Metallurgica et Materiali*, vol. 32, n^o1, 1995, p. 57-62,.

OKADA, A., YOSHINAGA, Y. - "Wear and Frictional Characteristics of Carbon-fiber - (Al-Cu) Composites" - Trans. of the Japan Institute of Metals, 1984, vol. 5, n°10, p. 131-138.

OKADA, A., KOGUCHI, H. - "Dry wear of Al - Chopped C Fiber Composites Fabricated by the Power Metallurgical Process" - Trans. of the Japan Institute of Metals, 1983, vol.24, p.101-108.

OKURA, A, MOTOKI, K. - "Rate of Formation of Intermetallic Compounds in Al Carbon Fiber Composites"- Report of the Research Group for Fiber-reinforced Al-MMC, Osaka, Japão, junho 1988 p. 104- 114.

PRASSAD, P. R. et alii - "Microstructure and Mechanical Properties of Rheocast Al-10%Cu Alloy"- Z. Metallkde, 1982,vol.73, n° 7, p.420.

PRASSAD, P. R. et alii - "Microstructure of Rheocast Hypoeutectic Al-Cu Alloys"- Z. Metallkde, 1982, vol. 73, n° 11, p. 714-716.

PIGGOTT, M. R. - "Load Bearing Fibre Composites"- Int. Series on the Strength and fracture of Materials and Structure, Pergamon Press, 1980.

QUAAK, C., KOOL, W. H. - "Properties os semi-solid Al Matrix Composites"- Materials Science and Engineering, A188, 1994, p. 277-282.

ROHATGI, P. .K; WEAVER, S. C. - "Metal Matrix Comosites - Advances in Materials Technology: MONITOR" - Publ. UNIDO, n° 17, fevereiro 1990, p. 1-17.

ROHATGI, P. K; ASTHANA, R.; DAS, S. - "Characterisation of Physical, Mechanical and Tribological Properties of Metal Matrix Composites", Advances in Materials Technology: MONITOR" - Publ. UNIDO, n° 17, fevereiro 1990, p. 26-79.

ROHATGI, P. K. et alii - "Aluminium Alloy - Fly Ash Composite (Ashalloy) - Future Fondry Products for Automotive Applications"- 4th Int. Conf on Al Alloy, Vol. II, Athanta, USA, 1994, p.567-574.

ROHATGI, P.. K. et alii - "Cast Lead-free Copper Graphite Composite Alloys With Improved Machinability". AFS Transaction, 1992 , vol. 159, p. 1-8.

SILVA,C.A.L.e MEI,P.R - "Aços e Ligas Especiais", ELETROMETAL METAIS ESPECIAIS,1988,P.267.

SINGER, L.F. - "Resistência de Materiales", ed. Harla & Row Latinoamerica, México, 1962, p.80-85.

SKIBO, M. D.; SCHUSTER, D. M. - Int. Patent Application n° PCT/US83/00940, maio 1986, USA.

SNIDE, J. A.; LYNCH, C. T. and WHIPPLE, L. D. - "Current Developments in Fiber-Reinforced Composites" - A.F.M.L.- T.R. , fevereiro 1968, p. 67-359.

SPENCER, D. B.; MEHARABIAN, R.; FLEMINGS, M. C. - "Rheological Behavior of Sn-15%Pb in the Crystallization Range"- Metall.Trans., julho 1972, vol.3 p. 1925-1931.

SPENCER, D. B. - PhD. Thesis- "Rheology Liquid-Solid Mixtures of Pb-Sn"- M.I.T. - U.S.A., junho 1971.

STONE, I. C.; TSAKIROPOULOS, P. - "The Spatial Distribution of Reinforcements in PM/SiCp MMC(s) and its effect on Their Processing and Properties", Proc. ICCM-9, vol 1, Madrid, 1993, p.271- 279.

SUGANUMA, K. , NAGATOMO, K. - Fabrication of Al_2O_3 fiber preform with γ - Al_2O_3 Power binder for 6061 Alloy Matrix Composite" , Materials Science and Eng. A188, 1994, p. 353-359.

TRUMPER, R. L. - "Metal Matrix Composite"- Applications and Prospects - Engeneering Materials Division, Poole, Dorset, 1987.

URTIGA, S. L. - "Obtenção e Caracterização de Compósitos do Tipo *in situ* no Sistema Al-Nb". - Tese de Doutorado, UNICAMP , abril 1994.

VACCARI, J. A. - "Já chegaram os Compósitos com Matriz de Al Fundido" - Máquinas e Metais, dezembro 1991, p. 28-35.

VEDANI, M. et alli - "Influence of Interface Properties on Mechanical Behavior of Particle Reinforced MMC(s)", Materials Science and Technology, fevereiro 1994, p75-82.

VOGEL, A.; DOHERTY, R. D.; CANTOR, B. - "Stir-Casting Microstructure and Slow Crack Growth". - Int. Conference in Solidification and Casting, Sheffield, Inglaterra, 1977, p. 518-525.

VINSON, J. R.; CHOU, T. W. - "Composite Materials and Their Use in Structures". - Materials Science Applied Publishers, London, 1975, p. 74-80.

VIVES, C. - "Fabrication of MC using a Helical induction stirrer", Materials Science and Eng. A(173), 1993, p. 239- 242.

WEAST,R.C.- "CRC Handbook of Chemistry and Physics", 62ND, ed C.Press,1981-1982,p.b250.

WHITE,J.L. - "Principles of Polymer Engineering Rheology", ed. Jonh Wiley & Sons,Inc,U.S.A,1988,p.217.

WILLIAMS, C.; FISHER, K. M. - "Solification Technology in The Foundry Casthouse", Metals Society, 1983, p. 137. .

YOUNG K. P.; RIEK, R. G.; FLEMINGS, M. C. - " Structure and Properties of Thixocast Steels"- Metals Technology, abril 1979, p. 130-137.

APÊNDICES

APÊNDICE "A"

CÁLCULOS PARA A DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA DO MOTOR A SER UTILIZADO NO SISTEMA DE COMPO-FUNDIÇÃO

A Figura A1 apresenta o esquema de um eixo árvore circular, do tipo utilizado como rotor no equipamento construído; com indicações das forças e deformações a que está submetido quando em movimento de rotação.

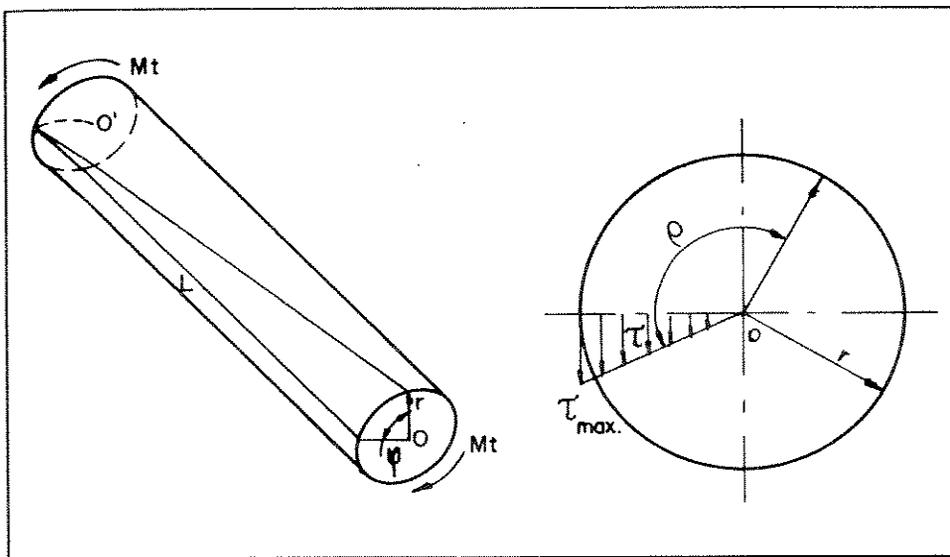


Figura A1- Representação esquemática do problema de torção-deformação de um eixo árvore circular.

A partir deste diagrama serão calculados o momento torsor e a tensão máxima no eixo. A dedução da solução matemática é apresentada no livro de SINGER, L.F.; 1962.

1 SIMBOLOGIA UTILIZADA

τ	Tensão de cisalhamento;
τ_A	Tensão admissível de cisalhamento;
τ_{max}	Tensão de cisalhamento máximo;
τ_p	Tensão limite de ruptura do Aço H13;
G	Módulo de elasticidade transversal do material;

φ	Ângulo de torção;
ρ	Distância radial ao centro do eixo;
L	Comprimento do eixo;
I_p	Momento polar de inercia;
A	Área da seção do eixo árvore;
r	Raio do eixo;
d	Diâmetro do eixo;
M_t	Momento torsor aplicado ao eixo;
P	Potência utilizada para mover o eixo;
N	Rotação do eixo (rpm);
f_s	Fração sólida;
τ_f	Tensão provocada pelo movimento do fluido;
τ_e	Tensão inicial do fluido;
η_p	Viscosidade plástica;
γ	Taxa de cisalhamento do fluido.

2

FÓRMULAS MATEMÁTICAS UTILIZADAS

$$\tau = \left(G \cdot \varphi / L \right) \cdot \rho \quad \text{(I)}$$

$$M_t = \left(G \cdot \varphi / L \right) \cdot I_p \quad \text{(II)}$$

$$I_p = \int \rho^2 da \quad \text{(III)}$$

$$\tau = \left(M_t \cdot \rho / I_p \right) \quad \text{(IV)}$$

$$I_p = \left(\pi \cdot r^4 / 2 \right) = \left(\pi \cdot d^4 / 32 \right) \quad \text{(V)}$$

$$\tau_{\max} = \left(2 \cdot M_t / \pi \cdot r^3 \right) = \left(16 \cdot M_t / \pi \cdot d^3 \right) \quad \text{(VI)}$$

$$P = 2 \cdot \pi \cdot N \cdot M_t / 60 \quad \text{(VII)}$$

$$\tau_f = \tau_e + \eta_p(\gamma) \quad \text{(VIII)}$$

3 SOLUÇÃO

Para calcular a potência necessária do motor que movera o eixo árvore, estima-se a tensão necessária para mover o fluido. Compara-se com o limite de ruptura do aço para verificar se este suportará o esforço e em caso positivo utilizar-se-a as fórmulas citadas para calcular-se o momento torsor e a potência do motor aplicado ao sistema.

Como não se dispunha de dados experimentais sobre o comportamento reológico do Al, utilizou-se dados da literatura (JOLY,P.A.;1976) referentes à liga Sn-15Pb, isto é possível uma vez que esta liga sendo mais densa que o Al implicará em maiores valores de esforço, o que valida os cálculos.

Também não se dispunha de dados sobre a resistência do aço H13 à torção, o que forçou ao uso de uma relação entre a dureza Brinell e o limite de ruptura. Como o aço H13 é muito resistente, a consideração pode ser considerada válida.

4 CÁLCULOS

A) A tensão provocada pelo movimento do Al é dada pela fórmula abaixo:

$$\tau_f = \tau_e + \eta_p(\dot{\gamma}) \quad (\text{VIII})$$

A Figura A.2 apresenta a relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento para a liga Sn-15Pb.

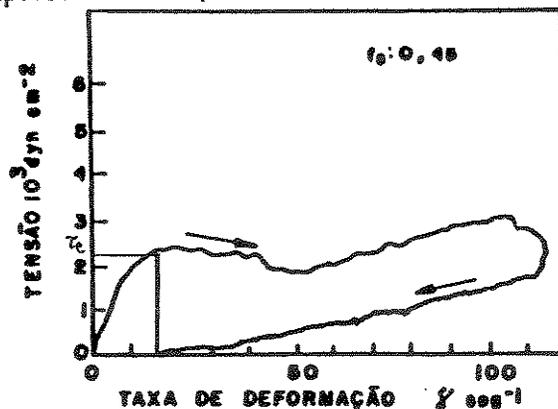


Figura A2 - Relação entre τ e $\dot{\gamma}$ para uma fração sólida de 0,45, liga Sn-15Pb (JOLY,P.A.;1976)

A Figura A.3 apresenta as propriedades reológicas da liga Sn-15Pb e permite obter dados sobre a viscosidade aparente e conseqüentemente sobre a viscosidade plástica, pois seus valores são próximos para fluidos bighanianos, e sobre a taxa de cisalhamento.

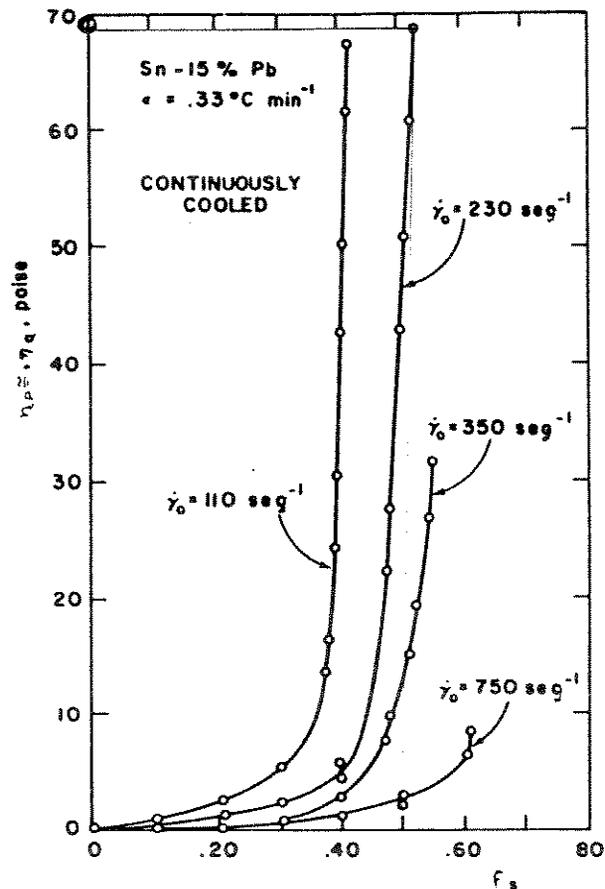


Figura A3 - Propriedades reológicas da liga Sn-15Pb refundida por Joly e Meharabian (1976): Viscosidade aparente em função da fração sólida e da tensão aplicada.

Assim, através dos gráficos das figura A.2 e A.3 podemos obter os valores abaixo

$$\tau_e = 2 \times 10^2 \text{ N/m}^2, \quad \eta_p = 7 \text{ Ns/m}^2, \quad \gamma = 230 \text{ s}^{-1}.$$

e calcular τ_f

$$\tau_f = 2 \times 10^2 \text{ N/m}^2 + 7 \text{ Ns/m}^2 \cdot 230 \text{ s}^{-1}$$

$$\tau_f = 1,81 \text{ MPa}$$

Aplica-se a τ_f um fator de segurança de 1,5 ao limite de ruptura e compara-se a tensão admissível com o limite de ruptura do material.

$$\tau_A = 1,81 \text{ Mpa} \cdot 1,5$$

$$\tau_A = 2,715 \text{ Mpa} \lll 600 \text{ Mpa} \text{ (gráfico).}$$

Pressupõe-se que o aço resista ao esforço de torção pois o limite de ruptura é muito superior à tensão que o eixo está submetido.

A figura abaixo permite obter-se dados relativos ao limite de ruptura a partir de dados de dureza Brinell.

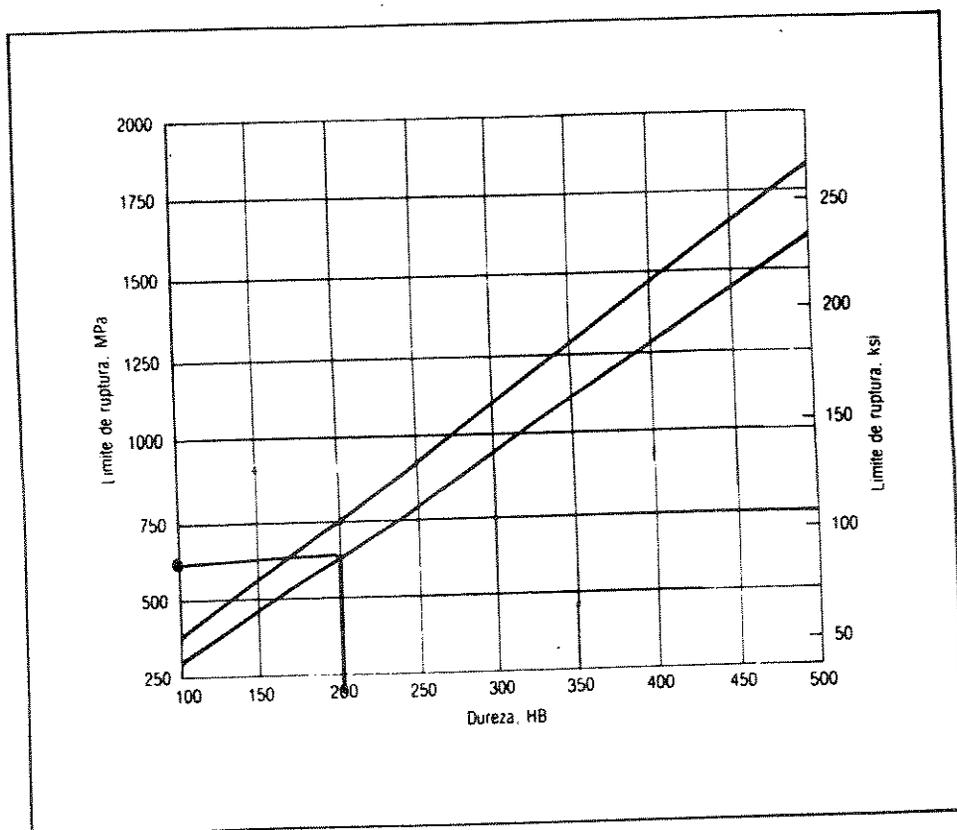


Figura A4 - Relação entre o limite de ruptura e dureza Brinell(HB) para aços nas condições de temperado e revenido, normalizado, ou laminado (SILVA,C.A.L.;1988).

$$\tau_{\max} = \left(\frac{2.Mt}{\pi.r^3} \right) = \left(\frac{16.Mt}{\pi.d^3} \right) \quad (\text{VI})$$

$$\tau_{\max} \leq 2,715 \text{ Mpa}, \quad d = 0,02 \text{ m} \quad (\text{diâmetro do eixo})$$

$$Mt = 2715 \cdot \pi \cdot (0,02^3)/16 = 0,00049297 \text{ N.m}$$

$$P = 2.\pi.N.Mt/60 \quad (\text{VII})$$

$$P = 2.\pi.1000.(0,00049297)/60$$

$$P = 0,0516 \text{ N.m/s}$$

$$P = 0,0516 \cdot 9806,65 = 506,26 \text{ Kgf.m/s}$$

$$P = 506,26 / 75.100 = 0,0675 \text{ CV.}$$

Portanto a potência de 0,25 CV do motor utilizado no sistema de composição satisfaz o necessário para mover o eixo-árvore.

APÊNDICE “B”

CALCULO DA POTÊNCIA TÉRMICA DO FORNO

Os cálculos da potência necessária para o aquecimento do forno foi dividido em etapas visando facilitar os cálculos.

Foram feitas simplificações de modo a facilitar os cálculos.

Considerou-se o forno suficientemente longo de maneira que não se levou em conta o efeito das bordas.

Considerou-se condução de calor unidimensional em regime permanente.

1 SIMBOLOGIA UTILIZADA

Q_{aq}	Calor necessário para aquecer certa massa de material da temperatura ambiente à temperatura de fusão (KJ (Kilo Joule)).
Q_f	Calor necessário à fusão de certa massa de material (KJ (Kilo Joule)).
Q_{sq}	Calor de superaquecimento de certa massa de material (KiloJoule).
c_p	Calor específico (KJ/KgK).
c_{sq}	Calor específico médio para o material fundido (KJ/KgK).
L	Calor latente de fusão (Kcal/KgK).
T_f	Temperatura de fusão (K).
T_{sq}	Temperatura de superaquecimento (K).
T_o	Temperatura da superfície externa do forno (K).
T_a	Temperatura ambiente (K).
T_i	Temperatura da região mais quente do forno (resistencia elétrica) (K).
T_f	Temperatura do forno na região onde o Al é fundido (K).

T_q	Temperatura quente genérica (K).
T_{fr}	Temperatura fria genérica (K).
q_k	Fluxo de calor por condução (W (Watts)).
K_i	Condutividade térmica de dado material indice i
A	Área da seção através da qual passara o calor por condução medida perpendicularmente à direção do fluxo (m^2).
R_k	Resistencia térmica de dado material indice k.
K_k	Condutância Térmica de dado material indice k.
r_0	Raio de uma circunferência hipotética a 1 metro do centro do forno (m).
r_i e r_i'	Raio da região de aquecimento elétrico (m).
r_f	Raio de uma região hipotética próxima ao centro do forno (m).
r e R	Raios genéricos (m).
l	Comprimento do forno (m).
A_{rt}	área de uma secção do rotor(m^2).
d'	diâmetro do rotor (m).
H	comprimento do rotor (m).

2 POTENCIA NECESSARIA PARA O AQUECIMENTO, FUSÃO E SUPERAQUECIMENTO DE DADA MASSA DE AI.

Dados:

$m=$	0,8 (Kg);
$c_p=$	0,904 (KJ/KgK);
$c_{sq}=$	0,904 (Kcal/Kg°C);
$L=$	94,5 (Kcal/Kg°C);
$T_f=$	600 °C (923 K);
$T_a=$	25 °C (298 K);
$T_o=$	65 °C (338 K)
$T_{sq}=$	680 °C (1073 K);

2.1 Cálculos

$$Q_{aq} = m \cdot c_p (T_f - T_a) = 0,8 \cdot 0,904 \cdot (600 - 25) = 416 \text{ KJ. (I)}$$

$$Q_f = mL = 0,8 \cdot 94,5 = 75,6 \text{ KJ. (II)}$$

$$Q_{sq} = m \cdot c_{sq} (T_{sq} - T_f) = 0,8 \cdot 0,904 \cdot (680 - 600) = 57,88 \text{ KJ. (III)}$$

$$Q = Q_{aq} + Q_f + Q_{sq} = 416 + 75,6 + 57,88 = 549,48 \text{ KJ. (IV)}$$

A potência de aquecimento requerida para uma hora de aquecimento, pode ser calculada como segue:

$$q = Q / (860 \times t) \text{ onde } t = 1 \text{ hora. (V)}$$

$q = 549,48 \text{ (watts).}$

3 CÁLCULO PARA VARIAS PAREDES

A Figura abaixo apresenta uma representação da transferência de calor por várias paredes como ocorre no forno de compo-fundição.

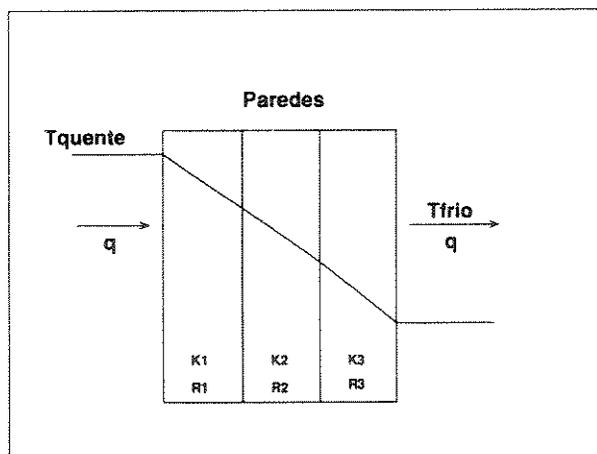


Figura A1: representação esquemática da transferência de calor através de estruturas compostas

$$q_k = -K.A \, dt / dx \quad (\text{J.B.J-Fourier-1922}). \quad (\text{VI})$$

$$q_k/A \int_0^L dx = - \int_{T_q}^{T_{fr}} K \, dt \quad (\text{VII})$$

$$q_k = AK/L \cdot (T_q - T_{fr}) \quad (\text{VIII})$$

$$R_k = L/AK, \quad Kk = A.K/L. \quad (\text{IX})$$

$$q = (T_i - T_1)/R_1 = (T_1 - T_2)/R_2 \dots\dots(T_n - T_o)/R_n. \quad (\text{X})$$

$$T_i - T_1 = qR_1;$$

$$T_1 - T_2 = qR_2;$$

$$T_i - T_{fr} = q \cdot (R_1 + R_2 + \dots R_n). \quad (\text{XI})$$

logo:

$$q = (T_i - T_{fr}) / \text{somatória de } R_n \quad (\text{XII})$$

e

$$q_{\text{total}} = DT_{\text{total}} / (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \dots R_n). \quad (\text{XIII})$$

4 CÁLCULO PARA A GEOMETRIA CILINDRICA DO FORNO COM VÁRIAS PAREDES.

$$\text{lembrando que } q_k = -K.A \, dt/dx \quad (\text{VI})$$

$$\text{onde } A = 2(\Pi.r.l). \quad (\text{XIV})$$

separando as variáveis e integrando entre T_o e r_o , T_i e r_i , T_i e r_i e t e r_i temos:

$$q_a = (T_i - T_f) / (\ln(r_i/r_f) / (2.\Pi.K.l)). \quad (\text{XV})$$

$$q_b = (T_i - T_o) / (\ln(r_o/r_i) / (2.\pi_i.K.l)). \quad (\text{XVI})$$

e

$$R_A = \ln(r_i/r_f) / (2.\pi_i.K.l). \quad (\text{XVII})$$

$$R_B = \ln(r_o/r_i) / (2.\pi_i.K.l). \quad (\text{XVIII})$$

A posição dos raios internos calculados pelo mesmo método demonstrado acima são mostrados nas Figuras abaixo:

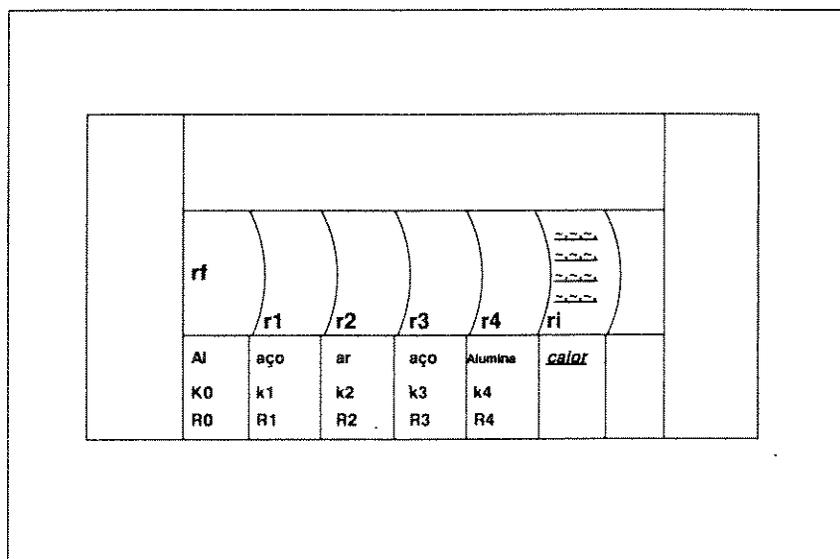


Figura B.1 - Representação esquemática das paredes internas do forno entre a fonte de calor e o centro do forno.

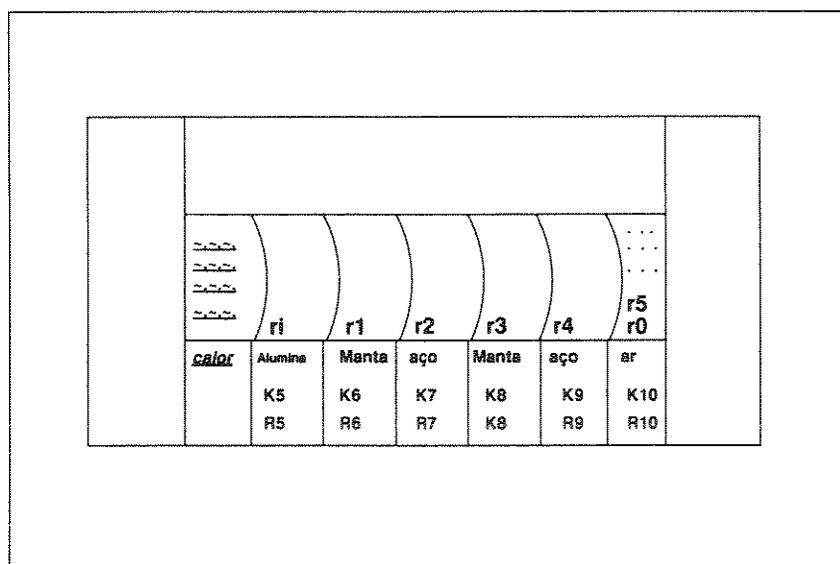


Figura B.2 - Representação esquemática das paredes internas do forno entre a fonte de calor e o ambiente externo.

TABELA B .1 Valores das resistências e condutibilidades térmicas das paredes internas ao forno (DADOS GERAIS).

R ₀	r _f	0,00001	K ₀	180	(Aluminio)
R ₁	r ₁	0,054	K ₁	29,3	(Aço)
R ₂	r ₂	0,057	K ₂	0,03365	(Ar)
R ₃	r ₃	0,06	K ₃	29,3	(Aço)
R ₄	r ₄	0,063	K ₄	0,2	(Alumina)
	r _i	0,066			(x x Kantal A1 x x)
~~~~~(CALOR)~~~~~					
					( x x Kantal A1 x x )
R ₅	r _i	0,077	K ₅	0,2	(Alumina)
R ₆	r ₆	0,08	K ₆	0,038	(Manta)
R ₇	r ₇	0,108	K ₇	29,3	(Aço)
R ₈	r ₈	0,111	K ₈	0,038	(Manta)
R ₉	r ₉	0,155	K ₉	29,3	(Ferro)
R ₁₀	r ₁₀	0,158	K ₁₀	0,03365	(Ar)

DADO DE USO LOCAL l = 0,4 METROS

$$R_0 = \ln(r_1/r_f)/2 \times \pi \times K_{Al} \times l = \ln(0,054/0,00001) \cdot 3,1415 \cdot 180 \cdot 0,4 = 0,01899725$$

$$R_1 = \ln(r_2/r_1)/2 \times \pi \times K_{Aço} \times l = 0,00073422$$

$$R_2 = \ln(r_3/r_2)/2 \times \pi \times K_{Ar} \times l = 0,60650678$$

$$R_3 = \ln(r_4/r_3)/2 \times \pi \times K_{Aço} \times l = 0,00066255$$

$$R_4 = \ln(r_i/r_4)/2 \times \pi \times K_{Alu} \times l = 0,09254863$$

---


$$R_A = R_0 + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 0,71944944$$

$$\begin{aligned}
 R5 &= \ln(r1/r_i)/2 \times \pi \times K_{alu} \times l = & 0,076038687 \\
 R6 &= \ln(r2/r1)/2 \times \pi \times K_{man} \times l = & 3,14231114 \\
 R7 &= \ln(r3/r2)/2 \times \pi \times K_{aco} \times l = & 0,000372072 \\
 R8 &= \ln(r4/r3)/2 \times \pi \times K_{man} \times l = & 3,496120151 \\
 R9 &= \ln(r5/r3)/2 \times \pi \times K_{fer} \times l = & 0,000260323 \\
 R10 &= \ln(r0/r5)/2 \times \pi \times K_{ar} \times l = & 21,8177098 \\
 &===== \\
 RB &= R5+R6+R7+R8+R9+R10 = & 28,45677349
 \end{aligned}$$

O correto no caso do cálculo de  $R_0$  e  $R_{10}$  seria usar o coeficiente global de transferência de calor. Fez-se uma aproximação.

$$q = q_A + q_B \quad (XIX)$$

$$q = ( (T_f - T_i)/R_A + (T_i - T_o)/R_B ) \quad (XX)$$

$T_i$ ( x C)	$q_A$ (watts)	$q_B$ (watts)	$q$ (watts)
1100	625,4782	36,37095	661,8492

Como a temperatura interna do forno é desconhecida durante os cálculos, admitiu-se a temperatura de 1100 °C. É uma aproximação da temperatura interna do Forno, logo

$$q_2 = 661,8492286 \text{ (watts)}$$

## 5 CÁLCULO DAS PERDAS NO TOPO DO FORNO

O cálculo da transferência de calor para o ambiente através da abertura superior e revestimento superior é baseado em equações de transferência de calor por convecção.

O calor trocado por convecção por ser calculado pela seguinte equação:

$$q = A \cdot hc \cdot (T_s - T_\infty) \quad (\text{XXI})$$

$$\text{onde } A = \Pi \cdot r_t^2 \quad (\text{XXII})$$

$$hc = Nu_L \cdot k / L \quad (\text{XXIII})$$

$$\text{e } L = 2 \cdot \Pi \cdot r_t \quad (\text{XXIV})$$

$$Nu_L = 0,0210 (Gr \cdot Pr)^{2/5} \quad (\text{correlação gráfica citada por KREITH, F. 1922}) \quad (\text{XXV})$$

ou

$$Nu_L = 0,13 (Gr \cdot Pr)^{1/3} \quad (\text{McAdams, W.H., 1954}) \quad (\text{XXVI})$$

Os valores de  $Nu_L$  e  $k$  são obtidos na literatura e correspondem a:

Para  $Gr \cdot Pr = 10^{12}$  temos  $Nu_L = 2000$ , e  $k = 0,0223 \text{ w/m.k}$

$$L = 2 \cdot 3,14159 \cdot 0,14 = 0,87965 \text{ m}$$

$$hc = 2000 \cdot 0,0223 / 0,87965 = 50,7$$

$$A = 3,14159 \cdot (0,14)^2 = 0,062 \text{ m}^2$$

$$q = 0,062 \cdot 50,7 \cdot (80 - 25) = 171,70 \text{ W}$$

$$q_3 = 171,70 \text{ (watts)}$$

## 6 CÁLCULO DAS PERDA DE CALOR NA BASE DO FORNO:

Como a base tem a mesma área do topo admiti-se  $q_4 \cong q_3$ .

$$q_4 = 171,70 \text{ (watts)}$$

## 7 PERDA DE CALOR PELO EIXO DO ROTOR PARA O AMBIENTE

Considerando o rotor como uma aleta cilíndrica imersa num ambiente onde uma extremidade é mantida a  $T_q$  e a outra a  $T_{fr}$  e considerando-se perda de calor somente por condução:

$$q = -K.A.dT/dx \quad (VI)$$

$$A_{rt} = \pi \cdot ((d')^2/4) \quad (XXVII)$$

$$q_k = AK/H \cdot (T_q - T_{fr}) \quad (XXVIII)$$

DADOS DE USO LOCAL:

$$d' = 0,02 \text{ (metros);}$$

$$H = 0,30 \text{ (metros);}$$

$$A_{rt} = 3,14159 \cdot (0,02)^2/4 = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$q_k = (3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 29,3/0,30) \cdot (600-25) = 17,63 \text{ W}$$

$q_5 = 17,63 \text{ (watts);}$
--------------------------------

## 8 PERDA DE CALOR PELO SUPORTE INFERIOR PARA O AMBIENTE

O caso do suporte inferior é semelhante ao do rotor.

$$K_{aço} = 29,3 \text{ W/m x C;}$$

$$d' = 0,04 \text{ (metros);}$$

$$H = 0,5 \text{ (metros);}$$

$$A_{rt} = 3,14159 \cdot (0,04)^2/4 = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$q_k = (1,26 \cdot 10^{-3} \cdot 29,3/0,50) \cdot (600-25) = 42,45 \text{ W}$$

$q_6 = 42,45 \text{ (watts);}$
--------------------------------

## 9 POTENCIA CALCULADA

$$q_{\text{calc}} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 1614.78 \text{ (watts)}$$

## 10 CONSIDERANDO UM DADO FATOR DE SEGURANÇA

$$F = 15 \%$$

$$q_w = q_{\text{calc}} \times 1,15 = 1856.99 \text{ (watts);}$$

## 11 POTENCIA DO FORNO

O forno foi calculado para fundir o material em 1 hora para que o material funda em menos tempo efetua-se uma correção

$$q_w = 1856.99 \text{ (watts)}$$

$$\text{-----} > 60 \text{ (min)}$$

$$P = X \text{ (watts) -----} > 30 \text{ (min)}$$

Temos a potência do forno:

$$P = 3.714 \text{ (KW)}$$

Obs: Aproxima-se para 4 KW

## 12 CÁLCULO DOS ELEMENTOS DE AQUECIMENTO

- 1) Temperatura do forno (T); T = 1100 °C;
- 2) Escolha do material (Tabelado); M = KANTHAL A-1 Fio;
- 3) Potência do elemento (P); P = 4 (KW);

4) Tensão (queda de tensão) (E)  $E = 220$  (volts);

5) Intensidade de corrente (I);

$$I = P/E = 18,18181818 \text{ A} \quad (\text{XXIX})$$

6) Resistência ohmica (R);

$$R = E/I = 12,1 \text{ (ohms);} \quad (\text{XXX})$$

7) Carga de superfície admissível (tabelado);

$$p \text{ (para M e T dados)} = p = 3 \text{ W/cm}^2;$$

8) Fator de temperatura (C);  $C = 1,069$ ;

9) Superfície irradiante (S);

$$S = ((I^2) \times C)/p = 117,7961433 \text{ cm}^2/\text{ohm}; \quad (\text{XXXI})$$

10) Resistência métrica de M(R) r  $= 0,5114 \text{ cm}^2/\text{ohm};$

11) Peso (Tabelado), Peso  $= 20,13 \text{ g/m}; ;$

12) Diâmetro (Tabelado) (D)  $= 1,9; \text{ mm};$

13)(s) Tabelado mais próximo de (S) s  $= 117,3; \text{ cm}^2/\text{ohm};$

14) Comprimento de fio necessário (L);

$$L = R/(r \times C) = 22,13333928; \text{ (metros);} \quad (\text{XXXII})$$

15) Verificação dos valores:

A bitola dentro dos valores obtido é:

$$B \& S = 12;$$

Para esta bitola temos:

(d) Diâmetro para bitola B & S encontrada  $= 2,05; \text{ mm};$

(s') Correspondente tabelado  $= 136,1; \text{ cm}^2/\text{ohm}; ;$

(r') Correspondente tabelado  $= 0,4616; \text{ ohm};$

$$l' = 24,52120821 \text{ (metros);}$$

$$p = ((I^2) \times C)/s = 2,596535119 \text{ W/cm}^2 \text{ p (Tabelado)} = 3$$

(p calculado e menor que o p aceitável);

(portanto p é aceitável).

**RESULTADOS**

TABELA B.2 - Resultados

MATERIAL DA RESISTÊNCIA =	KANTHAL A-1.
POTÊNCIA DO FORNO =	4 (KW).
TENSÃO =	220 (V).
CORRENTE =	18,18 (A)
COMPRIMENTO DO FIO =	24,52 (m)
TEMPERATURA DO FORNO =	1100 (°C)
BITOLA DO FIO (B & S) =	12 (valor comercial)