



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO PROCESSO MOLDE CHEIO PARA  
FUNDIÇÕES EM AREIA**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA  
CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**FRANCISCO GERMANO MARTINS**

**FLORIANÓPOLIS, MAIO /2003**



**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO PROCESSO MOLDE  
CHEIO PARA FUNDIÇÕES EM AREIA**

**FRANCISCO GERMANO MARTINS**

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
MESTRE EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS  
MATERIAIS, E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

---

**Prof. Carlos Augusto Silva de Oliveira, Dr.  
Orientador**

---

**Prof. Alexandre Lago, Dr.  
Coordenador do curso**

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Prof. Pedro A. N. Bernardini, Dr. Eng.**

---

**Prof<sup>ª</sup>. Ingeborg Kühn Arroyo Dr. Eng.**

---

**Prof. Carlos Enrique Nino Bohórquez, Dr. Eng.**

A minha querida e amada  
esposa, Tere.

## AGRADECIMENTOS

- A minha esposa Tere, pelo amor, dedicação e companheirismo essenciais para as minhas realizações.
- Ao professor Carlos Augusto Silva de Oliveira, pela paciência e orientação, que contribuíram em muito para minha evolução profissional principalmente pela sua amizade.
- A **SOCIESC** pelo apoio financeiro.
- Ao professor Pedro A. N. Bernardini, pela proposta inicial deste trabalho e por toda a confiança demonstrada na minha capacidade de realização do mesmo.
- Ao professor Iberê R. Duarte, pela contribuição na realização prática do trabalho, bem como consultas e orientações
- Ao professor Dácio do Nascimento, pela contribuição indispensável na preparação dos corpos de prova, consulta e orientações.
- A **TECNOCELL Ltda** e a **MINERAÇÃO NILSON Ltda** pelas doações realizadas.
- As minhas filhas Laura e Luiza pelo carinho e compreensão.
- Aos amigos da ETT, que de alguma maneira contribuíram para a conclusão deste trabalho.

## SUMÁRIO

Lista de figuras .....	vii
Lista de tabelas .....	ix
Lista de símbolos .....	x
Capítulo 1 .....	1
1- INTRODUÇÃO .....	2
Capítulo 2 .....	5
2-FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	6
2.1- Processo Molde Cheio.....	6
2.2- Histórico .....	7
2.3- Confecção dos modelos em poliestireno expansível.....	8
2.3.1- Poliestireno expansível (EPS).....	9
2.3.2- Modelo em poliestireno expansível (EPS).....	10
2.3.3- Mecanismo de gaseificação do poliestireno expansível (EPS).....	11
2.4-Sistema de canais de enchimento e alimentação .....	13
2.4.1- Elementos do sistema de canais de enchimento.....	13
2.4.2- Dimensionamento do sistema de canais.....	18
2.4.3- Sistema de alimentação de peças .....	21
2.5- Montagem do modelo e do sistema de enchimento .....	23
2.6- Pintura dos modelos e do sistema de enchimento .....	24
2.6.1- Tintas refratárias para a fundição .....	24
2.6.2- Técnicas de aplicação das tintas.....	25
2.7- Moldagem no processo Molde Cheio.....	25
2.8- Vazamento da peça .....	26
2.9- Desmoldagem/ Limpeza das peças .....	27
2.10-Defeitos gerados pela degradação do modelo de poliestireno .....	27
Capítulo 3 .....	30
3- METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	31
3.1- Metodologia .....	31
3.2- Procedimento Experimental .....	35
3.2.1- Análises da cola para o processo Molde Cheio.....	35
3.2.3 - Tintas.....	37
3.2.4-Sistema de enchimento dos modelos de EPS.....	39
3.2.5 -Areia.....	40
3.2.6- Moldagem .....	41
3.2.7- Fusão da liga Al/Si.....	41
3.2.8- Desmoldagem e acabamento.....	42
3.2.9- Ensaio metalográficos .....	42
Capítulo 4 .....	44
4-RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	45
4.1- Avaliação da cola a quente.....	45
4.2- Tintas de fundição .....	46
4.2.1- Caracterização das tintas.....	46
4.2.2- Espessura de camada de tinta em função do tempo de imersão.....	48
4.2.3- Permeabilidade da camada de tinta versus tempo de enchimento .....	50
4.3- Resultados das fusões.....	53
4.4- Areia empregada .....	62
4.5- Sistema de enchimento.....	64

4.6- Análises Metalográficas .....	67
Capítulo 5 .....	74
5-CONCLUSÕES.....	75
Capítulo 6 .....	77
6-SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	80
Capítulo 8 .....	83
ANEXO 1 .....	84
1.1-Cálculo do volume da peça .....	84
1.2-Cálculo da massa (Peso) da semi-esfera: .....	84
1.3-Cálculo da vazão gravimétrica: .....	85
1.4-Cálculo da vazão volumétrica: .....	85
1.5-Cálculo da velocidade do metal: .....	85
1.6-Cálculo da Área do Canal de descida: .....	86
1.6.1-Cálculo das dimensões dos canais de descida, distribuição e ataque.....	86
1.6.2-Cálculo das áreas dos canais para as relações.....	86
2.1-Cálculo do volume da sementeira .....	86
2.2-Cálculo da massa (Peso) da semi-esfera: .....	87
2.3-Cálculo da vazão gravimétrica: .....	88
2.4-Cálculo da vazão volumétrica: .....	88
2.5-Cálculo da velocidade do metal: .....	88
2.6-Cálculo da Área do Canal de descida: .....	89
2.6.1-Cálculo das dimensões dos canais de descida, distribuição e ataque.....	89
2.6.2-Cálculo das áreas dos canais para as relações.....	89
3.1- Cálculo do volume da peça extra .....	89
3.1.1- Cálculo do volume da peça .....	90
3.2- Requisito Térmico .....	90
3.3- Requisito volumétrico .....	91
3.4 -Cálculo da massa (Peso) da peça.....	92
3.3-Cálculo da vazão gravimétrica .....	92
3.4-Cálculo da vazão volumétrica .....	93
3.5-Cálculo da velocidade do metal .....	93
3.6-Cálculo da Área do Canal de descida:.....	93
3.6.1-Cálculo das dimensões dos canais de descida, distribuição e ataque.....	94
3.6.2-Cálculo das áreas dos canais para as relações.....	94

## Lista de figuras

Figura 2.1 – Seqüência do Processo Molde Cheio .....	6
Figura 2.2 – Molde de injeção para poliestireno expansível .....	10
Figura 2.3 – Contração dimensional do poliestireno ao longo do tempo.....	11
Figura 2.4 – Variação da composição dos principais produtos da decomposição do EPS..	12
Figura 2.5 – Esquema da decomposição do modelo pelo metal no molde.....	12
Figura 2.6 – Sistema de enchimento de uma peça fundida .....	13
Figura 2.7 – Canal de descida cônico e não cônico.....	16
Figura 2.8 – Canal de decida com bacia côncava.....	17
Figura 2.9 – Canal de distribuição escalonado .....	17
Figura 2.10 – Canal de distribuição contínuo.....	18
Figura 2.11 – Canal de ataque .....	18
Figura 2.12 – Tempo de enchimento, segundo Karsay .....	20
Figura 2.13 – Defeito de dobras em liga de alumínio .....	28
Figura 2.14 – Defeito de solda fria superficiais.....	28
Figura 2.15 – Defeito de porosidade em liga de alumínio.....	29
Figura 2.16– Aspecto visual do Carbono lustroso aderido na superfície .....	29
Figura 3.1- Modelo da semi-esfera (A) e sementeira (B).....	32
Figura 3.2- Modelo da camisa cilíndrica .....	32
Figura 3.4- Modelo da pistola de cola à quente.....	36
Figura 3.5 – Disposição do peso sobre a união de cola.....	36
Figura 3.6 – Corpo de prova pintado , com as marcações de leitura de espessura.....	39
Figura 3.7 – Molde empregado .....	41
Figura 4.1 – Superfície da peça pintada com tinta grafite.....	47
Figura 4.2 – Camada espessa de tinta deslocando .....	50
Figura 4.3 – Superfície da semi-esfera após a desmoldagem. a) Sem jateamento e b) jateada com granalha de aço S-390 .....	53
Figura 4.3 – Molde não preenchido, temperatura de vazamento baixa.....	54
Figura 4.4 – Sementeira incompleta .....	55
Figura 4.5 – Semi-esfera incompleta.....	55
Figura 4.6 – Peça com boa sanidade.....	56
Figura 4.7 – Sementeira completa com sistema de canais com bacia .....	56
Figura 4.8 – Canais e modelo da amostra F2-A3E.....	57

Figura 4.9 – Semi-esfera sem pintura com boa sanidade .....	59
Figura 4.10 – Sementeira com boa sanidade .....	60
Figura 4.11 – Vista inferior da peça .....	60
Figura 4.12 – Vista lateral da peça .....	61
Figura 4.13 – Vista com proporção da dimensão da peça .....	61
Figura 4.14 – Vista dos canais de ataque da peça .....	62
Figura 4.15 – Superfície com acabamento uniforme (areia 70/80 AFS).....	62
Figura 4.16 – Superfície com acabamento áspero (areia 50/60 AFS).....	63
Figura 4.17 – Superfície com areia aderida (20/30 AFS).....	63
Figura 4.19 – Sementeira com o sistema de canais ajustados .....	66
Figura 4.20 – Semi-esfera com bom acabamento, obtida na 2 <sup>a</sup> série de fusões .....	66
Figura 4.21 – Semi-esfera com bom acabamento, obtida na 3 <sup>a</sup> série de fusões .....	66
Figura 4.22 – Defeito de dobras ou solda fria .....	67
Figura 4.23 – Amostra F1- A3EG .....	68
Figura 4.24 – Microestrutura da amostra F1- A3EG, corte A.....	68
Figura 4.25 – Microestrutura da amostra F1- A3EG, corte B.....	68
Figura 4.26 – Microestrutura da amostra F2- A2EG, corte A.....	69
Figura 4.27 – Amostra F3- A3SZ.....	69
Figura 4.29 – Microestrutura da amostra F3- A3SZ, corte A .....	70
Figura 4.31 – Microestrutura da amostra F3- A2SG, corte A.....	71
Figura 4.32 – Microestrutura da amostra F2- A2EG, corte B .....	71
Figura 4.33 – Microestrutura da amostra F3- A3EZ, corte B.....	72
Figura 4.34 – Microestrutura da amostra F3- A3SZ, corte B.....	72
Figura 4.35 – Microestrutura da amostra F2- A2SG, corte B .....	72
Figura A1 – Semi-esfera oca.....	84
Figura A2 – Sementeira .....	87
Figura A3 – Peça extra .....	90

## Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Composição química da liga empregadas no processo.....	42
Tabela 4.1- Pontos de fusões da cola termoplástica .....	45
Tabela 4.2 – Temperatura de ruptura da cola .....	46
Tabela 4.3 – Densidades das tintas.....	47
Tabela 4.4 – Tempos de escoamento das tintas - Viscosidade cinemática.....	47
Tabela 4.5 – Espessura da camada de tinta de grafite, com 8 segundos de imersão .....	48
Tabela 4.6 – Espessura da camada de tinta de zirconita, com 8 segundos de imersão .....	48
Tabela 4.7 – Espessura da camada de tinta, com 15 segundos de imersão .....	49
Tabela 4.8 – Tempo de enchimento para a tinta de grafite.....	51
Tabela 4.9 – Tempo de enchimento para a tinta de zirconita .....	51
Tabela 4.10 – Tempo de enchimento para a tinta de grafite.....	52
Tabela 4.11 – Tempo de enchimento para a tinta de zirconita .....	52
Tabela 4.12 – Parâmetros da 1 <sup>a</sup> fusão, com relação de canais 2:2:2 .....	53
Tabela 4.13 – Parâmetros da 2 <sup>a</sup> fusão, semi-esfera .....	57
Tabela 4.14 – Parâmetros da 2 <sup>a</sup> fusão, sementeira .....	58
Tabela 4.15 – Parâmetros da 3 <sup>a</sup> fusão, semi-esfera .....	58
Tabela 4.16 – Parâmetros da 3 <sup>a</sup> fusão, sementeira .....	59

## Lista de símbolos

AFS – Unidade de medida granulométrica para areia de fundição, segundo a American Foundrymen's Society

CEMP – Comissão de Especificação de Matérias-primas

EPS- Poliestireno Expansível (polímero)

PMMA – Polimetilmetacrilato (polímero)

IT – Instrução de Trabalho (procedimento de ensaio)

$\text{Kg/m}^3$  - Unidade de densidade para polímero de poliestireno expansível

$\text{g/cm}^3$  – Unidade de densidade para metais

$\text{Kg/cm}^3$  – Unidade de densidade de tintas

$^{\circ}\text{C}$  – Unidade de temperatura, graus Celsius

GW – Unidade de potencia elétrica, gigawatts

$\text{kJ/g}$ – Unidade de calor por massa

s – Unidade de tempo, segundo

$\text{m}^3$  – Unidade de medida linear, metros cúbicos

$\text{cm}^2$  – Unidade de medida de área, centímetros quadrados

$\mu\text{m}$  – Unidade de medida linear, micron

$\text{cm}^3/\text{s}$  – Unidade de vazão, centímetros cúbico por segundos

$\text{cm}^2/\text{s}$  – Unidade de vazão, centímetros quadrados por segundos

$\text{cm/s}$  – Unidade velocidade, centímetros por segundos

kg – Unidade de medida massa, kilogramas

g – Unidade de medida massa, gramas

cSt – Unidade de viscosidade cinemática, centistokes

% – Porcentagem em massa

$nR$  – Número de Reynolds

$V$  - Velocidade do fluxo (metal) líquido

$d$  – Diâmetro do canal

$\nu$  - Viscosidade cinemática do líquido

$Q$  - Vazão de líquido em todos os pontos

$S$  - Área transversal

$\alpha$  - coeficiente global de perdas de carga

$g$  – Aceleração da gravidade

H- altura efetiva do sistema de canais

$t$  - tempo de enchimento  
 $K_f$  – Coeficiente de fluidez  
 $e$  – Menor espessura da peça  
 $A$  – área da secção de choque  
 $m$  – Peso da peça  
 $\delta$  – Densidade do metal  
 $Mm$  – Módulo do massalote  
 $K$  - Coeficiente de segurança para provocar a solidificação direcional  
 $V$  – Volume da peça ou secção  
 $S_r$  - Superfície de resfriamento  
 $V_m$  – Volume do massalote  
 $n$  – Rendimento do massalote  
 $\beta$  – Coeficiente de contração  
 $Mn$  – Módulo do pescoço do massalote  
 $a, b, c, a', a_1, b_1, b'', c''$  – Aresta  
 $A1$  - Areia de sílica, com granulometria 20/30 AFS (muito grossa)  
 $A2$  – Areia de sílica, com granulometria 50/60 AFS (grossa)  
 $A3$  – Areia de sílica, com granulometria 70/80 AFS (fina)  
 $E$  – Modelo de peça (semi-esfera)  
 $G$  – Tinta de fundição (grafite), ÁLCOOL GEL/11, marca Foseco  
 $F1$  – Primeira série de fusão  
 $F2$  – Segunda série de fusão  
 $F3$  – Terceira série de fusão  
 $S$  – Modelo de peça (sementeira)  
 $Z$  – Tinta de fundição (zirconita), ZIRCOMIL/KS 022/20, marca Refratek  
 $R$  – Raio maior  
 $r$  – Raio menor  
 $r_c$  - Raio do cilindro oblíquo  
 $h$  – Altura maior do cilindro oblíquo  
 $h_1$  – Altura menor do cilindro oblíquo  
 $h'$  – altura do massalote  
 $p$  – Proporção da altura em relação ao diâmetro  
 $n$  - número de obelisco (tronco de pirâmides)  
 $D_m$  – Diâmetro do massalote

## RESUMO

O processo Molde Cheio é um processo de fundição no qual se obtém peças metálicas a partir de um modelo em poliestireno expansível contido em uma caixa de moldar contendo areia solta, sem ligantes. O metal penetra no molde degradando termicamente o modelo e ocupa perfeitamente o seu lugar, sendo que os gases gerados durante a queima escapam através da areia.

Esse processo apresenta vantagens em relação aos outros processos de fundição, devido uma maior liberdade na concepção de projetos dos modelos, um menor consumo de energia elétrica e uma menor agressão ao meio ambiente, pois a quantidade de resíduos gerados é menor.

Esta dissertação de mestrado consiste no estudo de variáveis técnicas para a adaptação do processo Molde Cheio em a uma fundição de médio porte. As principais variáveis estudadas foram o dimensionamento de canais, duas tintas refratárias comum de fundição e uma avaliação da areia de fundição quanto a sua eficiência no acabamento superficial das peças, através da sua granulometria, visando racionalização no consumo de energia elétrica e menores níveis de agressão ao meio ambiente.

Os resultados obtidos mostraram-se promissores, uma vez que as duas tintas empregadas apresentaram boa resistência à erosão e facilidade no escape dos gases. As areias de 50/60 e 70/80 AFS também apresentaram um desempenho adequado aos parâmetros de fundição no que se refere ao acabamento superficial, bem como quanto a sua reutilização. A adaptação dos sistemas convencionais de alimentação em areia a verde para o processo Molde Cheio é viável, mas requer ajustes.

## ABSTRAT

Full Mold is a foundry process in which metallic pieces are obtained. This process starts from a model in expandable polystyrene contained in a molding box with loosen sand without additive. The metal penetrates in the thermo mold destructing the model and perfectly occupying the mold place, gases generated during it burns escape through the sand.

That process presents advantages in relation to the other foundry processes, due to the freedom in the conception of model projects, a smaller consumption of electricity and a little aggression to the environment. Due to the fact that the residues generated residues are smaller.

This master's dissertation consists of the study technical variables to the adaptation of the process to Full Mold in the medium foundry. The main variables were the channels dimensioning, two refractory common paints and an evaluation of the foundry sand as for its efficiency in the superficial finish of the pieces, through its granulometric. Looking for the rationalization in the electricity consumption and smaller aggression level to the environment.

The obtained results were shown as promising, once the two applied paints presented good resistance to the erosion and easiness in the escape of the gases. The sands of 50/60 and 70/80 AFS also presented an appropriate acting to the foundry parameters in what refers to the superficial finish, as well as for its reuse. The adaptation of the conventional systems of green sand feeding to the process Full Mold is viable, but it requests adjustments.

# Capítulo 1

## **Introdução**

## 1- INTRODUÇÃO

A constante necessidade de melhorar a qualidade dos produtos, reduzir os custos de fabricação e diminuir o impacto ambiental impõe um objetivo permanente às empresas de fundição de buscarem novas alternativas de produção. No caso específico das fundições, profundas modificações estão ocorrendo tanto pela introdução de novos processos como pelo aprimoramento dos já existentes.

A indústria de fundição cada vez mais vem desenvolvendo processos que geram fundidos de melhor qualidade, de baixo custo de produção, menor consumo de energia e mínima agressão ao meio ambiente. Essa constância, na busca de melhor qualidade aliada a um baixo custo de fabricação levou ao desenvolvimento do processo Molde Cheio. O processo Molde Cheio apresenta como características menores consumo de energia, custo de produção e impacto ambiental quando comparado a outros processos de fundição.

O processo Molde Cheio é um processo de fundição em areia sem aditivos, em que se emprega um modelo (réplica da peça) confeccionado em poliestireno expansível. Este modelo é pintado com uma tinta refratária e permanece no molde durante o vazamento, sofrendo uma degradação térmica pelo metal líquido que penetra no molde através do sistema de canais de alimentação, reproduzindo fielmente a forma do modelo degradado. Durante a queima, os gases gerados devem escapar através da camada de tinta e penetrar na areia solta, que deve permitir o seu escape com facilidade e o reaproveitamento da mesma sem tratamentos e descartes onerosos.

Nos anos 80, grandes companhias norte-americanas, européias e asiáticas iniciaram a fases de testes e implantação do processo Molde Cheio na produção de coletores de admissão, cabeçotes de motor e trocadores de calor fundidos em alumínio. A produção de fundidos em ferro cinzento e nodular concentrava-se em coletores de escape, blocos de motor, conexões, carcaças de motores elétricos e válvulas [1,2].

Na última década o processo tem crescido enormemente como pode ser observado pela indústria norte-americana, que em 1989 montou um consórcio formado por fundições, universidades e o Departamento de Energia dos EUA para pesquisar e compreender os mecanismos do processo Molde Cheio [1]. Os resultados logo apareceram; em 1994 foram produzidas 40.000 toneladas em fundidos de alumínio, em 1997 esta produção foi da ordem de 50.000 toneladas e para esta década está previsto um incremento de mais de 100% da produção [1]. Entretanto, no Brasil este processo é pouco desenvolvido.

O governo norte-americano espera que até 2020 as indústrias de fundição se adaptem ao processo, o que irá gerar uma economia de 1,1 GW de energia elétrica. Para viabilizar esta meta tem-se investido em universidades, através do Departamento de Energia, desde 1992, um valor em torno de 2 milhões de dólares por ano em pesquisa e capacitação de mão-de-obra [1,2].

O processo Full Mold (Molde Cheio) é conhecido internacionalmente através de vários nomes: “Lost foam” (espuma perdida); Policast (Evaporative Polystyrene), E.P.C (Evaporative Polystyrene Casting ou Evaporative Pattern Casting) [3].

Este processo segundo estimativas apresenta um retorno de investimentos em torno de 5 a 6 anos. Com relação ao processo em areia a verde, as análises têm indicado uma redução do custo de produção da ordem de 20 – 25 % para peças simples e de 40 – 45% para peças complexas [4]. Citações em vários artigos internacionais [1-4] fazem menção das vantagens sobre diferentes enfoques, como resumidas a seguir:

- ✓ Redução dos custos operacionais;
- ✓ Redução dos investimentos;
- ✓ Melhoramento da qualidade;
- ✓ Redução da poluição ambiental;
- ✓ Maior liberdade de projeto e
- ✓ Redução do consumo de energia elétrica.

A redução dos custos operacionais provém da :

- ✓ Eliminação da macharia;
- ✓ Utilização de areias sem aglomerante;
- ✓ Reaproveitamento de aproximadamente 99% da areia;
- ✓ Não necessidade de mão de obra especializada;
- ✓ Redução dos custos de manutenção;
- ✓ Melhoramento da qualidade;
- ✓ Redução das operações de rebarbação e usinagem;
- ✓ Alta produtividade.

A redução dos custos de investimento é obtida pelo baixo número de equipamentos empregados e pela menor área de construção requerida. Há menção [3,5] de que o custo de

uma planta para este processo, incluindo o equipamento de produção dos modelos, é cerca da metade do custo de uma fundição em areia à verde. Especificamente são desnecessárias: máquinas de machos, misturadores de areia, máquinas de moldagem. O manuseio de areia e os equipamentos de desmoldagem são simplificados, e podem-se substituir os ferramentais de macharia e moldagem por outros de produção de modelos em poliestireno expansível, mais simples e de menor custo.

Neste trabalho foi estudada a viabilidade da adaptação do processo Molde Cheio à estrutura convencional de fundição para a obtenção de fundidos em ligas de alumínio/silício hipoeutéticas. Foram fundidos três tipos de peças, com relações de dimensionamento de canais baseadas nos processos convencionais de fundição em areia a verde, duas tintas de uso comum e três granulometrias de areia de fundição. Também foi observado o comportamento do polímero empregado quanto a sua densidade.

## Capítulo 2

# **Fundamentação Teórica**

## 2-FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1- Processo Molde Cheio

O processo Molde Cheio é um processo de fundição em areia, sem aditivos, no qual se emprega um modelo (réplica da peça) que é confeccionado em poliestireno expansível. Este modelo é pintado com uma tinta refratária e com o auxílio de uma vibração externa o molde é confeccionado com o modelo no seu interior. Ao vaziar o metal no molde, o modelo sofre uma degradação térmica pelo metal líquido que penetra no molde através do sistema de canais de alimentação, reproduzindo a forma do modelo degradado. Durante a queima, os gases gerados devem escapar através da camada de tinta e penetrar na areia solta, o que permite a sua saída com facilidade. Esta areia solta pode ser reaproveitada sem tratamentos e descartes onerosos.

Após a solidificação, as peças podem ser facilmente desmoldadas requerendo pouca ou quase nenhuma rebarbação. A seqüência do processo é mostrada esquematicamente na figura 2.1.

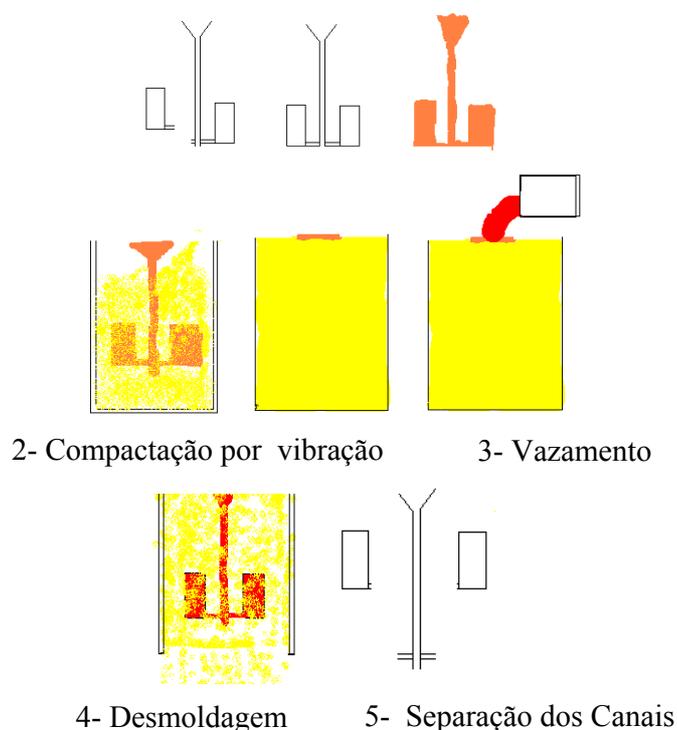


Figura 2.1 – Seqüência do Processo Molde Cheio

O processo Molde Cheio pode ser dividido nas várias etapas mostradas a seguir:

- Confecção do modelo em poliestireno expansível;
- Dimensionamento e colagem do sistema de canais de enchimento do modelo;
- Pintura dos modelos de poliestireno;
- Confecção do molde;
- Vazamento do metal;
- Desmoldagem.

Inicialmente, antes de serem descritas as diversas etapas do processo será apresentado um breve histórico do processo.

## **2.2- Histórico**

Há 1ª experiência em fundição com modelos de poliestireno foi realizada em abril de 1958, por SHROYER [2], que empregou o processo em areia à verde para confecção do molde, tendo como modelo um bloco de poliestireno expansível. O processo foi patenteado com o nome de “Cavity less casting Mold and Method for Making” [2,4]. A patente foi adquirida pela empresa alemã Grunzweig & Hartmann, que sob direção do Dr. WITTMOSER, desenvolveu o processo, melhorando a qualidade do poliestireno e do sistema de moldagem [4].

Em 1962 surgiu o primeiro artigo publicado por TAYLOR, et al, relatando experiências em fundição de peças artísticas no Instituto de Tecnologia de Massachusetts, com ligas de alumínio, bronze e ferro fundido [4].

Em 1964, SMITH patenteia o processo “Full Mold”, que utilizou moldes com areia sem aglomerantes e aditivos [5]. A partir desta data o processo começa a se desenvolver, mas é a partir da metade dos anos 70, com o fim das patentes e o final da crise energética,

que as peças artísticas deram lugar a peças complexas, seriadas e com exigências dimensionais, como coletores de admissão e blocos de motores.

Outras técnicas de moldagem sem aglomerantes juntaram-se ao processo na tentativa de torná-lo mais usual, como o uso de vácuo para eliminar gases e o processo magnético para dar mais resistência ao molde. Entretanto, devido à simplicidade e ao baixo custo, a areia sem aglomerantes é a mais utilizada. Novos materiais para confecção dos modelos foram testados, como o polimetilmetacrilato (PMMA), para solucionar os problemas que surgiram na fundição de aço, como a formação de “carbono lustroso”, carburação das peças e inclusões nos fundidos [3,5]. O PMMA apresentou bons resultados, mas seu preço é de 5 a 10 vezes maior que o do poliestireno expansível [6].

A partir dos anos 80, grandes companhias nos Estados Unidos, Canadá, França, Alemanha, Inglaterra e Japão iniciaram a fase de testes e implantação do processo em escala industrial para produção de coletores de admissão, cabeçotes de motor e trocadores de calor fundidos em alumínio. A produção de fundidos em ferro cinzento e nodular concentra-se em coletores de escape, blocos de motor, conexões, carcaças de motores elétricos e válvulas [1,2].

### **2.3- Confecção dos modelos em poliestireno expansível**

Como no processo Molde Cheio o modelo permanece dentro do molde durante o vazamento do metal líquido, há necessidade deste ser eliminado durante o vazamento do molde. Para assegurar a eliminação rápida e sem resíduos dentro da cavidade do molde, são empregados materiais poliméricos que apresentam uma degradação térmica rápida frente ao calor do metal líquido. Assim os polímeros que melhor adaptam-se à produção de modelos para fundição são o poliestireno expansível e o polimetilmetacrilato ou mistura de ambos.

Os polímeros empregados em modelos de fundição devem apresentar certas características para produzir peças fundidas de qualidade, sendo as principais: estabilidade dimensional, produzir um baixo volume de gases, excelente acabamento superficial e resistência mecânica [3,5,6].

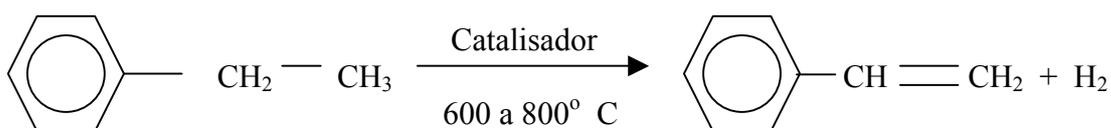
Nos itens a seguir serão discutidos os processos de obtenção do poliestireno expansível (polímero empregado no trabalho) e a fabricação de modelos para o processo Molde Cheio.

### 2.3.1- Poliestireno expansível (EPS)

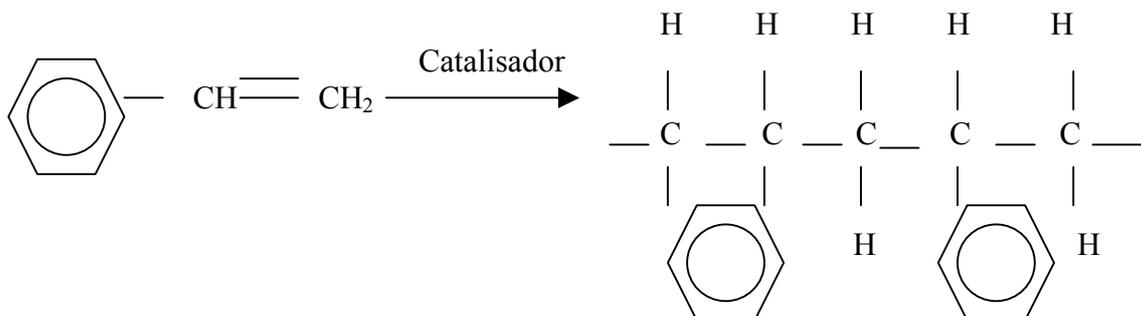
A obtenção do poliestireno inicia com a reação de Friedel- Craft entre o benzeno e o etileno na presença de cloreto de alumínio, na temperatura de 90° C e na pressão de 1atm de pressão, formando-se então o etil benzeno, reação 1. Este composto é desidrogenado na presença de óxido de ferro e nitrogênio, formando o estireno, reação 2. O estireno é destilado na presença do peróxido de benzoíla, transformando-se em um polímero de cadeia longa, o poliestireno, reação 3.



Reação 1 – Reação de Friedel – Craft para formação do etil benzeno



Reação 2 – Reação de desidrogenação do etil benzeno



Reação 3 – Reação de polimerização do estireno

O estireno é um líquido transparente, com 92% de carbono e 8% de hidrogênio em peso. A sua polimerização é do tipo em suspensão, pois no reator estão presentes o estireno, água e um tensoativo. Para se obter o poliestireno expansível adiciona-se no reator um expensor, o pentano. Esta reação necessita de forte agitação e calor. O polímero absorve entre 5 a 8 % do agente expensor. Obtêm-se o poliestireno na forma de pequenas esferas (pérolas), com um diâmetro que pode variar entre 0,4 a 1,3 mm [4-9].

### 2.3.2- Modelo em poliestireno expansível (EPS)

Após a pré-expansão, as pérolas são submetidas a uma estabilização por um período mínimo de 1 hora [4,6-10] antes de serem sopradas no molde que apresenta a forma do modelo desejado. No molde as pérolas são submetidas a uma segunda expansão, agora pela ação de vapor d'água. O molde é resfriado ocorrendo uma acomodação do poliestireno expansível e a seguir o modelo é extraído do molde [5,6,8-11]. A figura 2.2, mostra um molde para peças em poliestireno expansível [2].

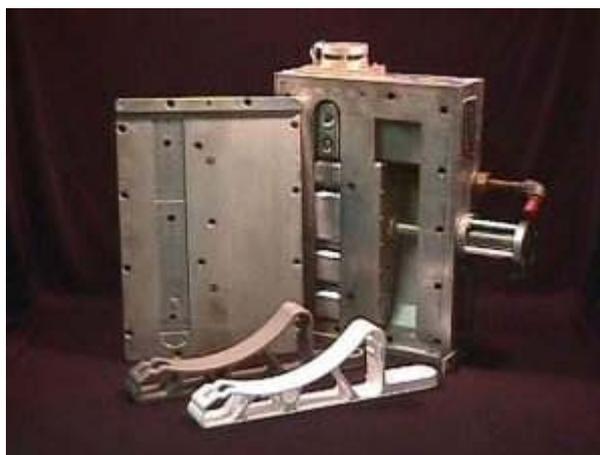


Figura 2.2 – Molde de injeção para poliestireno expansível [2]

As pérolas usadas em modelos para fundição apresentam uma densidade entre 16 e 24 kg/m<sup>3</sup> [4,5,8-10], que confere ao modelo formado uma estabilidade dimensional elevada e acabamento superficial mais homogêneo.

Os modelos de poliestireno expandido sofrem uma contração, que ocorre imediatamente após o resfriamento e aumenta com o tempo de estocagem [4,5,8-12], como pode ser observado na figura 2.3. É interessante notar que após a contração inicial do resfriamento, não mostrada na figura, há uma ligeira expansão e a seguir ocorrem contrações sucessivas. Cerca de 75% da contração total ocorre nos primeiros 7 dias [4,8] e após o vigésimo dia ela situa-se entre 0,7 - 0,9% [4], estabilizando-se ao longo do tempo.

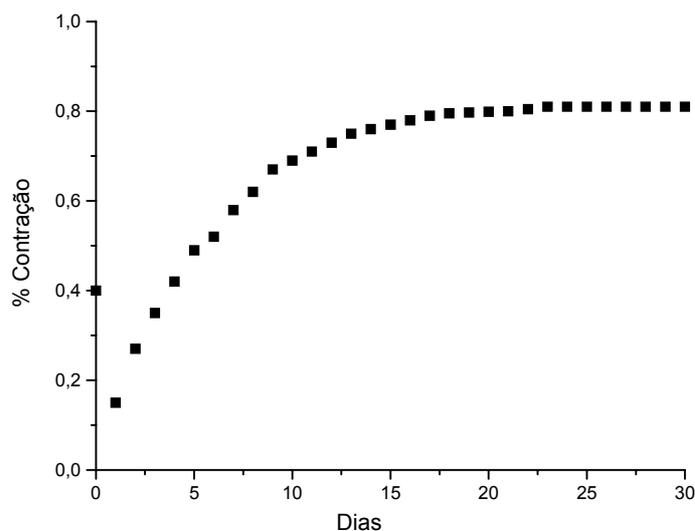


Figura 2.3 – Contração dimensional do poliestireno ao longo do tempo [9].

As conclusões mais significativas obtidas após as investigações sobre a contração dos modelos de poliestireno expandido, foram [5,8,9,11-13]:

-A diminuição da contração nos primeiros dias está associada à redução do teor de pentano (agente expensor) livre no material;

-A elevada contração que segue nos dias seguintes está relacionada com o aumento da temperatura de estocagem, que provoca uma evaporação de gases (vapor) retidos, e uma possível interação das pérolas do poliestireno;

Em função do mostrado anteriormente e das variações possíveis de ocorrerem durante a fabricação dos modelos existem divergências quanto ao tempo de estabilização dimensional, variando de 3 – 4 dias [8,9,12] até 90 dias [13], sendo que a maioria dos autores [4,5,8,9,11-14] assume 30 dias.

### 2.3.3- Mecanismo de gaseificação do poliestireno expansível (EPS)

O EPS normalmente é um polímero que funde a  $164^{\circ}\text{C}$ , volatiliza a  $316^{\circ}\text{C}$  e queima a  $576^{\circ}\text{C}$  [5,8,9,15]. Na fundição, no entanto, quando o metal, por exemplo o ferro fundido a  $1400^{\circ}\text{C}$ , entra em contato com o EPS ocorre uma passagem instantânea pelos três estados físicos a  $740^{\circ}\text{C}$ .

A figura 2.4 [9,17], mostra os valores obtidos laboratorialmente, por cromatografia, dos gases gerados pela pirólise do poliestireno em várias temperaturas, onde se observa que o estireno pode sofrer um craqueamento em temperatura acima de  $500^{\circ}\text{C}$ , formando

carbono sólido e hidrogênio. Como consequência, pode haver a formação de defeitos superficiais nas peças fundidas, como por exemplo; o “carbono lustroso”.

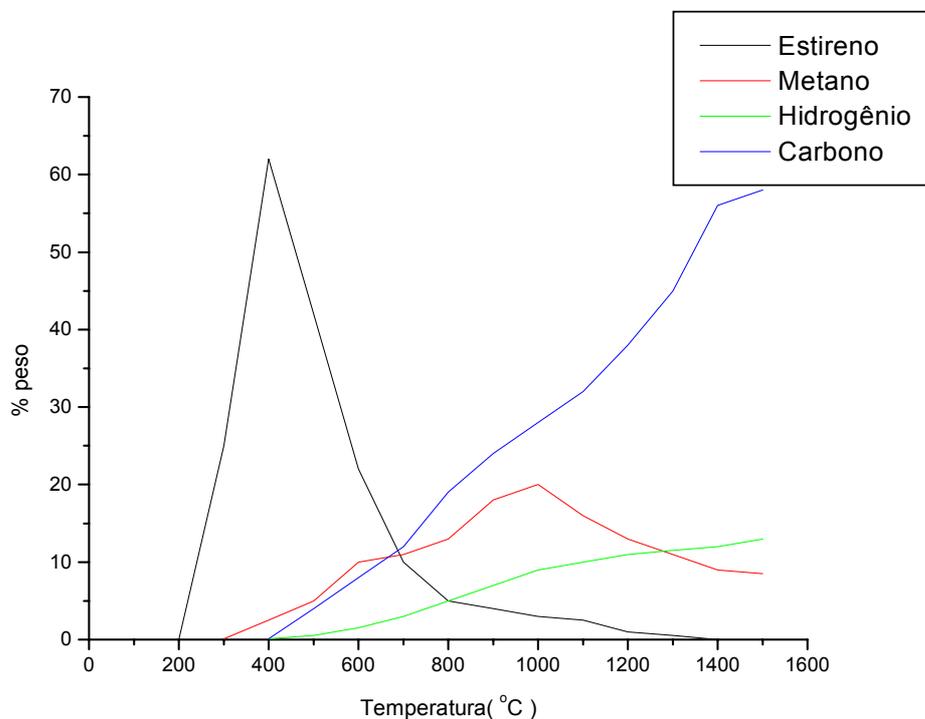


Figura 2.4 – Variação da composição dos principais produtos da decomposição do EPS [9,17]

A figura 2.5, mostra esquematicamente a evolução da decomposição do modelo no molde e ilustra o fenômeno de pirólise que ocorre dentro do molde quando há a penetração do metal líquido [5,8,9]. Pode-se observar que a fase líquida é composta essencialmente de estireno e está localizada entre o modelo sólido e a fase gasosa formada.

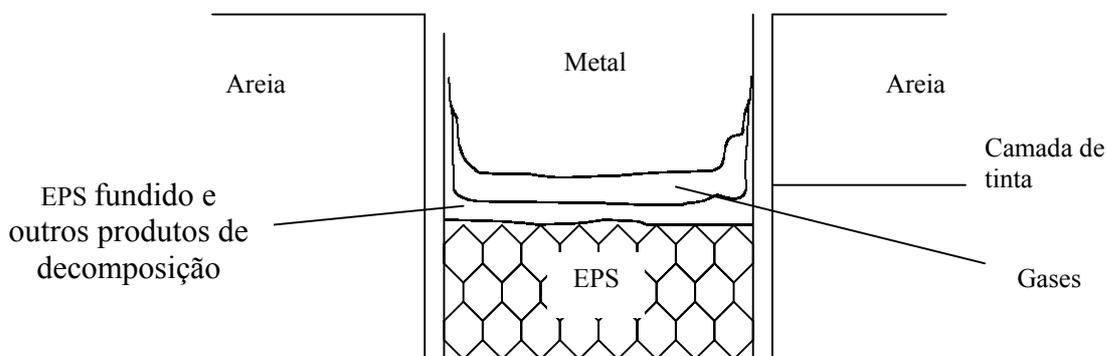


Figura 2.5 – Esquema da decomposição do modelo pelo metal no molde [6]

Segundo LEE [5], os gases formados, que se enriquecem de carbono em temperaturas mais elevadas, figura 2.4, devem deixar o sistema durante a queima, através da tinta. Assim quanto maior o tempo de aprisionamento desses gases maiores serão as concentrações de carbono e hidrogênio na fase gasosa e menor a concentração de hidrocarbonetos. Este fenômeno tem uma grande importância metalúrgica, principalmente no que se refere ao carbono na forma de inoculante, que acelera a nucleação eutética. Depósitos de carbono na interface metal/gás podem gerar inclusões em ferros fundidos de alto carbono equivalente, denominadas de “carbono lustroso” [5]. No ferro fundido nodular, o fenômeno tende a ser maior, devido a maior tensão superficial da liga e solidificação mais pastosa [9,17].

## 2.4-Sistema de canais de enchimento e alimentação

O sistema de canais de enchimento é parte fundamental na obtenção de um fundido de qualidade e com baixo custo de produção. O sistema de canais deve reduzir a turbulência do fluxo metálico, evitar a aspiração de gases, promover um enchimento no tempo adequado, não apresentar erosão, gerar um gradiente térmico adequado e eliminar os aspectos subjetivos da prática do vazamento. Os fatores que condicionam a aplicação dos canais são o rendimento metálico, o espaço na placa ou molde, a geometria da peça e a altura da caixa de moldar.

### 2.4.1- Elementos do sistema de canais de enchimento

Os sistemas de enchimento são compostos de várias partes, como mostrado esquematicamente na figura 2.6.

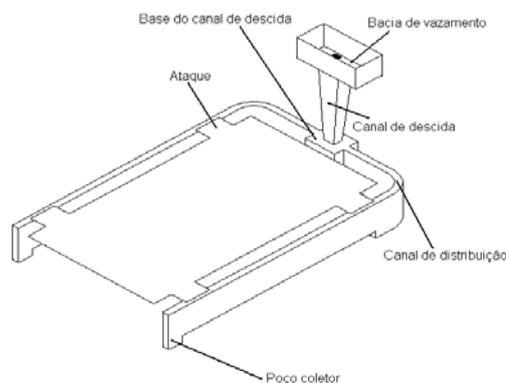


Figura 2.6 – Sistema de enchimento de uma peça fundida [19]

Os canais de enchimento podem ser divididos em três partes: canal de descida, canal de distribuição e canal de ataque. O sistema de enchimento pode apresentar outros dispositivos, como bacia de vazamento, filtros de retenção, massalotes ou montantes, poços coletores e respiros.

Na concepção do projeto de um sistema de enchimento define-se primeiramente a menor secção transversal do sistema [18,19,20,22]. Se esta área corresponde à secção dos ataques, então se divide esta área pelo número de ataques correspondentes. O mesmo procedimento deve ser adotado se esta área se refere ao canal de distribuição, se o canal se dividir em dois, divide-se por dois [18,19,20,22,23].

Os sistemas de canais de enchimento podem ser pressurizados, no qual a maior secção corresponde ao canal de descida ou despressurizados onde a menor secção é o canal de descida. Os sistemas despressurizados são utilizados para ligas com grande tendência de oxidação e absorção de gases, que necessitam de baixa velocidade de fluxo do líquido [18,19,22,24], pois a alta velocidade, além de causar erosão e aspiração dos gases, determina a ocorrência de turbulência. Os sistemas despressurizados apresentam ainda a possibilidade de preenchimento incompleto dos canais e sistemas mais pesados devido as maiores áreas das secções, resultando em menor rendimento metalúrgico.

A velocidade pode ser reduzida em todo sistema se for possível diminuir a altura a partir da qual o metal escoar ou alargando a secção em um determinado ponto [18,19].

No processo Molde Cheio, o modelo em EPS permanece dentro do sistema de canais de enchimento durante o vazamento, o que torna necessário avaliar além dos parâmetros comuns aos outros processos de fundição, como as relações de áreas, a velocidade, a vazão, o fluxo do metal e os efeitos de turbulência, parâmetros específicos para o EPS, como a pressão gerada pelos gases da decomposição térmica do EPS. Considerando todos esses aspectos faz-se necessário rever conceitos de mecânica dos fluídos para melhor adequar os cálculos de canais empregados para a areia à verde ao processo Molde Cheio.

O estudo das características do fluxo de metais em canais é facilitado pelo fato de que o comportamento dos metais e de suas ligas com suficiente superaquecimento é bastante semelhante ao da água [18], além de serem semelhantes entre si. A turbulência gerada pelo fluxo de um líquido dentro de um canal é função da relação entre as forças de inércia do líquido e da sua viscosidade. Esta relação é expressa de maneira sintética pelo número de Reynolds (E-1) [18,19,20].

$$nR = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (\text{E -1})$$

Onde:  $nR$  = Número de Reynolds

$V$  = Velocidade do fluxo líquido (cm/s)

$d$  = diâmetro do canal (cm)

$\nu$  = Viscosidade cinemática do líquido (cm<sup>2</sup>/s)

O número de Reynolds define o fluxo dos líquidos em laminar ( $nR \cdot 2000$ ), turbulento ( $nR$  entre 2000 e 20000) e severamente turbulento ( $nR \cdot 20000$ ) [18,19]. Segundo PERRONE [21] o número de Reynolds para o processo Molde Cheio pode variar entre 400 e 3000, devido a mudanças de direções e encontros de secções internas no modelo. Os valores acima mostram que o fluxo do metal em um sistema de canais no processo Molde Cheio compreende uma faixa de fluxo laminar a levemente turbulento. Este fluxo pode ser considerado como não causador de danos ao sistema de enchimento [18,19,20]. Este fato é muito relevante, pois os gases gerados pela decomposição do EPS dentro do sistema, apresentarão uma menor tendência de serem absorvidos pelo metal.

Pela lei da continuidade [18,19] admite-se que em um canal cheio, a vazão, isto é, a quantidade de metal que passa por qualquer secção transversal por unidade de tempo é constante. A equação da lei da continuidade (E-2) é mostrada as seguir:

$$Q = V \cdot S \quad (\text{E-2})$$

Onde:  $Q$  = Vazão de líquido em todos os pontos (cm<sup>3</sup>/s)

$V$  = Velocidade do fluxo líquido (cm/s)

$S$  = Área transversal (cm<sup>2</sup>)

Como a velocidade é inversamente proporcional á seção transversal, pode-se controlá-la através da seção dos canais, permitindo que o fluxo seja o menos prejudicial possível para a peça [18,19].

As perdas por fricção dependem de vários fatores, incluindo a velocidade e a viscosidade do metal líquido, a rugosidade das paredes e a geometria dos canais. Na prática para um determinado líquido estas perdas são proporcionais a relação entre o comprimento do canal e o seu diâmetro [18,19]. Com relação ao coeficiente global de perdas ( $\alpha$ ), os

valores variam entre 0,25 e 0,45 para sistemas pressurizados e de 0,6 a 0,7 para sistemas despressurizados [18,19].

A fluidez do metal líquido está relacionada com as condições térmicas dentro dos canais, pois isto afeta a solidificação. A degradação do polímero (EPS) é um fenômeno endotérmico que consome energia de até 1,6 kJ/g. A reação endotérmica causa um gradiente de temperatura no metal líquido e para manter a fluidez há necessidade de maiores temperaturas iniciais [15,21]. Foi verificado experimentalmente que a fluidez de uma liga é diretamente proporcional ao superaquecimento [18,20,22]

#### 2.4.1.1- Canal de descida

O canal de descida consiste em um canal vertical que recebe o metal fundido no ato do vazamento e o conduz para os canais de distribuição. A entrada do canal pode ser em forma cônica ou apresentar uma bacia de vazamento. Quando o canal for longo a velocidade aumenta, podendo descolar o metal da parede, e criar um vácuo dentro do canal arrastando vapores, gases e areia [18,19,20, 22,23].

Para evitar estes problemas utiliza-se um canal de descida cônico com o diâmetro inferior menor que a medida superior, como se observa na figura 2.7.

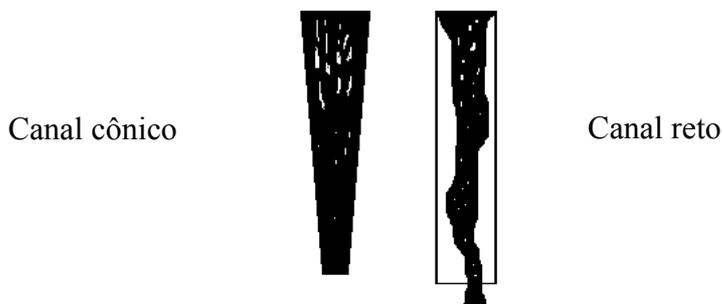


Figura 2.7 – Canal de descida cônico e não cônico [18,19,24]

Outro ponto a ser observado é o final da descida que deve apresentar um suave arredondamento, pois uma concavidade acentuada irá propiciar a ocorrência de turbulência, figura 2.8.

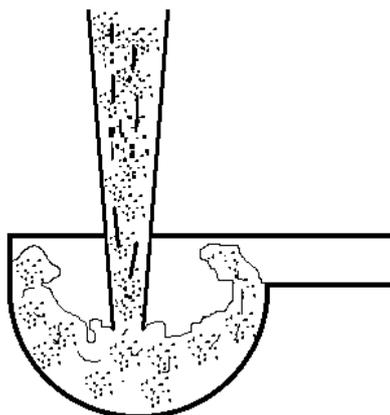


Figura 2.8 – Canal de decida com bacia côncava [19]

#### 2.4.1.2- Canal de distribuição

O canal de distribuição inicia a partir da base do canal de descida, onde ocorre a mudança de direção do fluxo do metal líquido de vertical para horizontal, diminuindo a turbulência. Normalmente, apresenta uma bacia para reduzir o impacto do metal líquido.

O canal de distribuição pode apresentar uma redução de secção por escalonamento, figura 2.9, ou de forma contínua como se observa na figura 2.10, para evitar o retorno do metal líquido sobre o fluxo. Na extremidade pode apresentar um poço coletor ou até respiros.

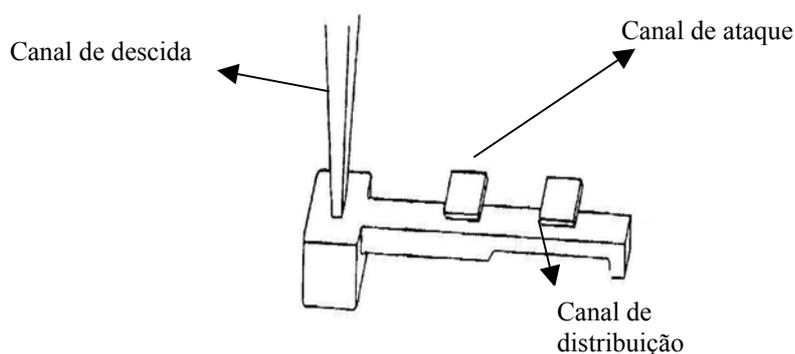


Figura 2.9 – Canal de distribuição escalonado [19,20]

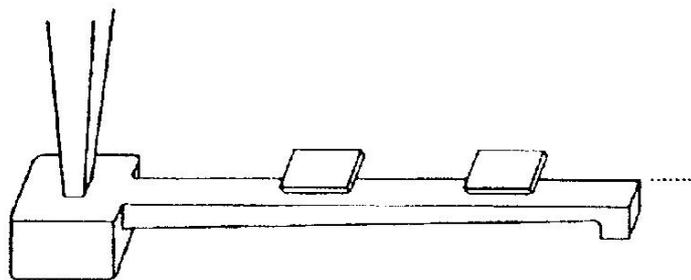


Figura 2.10 – Canal de distribuição contínuo [19,20]

#### 2.4.1.3- Canal de ataque

O canal de ataque é definido em função das combinações de velocidades e turbulências desejadas para que se mantenha dentro dos limites pré-estabelecidos pelo número de Reynolds [18,19,20,25]. A posição do canal de ataque deve estar na parte de cima do canal de distribuição e antes do final deste, o que evita os problemas de inclusões. As proporções das dimensões dos canais de ataque devem evitar a entrada de partículas não-metálicas e facilitar a separação na desmoldagem. Além disso, a conexão com o canal de distribuição deve ser perpendicular, para evitar choques no vazamento do metal, figura 2.11.

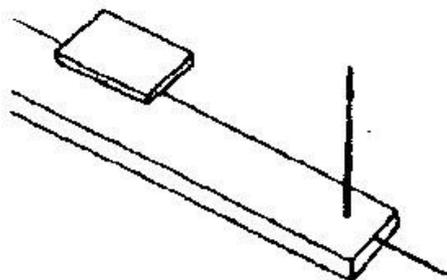


Figura 2.11 – Canal de ataque [19,20]

#### 2.4.2- Dimensionamento do sistema de canais

O dimensionamento de um sistema de canais de enchimento para peças fundidas em areia a verde, segundo MARIOTTO [18], AFS [20] e FUOCO [22] pode se basear tanto no volume como no peso da peça. É necessário, ainda, considerar a velocidade do metal líquido, o tempo de enchimento e a densidade do metal [18-20,22,26].

#### 2.4.2.1- Determinação da velocidade do metal líquido

Para definir a velocidade do metal, a altura efetiva do sistema de canais é a variável mais significativa no cálculo [18,19]. As demais variáveis que podem afetar a velocidade ficam implícitas no coeficiente de perdas de carga ( $\alpha$ ).

A velocidade do metal é calculada pela equação E-3:

$$V = \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (\text{E-3})$$

Onde :  $V$  = velocidade do metal (cm/s)

$g$  = aceleração da gravidade (980 cm/s<sup>2</sup>)

$H$  = altura efetiva do sistema de canais (cm)

$\alpha$  = coeficiente global de perdas

#### 2.4.2.2- Determinação do tempo de enchimento

Existem vários fatores a serem considerados para definir o tempo de enchimento, entre estes, a velocidade do metal, o peso e a espessura da peça, a temperatura e tipo do metal a ser vazado [18,19]. O tempo de enchimento pode ser também determinado pelo ciclo da máquina de moldar em fundições automatizadas [19] e ainda definido para se evitar defeitos nas.

Pesquisas foram realizadas pela AFS [20] para determinação dos tempos médios de enchimento. Estas pesquisas levaram a equação (E-4) que possui variáveis relacionadas em função do peso, espessura da peça e temperatura do metal [19].

$$t = Kf(1,23 + 0,06 \cdot e) \sqrt{p} \quad (\text{E-4})$$

Onde:  $t$  = tempo de enchimento (s)

$p$  = peso da peça (Kg)

$e$  = menor espessura da peça

$Kf$  = Coeficiente de fluidez

Os coeficientes numéricos e  $Kf$  foram obtidos experimentalmente para ligas ferrosas, vazadas em moldes de areia a verde entre 1370 e 1425° C.

Karsay [19,20] desenvolveu outra forma de determinar o tempo de enchimento através do peso das peças, como mostra a curva da figura 2.12.

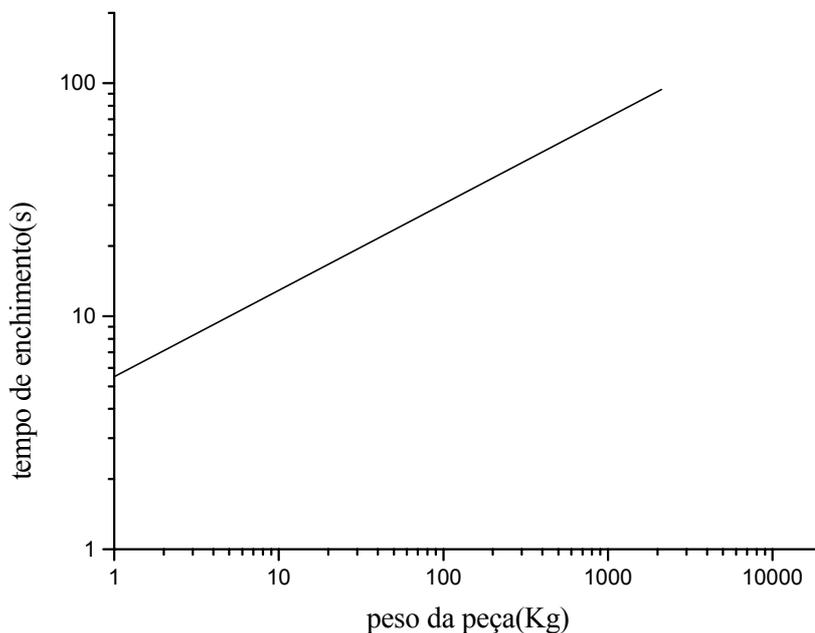


Figura 2.12 – Tempo de enchimento, segundo Karsay [19,20]

#### 2.4.2.3- Determinação da área da secção de choque

A partir da obtenção da velocidade do metal e do tempo de enchimento pode-se calcular a área que recebe o primeiro contato com o metal líquido (secção de choque) [18,19], como mostrado na equação E-5:

$$A = \frac{m}{\delta \cdot V \cdot t} \quad (\text{E-5})$$

Onde:  $A$  = área da secção de choque ( $\text{cm}^2$ )

$m$  = peso da peça (g)

$\delta$  = densidade do metal ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$V$  = velocidade do metal (cm/s)

$t$  = tempo de enchimento (s)

Em um sistema despressurizado, o fluxo é determinado pelas áreas da base do canal de descida, que é portanto, a área A calculada [18,19,20,22]. Neste cálculo, é necessário há previsão do tempo de enchimento.

No processo Molde Cheio em experiências de vazamento sem vácuo [4,5,8,9,17], observou-se que o tempo de evolução dos gases do EPS é maior do que o tempo de enchimento do modelo, sugerindo que os vapores ficam retidos entre os grãos de areia na forma gasosa ou condensada, queimando progressivamente e retardando o enchimento do molde. Outro ponto observado foi que o “jato” de metal líquido influenciava no tempo de vazamento e na taxa média de vazamento [18,19,22,24].

#### 2.4.2.4- Relações de áreas para os canais

As relações de áreas para os canais é função da velocidade do metal, do tipo de liga metálica e da turbulência [18-20,22,24,25]. As relações são representadas por três Algarismos, que definem o módulo de proporcionalidade entre as áreas das secções transversais dos canais de descida, distribuição e ataque. Por exemplo à relação 1:2:3 indica que a área do canal de descida é a metade da área do canal de distribuição, e a terça parte da área do canal de ataque.

Os sistemas despressurizados são recomendados para as ligas de alumínio, que apresentam uma grande tendência à oxidação e absorção de gases [18,19]. Para os ferros fundidos cinzentos empregam-se os sistemas pressurizados, pois a tendência de oxidação da liga é baixa e prioriza-se o rendimento metálico e o enchimento rápido [19].

#### 2.4.3- Sistema de alimentação de peças

Devido às contrações no estado líquido e de solidificação das ligas metálicas e das características das interfaces líquido-sólido, as peças solidificadas podem apresentar cavidades de diferentes tamanhos, denominadas de “rechupes”. Para evitar este tipo de problema emprega-se o “massalote ou montante”, que é um elemento necessário para que a frente de solidificação mantenha um contato contínuo com o metal líquido até que todo o metal contido dentro dos limites da peça solidifique. Deste modo cria-se um gradiente térmico e volumétrico que promove o suprimento de metal e condições de temperatura, de modo que ocorra a solidificação do massalote após o término da solidificação da peça [18-20,22,26].

O mecanismo básico de alimentação exige que a contração volumétrica que ocorre quando um cristal (sólido) cresce às custas de um líquido seja compensada diretamente pelo líquido adjacente. Isto ocasiona um abaixamento do nível do líquido no seu ponto mais elevado, que deve ser o massalote. Para que isto ocorra é necessário haver um gradiente de temperatura positivo em direção ao massalote e o volume do massalote deve ser suficiente para fornecer o líquido necessário a compensar todas as contrações.

#### 2.4.3.1- Requisito Térmico

Segundo MARIOTO [18], a regra de Chvorinov, é considerada a equação fundamental dos métodos para cálculo aproximado das dimensões do massalote, quanto ao requisito térmico, onde o massalote deve solidificar depois da secção alimentada. Esta regra considera que a espessura da camada plana solidificada é o quociente de seu volume pela área de sua superfície em contato com o molde e pode ser expressa pela equação E-6, portanto o módulo do massalote deve ser maior que o módulo da peça:

$$Mm = K \cdot \frac{V}{Sr} \quad (E-6)$$

Onde:  $Mm$  = módulo do massalote

$V$  = Volume da peça ou secção

$Sr$  = Superfície resfriamento

$K$  = Coeficiente de segurança para provocar a solidificação direcional ao massalote

#### 2.4.3.2 – Requisito Volumétrico

A condição térmica não é suficiente para assegurar o funcionamento do massalote, pois não define o volume de metal necessário para compensar a contração volumétrica total. Esta contração é compensada por uma parte do líquido do massalote, e pode ser determinada aproximadamente pelo quociente entre o volume do rechupe e o volume do massalote [18,19,22]. O volume do massalote pode ser determinado pela equação E-7.

$$Vm = \frac{V \cdot \beta}{n - \beta} \quad (E - 7)$$

Onde :  $V_m$  = Volume do massalote

$V$  = Volume da peça ou secção

$n$  = rendimento do massalote

$\beta$  = Coeficiente de contração

O rendimento do massalote está condicionado ao seu formato. Quando o formato é cilíndrico apresenta um rendimento médio de 14%. Este é um valor prático [18-20].

#### 2.4.3.3- Pescoço do massalote

O pescoço do massalote é a secção que une a peça ao massalote. Esta secção deve promover um gradiente de temperatura positivo em direção ao massalote para que este seja a última secção a solidificar, obedecendo ao requisito térmico empregado. Assim, a presença de metal líquido no massalote e a diminuição da área de troca de calor da peça, contribuem para a solidificação direcional, o que gera uma movimentação de líquido para compensar a contração volumétrica sem haver interrupções do fluxo do metal. O dimensionamento do pescoço é uma função da geometria da peça e da liga utilizada.

Sendo assim é necessário que o módulo do pescoço seja um valor médio entre o módulo da peça e do massalote [18,19]. Deste modo o pescoço deve atender ao requisito térmico, que novamente impõe o emprego da regra de Chvorinov. Recomenda-se que o pescoço tenha o formato de um cubo, cujo módulo pode ser expresso pela equação E-8 [18,19].

$$Mn = \frac{a^3}{4a^2} \quad (\text{E-8})$$

Onde:  $Mn$  = Módulo do pescoço do massalote.

$a$  = aresta do cubo

## 2.5- Montagem do modelo e do sistema de enchimento

A montagem de partes de modelos e do sistema de enchimento (canais de ataque, distribuição, massalotes e canal de descida ao modelo) é normalmente realizada com adesivos [5, 8,9,17]. É fundamental que o adesivo não reaja com o poliestireno, não deixe cinzas quando em contato com o metal líquido, possibilite a selagem das superfícies internas e externas do modelo evitando reentrâncias na peça fundida, e seja de fácil aplicação para não comprometer a produtividade.

Os adesivos mais indicados são do tipo termoplástico [27], denominados de “cola quente”, pois não apresentam solventes aromáticos, acetonas e nem ésteres que atacam o poliestireno expansível. A aplicação mecanizada é a mais indicada para assegurar velocidade na aplicação e a quantidade necessária de cola para fixar o modelo. Uma técnica comum é a de carimbo, onde este é submerso em um tanque com cola e a seguir aplicado na superfície do modelo [5,8,9,17,21].

## **2.6- Pintura dos modelos e do sistema de enchimento**

Os modelos em poliestireno expansível são pintados com tinta refratária. Esta tinta controla a velocidade de escape dos gases produzidos pela gaseificação do EPS durante o vazamento [4,5,9,10,17,18,27], além disso evita defeitos como sinterização e erosão do molde.

### **2.6.1- Tintas refratárias para a fundição**

O desenvolvimento das tintas para molde e machos iniciou-se em 1952, quando foram desenvolvidas tintas à base de zirconita para a fundição em areia a verde. Estas encontraram rapidamente um espaço nas fundições de aço e ferro fundido. Neste mesmo período surgiram novos aglomerantes para moldes e machos que apresentaram problemas de reação metal/molde, como porosidades e bolhas de gases. O emprego de zirconita, hidrossilicato de magnésio e combinações de grafita em pó e de coque calcinado na pintura de moldes e machos confeccionados com esses novos aglomerantes reduziram estes problemas [5,9,18,21,27,28].

Os últimos avanços em formulações de tintas geraram produtos com menor produção de gases, maior isolamento térmico e uma baixa deformação em altas temperaturas, de modo a obter-se uma superfície lisa e limpa do fundido e reduzir os defeitos superficiais relacionados com a expansão da sílica [21,27-29].

Nas composições básicas das tintas de fundição estão incluídos materiais com características diluentes, refratárias e os aditivos específicos. Os aditivos possuem funções específicas, de atuar como espessantes, fixadores, fungicidas e antiespumantes. Nas tintas empregadas no processo Molde Cheio, o diluente não pode reagir com o polímero, sendo normalmente empregados água ou álcool.

A camada de tinta assume papel importante no escape dos gases e na resistência a erosão. Se for espessa pode provocar defeitos, tais como gases, rugas superficiais e

carbono lustroso [4,5,9,10,19,21,23,30]. De acordo com LEE [5], IMMEL [9] e VATANKHAH [31] a espessura da película deve ser de 0,25 a 1,5 mm. Quanto menor o módulo de finura da areia base (tamanho dos grãos médios da areia) e quanto maiores as temperaturas de vazamento e da coluna metalostática, mais espessa deverá ser a película da tinta [5,9,17,31,32].

A permeabilidade da tinta é um fator que controla o preenchimento do molde [5,9]. Segundo LEE [5] e IMMEL [9], as densidades das tintas podem ser de 1,073 e 1,324 kg/cm<sup>3</sup> para revestimento de alta e baixa permeabilidade, respectivamente. Um modo de efetuar-se o controle tanto da espessura como da permeabilidade da camada de tinta é através da densidade da tinta, que é normalmente medida em graus Baumé.

#### 2.6.2- Técnicas de aplicação das tintas

As técnicas de aplicação das tintas como imersão, por jorro e por pulverização, podem ser empregadas no processo Molde Cheio. No entanto o método de imersão é considerado o melhor, por promover uma uniformidade de espessura de camada [5,9,10,17,27,28].

Nas tintas à base d'água empregadas, as partes pintadas devem ser submetidas a secagem em temperaturas que não ultrapassem os 50° C, para evitar distorções dos modelos [5,8,9,17,27]. Pode-se empregar até fornos de microondas para secagem de modelos complexos. Em qualquer um dos casos a tinta deve ser suficientemente elástica para resistir a expansão e contração, sem apresentar trincas, que podem levar ao deslocamento da mesma [5,17,31,32].

#### 2.7- Moldagem no processo Molde Cheio

A operação de moldagem no processo Molde Cheio consiste em introduzir o modelo na caixa de moldar realizando simultaneamente duas operações: o preenchimento do molde com a areia solta e a vibração do mesmo [4,5,9,17,26,29]. A vibração faz a areia fluir para dentro das cavidades do modelo e promove a sua compactação. A compactação da areia deve ser maior em peças mais complexas [4,5,9,10,17,21,28,33].

A frequência, a amplitude, a intensidade de vibração, a direção de movimento da areia, formato da caixa de moldar e o ponto no qual a vibração é aplicada são os fatores críticos no que tange a precisão dimensional da peça [4,5,9,10,17,29,30]. Para peças

simples 20 a 30 segundos são suficientes, enquanto que peças complexas necessitam de tempos maiores na compactação [4,5,8,9,10,26,33]. O formato e o tamanho das caixas podem variar de acordo com o tipo e tamanho das peças a serem fundidas. Vários projetos específicos envolvem o uso de telas com malhas finas nas laterais para facilitar o escape de gases, e outras com aberturas no fundo para facilitar a desmoldagem [4,5,8-10,16,17,26,33]. Na moldagem para ligas ferrosas, as caixas são dotadas de compartimentos para vácuo que diminuem defeitos associados aos gases do EPS [4,5,9,17,21].

A principal areia de moldagem tem sido a de sílica, sem aglomerantes. Sua densidade aumenta com a vibração, podendo ter acréscimo de até 12,5% durante a vibração [8]. Tem sido observado que quanto maior for o tamanho do grão de areia, maior será o grau de compactação alcançado. Por outro lado grãos angulares apesar de não compactarem muito bem, possuem maior resistência e maior permeabilidade em relação aos grãos redondos [4,5,7,33]. São obtidos os melhores resultados com o uso de uma areia seca com módulo de finura entre 25- 45 AFS independentemente do formato do grão [4,5,8,12,33]. Com isto os testes de laboratório são reduzidos drasticamente, importando apenas o módulo de finura e a quantidade de finos.

A temperatura da areia é um ponto crítico, não podendo ultrapassar os 50° C para evitar as deformações no modelo de poliestireno expansível [4,5,8,9,12]. Deve-se considerar que o grau de isolamento térmico da areia não aglomerada é maior, logo o resfriamento é mais lento que nos métodos em areia a verde e ligadas quimicamente [12].

## **2.8- Vazamento da peça**

No processo Molde Cheio a temperatura de vazamento tende a ser ligeiramente mais alta que nos outros processos em areia para compensar o calor consumido na evaporação do poliestireno expansível, o que pode provocar a oxidação das ligas de alumínio e inoculação em ferros fundidos [4,5,8,9,21]. Entretanto, existem tintas que promovem um isolamento térmico possibilitando vazamentos em temperaturas mais baixas.

É necessário que desde o início do vazamento se mantenha o canal de descida cheio para evitar o colapso da areia e conseqüente perda do molde [8,9,27,29]. A velocidade de vazamento é determinada pela densidade do modelo, pelas permeabilidades da tinta e da

areia, pelo tipo e temperatura do metal vazado e pelo número de ataques empregados na peça [4,5,8,9,19,21].

A utilização de vácuo na areia para reduzir o efeito da pressão de ar nos espaços existentes entre os grãos de areia aumenta a força de contato grão com grão, gerando maior fricção interna e conseqüente redução da fluxibilidade da areia. A combinação de vácuo e vibração aumenta a rigidez do molde, tornando desprezível o efeito da pressão metalostática [4,5,8,9,17,27].

O vácuo evita a fluidização da areia, a emissão de fumos, defeitos de gases e o perigo do retorno do metal durante o vazamento [5,8,9,17,27,33]. A sua aplicação pode ser realizada de duas maneiras, selando o topo da caixa de moldar com uma folha plástica ou deixando livre o topo da caixa de moldar. No segundo método, a diferença de pressão entre a base da caixa e as camadas subseqüentes geram uma corrente contínua de ar que retira os gases por arraste e cria uma atmosfera oxidante que auxilia a combustão dos mesmos [8].

## **2.9- Desmoldagem/ Limpeza das peças**

No processo Molde Cheio a desmoldagem é uma operação simples que envolve a separação da areia compactada por vibração do conjunto fundido. Após o resfriamento do conjunto injeta-se ar através da areia, fluidificando-a e separando-a do conjunto fundido. A caixa pode ser esvaziada pelo fundo ou tombada em uma tela de aço, para reter o conjunto fundido e deixar passar a areia [5,8-10,17].

A areia pode ser reaproveitada, considerando que os produtos da degradação do poliestireno expandido não estão na areia, bastando resfriá-la abaixo de 50° C, remover os finos gerados e os respingos de metal. A areia necessita apenas uma adição de areia nova para compensar as perdas [8,9,11,14,17,21,27]. Após a quebra de canais, as peças são submetidas a limpeza superficial com jatos de granalha, visando remover a tinta levemente aderida à peça. Desta forma as peças estão prontas para rebarbação e usinagem.

## **2.10-Defeitos gerados pela degradação do modelo de poliestireno**

Os defeitos típicos gerados pela degradação do modelo de poliestireno são: defeito de superfície, solda fria, porosidade, rugosidades, carbono lustroso e deformações no modelo devido ao excesso de compactação da areia [5,9,17,21,30]. Os defeitos de

superfície são próprios do modelo, devido ao tamanho das pérolas e da densidade do modelo, eles são a cópia fiel da superfície do modelo na peça.

As soldas frias se formam quando duas frentes de solidificação do metal se encontram ou não há escape do filme de poliestireno queimado, como pode ser observado nas figuras 2.13 e 2.14. A figura 2.13 mostra a microestrutura da peça e a 2.14 a peça fundida.

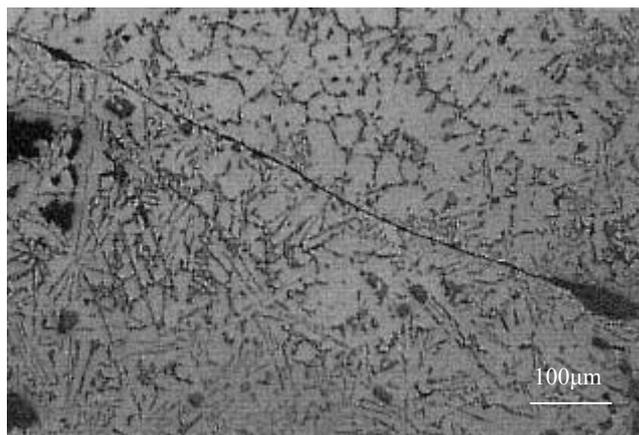


Figura 2.13 – Defeito de dobras em liga de alumínio [21]

As rugosidades (wrinkles) ocorrem na superfície fundida devido a camadas de tintas espessas, onde no local ocorre uma alta concentração de gases do modelo de poliestireno degradado. Este tipo de defeito sempre aparece na última região preenchida [9,21,30,32].

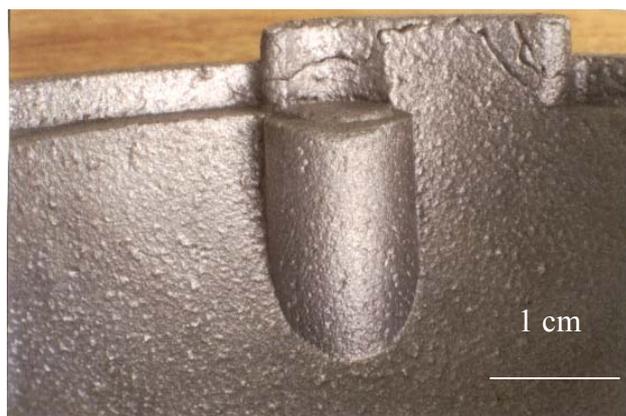


Figura 2.14 – Defeito de solda fria superficiais [19]

A porosidade é agravada pela liberação de gases e líquidos durante a degradação do polímero e do adesivo, se esses gases forem absorvidos pelo metal podem provocar porosidades de até 5 mm de diâmetro, como mostram as figuras 2.15.

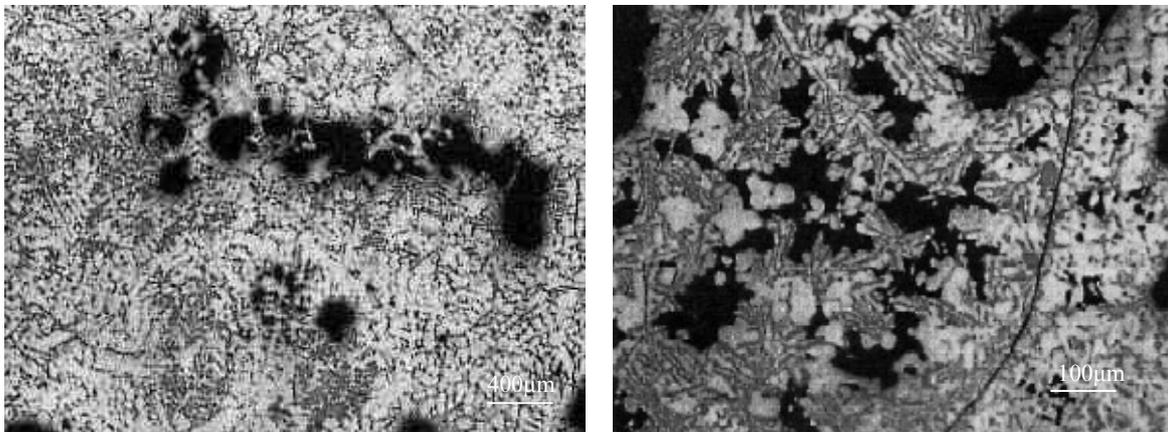


Figura 2.15 – Defeito de porosidade em liga de alumínio [21]

O carbono lustroso, figura 2,17, é típico dos ferros fundidos e aços, e surge em função do craqueamento do estireno que foi liberado na queima do EPS e não escapou através da camada de tinta. Estes resíduos carbonáceos aparecem na superfície do metal líquido em ascensão, causando um enrugamento das superfícies planas do fundido e apresenta-se com aspecto brilhante.



Figura 2.16– Aspecto visual do Carbono lustroso aderido na superfície [6,15]

## Capítulo 3

### **Metodologia e Procedimento**

### **Experimental**

### **3- METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

#### **3.1- Metodologia**

O principal objetivo deste trabalho foi o de desenvolver e adaptar industrialmente o processo Molde Cheio à estrutura convencional de fundição para obtenção de fundidos em ligas Alumínio/Silício hipoeutéticas. O processo foi desenvolvido na fundição da Sociesc/Escola Técnica Tupy que fabrica fundidos ferrosos e não-ferrosos. A fundição da Sociesc dispõe de duas baterias de fornos de indução e um forno cadinho poço de capacidade de 70 quilogramas e opera com dois sistemas de moldagem: um em areia a verde e o outro em cura a frio. Neste trabalho foi utilizado o forno cadinho poço e o sistema de moldagem empregado foi o que opera com areia a verde destinada ao ensino na Escola Técnica Tupy.

No desenvolvimento do processo de fundição por Molde Cheio avaliou-se o efeito de alguns parâmetros relevantes para o processo. Os parâmetros avaliados foram: granulometria da areia, tipo e espessura da camada de tinta e o sistema de enchimento para peças em ligas de alumínio/silício hipoeutéticas. Para verificar o comportamento do processo com relação à geometria final das peças foram utilizados três tipos diferentes de modelos; o primeiro foi uma semi-esfera que corresponde a uma geometria mais simples; o segundo uma sementeira de geometria mais complexa; e o último uma camisa cilíndrica que foi utilizada devido a grande massa de material fundido, necessitando de massalote.

Para avaliar os parâmetros citados foram realizadas quatro fusões de ligas de alumínio/silício hipoeutéticas. Nas três primeiras fusões foram utilizados 12 moldes em cada fusão, perfazendo um total de 36 moldes e na quarta fusão apenas um molde maior. Em cada uma das três primeiras fusões foram utilizados seis modelos de semi-esfera, figura 3.1(A) e seis de sementeira, figura 3.1(B). Na quarta fusão foi empregado somente um modelo de camisa cilíndrica, figura 3.2. As dimensões das peças encontram-se no anexo 3.1 a 3.3.

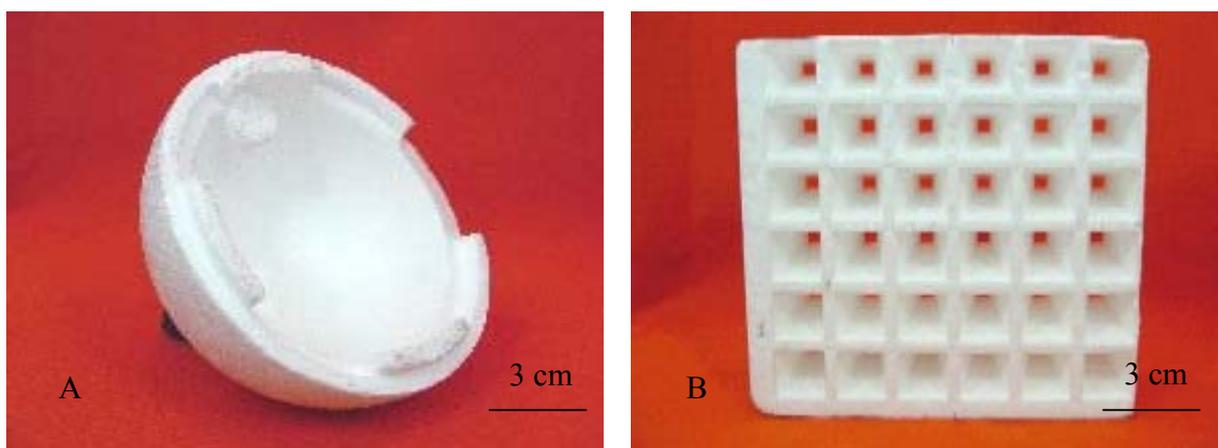


Figura 3.1- Modelo da semi-esfera (A) e sementeira (B)

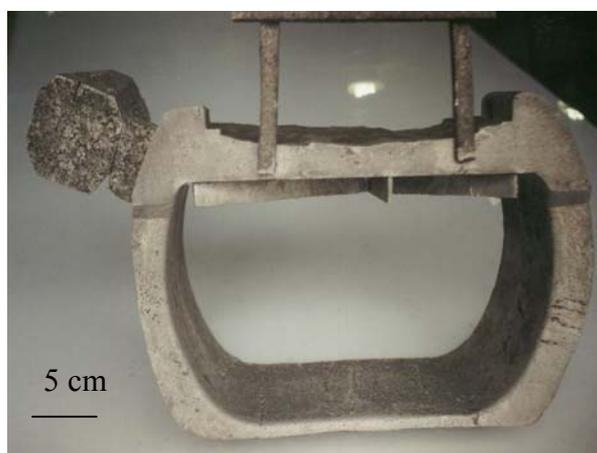


Figura 3.2- Modelo da camisa cilíndrica

O sistema de canais de enchimento foi baseado em técnicas convencionais de cálculo (vide anexo) para ligas de alumínio fundidas em areia a verde. Na primeira fusão foram empregadas duas relações para os canais de descida, distribuição e ataque. Em seis moldes foi utilizada a relação 1:1:2 e nos outros seis 2:2:2, sendo que em cada uma das relações foram empregados três modelos de semi-esfera e três de sementeira. Na segunda fusão a temperatura de vazamento foi elevada e repetida a relação 2:2:2 para os seis modelos de semi-esfera e a relação 2:2:4 para os seis modelos de sementeira. Na terceira foram repetidas as relações de canais utilizadas na segunda fusão sendo que, para as sementeiras foi empregada uma bacia auxiliar no canal de entrada para elevar a pressão do metal no molde. Na quarta fusão realizada, o sistema de canais recebeu ajustes em função dos resultados obtidos e utilizou uma relação de 2:2:4.

Os modelos em EPS foram doados pela TECNOCELL Ltda. A semi-esfera e a sementeira apresentavam densidades poliméricas de 22 e 24 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. No

modelo de camisa cilíndrica a densidade não foi fornecida pelo fabricante, mas por comparação com outros modelos a sua densidade devia estar entre 22 e 24 kg/m<sup>3</sup>. Os sistemas de alimentação por sua vez apresentavam uma densidade média de 17 kg/m<sup>3</sup>. A camisa cilíndrica possuía no sistema de alimentação (canais e massalote) polímeros de densidade 15 kg/m<sup>3</sup> e detalhes com nervuras de PMMA (polimetilmetacrilato) que foram incorporadas ao modelo, através de uma colagem.

A literatura [4-6,8-10,17] cita que existem tintas refratárias específicas para o processo Molde Cheio, entretanto, como o objetivo do trabalho foi o de desenvolver e adaptar industrialmente o processo Molde Cheio à estrutura convencional de fundição, foram empregados dois tipos comuns de tintas de fundição: uma à base de zirconita, ZIRCOMIL/KS 022/20, marca Refratek e a outra a base de zirconita e grafite ÁLCOOL GEL/11, marca Foseco. Estas tintas serão denominadas doravante de zirconita e grafite, respectivamente. Inicialmente, foram realizados ensaios nas tintas empregadas para verificar as condições de uso e assegurar a constância de composição e espessura da camada. Com este objetivo foram avaliadas as densidades e viscosidades das tintas.

O efeito da tinta no processo foi observado através da qualidade do acabamento superficial das peças, da eficiência na resistência à erosão da areia, na facilidade do escape de gases e na sanidade interna das peças. Estes parâmetros foram avaliados por meio de exames visuais e metalográficos quanto à presença de gases e pelo controle da velocidade de enchimento. Também foram realizados testes com modelos sem pintura.

Os modelos empregados nas três primeiras fusões foram pintados por imersão nas tintas de fundição de grafite e de zirconita, adotando dois tempos de imersão de oito e quinze segundos. Em cada série de fusão, 5 foram pintados com a tinta de grafite e 6 com a tinta de zirconita. Um modelo em cada uma das 3 séries não foi pintado. Para o modelo maior a técnica de pintura adotada, em função do tamanho da peça, foi o jorro de tinta e empregada a tinta de grafite.

A influência da areia para o processo é fundamental, pois esta afeta o acabamento superficial das peças, a permeabilidade do molde e o escape dos gases gerados na queima do modelo. Para avaliar o efeito da areia foram empregados três granulometrias diferentes, entre 20 e 80 AFS. Em cada série de 12 moldes vazados foram empregados 4 moldes com a areia 20/30 AFS, 4 com 50/60 AFS e 4 com a 70/80 AFS. Na quarta fusão, no único molde vazado foram empregadas duas granulometrias de areias, 70/80 AFS na parte inferior e 20/30 AFS na parte superior.

Outro aspecto avaliado foi a cola empregada para montagem dos modelos. Os ensaios realizados objetivaram verificar suas condições de uso. Foram avaliadas as propriedades físicas (ponto de fusão) e mecânicas (resistência a quente) da cola. A temperatura de fusão da cola foi determinada pelo método de ensaios em materiais plásticos por microscopia de fusão e o ensaio de temperatura de perda de resistência a quente da cola foi desenvolvido para este fim.

Avaliou-se também a distribuição da cola na fixação do modelo, a sustentação dos modelos durante a vibração dos moldes, bem como a passagem do metal de uma seção para outra durante o vazamento.

Para avaliar as condições de uso do processo Molde Cheio foram realizadas análises metalográficas para verificar porosidades internas e variações na microestrutura. Para tanto, foram coletadas amostras das peças fundidas nas três fusões, de modo a ter informações quanto ao tipo de peça, de tinta e das areias utilizadas. Foram feitos ensaios de jateamento com granalha em 3 amostras para eliminar os “desenhos das pérolas de EPS” reproduzidas na superfície das peças obtidas.

Para identificar cada experimento foi adotada uma seqüência de códigos que caracteriza a fusão, tipo de areia, tipo de modelo e a tinta empregada no revestimento. A seguir apresenta-se um exemplo de como foi realizada a identificação de cada experimento:

O exemplo apresentado é F3A2SG, onde:

- ✓ F3 - Identifica a terceira série de fusões;
- ✓ A2 - A areia 50/60 AFS empregada;
- ✓ S - O modelo da sementeira;
- ✓ G - A tinta de grafite empregada.

A seqüência de códigos empregada é apresentada a seguir:

F1 – Primeira série de fusões

F2 – Segunda série de fusões

F3 – Terceira série de fusões

A1 – Areia módulo de finura 20/30 AFS

A2 – Areia módulo de finura 50/60 AFS

A3 – Areia módulo de finura 70/80 AFS

E – Modelo da semi-esfera

S – Modelo da sementeira

G – Tinta grafite (ÁLCOOL GEL/11)

Z – Tinta zirconita (ZIRCOMIL/KS 022/20)

### **3.2-Procedimento Experimental**

Todo o trabalho desenvolvido está direcionado para as operações de confecção do molde e vazamento do metal. Para se obter os moldes em condições adequadas foram empregados 37 modelos em poliestireno expansível, onde 34 destes modelos foram devidamente pintados, sendo 16 com tinta de grafite e 18 com zirconita. A seguir, foram colados os sistemas de canais. Após a preparação dos modelos adaptou-se o molde e o sistema de vibração e finalmente, foi realizada a fusão e vazamento da liga.

A seguir são descritos os ensaios realizados na cola e nas tintas empregadas e os procedimentos de moldagem, fusão e vazamento.

#### **3.2.1- Análises da cola para o processo Molde Cheio**

Empregou-se na fixação dos modelos uma cola termoplástica, tipo “cola à quente”, usada para trabalhos artesanais. Os ensaios realizados para verificar a qualidade da cola foram: o de determinação das temperaturas de fusão e a de perda de resistência à quente, que são descritos a seguir:

##### **3.2.1.1- Determinação da temperatura de fusão da cola**

Este ensaio baseou-se na instrução de trabalho nº IT – 7325 [33], adotada no Laboratório de Materiais da SOCIESC, para ensaio da temperatura de fusão em materiais plásticos.

Inicialmente, foram retiradas três amostras da cola, cortando-se pequenos pedaços desta. Fez-se uma raspagem da superfície de cada amostra para obter fragmentos que eram utilizados no ensaio de determinação da temperatura de fusão por microscopia.

Os fragmentos obtidos foram dispostos sobre uma lamina de vidro e posicionados na objetiva do microscópio. A lamina é aquecida por resistência elétrica. A amostra aquecida é observada através do microscópio até que ocorra o início da fusão. Esta temperatura foi medida através de um termômetro acoplado ao microscópio. A temperatura de fusão da cola foi determinada a partir de uma média de nove ensaios realizados (3 amostras e 3 repetições).

### 3.2.1.1 – Determinação da resistência à quente da cola

Este ensaio foi desenvolvido neste trabalho para medir a resistência à quente da cola empregada com o objetivo de avaliar se a temperatura de secagem dos modelos pintados não afetaria a sua adesão.

Para este ensaio foram cortados corpos de prova de EPS retangulares com 20X20X100 mm. A seguir, promoveu-se a união com a cola empregando uma pistola de cola à quente, figura 3.4. A disposição da cola foi aleatória na face de união do corpo de prova.



Figura 3.4- Modelo da pistola de cola à quente

Este conjunto, a seguir foi colocado em uma estufa de ar circulante, na temperatura ambiente, com um peso (65 gramas) sobre a união, conforme mostrado na figura 3.5. A estufa foi ligada e acompanhou-se a subida da temperatura até a ruptura, ou seja quando ocorre a queda do peso no interior da estufa. Esta temperatura é a de resistência a quente. A temperatura de resistência a quente foi determinada a partir de uma média de 5 ensaios.

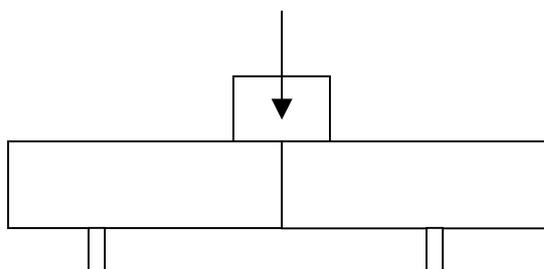


Figura 3.5 – Disposição do peso sobre a união de cola

### 3.2.2 - Colagem dos canais aos modelos

Na fixação do sistema de canais nos modelos das peças foi empregada uma pistola de cola a quente de uso comum em artesanato, figura 3.4.

Os modelos foram pintados antes de serem colados para facilitar a secagem, devido ao tamanho da estufa utilizada. Optou-se por uma disposição de cola na união das seções dos canais de forma aleatória, sem excessos. Na colagem deve-se evitar o contato do bico da pistola com o modelo, pois este apresenta uma temperatura acima do ponto de fusão do poliestireno expansível.

### 3.2.3 - Tintas

Inicialmente, foi necessário caracterizar as tintas quanto sua à densidade e viscosidade para assegurar a constância de composição e espessura. Em função do ensaio de densidade ser prático para as condições de uso dentro da fundição foi empregada a densidade medida em graus Baumé e convertidas para  $\text{kg/cm}^3$ .

O ensaio de viscosidade foi executado devido às diferenças acentuadas de densidade entre as tintas, o que poderia ocasionar espessuras de camadas muito distintas comprometendo as avaliações.

#### 3.2.3.1- Ensaio de densidade das tintas

Este ensaio baseou-se na Norma CEMP 115 [34], para medir a densidade em líquidos empregados na fundição. Foi coletada uma amostra de cada tinta, antes de cada fase de testes de pintura. Este ensaio objetivava manter sempre a mesma condição das tintas utilizadas.

Eram coletados 10 litros de cada tinta. Estes 10 litros eram homogeneizados e foi separado 1 litro em uma proveta. A seguir, nesta proveta era introduzido o arômetro Baumé para a leitura da densidade. Se esta estava dentro da especificação de uso para fundição seguia-se o processo, se não, ajustava-se adicionando solvente ou carga de tinta.

#### 3.2.3.2 – Ensaio de determinação do tempo de escoamento (viscosidade) das tintas

Este ensaio baseou-se na norma CEMP – 073 [35], adotada no Laboratório de Materiais da SOCIESC, para ensaio de escoamento (viscosidade cinemática) em líquidos empregados em fundição.

Foi coletada uma amostra de 300 mL de tinta de fundição para cada ensaio, e ajustada a temperatura em  $25 \pm 0,5^\circ \text{C}$  em um banho termostático. A seguir, a tinta era transferida para um copo de escoamento até um ligeiro transbordamento, mantendo-se o orifício de escoamento vedado externamente com o dedo. Raspava-se o excesso de líquido e desobstruía-se o orifício, acionando simultaneamente o cronômetro. Encerrava-se o ensaio quando ocorresse a primeira interrupção do filete contínuo do líquido. O tempo de escoamento foi determinado a partir de uma média de 3 ensaios.

### 3.2.3.3 – Pintura dos corpos de provas e modelos

O processo de pintura adotado foi o de imersão, com tempos de oito e quinze segundos, tanto para os corpos de prova utilizados para medir a espessura da tinta como para os modelos de semi-esfera e sementeira. Para os modelos da segunda série de fusões, o tempo de imersão na tinta foi de oito segundos e para os da terceira série de fusões foi de quinze segundos. No modelo da camisa cilíndrica a pintura não pode ser por imersão, sendo utilizado o processo por jorro de tinta.

Na primeira fusão um modelo de semi-esfera e o seu sistema de canais não foram pintados (amostra F1- A3E) e na segunda fusão apenas o sistema de canais foi recoberto com tinta (amostra F2- A3E). Na terceira fusão utilizou-se um novo modelo sem pintura (amostra F3- A2E). Estes procedimentos objetivaram avaliar a tinta, quanto ao seu poder de isolamento térmica e possível obtenção de peças sem pintura.

A secagem dos corpos de prova e dos modelos foi realizada em estufa de ar circulante, na temperatura de  $55 \pm 5^\circ \text{C}$  por 15 minutos. A temperatura foi especificada em função da literatura [6,13] e dos resultados obtidos nos ensaios de resistência a quente e da temperatura de fusão da cola.

### 3.2.3.4 – Ensaio de Espessura de Camada de Tinta

Este ensaio baseou-se na norma CEMP – 069 [36], adotada no Laboratório de Materiais da SOCIESC, para ensaio de espessuras de camada de tinta de fundição em núcleos de areia (machos) em cura a frio, adaptando-se este método para corpos de prova

em poliestireno expansível, com densidade de 17 e 24 kg/m<sup>3</sup>, procurando manter as mesmas densidades dos canais e modelos das peças a serem fundidas.

Como poderia haver variação da espessura da camada de tinta ao longo do corpo de prova foi utilizada uma média de três leituras, como mostrada na figura 3.6.

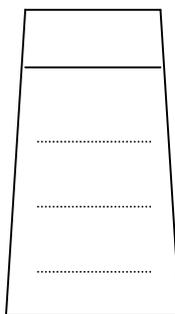


Figura 3.6 – Corpo de prova pintado , com as marcações de leitura de espessura

Para determinar a espessura da camada de tinta media-se a espessura do corpo de prova sem pintura, com paquímetro nas regiões assinaladas, figura 3.6. Após a pintura efetuava-se uma nova medida da espessura nas regiões assinaladas. A espessura da camada era calculada através da média da diferença destas leituras dividida por 2. Considerou-se que a espessura da camada de tinta que envolve os modelos da semi-esfera e da sementeira fosse a mesma do corpo de prova, uma vez que a densidade do EPS e o tempo de imersão foram os mesmos.

#### 3.2.4-Sistema de enchimento dos modelos de EPS

O sistema de enchimento para os três modelos foi calculado seguindo os princípios básicos de enchimento de peças fundidas em alumínio pelo processo em areia a verde. Foram utilizadas as relações para os canais do sistema AFS [18,19,27].

Para dimensionar os canais foram realizados os cálculos de volumes com base nas dimensões dos modelos da semi-esfera, figura 3.1 e sementeira, figura 3.2 e a camisa cilíndrica, figura 3.3. A partir deste volume foram estimados, através da densidade do metal empregado, o peso das peças a serem fundidas. A velocidade e o tempo de enchimento foram estimados a partir de resultados experimentais da Escola Técnica Tupy para areia a verde [19]. A sistemática de cálculo empregada encontra-se no anexo 1.

Para estudar o uso dos sistemas de canais despressurizados no processo Molde Cheio foram adotados as seguintes relações para os canais de descida, distribuição e ataque

1:1:2 , 2:2:2 e 2:2:4. A primeira relação não altera o fluxo do metal nos canais de descida e distribuição e ocasiona uma despressurização no ataque. Na segunda relação foi duplicada a área dos canais de descida e distribuição e manteve-se a mesma proporção no canal de ataque. Este ajuste foi utilizado em função da prática de fundição. A terceira relação foi adotada para sementeira e para camisa cilíndrica em função da complexidade e do tamanho das peças.

As relações de canais foram utilizadas objetivando a despressurização do sistema e o mínimo de turbulência possível pois, as ligas de alumínio apresentam uma forte tendência à oxidação com a turbulência.

A dimensão calculada para a área da secção do canal de descida da semi-esfera foi de  $0,65 \text{ cm}^2$  e como a relação inicial foi 1:1:2 as áreas dos canais de distribuição e ataque foram de  $0,65 \text{ cm}^2$  e  $1,30 \text{ cm}^2$ , respectivamente. Para a relação de 2:2:2, os canais de descida, distribuição e ataque apresentaram uma área da secção de  $1,30 \text{ cm}^2$ .

Para a sementeira os valores das áreas da secção dos canais de descida e distribuição foram de  $1,54 \text{ cm}^2$  e o canal de ataque de  $3,08 \text{ cm}^2$  na relação 1:1:2, na relação 2:2:2 as dimensões dos canais foram de  $3,08 \text{ cm}^2$  e na relação 2:2:4 os valores dos canais de descida e distribuição foram de  $3,08 \text{ cm}^2$  e do canal de ataque de  $6,16 \text{ cm}^2$ . Na relação 1:1:2, em função dos valores estarem muito próximos e para facilitar a confecção dos canais, optou-se por uma medida média de  $1,20 \text{ cm}^2$  para os canais da semi-esfera e da sementeira.

Os valores das áreas da secção dos canais para a camisa cilíndrica foram os mesmos da sementeira com relação 2:2:4.

Para a confecção dos sistemas de canais foi empregado poliestireno expansível com densidades diferentes. Na 1ª e 2ª séries de fusões todos os sistemas foram confeccionados com o poliestireno com densidade  $24 \text{ kg/m}^3$ . Na 3ª e 4ª série de fusões os sistemas foram confeccionados com poliestireno de densidade  $17 \text{ kg/m}^3$ .

### 3.2.5 -Areia

Foram empregadas as areias usualmente utilizadas na fundição da Sociesc, que possuem uma granulometria entre 50/60 e 70/80 AFS e uma terceira areia com granulometria entre 20/30 AFS, todas as areias foram fornecidas pela Mineração Nilson LTDA. As areias são de origem quartzos (sílica 99, 8%) e apresentam um teor médio de argila de 0,14% em sua composição. Em cada série de fusão com 12 moldes, utilizou-se 4

moldes contendo areia de 20/30 AFS, 4 moldes com areia 50/60 AFS e 4 moldes com areia 70/80 AFS.

No experimento do modelo da camisa cilíndrica foi utilizado um molde maior com duas camadas de areia, na parte inferior até a metade do molde empregou-se a areia 70/80 AFS e na parte superior 20/30 AFS. As areias não continham qualquer tipo de ligante e todas foram reaproveitadas nas fusões seguintes.

### 3.2.6- Moldagem

Para a confecção dos moldes foram adaptadas latas de 25 litros como caixa de moldar, figura 3.7. Inicialmente, foi adicionada uma camada de areia no fundo, posicionando o modelo e a seguir adicionou-se a areia solta ao redor do modelo, efetuando-se, simultaneamente, uma vibração ao redor do molde. A vibração era realizada até que o molde estivesse completamente cheio, cobrindo todo o modelo, exceto o topo do funil de vazamento. Esta vibração foi produzida por um martetele pneumático de moldagem manual em areia a verde, que operou com uma pressão de ar de  $4,5 \text{ kg/cm}^2$ .

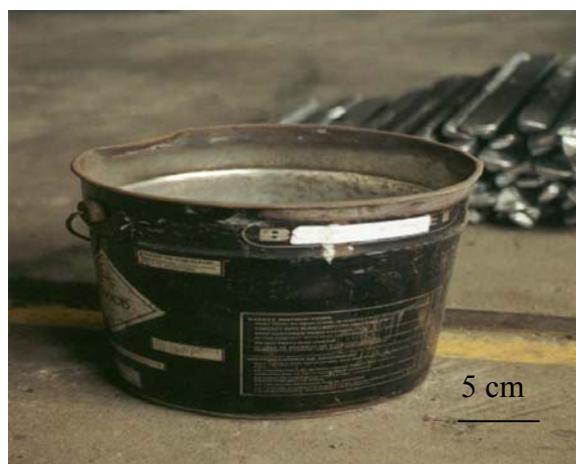


Figura 3.7 – Molde empregado

### 3.2.7- Fusão da liga Al/Si

As ligas metálicas empregadas nos experimentos foram doadas pela Sociesc. Estas ligas são empregadas nas aulas práticas de fusão dos Cursos de Metalurgia e Materiais e apresentam composição hipoeutética.

A fusão da liga de alumínio foi realizada em um forno cadinho-poço, que emprega óleo diesel como combustível. A carga do forno foi de 40 kg de liga de alumínio. Após a

fusão, efetuou-se uma pré-limpeza e o tratamento de desgaseificação, utilizando uma pastilha Degaser (FOSECO), removeu-se a escória e mediu-se a temperatura do banho líquido com um termopar de platina/platina-ródio. A seguir, foram efetuados os vazamentos nos moldes, monitorando-se a temperatura na panela de vazamento e os tempos de enchimento de cada molde.

Na fusão da camisa cilíndrica, foi empregado o retorno das fusões anteriores (canais e peças fundidas), não sendo realizadas análises química e metalográfica, apenas análises visuais da peça, quanto à eficiência do massalote e acabamento superficial.

### 3.2.7.1- Composição da liga empregada

As composições químicas das corridas são mostradas na tabela 3.1, os resultados das análises foram obtidos por espectrofotometria de Absorção Atômica e por gravimetria nas peças fundidas.

Tabela 3.1 – Composição química da liga empregadas no processo

<b>ELEMENTO</b>	<b>Liga Fusão 1</b>	<b>Liga Fusão 2</b>	<b>Liga Fusão 3</b>
Si	6,67 %	5,70%	7,38%
Cu	0,06 %	0,50%	1,0%
Fe	0,29 %	0,31%	0,31%
Mn	0,38 %	0,09%	0,35%
Mg	0,18 %	0,23%	0,08%
Zn	0,03 %	0,19%	0,16%

### 3.2.8- Desmoldagem e acabamento

Após o resfriamento promoveu-se a desmoldagem das peças, sobre lonas para não misturar a areia solta com a areia do sistema da fundição e possibilitar o seu reaproveitamento posterior. A desmoldagem foi realizada sem impacto, simplesmente virando o molde.

A seguir, promoveu-se a pesagem dos conjuntos fundidos e realizaram-se as primeiras avaliações dos canais, da eficiência da tinta, da areia e os cortes de canais. Três semi-esferas foram jateadas com granalha de aço S-390 (esférica, diâmetro médio 0,84 mm) para limpeza superficial e melhoria do aspecto superficial por 2 minutos.

### 3.2.9- Ensaios metalográficos

Inicialmente, foram realizadas as análises visuais da superfície apenas removendo a camada de tinta com uma estopa. A seguir, foram realizadas as inspeções visuais quanto a inclusões e rechupes. As porosidades internas e outros eventuais desvios ocorridos foram analisados por metalografia.

Para os ensaios metalográficos foram selecionadas 6 peças, três de cada tipo de modelo (semi-esfera e sementeira), sendo, que três foram pintadas com a tinta de grafite e três com zirconita. Dessas peças foram retiradas 2 amostras, uma próxima a região do canal de entrada e outra na parte superior da peça.

A preparação metalográfica das peças, iniciou-se com um lixamento convencional, até a lixa 1000 e a seguir um polimento cuidadoso com pasta de diamante de 1 $\mu$ m. A análise metalográfica, por microscopia ótica, foi realizada nas amostras previamente atacadas com ácido fluorídrico a 5%.

## Capítulo 4

# **Resultados e Discussão**

## 4-RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo a apresentação dos resultados e a discussão destes foi dividida em três pontos: as análises dos insumos (cola quente e tintas), as fusões e características gerais das peças obtidas e as análises metalográficas nas amostras das peças, seguindo a metodologia experimental descrita no capítulo 3.

### 4.1- Avaliação da cola a quente

A literatura [4,5,8,26] cita que se deve empregar colas que não ataquem o poliestireno, mas não apresenta características físicas e químicas destas colas. Sendo assim, utilizou-se uma cola quente termoplástica empregada em artesanato para a união dos modelos ao sistema de alimentação. Os resultados da temperatura de fusão da cola são mostrados na tabela 4.1. O ponto de fusão médio obtido foi de 77,6° C. Este está acima da temperatura de 55 +/- 5° C utilizada na secagem da tinta refratária, o que indica que não haverá fusão da cola durante a secagem.

Tabela 4.1- Pontos de fusões da cola termoplástica

Amostra	Ponto de Fusões ° C			Média ° C
1	79	78	80	79
2	74	75	76	75
3	79	79	78	79

O ensaio de resistência à quente da cola foi desenvolvido em função da necessidade de secar os modelos pintados com os canais já colados. Os resultados deste ensaio, para uma carga de 65 gramas e um tempo médio de aquecimento de quinze minutos são mostrados na tabela 4.2. Eles mostram que a temperatura média para o rompimento da união da cola foi de 87° C. A temperatura obtida não é compatível com a temperatura de fusão da cola pois está 10° C acima do ponto de fusão.

Acredita-se que esta incompatibilidade esteja associada com um possível isolamento térmico da união colada pelo poliestireno expansível. Como o tempo de aquecimento foi relativamente curto, a temperatura interna no ponto de união da cola deve ter ficado abaixo da temperatura de fusão.

Os tempos de secagem da tinta e o de aquecimento para o ensaio foram de quinze minutos então o resultado do ensaio pode ser um indicativo de que a cola resista ao peso do modelo/ sistema de canais durante a secagem da tinta.

O ensaio de resistência a quente da cola não forneceu informações precisas, entretanto ele deve ser aperfeiçoado para efetivamente poder ser utilizado. O ensaio, depois de aperfeiçoado, pode fornecer informações importantes quando da utilização de modelos complexos e novas colas.

Tabela 4.2 – Temperatura de ruptura da cola

<b>Corpos de prova</b>	<b><i>Temperatura de ruptura (°C)</i></b>
1	90
2	85
3	86
4	85
5	89

## **4.2- Tintas de fundição**

Segundo a literatura [4,5,9,10,19,21,23,30,31] a pintura do modelo e do sistema de canais é uma variável fundamental ao processo Molde Cheio para assegurar a resistência da areia à erosão e facilitar o escape dos gases evitando defeitos. Segundo LEE [5] e IMMEL [9] os valores médios de espessura de camada de tinta estão relacionados com o módulo de finura da areia e citam apenas aspectos de refratariedade da tinta, sem mencionar a composição das tintas empregadas.

Nas tintas utilizadas, sem aditivos especiais, procurou-se assegurar a espessura da camada de tinta através do controle da densidade e da viscosidade. As tintas empregadas utilizavam como solvente o álcool etílico. Este solvente não afeta o poliestireno expansível e apresenta uma boa volatilidade, o que reduz o tempo de secagem, tanto em estufa como ao ar.

### **4.2.1- Caracterização das tintas**

Para assegurar a constância de concentração das tintas empregadas, foi empregada a medida de densidade. A tinta de grafite apresentou uma densidade de 1,098 kg/cm<sup>3</sup> e a de zirconita 1,542 kg/cm<sup>3</sup>. Os valores de densidade encontrados estão dispostos na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Densidades das tintas

Amostra	Densidade, em kg/cm <sup>3</sup>			Média
Zirconita	1,542	1,542	1,542	1,542
Grafite	1,098	1,098	1,098	1,098

Em função da diferença entre as densidades das duas tintas, realizou-se um segundo ensaio, o de viscosidade cinemática, para verificar se não haveria diferenças de escoamento entre as tintas. Os resultados dos tempos de escoamento e as viscosidades calculadas são apresentados na tabela 4.4. Como as duas viscosidades apresentaram-se muito próximas com valores médios obtidos de 18 cSt para a tinta de grafite e 17,61 cSt para a tinta de zirconita, assumiu-se um escoamento semelhante para as duas tintas.

Tabela 4.4 – Tempos de escoamento das tintas - Viscosidade cinemática

Amostra	Tempos de escoamento das tintas (s)			Média (s)	Viscosidade cinemática (cSt)
Zirconita	11,64	11,49	11,27	11,46	17,61
Grafite	11,37	11,41	11,12	11,29	18

Outro ponto a salientar é que a tinta de menor densidade (grafite) penetrou mais na superfície do modelo, revelando com maior nitidez os detalhes da superfície do EPS após a peça ser fundida, como visto na figura 4.1.

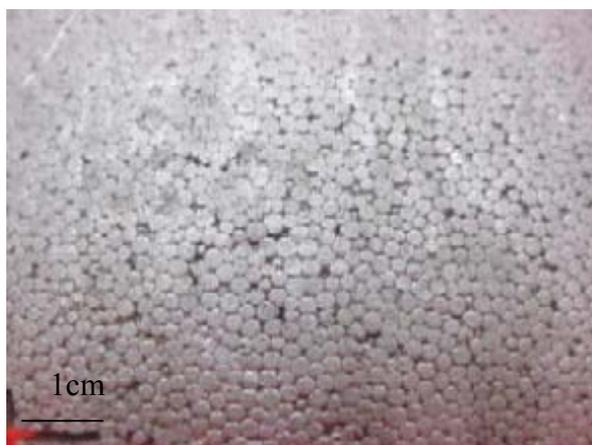


Figura 4.1 – Superfície da peça pintada com tinta grafite

As densidades elevadas promovem camadas mais espessas, diminuindo a permeabilidade da camada de tinta e afetando o preenchimento do molde. Segundo LEE [5] e IMMEL [9] a densidade de  $1,073 \text{ kg/cm}^3$  é adequada para revestimento de alta permeabilidade e a densidade  $1,324 \text{ kg/cm}^3$  para revestimento de baixa permeabilidade. Não foram feitas referências quanto à penetração de tinta nos interstícios das pérolas que formam os modelos ou por serem mais viscosas ou porque os modelos apresentaram um acabamento melhor ou por uma molhabilidade da tinta de grafite. A condição de molhabilidade maior é o que parece estar mais de acordo com este efeito de penetração. Esta molhabilidade deve estar relacionada com a textura do EPS (carbono) e a tinta de grafite (carbono), pois a tinta de zirconita, a base de óxidos, não penetrou tanto nos modelos.

#### 4.2.2- Espessura de camada de tinta em função do tempo de imersão

De acordo com LEE [5] e IMMEL [9] a espessura da camada de tinta deverá ser entre 0,25 e 1,5 mm para o processo Molde Cheio. PAN [37] e YANG[38] empregaram espessuras de 0,1, 0,2 e 0,4 mm em seus estudos para ligas de alumínio com tintas contendo mica e obtiveram bons resultados. Neste trabalho as camadas de tintas obtidas com oito e quinze segundos de imersão para os corpos de prova foram 0,12 e 0,35 mm para a tinta de grafite, respectivamente, e de 0,22 e 0,42 mm para a tinta de zirconita.

Comparando os valores obtidos, tabelas 4.5 e 4.6, com os resultados da literatura, que cita valores entre 0,25 a 1,5 mm [5,9,31], as camadas estão dentro de um limite aceitável para vazamento em temperatura relativamente baixa.

Tabela 4.5 – Espessura da camada de tinta de grafite, com 8 segundos de imersão

Corpo de prova	Densidade do corpo de prova ( $\text{kg/m}^3$ )	Espessura do cp sem tinta (mm)	Espessura do cp com tinta (mm)	<i>Espessura média da camada de tinta (mm)</i>
1	17	9,30	9,50	0,10
2	17	8,60	8,90	0,15
3	17	9,10	9,36	0,13
4	24	9,24	9,40	0,08
5	24	8,86	9,15	0,14
6	24	9,09	9,40	0,15

Tabela 4.6 – Espessura da camada de tinta de zirconita, com 8 segundos de imersão

Corpo de prova	Densidade do corpo de prova (kg/m <sup>3</sup> )	Espessura do cp sem tinta (mm)	Espessura do cp com tinta (mm)	<i>Espessura média da camada de tinta (mm)</i>
1	17	9,10	9,54	0,22
2	17	8,10	8,62	0,26
3	17	8,50	8,91	0,20
4	24	9,10	9,56	0,23
5	24	8,80	9,28	0,24
6	24	9,10	9,52	0,21

O emprego de corpos de provas de poliestireno com densidades diferentes não provocaram diferenças significativas na espessura da camada de tinta. A diferença de densidade entre as tintas propiciou uma elevação de aproximadamente 0,10 mm na camada aderida para um mesmo tempo de imersão. Esta diferença é devida à maior carga sólida da tinta de zirconita em relação à de grafita.

O aumento do tempo de imersão para um mesmo tipo de tinta propiciou um incremento aproximado nas camadas de tintas de 0,20 mm, como mostrado na tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Espessura da camada de tinta, com 15 segundos de imersão

Corpo de prova	Densidade do corpo de prova (kg/m <sup>3</sup> )	Espessura do cp sem tinta (mm)	Espessura do cp com tinta (mm)	<i>Espessura média da camada de tinta (mm)</i>
Grafite	17	9,12	9,82	0,35
Grafite	17	8,60	9,36	0,38
Grafite	17	8,70	9,36	0,33
Zirconita	24	8,90	9,76	0,43
Zirconita	24	8,70	9,58	0,44
<i>Zirconita</i>	<i>24</i>	<i>9,10</i>	<i>9,92</i>	<i>0,41</i>

Observa-se ainda que as duas tintas apresentaram aumentos de camada praticamente idênticos em relação ao mesmo aumento de tempo de imersão.

A elevação do tempo propiciou um aumento na camada de tinta obtida, em contrapartida provocou trincas superficiais, que causaram o descolamento da camada do modelo após a secagem da tinta, como pode ser observado na figura 4.2.

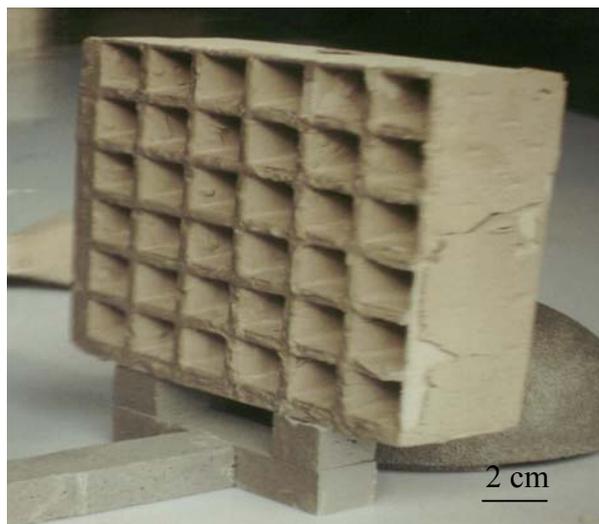


Figura 4.2 – Camada espessa de tinta deslocando

Os tempos de secagem em estufa variaram entre oito e quinze minutos, dependendo da espessura da camada de tinta e da complexidade do modelo. Uma espessura maior exige um tempo maior. Um direcionamento do fluxo de ar sobre os modelos favorece a secagem.

Quanto às técnicas de pintura citadas na literatura [5,8,9,17,27], apenas duas foram empregadas, a por imersão e por jorro. A por imersão se mostrou mais eficaz, tendo apresentado uma boa uniformidade de camada e facilidade de execução. A pintura por jorro de tinta pode provocar a lavagem da tinta já depositada e camadas não uniformes.

#### 4.2.3- Permeabilidade da camada de tinta versus tempo de enchimento

Segundo LEE [5] e IMMEL [9] a permeabilidade da camada de tinta é um fator que controla o tempo de enchimento do molde. Para avaliar os tempos de enchimento obtidos nos experimentos, os resultados foram agrupados segundo a relação de canais, tipo de peça, granulometria, tinta empregada em função da espessura da camada. Os resultados são apresentados nas tabelas 4.8 a 4.11.

Os resultados da tabela 4.8 correspondem aos tempos de enchimento dos modelos da semi-esfera, da segunda e terceira fusões, onde a espessura da camada de tinta de grafite para segunda fusão é de 0,12 mm e da terceira de 0,35 mm. O resultado com (\*) corresponde à primeira fusão.

Observam-se valores muito próximos do tempo de enchimento, para diferentes espessuras de camada. A análise do efeito da espessura da camada de tinta sobre a permeabilidade ficou comprometida em função das temperaturas de vazamento não serem

constantes, devido a problemas de operacionalização do forno e transferência do metal para uma segunda panela de vazamento.

Apesar do incremento de praticamente 0,2 mm na espessura da camada, para mesma peça, não houve uma grande diferença no tempo de enchimento. Aparentemente, a variação granulométrica da areia afetou mais significativamente os resultados. Pode-se observar que o tempo de enchimento foi decrescente com a granulometria da areia, ou seja; a areia 70/80 AFS, mais fina, que tem menor permeabilidade entre os grãos de areia, apresentou um tempo maior de enchimento. O efeito da granulometria da areia no tempo de enchimento está de acordo com a literatura [5,8-10,16,17,23,26,27,32].

Este incremento na espessura da camada da tinta de grafite não provocou diferenças significativas no acabamento superficial.

Tabela 4.8 – Tempo de enchimento para a tinta de grafite.

Espessura da camada de tinta (mm)	Relação 2:2:2 – Semi-esfera Tempo de enchimento (s)		
	A1EG(20/30 AFS)	A2EG(50/60 AFS)	A3EG(70/80 AFS)
0,12	18,2	18,4	*18,5
0,35	18,4	-	18,8

( \* ) Corresponde a primeira fusão

Na tabela 4.9, os resultados apresentados correspondem a espessura da camada obtida com a tinta de zirconita, onde a espessura de 0,22 mm foi empregada na segunda fusão e 0,42 mm para terceira fusão para a semi-esfera. Percebe-se que houve uma elevação do tempo de enchimento, mas mantendo ainda a tendência da areia mais fina (70/80 AFS), apresentar o maior tempo de enchimento.

Este incremento de 0,20 mm provocou na parte superior da semi-esfera uma maior incidência de penetração de camada de tinta na superfície da peça, em 2 casos, sendo a provável causa do descolamento da camada de tinta do modelo.

Tabela 4.9 – Tempo de enchimento para a tinta de zirconita

Espessura da camada de tinta (mm)	Relação 2:2:2 – Semi-esfera Tempo de enchimento (s)		
	A1EZ(20/30AFS)	A2EZ(50/60AFS)	A3EZ(70/80AFS)
0,22	18,0	18,4	19,0
0,42	18,3	18,7	19,5

Comparando os valores das tabelas 4.10 e 4.11 com os das tabelas 4.8 e 4.9, os tempos de enchimento são maiores porque a sementeira apresenta uma massa maior, um formato geométrico e de sistema de canais mais complexo que o da semi-esfera, exigindo assim um volume de metal maior, mas ainda assim mantém-se a tendência decrescente em função da granulometria da areia.

Na 3ª série de fusão as temperaturas de vazamentos foram maiores que na 2ª série de fusões, o que provocaria uma maior fluidez da liga metálica, conseqüentemente um menor tempo de enchimento, mas isto não ocorreu, pois o tempo de enchimento foi maior. Estes resultados podem ser um indicativo de que a espessura da camada reteve mais os gases no interior do molde.

Tabela 4.10 – Tempo de enchimento para a tinta de grafite

Espessura da camada de tinta (mm)	Relação 2:2:4 – Sementeira Tempo de enchimento (s)		
	A1SG(20/30AFS)	A2SG(50/60AFS)	A3SG(70/80AFS)
0,12	23,4	24,4	25,8
0,35	24,4	25,7	26,4

Tabela 4.11 – Tempo de enchimento para a tinta de zirconita

Espessura da camada de tinta (mm)	Relação 2:2:4 – Sementeira Tempo de enchimento (s)		
	A1SZ(20/30AFS)	A2SZ(50/60AFS)	A3SZ(70/80AFS)
0,22	23,5	24,8	25,0
0,42	24,4	25,4	26,3

As tintas de fundição empregadas ZIRCOMIL/KS 022/20, marca Refratek, e ÁLCOOL GEL/11, marca Foseco, atenderam perfeitamente as condições exigidas de permeabilidade e resistência à erosão da areia. Quanto à densidade das tintas, a de zirconita com densidade média de 1,542 kg/cm<sup>3</sup> foi a que propiciou um acabamento melhor, não reproduzindo os detalhes de superfície do polímero. As tintas empregadas são de secagem rápida, pois o solvente é o álcool etílico. A tinta de grafite de densidade menor promove um melhor escape de gases, mas revelou detalhes superficiais do polímero, que em uma situação de carga, podem levar a formação de um ponto concentrador de tensão,

ocasionando fraturas. E esse problema podem ser eliminado com um jateamento de granalha de aço.

O jateamento com granalha de aço mostrou-se bastante eficiente na eliminação dos detalhes superficiais do polímero da peça, como mostram as figura 4.3.

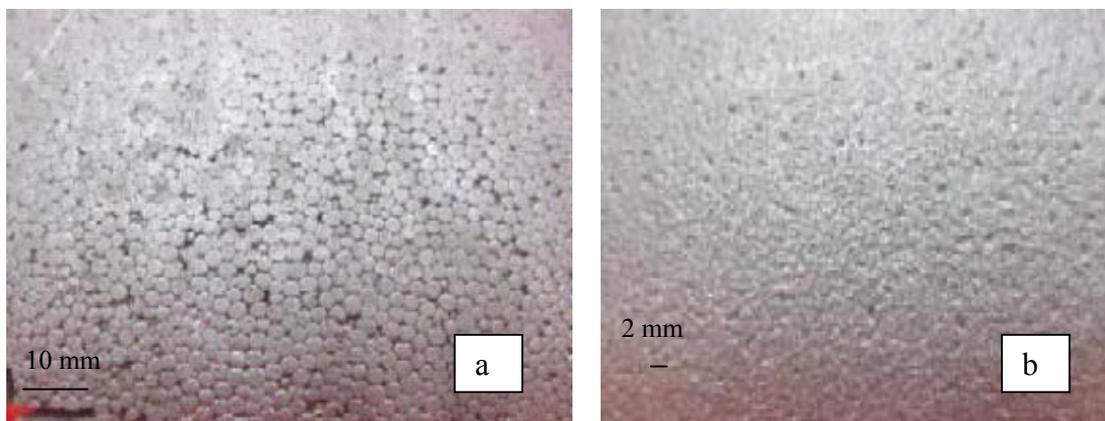


Figura 4.3 – Superfície da semi-esfera após a desmoldagem. a) Sem jateamento e b) jateada com granalha de aço S-390

A avaliação do tempo de vazamento quanto à permeabilidade da camada de tinta não foi significativa, observou-se apenas que a permeabilidade da camada de tinta é menor com o aumento da espessura da camada, pois surgiram defeitos de dobras ou solda fria na parte superior das peças com camadas mais espessas (0,42 mm).

#### 4.3- Resultados das fusões

Os resultados da 1ª fusão são mostrados na tabela 4.12 onde são apresentados os valores de temperatura e de tempo de enchimento, a tinta e a areia empregadas em cada molde. Nesta primeira série de fusões optou-se por trabalhar com duas relações de canais 1:1:2 e 2:2:2. Nos seis primeiros moldes foram empregados três modelos da semi-esfera e três da sementeira com a relação 1:1:2. Neste experimento não se obteve sucesso, devido à relação de canais não atender as condições de enchimento e a temperatura de vazamento baixa.

Assim optou-se por uma modificação na relação de canis para 2:2:2, empregando novamente três modelos da semi-esfera e três da sementeira.

Tabela 4.12 – Parâmetros da 1ª fusão, com relação de canais 2:2:2

Parâmetros avaliados	Semi-esfera			Sementeira		
	F1-A1EG	F1-A2EG	F1-A3EG	F1-A1SZ	F1-A2SZ	F1-A3SZ
Areia (AFS)	20-30	50-60	70-80	20-30	50-60	70-80
Tinta utilizada	Grafite	Grafite	Grafite	Zirconita	Zirconita	Zirconita
Temperatura de vazamento (° C)	664	686	685	682	680	672
Tempo de enchimento (s)	7,5	17,7	18,5	24,5	23,8	9,7
Peso conjunto (g)	Incompl.	1890	1785	Incompl.	Incompl.	Incompl.
Peso peça (g)	-	1190	1188	-	-	-

A temperatura inicial de vazamento na 1ª fusão variou entre 652 e 686° C. Nos 6 primeiros moldes, onde foi empregada a relação de canais 1:1:2, o metal líquido não preencheu toda a peça e estas apresentaram defeitos característicos de solda fria, como mostrado na figura 4.3. Nos moldes com a sementeira empregando a relação 2:2:2 houve o preenchimento quase que completo, indicando falta de metal por perda de pressão na coluna de metal, figura 4.4.

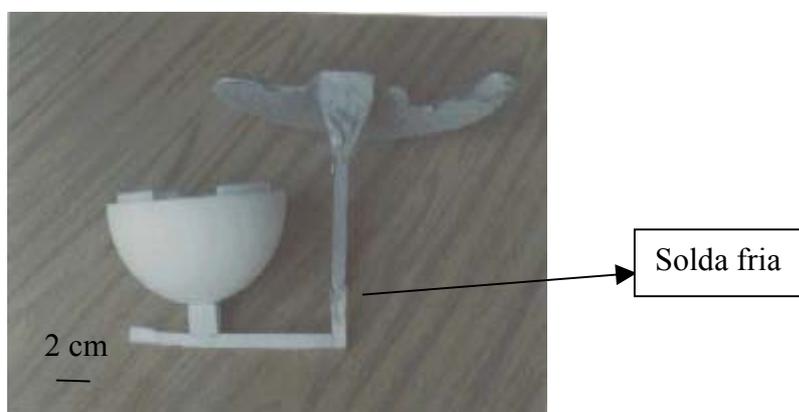


Figura 4.3 – Molde não preenchido, temperatura de vazamento baixa



Figura 4.4 – Sementeira incompleta

Na primeira série de fusões, empregando o sistema de canais com a relação 1:1:2, mesmo com a elevação da temperatura para  $687^{\circ}\text{C}$  não ocorreu o preenchimento da peça. Mas, com o dobro da relação nos canais de descida e distribuição (2:2:2) ocorreu um início de preenchimento da peça no molde F1-A1EG, com os canais preenchidos e uma pequena parte da peça.

A superfície da peça apresentou contornos arredondados típico do defeito solda fria, o que revela que a temperatura do metal estava baixa para o vazamento. Uma outra indicação de baixa temperatura de vazamento é que a mudança da relação do sistema de canais de 1:1:2 para 2:2:2, não provocou um preenchimento completo, figura 4.5.



Figura 4.5 – Semi-esfera incompleta

Um outro efeito notado foi que empregando a relação de canais 2:2:2, os moldes F1-A2EG e F1-A2EG preencheram por completo no caso das semi-esferas, como pode ser observado na figura 4.6 e parcialmente nas sementeiras, indicando que faltou pressão de metal nos canais devido a sua pequena altura.



Figura 4.6 – Peça com boa sanidade

Para eliminar a falta de pressão nos canais de enchimento na segunda série de fusões, foi utilizada uma bacia auxiliar sobre o funil de entrada do canal de descida e aumentado o número de ataques. Deste modo, a secção de ataque ficou com o dobro da área produzindo duas frentes de enchimento. A figura 4.7, ilustra o sistema montado. Estas soluções foram adotadas com base na literatura [18,19,21,27].

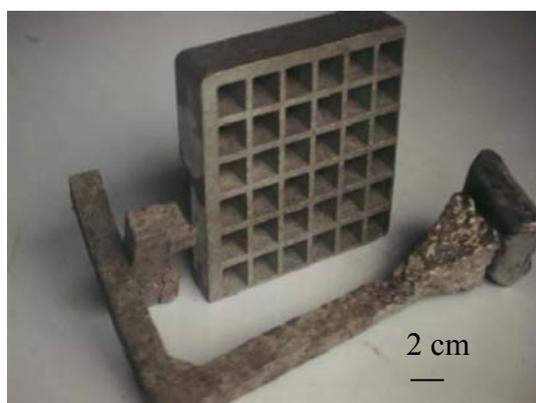


Figura 4.7 – Sementeira completa com sistema de canais com bacia

Em função dos resultados da primeira série de fusões e da análise química da liga empregada (6,67% Si), indicando que esta liga apresenta um intervalo de solidificação grande, o que gera uma solidificação pastosa. E ainda a literatura [9,15,21] que citando que a reação de degradação do EPS é bastante endotérmica, ou seja, absorve calor, a temperatura de vazamento foi elevada.

Os resultados obtidos nesta série de fusões estão apresentados nas tabelas 4.13 e 4.14. Pode-se observar que quase todos os moldes apresentaram preenchimento completo de metal, a única exceção foi a amostra F2-A3E. Nesta amostra, somente os canais de enchimento foram pintados. Este fato mostra a necessidade de pintura, para atuar como um isolamento térmico do modelo, quando este estiver muito próximo ao canal de descida.

A figura 4.8 mostra o sistema de canais (pintado) e o modelo (sem pintura) da amostra F2-A3E. Pode-se notar que o modelo sofreu uma degradação térmica provocada pelo calor irradiado do canal de descida. Este fato também justifica a necessidade da utilização de pintura, mesmo que a camada de tinta não seja muito espessa, para proteger o modelo do calor irradiado pelo canal de descida.



Figura 4.8 – Canais e modelo da amostra F2-A3E

Tabela 4.13 – Parâmetros da 2ª fusão, semi-esfera

Fusão 2 Relação 2:2:2	F2- A1EG	F2- A2EG	F2- A3E	F2- A1EZ	F2- A2EZ	F2- A3EZ
Areia (AFS)	20-30	50-60	70-80	20-30	50-60	70-80
Tinta utilizada	Grafite	Grafite	s\ tinta	Zirconita	Zirconita	<i>Zirconita</i>
Temperatura de vazamento (° C)	722	720	712	708	700	697
Tempo de enchimento (s)	18,2	18,2	6,8	18	18,4	19,0
Peso conjunto (g)	1899	1930	-	1585	1595	1879
<i>Peso peça (g)</i>	<i>1195</i>	<i>1199</i>	-	<i>1185</i>	<i>1195</i>	<i>1190</i>

A variação da espessura das tintas não afetou sensivelmente os resultados, pois propiciaram peças com boa sanidade, tanto para a semi-esfera como para a sementeira.

Observando ainda os resultados desta segunda série de fusões, a elevação da temperatura de vazamento e as modificações dos sistemas de canais mostraram-se eficientes para a semi-esfera.

Tabela 4.14 – Parâmetros da 2ª fusão, sementeira

Fusão 2 Relação 2:2:4	F2- A1SZ	F2- A2SZ	F2- A3SZ	F2- A1SG	F2- A2SG	F2- A3SG
Areia (AFS)	20-30	50-60	70-80	20-30	50-60	70-80
Tinta utilizada	Zircônia	Zircônia	Zircônia	Grafite	Grafite	Grafite
Temperatura de vazamento (° C)	705	699	688	692	687	679
Tempo de enchimento (s)	23,5	24,8	25,0	23,4	24,4	25,8
Peso conjunto (g)	3625	3773	3664	3742	3689	3678
Peso peça (g)	2715	2685	2712	2701	2696	2730

Com as modificações realizadas na 2ª série de fusões, ou seja: alteração da relação de canais, emprego de uma bacia de vazamento e a elevação da temperatura, os problemas para a sementeira foram sanados e obteve-se êxito nas fusões. Entretanto, o rendimento metalúrgico após a adoção da bacia de vazamento, sofreu uma queda em função do maior peso do conjunto.

Os resultados da terceira série de fusões são mostrados nas tabelas 4.15 e 4.16, onde foram mantidas a mesma relação de canal 2:2:2 para a semi-esfera e a relação 2:2:4 para sementeira. Isto foi adotado para verificar a reprodutibilidade das condições de ajustes de temperatura e alimentação.

Tabela 4.15 – Parâmetros da 3ª fusão, semi-esfera

Fusão 3 Relação 2:2:2	F3- A1EG	F3- A2E	F3- A3EG	F3- A1EZ	F3- A2EZ	F3- A3EZ
Areia (AFS)	20-30	50-60	70-80	20-30	50-60	70-80
Tinta utilizada	Grafite	s/tinta	Grafite	Zircônia	Zircônia	Zircônia
Temperatura de vazamento (° C)	762	754	738	760	757	743
Tempo de enchimento (s)	18,4	18,7	18,8	18,3	18,7	19,5
Peso conjunto (g)	1585	1595	1879	1585	1595	1879
Peso peça (g)	1189	1196	1194	1185	1195	1190

No molde F3- A2E o modelo não foi pintado, apenas o sistema de canais recebeu uma espessura de camada de tinta de grafite de 0,35 mm. Este molde apresentou boa permeabilidade, mas o acabamento superficial da peça apresentou marcas de inclusão de areia na superfície externa, devido a presença de grãos mais grosseiros na areia, figura 4.9.



Figura 4.9 – Semi-esfera sem pintura com boa sanidade

Tabela 4.16 – Parâmetros da 3ª fusão, sementeira

Fusão 3 Relação 2:2:4	F3- A1SG	F3- A2SG	F3- A3SG	F3- A1SZ	F3- A2SZ	F3- A3SZ
Areia (AFS)	20-30	50-60	70-80	20-30	50-60	70-80
Tinta utilizada	Grafite	Grafite	Grafite	Zirconita	Zirconita	Zirconit a
Temperatura de vazamento (° C)	738	729	715	762	742	780
Tempo de vazamento (s)	24,4	25,7	26,4	24,4	25,4	26,3
Peso conjunto (g)	3695	3623	3690	3560	3625	3570
Peso peça (g)	2619	2672	2686	2681	2735	2789

Para a sementeira na terceira série de fusões, a relação de canal empregada foi 2:2:4.

A figura 4.10, mostra em detalhes uma das sementeiras obtidas, onde se observa uma seção fina de parede. O canal de ataque foi posicionado na secção mais espessa, o que contradiz a prática de fundição e a literatura [18,19,22], que recomenda um ataque através da secção mais fina. Este procedimento foi apenas para se ter maior estabilidade do modelo da sementeira durante a colagem.

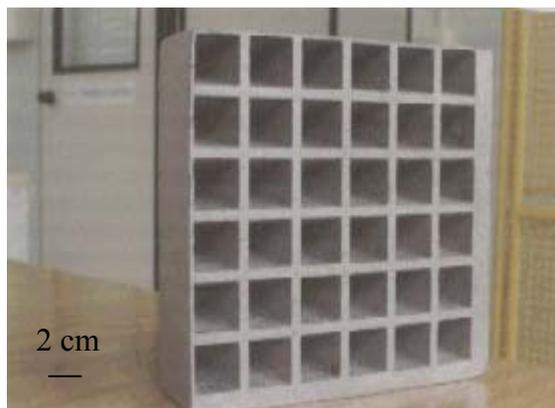


Figura 4.10 – Sementeira com boa sanidade

Na quarta fusão, onde foi empregado o modelo de camisa cilíndrica, utilizou-se massalotes e modificou-se a velocidade do metal em função dos resultados das primeiras experiências.

Obteve-se um sucesso parcial quanto à alimentação da peça, os canais trabalharam adequadamente na condução do metal, apenas um dos massalotes usados desprendeceu-se da peça, o que prejudicou a solidificação da secção alimentada por este massalote.

Na figura 4.11, percebe-se a sensível diferença entre as densidades dos polímeros empregados. O massalote confeccionado em polímero de densidade comercial ( $\sim 15 \text{ kg/m}^3$ ) e a peça com maior densidade apresentaram diferenças de texturas superficiais. Nesta figura, pode-se observar ainda um defeito superficial, mostrado em detalhe, que já existia antes da fusão e que foi fielmente reproduzido.

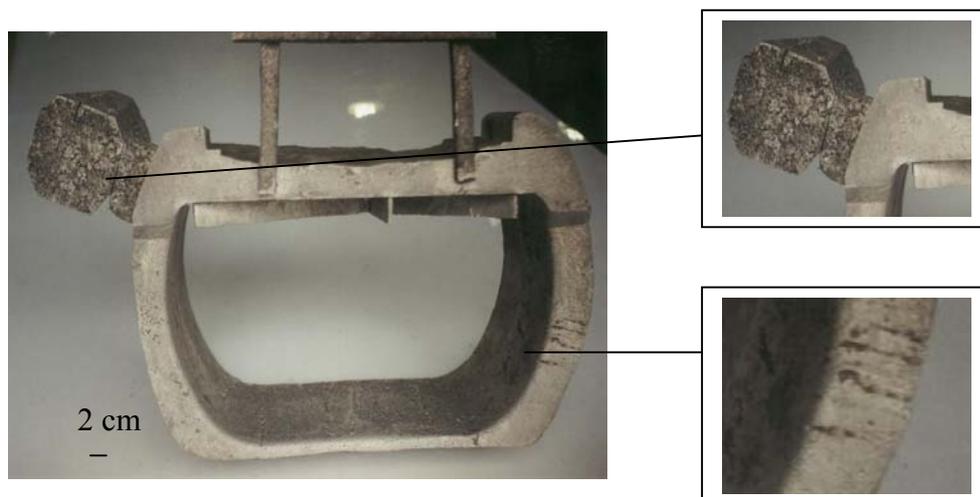


Figura 4.11 – Vista inferior da peça

Na figura 4.12, são mostradas, em detalhe, as nervuras que foram incorporadas ao modelo, através de colagem utilizando polímero de PMMA (polimetilmetacrilato). A união

de polímeros diferentes permite uma melhor reprodução de detalhes quando for necessário. Esta possibilidade também é citada na literatura [5,6,9,17,21].

É visto ainda, em detalhe um rechupe, que assumiu a forma de uma bolha de gás no massalote, evidenciando a atuação do massalote na alimentação da peça.

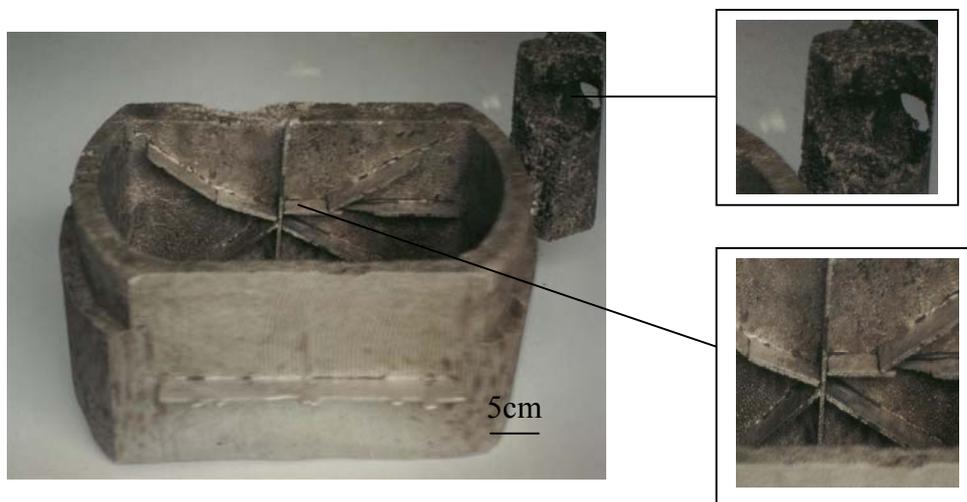


Figura 4.12 – Vista lateral da peça

Na figura 4.13 observa-se a proporcionalidade da peça, o sistema de canais de alimentação e o rechupe na parte superior da peça, que ocorreu devido ao massalote deste lado ter desprendido, ocasionando uma deficiência na alimentação. Este desprendimento pode ter ocorrido por formação de bolhas de gás no local ou por penetração da tinta que ocasionou uma descontinuidade no fluxo do metal neste ponto, originando um desmoronamento de areia no local, isolando ainda mais a secção do massalote. Observa-se, ainda, uma bolha de gás na lateral da peça, figura 4.14. A figura 4.14 mostra também detalhes do canal de ataque.

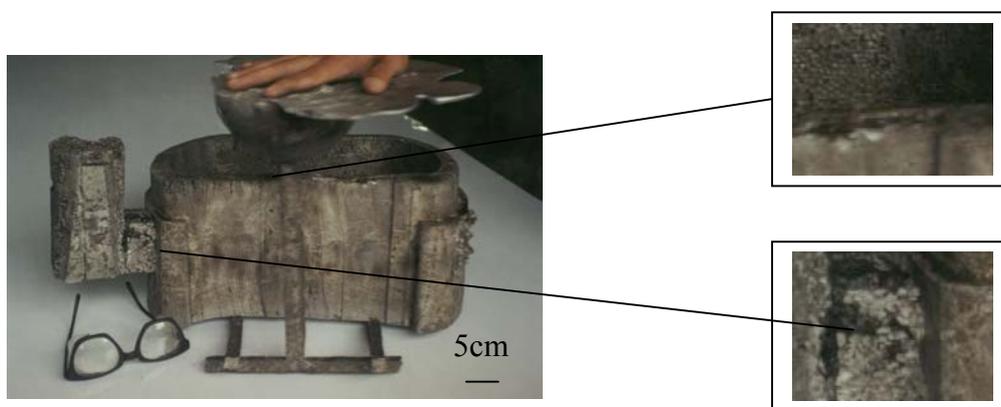


Figura 4.13 – Vista com proporção da dimensão da peça



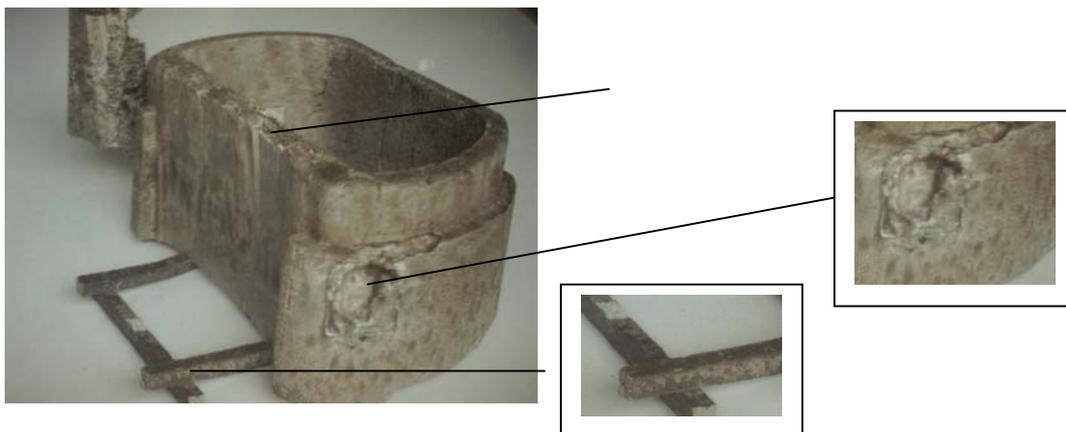


Figura 4.14 – Vista dos canais de ataque da peça

#### 4.4- Areia empregada

A areia para o processo é fundamental, pois esta influencia no acabamento superficial das peças e na permeabilidade do molde, afetando o escape dos gases de queima do modelo [4,5,8-10,16,17,26,33]. O procedimento de compactação do molde é de fácil adaptação.

A areia de granulometria fina (70/80 AFS) proporcionou um acabamento mais liso, como pode ser observado na figura 4.15, em contra partida quando se emprega a tinta com menor densidade (grafite), esta areia penetra mais na superfície do modelo, reproduzindo fielmente os detalhes da superfície do polímero.

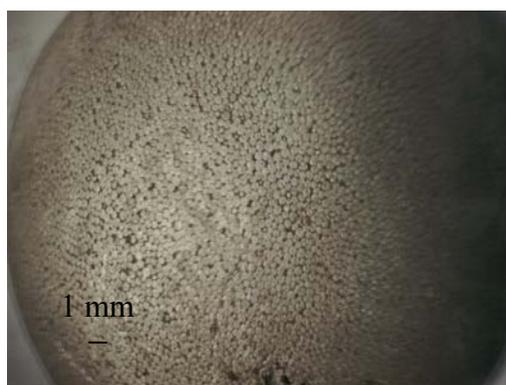


Figura 4.15 – Superfície com acabamento uniforme (areia 70/80 AFS)

Quando se emprega uma areia de maior granulometria (50/60 AFS) e uma tinta de maior densidade a superfície do polímero não é revelada com tanta nitidez. A areia mais grossa, compromete o acabamento, provocando uma maior aspereza e pequenas inclusões de areia, com mostra a figura 4.16.

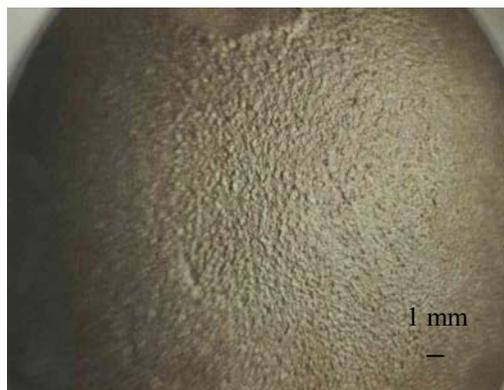


Figura 4.16 – Superfície com acabamento áspero (areia 50/60 AFS)

A areia 20-30 AFS, não é utilizada comumente em fundições, pois ocasiona um acabamento extremamente áspero. Quando se empregou uma tinta de menor densidade a aspereza foi ainda maior, e inclusive houve uma aderência de areia na superfície da peça, figura 4.17.



Figura 4.17 – Superfície com areia aderida (20/30 AFS)

Na análise geral quanto ao acabamento superficial as areias de 70/80 e 50/60 AFS, apresentaram um melhor desempenho. A areia 50/60 AFS, concilia acabamento superficial e permeabilidade, mas quando se utiliza a tinta de grafite com densidade de  $1,098 \text{ kg/cm}^3$  o seu acabamento pode ficar comprometido devido a presença de grãos grossos na areia. Este fato confirma as indicações de GREEN [30] e VANTANKHAH [31] quanto ao acabamento e densidade da tinta.

A espessura adequada da camada de tinta depende do módulo de finura da areia, ou seja: para areias mais grossas, a camada de tinta deverá ser mais espessa, para envolver mais o modelo não permitindo o acabamento áspero.

Além disto, observou-se que a densidade dos polímeros afeta o acabamento superficial, onde polímeros de densidade menor (massalote) mostraram se extremamente rugosos. Outro ponto a salientar é que o aumento da granulometria da areia, eleva a

permeabilidade do molde, reduzindo o tempo de vazamento e facilitando o escape dos gases do molde, o que propicia uma melhor qualidade das peças.

As avaliações mais significativas foram que a areia 20/30 AFS não atende as especificações quanto a um acabamento superficial da peça, pois promove uma superfície muito áspera. Mas, apresenta um menor tempo de vazamento devido o escape dos gases ser maior, para uma mesma espessura de camada.

As peças produzidas com a areia 50/60 AFS apresentaram um acabamento razoável e quanto ao tempo de vazamento, pode-se considerar intermediário entre a areia grossa e a fina para uma mesma espessura de camada.

As peças produzidas com a areia 70/80 AFS apresentaram um excelente acabamento superficial, sem pontos de penetração de areia. Estes resultados se mostraram especialmente bons quando se emprega a tinta de zirconita, que apresenta uma densidade média maior,  $1,542 \text{ kg/cm}^3$ , tabela 4.3.

O ponto mais relevante quanto ao uso das areias é o seu reaproveitamento sem a necessidade de tratamentos específicos de lavagem e queimas, apenas de resfriamento, com quantidades mínimas de descartes. Este fato mostra que o processo Molde Cheio diminui sensivelmente os rejeitos de areia de fundição e promove a sua reclassificação como resíduo de classe 2 para classe 3, o que diminui os custos nos aterros industriais e ainda possibilita reutilização em construção civil.

Entretanto, sentiu-se um forte odor proveniente do poliestireno queimado após a desmoldagem, provavelmente dos vapores condensados entre os grãos de areia. Este fato sugere a necessidade de maiores estudos para avaliar o efeito dos gases gerados, quando da produção em grandes escalas. As literaturas consultadas [4,5,6,9,17,21], não fazem menção de volumes liberados e de toxicidade do estireno, apenas da proporção dos produtos, onde o estireno é o aparece em maior concentração [9,17].

#### **4.5- Sistema de enchimento**

O sistema de enchimento adotado foi baseado na literatura [18,19,21] que emprega os princípios tradicionais de cálculos de enchimento para sistema de moldagem em areia a verde. A adoção de um sistema despressurizado foi devida á liga apresentar uma forte tendência à oxidação.

Na primeira série de fusão os dois modelos trabalharam com a relação de canais 1:1:2. A relação 1:1:2, não foi eficiente no preenchimento dos modelos utilizados, pois

ocorreram desmoronamentos nos canais de descida e a temperatura do metal estava muito baixa ocasionando perda total da corrida. Ainda na primeira série de fusões com a relação 2:2:2 para os dois modelos e a temperatura em torno do 660° C, novamente, o primeiro molde da semi-esfera não foi preenchido, confirmando o problema de temperatura baixa.

Então a temperatura foi elevada para 680° C e houve o preenchimento total das semi-esferas, figura 4.18.

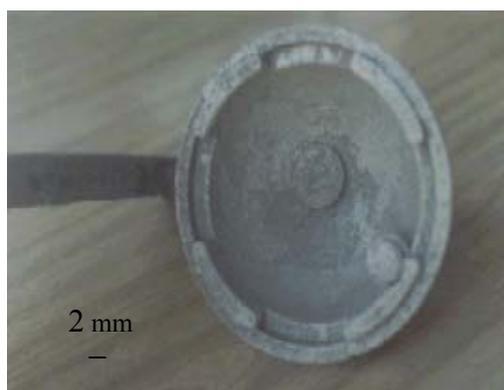


Figura 4.18 – Semi-esfera com bom acabamento

A relação de canais 2:2:2, para a semi-esfera mostrou-se eficiente quanto ao preenchimento total, mas para a sementeira na posição em que foi moldada faltou pressão, havendo necessidade de introduzir uma bacia auxiliar no funil de entrada e um segundo canal de ataque, que provocou a mudança da relação para 2:2:4, assegurando o sucesso no preenchimento da peça, figura 4.19.

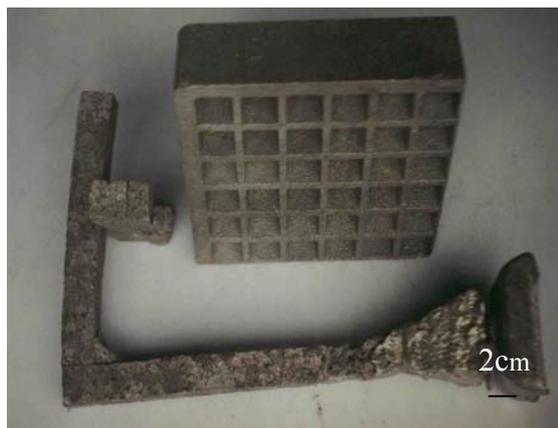


Figura 4.19 – Sementeira com o sistema de canais ajustados

A partir da segunda série de fusões foram obtidos sucessos no preenchimento das peças. As figuras 4.20 e 4.21 são exemplos das semi-esferas obtidas na 2ª e 3ª fusões.



Figura 4.20 – Semi-esfera com bom acabamento, obtida na 2ª série de fusões



Figura 4.21 – Semi-esfera com bom acabamento, obtida na 3ª série de fusões

A figura 4.22 mostra a região superior da amostra F2-A3EZ, onde pode ser observado na parte superior da peça, o defeito de dobra (solda fria), que é ocasionado pelo encontro de duas frentes de metal ou aprisionamento do filme de EPS [21].

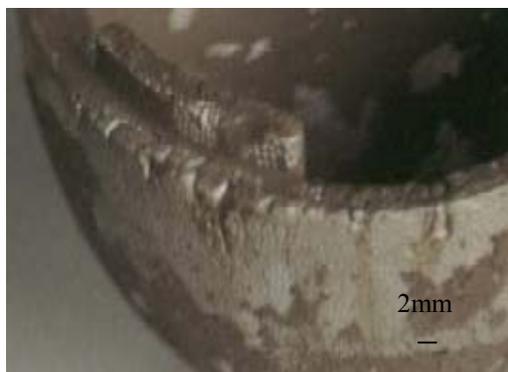


Figura 4.22 – Defeito de dobras ou solda fria

O sistema de canais de enchimento com a relação 2:2:2 e 2:2:4 são compatíveis tanto para peças simples como para peças complexas, pois os resultados baseados nas peças obtidas foram bons.

Como os tempos de vazamento foram longos em relação aos processos de areia a verde é necessário modificar o coeficiente de perda de carga  $\alpha$  no cálculo de velocidade.

#### 4.6- Análises Metalográficas

Após as avaliações de acabamento superficial foram realizadas as análises metalográficas em 3 amostras da semi-esfera e 3 amostras da sementeira. Onde duas amostras da semi-esfera (F1- A3EG e F2- A2EG) foram pintadas com tinta de grafite e vazadas em moldes com areia 70/80 AFS e 50/60AFS e a terceira amostra (F3- A3EZ) foi pintada com tinta de zirconita e vazada em molde com areia 70/80 AFS.

Duas amostras de sementeiras (F2- A2SG e F3- A2SG) foram pintadas com tinta de grafite e vazadas em molde com areia 50/60 AFS e a terceira amostra F3- A3SZ foi pintada com tinta de zirconita e vazada em molde com areia 70/80 AFS

Estas análises tiveram o propósito de avaliar a presença de porosidades no interior das peças ocasionadas pelo EPS e a microestrutura resultante. Em todas as amostras analisadas foram retirados dois corpos de prova para metalografias, conforme mostrado nas figuras 4.23 para a semi-esfera e 4.27 para a sementeira.

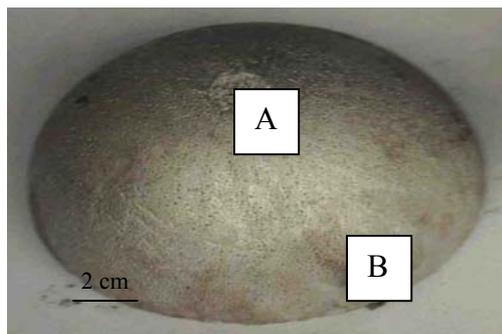


Figura 4.23 – Amostra F1- A3EG

A amostra F1-A3EG (semi-esfera) apresentou microporosidades distribuída em toda a região, não havendo concentração de vazios, figuras 4.24 e 4.25. Este tipo de porosidade é típico desta liga, sendo difícil à alimentação em peças espessas, pois a liga apresenta um grande intervalo de solidificação. A temperatura de vazamento foi da ordem de 685° C.

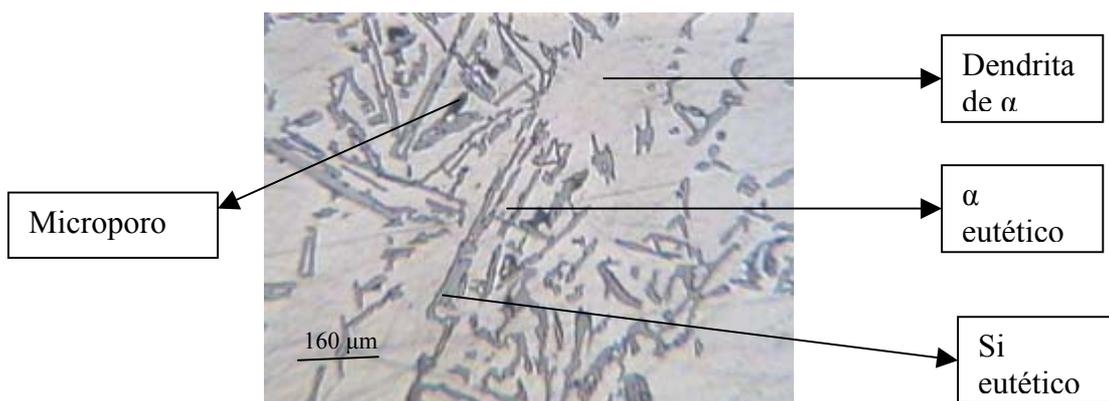


Figura 4.24 – Microestrutura da amostra F1- A3EG, corte A

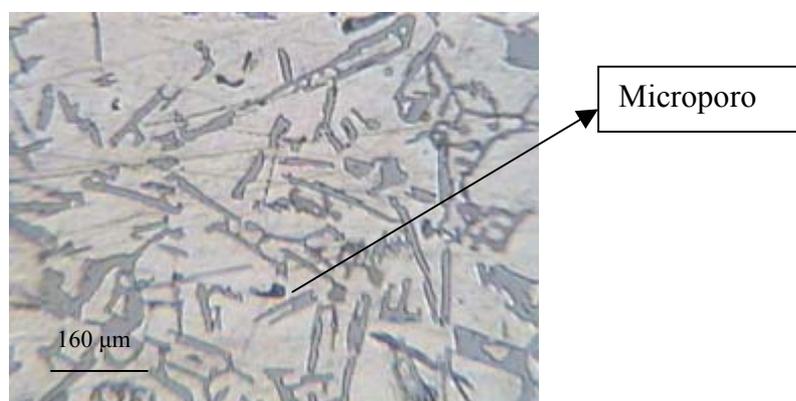


Figura 4.25 – Microestrutura da amostra F1- A3EG, corte B

A microestrutura resultante da 1ª fusão é típica de uma liga hipoeutética, com dendritas de  $\alpha$  e o eutético de silício na forma de plaquetas, apresentando entre elas a fase  $\alpha$ , como mostrado na figura 4.24 e 4.25. O teor de cobre desta liga é baixo, como mostra a tabela 3.1.

A amostra F2-A2EG, figura 4.26, apresentou porosidade em função da temperatura de vazamento ( $720^{\circ}\text{C}$ ), onde superesfriamento foi baixo, elevando o raio crítico, o que diminuiu a nucleação, propiciando um maior crescimento dos grãos, o que favoreceu o aparecimento de porosidade localizada é prejudicial á liga, segundo FUOCO [22], pois diminui a resistência da secção.

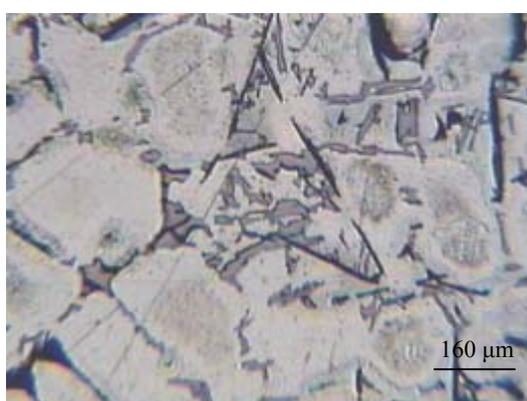


Figura 4.26 – Microestrutura da amostra F2- A2EG, corte A

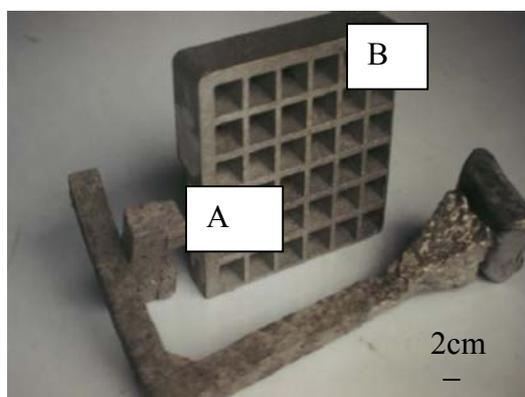


Figura 4.27 – Amostra F3- A3SZ

As amostras F3-A3EZ e F3-A3SZ (figuras 4.28 e 4.29) apresentaram porosidades localizadas nas regiões dos ataques, em função da permeabilidade da areia ser menor (grãos menores), a velocidade de escape dos gases foi menor, a temperatura de vazamento foi mais elevada, ocasionando um maior encharque de calor nesta região, além da liga ser hipoeutética.

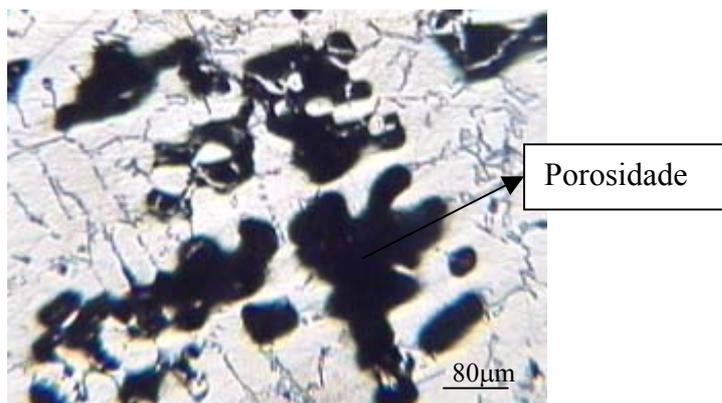


Figura 4.28- Microestrutura da amostra F3- A3EZ, corte A

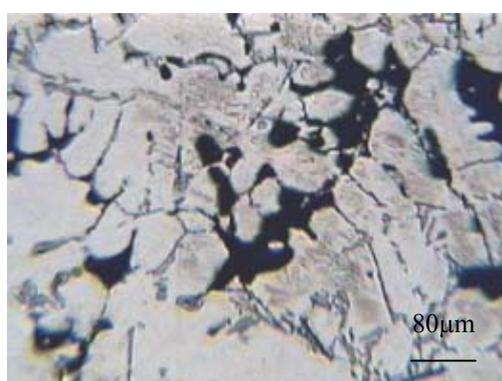


Figura 4.29 – Microestrutura da amostra F3- A3SZ, corte A

As amostras F2- A2SG e F3- A2SG, não apresentaram porosidades, mesmo sendo ligas hipoeutéticas, mas apresenta secções finas o que ocasionou uma menor zona pastosa, favorecendo a solidificação, como mostra as figuras 4.30 e 4.31. Estas peças apresentaram uma sanidade interna melhor se comparada com as vazadas em areia 70/80 AFS, quando vazadas em temperaturas maiores, provavelmente devido a uma troca térmica mais eficiente entre os grãos de areia e os gases.

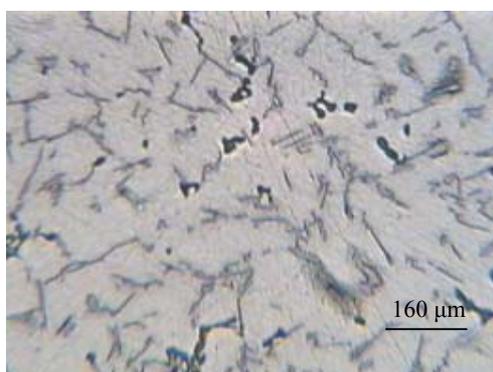


Figura 4.30 – Microestrutura da amostra F2- A2SG, corte A

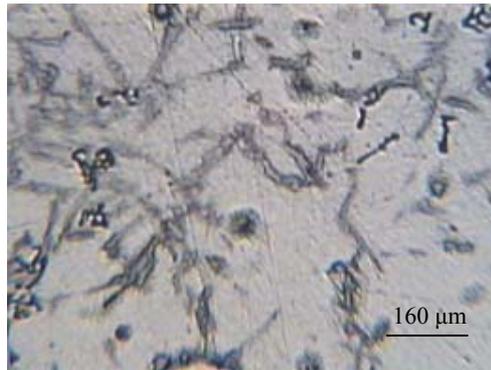


Figura 4.31 – Microestrutura da amostra F3- A2SG, corte A

Com base na composição da liga, tabela 3.1, a microestrutura da amostra F2-A2EG (figura 4.26) apresenta agulhões de  $Al_5FeSi$  devido ao teor de ferro alto e o de manganês baixo. E na figura 4.32, observa-se a formação dendrítica de  $\alpha$  e o eutético de silício não modificado, além de poros dispersos, indicando a dificuldade de alimentação.

A amostra F3-A3EZ da semi-esfera e as amostras F2-A2SG, F3- A3SZ e F3-A2SG das sementeiras, apresentaram distribuídos ao longo da superfície precipitados de cobre ( $CuAl_2$ ); precipitados de ferro ( $AlSiFeMn$ ), tipo “escrita chinesa”, devido à modificação com manganês na liga, tabela 3.1, alterar alterar a forma do ferro, como pode ser observado nas figuras 4.33, 4.34, 4.35 e 4.36.

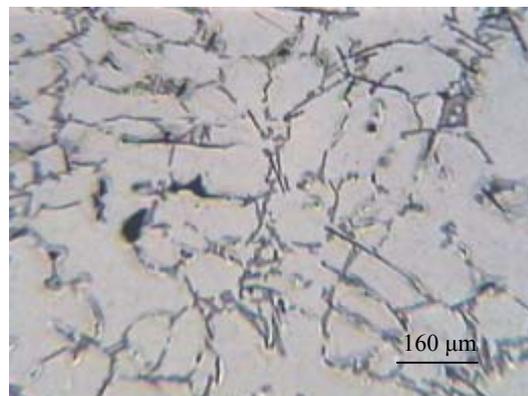


Figura 4.32 – Microestrutura da amostra F2- A2EG, corte B

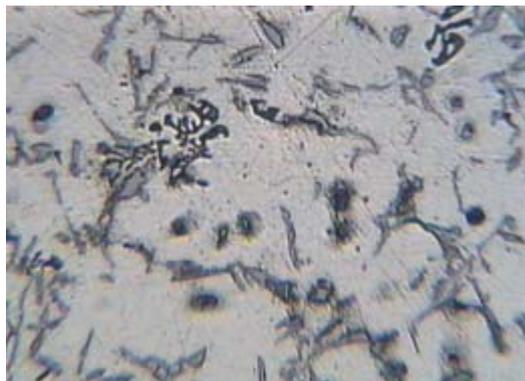


Figura 4.33 – Microestrutura da amostra F3- A3EZ, corte B



Figura 4.34 – Microestrutura da amostra F3- A3SZ, corte B

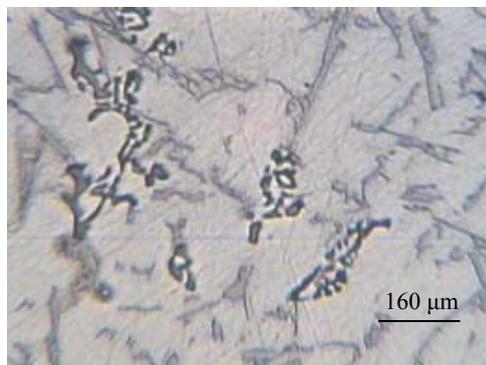


Figura 4.35 – Microestrutura da amostra F2- A2SG, corte B

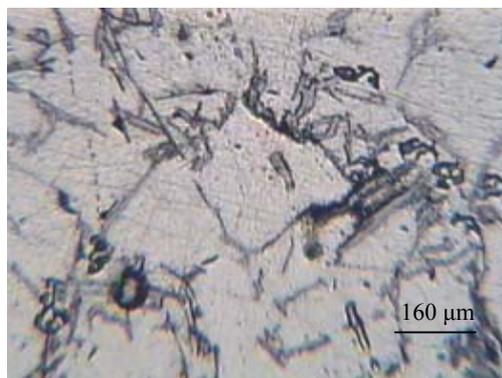


Figura 4.36 – Microestrutura da amostra F3- A2SG, corte B

Observando as microestruturas obtidas não foi constatada nenhuma modificação de características morfológicas da liga de alumínio hipoeutética em função do emprego do processo Molde Cheio.

Quanto às porosidades observadas estas são típicas da liga hipoeutética (grande intervalo de solidificação e alta temperatura de vazamento). Não sendo constatada nenhuma forma de porosidade de gases ( $H_2$ ), uma vez que o alumínio é muito suscetível este tipo de gás em temperaturas elevadas e devido a presença de um hidrocarboneto dentro do molde, que ao queimar gera gases contendo  $H_2$ .

## Capítulo 5

### **Conclusão**

## 5-CONCLUSÕES

A principal conclusão deste trabalho é que os resultados obtidos com os tipos de tintas, as areias e o sistema de alimentação empregado mostraram que é viável a adaptação do processo Molde Cheio à estrutura convencional de fundição para a obtenção de fundidos em ligas de alumínio/silício hipoeutéticas e que tal adaptação reduz custos de processo e ambientais.

Devem-se salientar também alguns fatos importantes com relação ao reaproveitamento da areia:

- As areias usuais de fundição podem ser empregadas sem nenhuma adição de ligantes ou aditivos no processo “Molde Cheio”, o que facilita seu reaproveitamento.
- A reutilização das areias nas experiências deste trabalho foi de 100%, bastando apenas separar os respingos de metais e resfriá-la após o uso, sem a necessidade de empregar equipamentos e tratamentos de lavagem e queima, reduzindo os custos de tratamento para reaproveitamento.
- O descarte da areia, que além de ser mínimo, é reclassificado de classe de resíduos II para a classe de resíduos III. Esta mudança de classe apresenta um custo menor de armazenagem nas unidades de aterros industriais e ainda facilita o seu emprego na construção civil.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir também que:

- O acabamento superficial obtido com as areias de 50/60 AFS e 70/80 AFS atendem perfeitamente os requisitos de acabamento de um fundido de qualidade.
- A areia 70/80 AFS possui uma permeabilidade menor, o que dificulta a saída dos gases e eleva o tempo vazamento.
- A areia 20/30 AFS, é muito grossa e causa danos na superfície dos fundidos, mas promove um escape de gases maior, diminuindo o tempo de vazamento.

- As duas tintas de fundição empregadas: ZIRCOMIL/KS 022/20, marca Refratek, e ÁLCOOL GEL/11, marca Foseco adaptaram-se bem ao processo sem a adição de aditivos ou mudanças de concentrações. Apenas deve-se conciliar a densidade da tinta com a do modelo, pois com baixas densidades ocorre penetração nos interstícios das superfícies do modelo.
- A técnica de imersão mostrou-se eficiente na pintura e obtenção de camadas, tanto para peças planas com cavidades como para peças côncavas. Com o sistema de jorro deve-se ter o cuidado para não lavar a tinta já depositada.
- O acabamento inadequado de algumas peças ocasionado pela tinta que penetrou na superfície pode ser eliminado nas ligas de alumínio com um jateamento de granalha de aço.
- A temperatura de vazamento do processo Molde Cheio deve ser mais elevada que a do processo em areia verde. Para esta liga entre 700 a 740° C.
- Os métodos de cálculos empregados foram satisfatórios, apenas necessitando ajustes quanto ao funil de entrada e ao coeficiente de perdas,  $\alpha$ , no cálculo da velocidade do metal devido à formação de gases nos canais.
- A baixa densidade dos polímeros nos sistemas de canais não afetou o processo de alimentação.
- A densidade dos polímeros se mostrou uma variável importante no acabamento superficial devido à não uniformidade superficial em densidades menores.
- O sistema de compactação (vibração) é de fácil adaptação para qualquer fundição.
- A etapa de acabamento das peças foi simples, necessitando apenas de rebarbação nas áreas dos canais de ataque.

## Capítulo 6

### **Sugestões para trabalhos futuros**

## 6-SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No desenvolvimento deste trabalho alguns assuntos mostraram-se interessantes de serem mais detalhadamente estudados a fim de melhor conhecer o processo de fundição de Molde Cheio. Algumas técnicas de análises adotadas também mostraram ter grande potencial, necessitando entretanto, de aperfeiçoamento. Infelizmente, estes estudos não puderam ser realizados, ficando como sugestões para próximos trabalhos.

- Empregar a técnica usando como polímero o polimetilmetacrilato ou mistura deste com o poliestireno, para avaliar a possibilidade de obter fundidos ferrosos, que é o maior número de empresas de fundições da região.
- Empregar tintas com viscosidades maiores, para avaliar a possibilidade de utilizar a areia 20/30 AFS sem comprometer o acabamento, possibilitando uma redução de custos.
- Avaliar o coeficiente de perda de carga  $\alpha$  na velocidade de preenchimento dos moldes, com o objetivo de diminuir a secção dos canais e o tempo de vazamento das ligas de alumínio.
- Adaptar um outro sistema de funil de entrada do metal líquido evitando desperdício de metal e lavagem da areia para dentro da cavidade do molde.
- Avaliar a questão ambiental, no que se refere a evolução de gases, em termos de volume e toxicidade dos mesmos.

## Capítulo 7

# **Revisão Bibliográfica**

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INTERNET: [\\www.oit.doe.gov/factsheets/metalcast/lostfoam.html](http://www.oit.doe.gov/factsheets/metalcast/lostfoam.html)  
<05/Dez/2000>
- [2] INTERNET: [\\www.afstransactions/unb.edu/~foundry](http://www.afstransactions/unb.edu/~foundry) < 23/Set/1999>
- [3] BROWN, J.R. , Processos de Fundição a poliestireno, atual estágio de desenvolvimento, palestra 4<sup>o</sup> CONBRAFUND, São Paulo, 1984, 129-136.
- [4] INTERNET: [\\www..styrochem.com/lostfoam.html](http://www..styrochem.com/lostfoam.html) < 23/set/1999>
- [5] BAILEY, R. , Understanding the Evaporative Pattern Casting Process ( EPC), art. Modern casting, Abril , 1982, pg.58, 72
- [6] LEE, H.S., Forming Conditions of Gray Iron Casting in Full Mold Process with Unbonded Sand Molds, art. AFS Transactions, vol. 84, 1976, pg. 559-570.
- [7] CORAZZA F<sup>O</sup>, E. C. Termoplásticos, os materiais e suas transformações, 4<sup>th</sup> Ed., São Paulo, 1995, pg.18-79.
- [8] PIWONKA, T.S., A comparison of lost pattern casting processes, art. Foundry T. Journal, vol.164, Setembro, 1990, pg. 626 –631
- [9] IMMEL, R.H., Expandable Polystyrene and Its Processing into Patterns for the Evaporative Casting Process, art. AFS Transaction, vol.87, 1979, pg.545-550.
- [10] CLEGG, A. J., Expanded- Polystyrene Molding a Status Report , art. Foundry T. Journal, vol.159, Setembro, 1985 ,pg. 177-196.
- [11] HARSLEY, R. , The Function of Tooling in Evaporative Pattern Molding, art. Modern Casting, Setembro, 1989, pg.32-33.
- [12] KANICKI, D.P, Foam Producers Aim for Improved Material Control and Developments, art. Modern casting, Setembro , 1989.pg. 38-39.
- [13] PATZ ,M., Unique Casting Applications with Foam Patterns, art. Modern casting, Outubro, 1989, pg.36-37.
- [14] MRDJENOVICH, R. , Evaporative Pattern Casting at Ford, art. Modern Casting, Fevereiro, 1984, pg. 18, 78.
- [15] WARNER, M., MILLER, B.A., and LITTLETON, H.E., "Pattern Pyrolysis Defect Reduction in Lost Foam Castings, AFS Transactions, 1998, pg. 777-785.
- [16] LESSITER M J, Total Product Optimization via Lost Foam Casting Engineered Casting Solutions, Janeiro, 1999, p. 31.
- [17] GORIA, C.A. et alii, Metalurgical Science and Technology, Junho, 1983, p.14

- [18] MARIOTO, C. L. , Sistemas de Enchimento e Alimentação de Peças Fundidas, 1ª Ed.ABM, São Paulo, 1987, pg.74-90.
- [19] DUARTE, I. R. Alimentação e Sistema de Enchimento Horizontal, 2ª ed,ETT, Joinville, 1999, pg. 20-37.
- [20] AFS – Aluminium Casting Tecnology, 2ª ed, USA, 1993,pg. 263-285.
- [21] PERRONE, A., BONOLLO, F., WAGNER, V., Fonderia: Stato Dell'Arte, Alluminio, Magazine, N.4, Agosto, 1998, pg 32-41
- [22] FUOCO, R. Curso de Fundição de Ligas de Alumínio, ABM,são Paulo 1994, pg. 21-39.
- [23]LAWRENCE, M. D., RAMSAY C.W., and ASKELAND, D.R., "Some Observations and Principles for Gating of Lost Foam Castings", AFS Transactions, 1998, p. 349.
- [24] HILL, M., VRIEZE, A.E., MOODY T.L., RAMSAY, C.W., and ASKELAND D.R.,"Effect of Metal Velocity on Defect Formation in Al LFCs", AFS Transactions, 1998, p. 365.
- [25]BENNETT, S., RAMSAY, C.W., and ASKELAND D.R., "Temperature Gradients During Fill and Solidification of Lost Foam Aluminum Castings", AFSTransactions, 1998, p 357.
- [26] GURDOAN, O.; HUANG, H., AKAY, H. U.; FINCHER, W. W.; WILSON, V.E, Mold Filling Analysis for Ductile Iron Lost Foam Castings, art. AFS Transactions,vol. 96, pg. 451–453
- [27]SHIVKUMAR, S., L.WANG, D.APELIAN, The Lost Foam Casting of Aluminum Alloy Components, Journal of Material, November,1990, pg. 38-45.
- [28]HEINE, H.J., A Progress Repot : Evaporative Polystyrene Patterns – Part II, \_ art. Foundry M&T, January 1983, pg. 64-70.
- [29] LEIHOLZ, R. , Modelo de isopor, econômico e versátil, art. Fundição e Matéria e prima, Abril 1980, pg.32-34.
- [30] GREEN, J. J., RAMSAY, C.W., and ASKELAND D.R.,"Formation of Surface Defects in Gray Iron Lost Foam Castings", Am. Foundrymen's Soc. Trans, 1998, p.339
- [31] VATANKHAH, B, SHELDON, D., and LITTLETON H.E., "Optimization of Vibratory Sand Compaction., AFS Transactions, 1998, pg. 335- 346.
- [32] BAST, J , A utilização do lost foam na fundição baixa pressão, art. Fundição e

serviços, Maio ,1999,pg.22-27.

- [33] SOCIESC, DGQ – Instrução de Trabalho nº 7325, Determinação do ponto de fusão de materiais poliméricos, revisada em 2002.
- [34] ABIFA, CEMP – Comissão de Especificação de Matérias – Primas, norma nº 115, Determinação da densidade relativa de líquidos usados em fundição, pelo método do densímetro de imersão, 1995.
- [35] ABIFA, CEMP – Comissão de Especificação de Matérias – Primas, norma nº 073, Determinação do tempo de escoamento de líquidos usados em fundição, pelo copo CEMP, 1995.
- [36] ABIFA, CEMP – Comissão de Especificação de Matérias – Primas, norma nº 069, Determinação da espessura da camada de tinta para fundição aplicada pelo processo de pintura por imersão, 1995.
- [37] PAN,E.N.,LIAO,K.Y., Study on flowability of EPC A356 Al Alloy, AFS Transactions, 1998, pg. 233- 246.
- [38] YANG,J., HUANG, T. FU,J. , Study of Gas Pressure in EPC (LFC) Molds, AFS Transactions, 1998, pg. 21- 26.

## Capítulo 8

### **Anexos**

## ANEXO 1

Para o dimensionamento do sistema de enchimento foi necessário estimar o peso das peças, sendo assim efetuou-se inicialmente o cálculo do volume das peças empregadas. Com base nas cotas mostradas na figura A1, determinou-se o volume total da semi-esfera oca, contendo um cilindro reto com secção oblíqua no seu interior.

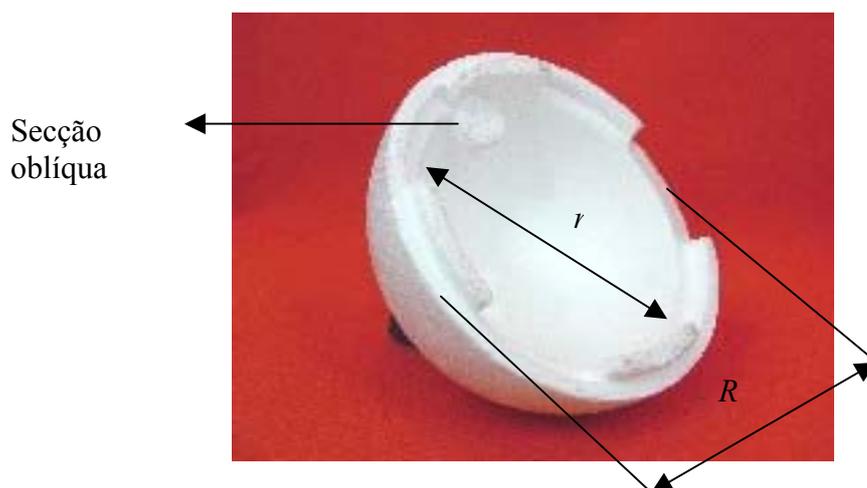


Figura A1 – Semi-esfera oca

### 1.1-Cálculo do volume da peça

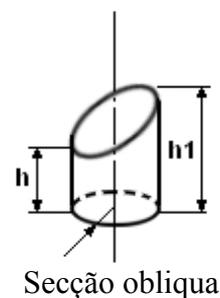
$$V = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot (R^3 - r^3) + \pi \cdot r \cdot c^2 \cdot \frac{(h + h1)}{2}$$

$$V = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot [(74,1)^3 - (59,15)^3] + \pi \cdot (11,53)^2 \cdot \frac{(37,1 + 20)}{2}$$

$$V = 418710,61 + 3460,18$$

$$V = 422170,79 \text{ mm}^3$$

$$V = 422,17 \text{ cm}^3$$



Com base no volume da semi-esfera determinou-se o peso estimado da peça, empregando a densidade da liga de alumínio,  $\delta = 2,69 \text{ g/cm}^3$ .

### 1.2-Cálculo da massa (Peso) da semi-esfera:

$$\delta = \frac{m}{V}$$

$$2,69 = \frac{m}{422,17}$$

$$m = 1135 \text{ g}$$

Com o valor estimado do peso da peça, determinou-se a vazão gravimétrica e volumétrica em função do peso [18,19] necessárias para dimensionar o sistema de canais.

### 1.3-Cálculo da vazão gravimétrica:

Com base em experimentos práticos com ligas de alumínio em moldes em areia a verde na fundição da Escola Técnica Tupy, em vazamento por gravidade adotou-se o tempo inicial de 6 segundos para o vazamento do molde.

$$\begin{array}{r} 1135 \text{ g} \quad \underline{\quad\quad} 6 \text{ s} \\ \times \quad \underline{\quad\quad} 1 \text{ s} \end{array}$$

$$x = 189 \text{ g/s}$$

### 1.4-Cálculo da vazão volumétrica:

Segundo MARIOTO [18], a vazão volumétrica de uma liga de alumínio em vazada por gravidade em canais despressurizados é de  $2,4 \text{ g/cm}^3$ , logo:

$$\begin{array}{r} 2,4 \text{ g} \quad \underline{\quad\quad\quad} 1 \text{ cm}^3 \\ 189 \text{ g/s} \quad \underline{\quad\quad\quad} x \end{array}$$

$$x = 78,75 \text{ cm}^3/\text{s}$$

### 1.5-Cálculo da velocidade do metal:

Para o cálculo da velocidade do metal, mediu-se a altura do canal de descida (H) e com base na literatura [18,19] atribui-se para o coeficiente de perda de carga ( $\alpha$ ) um valor médio entre o valor máximo para sistemas pressurizado e mínimo do sistema despressurizado, resultando no valor de 0,52. E (g) é a aceleração da gravidade atuando no sistema.

$$V = \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

$$V = 0,52 \cdot \sqrt{2 \cdot 980 \cdot 27,5}$$

$$V = 120,72 \text{ cm/s}$$

### 1.6-Cálculo da Área do Canal de descida:

O dimensionamento dos canais é obtido pela menor secção do sistema despressurizado, que no caso é o canal de descida. Assim com base nos valores de massa de alumínio ( $m$ ), densidade ( $\delta$ ), velocidade ( $V$ ) calculada com base no tempo ( $t$ ) adotado, tem-se a área do canal de descida ( $A$ ) é :

$$A = \frac{m}{\delta \cdot V \cdot t}$$

$$A = \frac{1135}{2,4 \cdot 120,72 \cdot 6}$$

$$A = 0,65 \text{ cm}^2$$

#### 1.6.1-Cálculo das dimensões dos canais de descida, distribuição e ataque

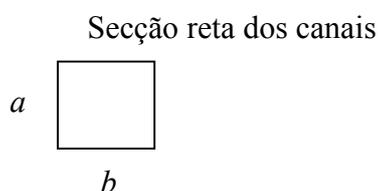
Para a confecção dos canais são necessárias as medidas laterais deste, então arbitrando que a secção transversal dos canais seja quadrada tem-se:

$$\text{Se } a = b$$

$$S = a^2$$

$$a = \sqrt{0,65}$$

$$a = 0,806 \text{ cm, logo } a = b = 0,806 \text{ cm}$$



#### 1.6.2-Cálculo das áreas dos canais para as relações

Relação 1:1:2, área do canal de descida e distribuição é igual a  $0,65 \text{ cm}^2$  e a área do canal de ataque é  $1,3 \text{ cm}^2$ .

Relação 2:2:2, área do canal de descida, distribuição e ataque é igual a  $1,3 \text{ cm}^2$ . Para facilitar o corte do EPS, os canais foram projetados para terem seções transversais quadradas.

### 2.1-Cálculo do volume da sementeira

Com base nas cotas apontadas na figura A2, determinou-se o volume total da sementeira através da fórmula deduzida de um paralelepípedo com furos na forma de troncos de pirâmides.

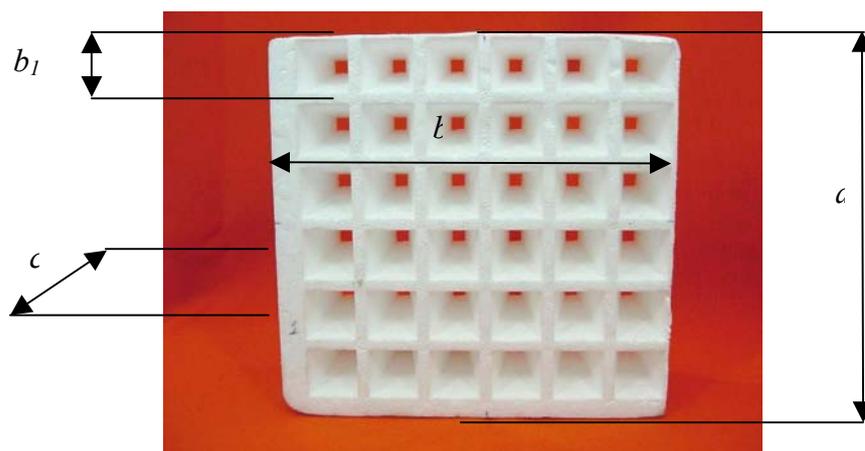


Figura A2 – Sementeira

O modelo de peça sementeira apresenta o formato de um paralelepípedo com 36 furos de troncos de pirâmide de bases paralelas, figura A3 (obelisco). Portanto, o cálculo considerou o volume total do paralelepípedo regular e foram subtraídos os furos de cada tronco de pirâmide, além do rebaixo na forma de um prisma retangular, figura A4. Assim o volume total da sementeira é dado por:

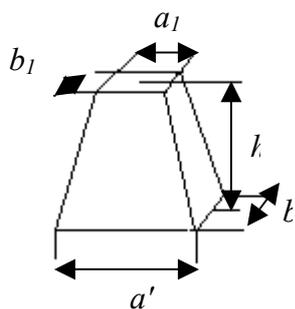


Figura A3

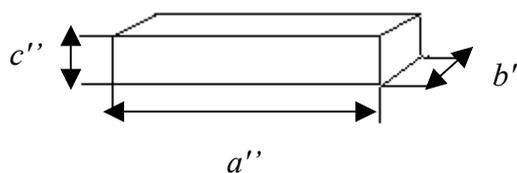


Figura A4

$$V = a \cdot b \cdot c - \left\{ \frac{h}{6} \cdot [(2a' + a_1) \cdot b + (2a_1 + a') \cdot b_1] \cdot n + a'' \cdot b'' \cdot c'' \right\}$$

$$V = 170.170.47 - \left\{ \frac{47}{6} \cdot [(2.22 + 5) \cdot 22 + (2.5 + 22) \cdot 5] \cdot 36 + 85.17.10 \right\}$$

$$V = 1358300 - \{349116 + 14450\}$$

$$V = 994734 \text{ mm}^3$$

$$V = 994,734 \text{ cm}^3$$

Com base no volume da sementeira determinou-se o peso estimado da peça, empregando a densidade da liga de alumínio.

## 2.2-Cálculo da massa (Peso) da semi-esfera:

$$\delta = \frac{m}{V}$$

$$2,69 = \frac{m}{994,734}$$

$$m = 2675,83 \text{ g}$$

Com o valor estimado do peso da peça, determina-se a vazão gravimétrica e volumétrica em função do peso [18,19] necessárias para dimensionar o sistema de canais.

### 2.3-Cálculo da vazão gravimétrica:

Como citado anteriormente, o valor adotado para o tempo inicial para o vazamento do molde foi de 6 segundos

$$\begin{array}{r} 2675,83 \text{ g} \quad \underline{\quad 6 \text{ s}} \\ \times \quad \underline{\quad \quad \quad 1 \text{ s}} \end{array}$$

$$x = 445,97 \text{ g/s}$$

### 2.4-Cálculo da vazão volumétrica:

Em função das condições serem as mesmas manteve-se, o valor proposto por MARIOTO [18], a vazão volumétrica de uma liga de alumínio em vazada por gravidade em canais despressurizados é de  $2,4 \text{ g/cm}^3$ , logo:

$$\begin{array}{r} 2,4 \text{ g} \quad \underline{\quad \quad \quad 1 \text{ cm}^3} \\ 445,97 \text{ g} \quad \underline{\quad \quad \quad x} \end{array}$$

$$x = 185,8 \text{ cm}^3/\text{s}$$

### 2.5-Cálculo da velocidade do metal:

Para o cálculo da velocidade do metal, adotou-se o parâmetro da semi-esfera, devido o molde e a liga serem os mesmos

$$\begin{aligned} V &= \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \\ V &= 0,52 \cdot \sqrt{2 \cdot 980 \cdot 27,5} \\ V &= 120,72 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

## 2.6-Cálculo da Área do Canal de descida:

O dimensionamento dos canais é obtido pela menor secção do sistema despressurizado, que no caso é o canal de descida.

$$A = \frac{m}{\delta.V.t}$$

$$A = \frac{2675,8}{2,4.120,72.6}$$

$$A = 1,539 \text{ cm}^2$$

### 2.6.1-Cálculo das dimensões dos canais de descida, distribuição e ataque

Para a confecção dos canais são necessárias as medidas laterais deste, então arbitrando que a secção reta dos canais seja quadrada tem-se:

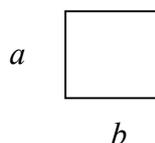
$$\text{Se } a = b$$

$$S = a^2$$

$$a = \sqrt{1,539}$$

$$a = 1,24 \text{ cm, logo } a = b = 1,24 \text{ cm}$$

Secção reta dos canais



### 2.6.2-Cálculo das áreas dos canais para as relações

Relação 1:1:2, área do canal de descida e distribuição é igual a  $1,54 \text{ cm}^2$  e a área do canal de ataque é  $3,08 \text{ cm}^2$ .

Relação 2:2:2, a área do canal de descida, distribuição e ataque é igual a  $3,08 \text{ cm}^2$ . Para facilitar o corte do EPS, os canais foram projetados para terem seções transversais quadradas.

Para a relação 2:2:4, a área total do canal de ataque foi de  $6,16 \text{ cm}^2$ .

## 3.1- Cálculo do volume da peça extra



Figura A3 – Peça extra

Para o cálculo do volume da camisa isolante, foi necessário dividi-la em quatro secções de forma retangular.

### 3.1.1- Cálculo do volume da peça

$$V = V_a + V_b + V_c + V_d$$

$$V = 175.310.35 + 240.35.145 + 175.310.35 + 170.250.15$$

$$V = 1898750 + 1218000 + 1898750 + 637500$$

$$V = 5653000 \text{ mm}^3$$

$$V = 5653,0 \text{ cm}^3$$

A camisa isolante, apresenta secções espessas, sendo necessário ter-se uma solidificação direcional para evitar rechupes durante a solidificação. Para se obter esta solidificação direcional foi necessário avaliar os requisitos térmicos e volumétricos, que possibilitam o dimensionamento dos massalotes, assim este deve satisfazer os dois requisitos.

### 3.2- Requisito Térmico

Este requisito deve existir para gerar um gradiente de temperatura positivo em direção ao massalote. Para ter-se este requisito emprega-se a regra de Chvorinov, onde o módulo do massalote ( $Mm$ ) é proporcional ao módulo da peça ou secção ( $M$ ).

$$Mm = KM$$

$$\text{Onde: } Mm = K \frac{V_{\text{secção}}}{S_r}$$

$$Mm = K \frac{V_{\text{secção}}}{S_r} \text{ e } K=1,2 \quad (\text{coeficiente de proporcionalidade empírico})$$

$$Mm = 1,2 \frac{1218}{864}$$

$$Mm = 1,2 \cdot 1,4 = 1,7$$

Com base no módulo do massalote, calcula-se o diâmetro e a altura, baseado na equação de Chvorinov,  $Mm = K \frac{V}{Sr}$ , tem-se que o diâmetro do massalote cilíndrico é

dado por

$$Dm = \frac{Mm \cdot (1 + 4p)}{p}$$

$$Dm = \frac{1,7 \cdot (1 + 4 \cdot 2)}{2}$$

$$Dm = 7,65 \text{ cm}$$

Considerando altura do massalote ( $h'$ ) como  $h' = p \cdot Dm$ , temos  $h = 2 \cdot 7,65 = 15,3 \text{ cm}$

### 3.3- Requisito volumétrico

O requisito volumétrico é definido em função da contração do metal durante a solidificação da peça, havendo assim a necessidade de existir metal líquido para suprir esta contração do metal. Esta contração também está relacionada com a rigidez do molde, mas no caso do processo Molde Cheio esta rigidez é dada pela condição de vibração do molde, o que não foi possível mensurar, assim o coeficiente de contração adotado foi 0,075, valor médio para ligas de alumínio hipoeutéticas, com superaquecimentos de até 150°C.

$$Vm = \frac{V \cdot \beta}{n - \beta}$$

$$Vm = \frac{5653 \cdot 0,075}{0,14 - 0,075}$$

$$Vm = 6522,7 \text{ cm}^3$$

$$Dm = \sqrt[3]{\frac{Vm \cdot 4}{\pi \cdot p}}$$

$$Dm = \sqrt[3]{\frac{6522,7 \cdot 4}{\pi \cdot 2}}$$

$$Dm = 16 \text{ cm}$$

Com base nos requisitos térmico e volumétrico, definiu-se pelo uso de dois massalotes, com diâmetros de 8 cm e altura 16 cm, nas laterais da peça, próximos a união das secções mais espessas.

Para o ataque (pescoço) do massalote, define-se um módulo médio ( $Mn$ ) entre o módulo da peça ( $M$ ) e do massalote ( $Mm$ ), de modo que exista um gradiente em direção ao massalote. O ataque do massalote foi obtido pela relação:

$$M \langle Mn \langle Mm$$

$$1,4 \langle 1,55 \langle 1,7$$

Assim a dimensão do ataque é dada por:

$$Mn = \frac{a^3}{4.a^2}$$

$$a = 4.1,55 = 6 \text{ cm}$$

### 3.4 -Cálculo da massa (Peso) da peça

$$\delta = \frac{m}{V}$$

$$2,69 = \frac{m}{5653}$$

$$m = 15206,6 \text{ g}$$

Com o valor estimado do peso da peça, determina-se a vazão gravimétrica e volumétrica em função do peso [18,19] necessárias para dimensionar o sistema de canais.

### 3.3-Cálculo da vazão gravimétrica

Com base em experimentos práticos com ligas de alumínio na fundição da Escola Técnica Tupy, em vazamento por gravidade para peças com massa maior de 10 Kg adotou-se o tempo 20 segundos para o vazamento do molde.

$$\begin{array}{r} 15206,6 \text{ g} \quad \underline{\quad\quad} 20 \text{ s} \\ \times \quad \underline{\quad\quad\quad\quad} 1 \text{ s} \end{array}$$

$$x = 760,3 \text{ g/s}$$

### 3.4-Cálculo da vazão volumétrica

Segundo MARIOTO [18], a vazão volumétrica de uma liga de alumínio em vazada por gravidade em canais despressurizados é de  $2,4 \text{ g/cm}^3$ , logo:

$$\frac{2,4 \text{ g}}{760,3 \text{ g}} \frac{1 \text{ cm}^3}{\text{_____}} \times$$

$$x = 316,8 \text{ cm}^3/\text{s}$$

### 3.5-Cálculo da velocidade do metal

Para o cálculo da velocidade do metal, mediu-se a altura do canal de descida e com base na literatura [18,19] o coeficiente de perda ( $\alpha$ ) de carga adotada foi um valor médio entre o valor máximo para sistemas pressurizado e mínimo do sistema despressurizado. O coeficiente de perda de carga adotado nas 3 primeiras fusões foi de 0,52. Como na 4ª fusão a peça apresentava condições distintas das outras peças, optou-se por uma reavaliação do coeficiente em função do tempo de enchimento, uma vez que o previsto era de 6 segundos e se obteve tempos de 3 vezes maior, então se reduziu o valor 2,5 vezes. Com isto o novo coeficiente de perda de carga ( $\alpha$ ) empregado foi de 0,21.

$$V = \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

$$V = 0,21 \cdot \sqrt{2 \cdot 980 \cdot 42}$$

$$V = 60,25 \text{ cm/s}$$

### 3.6-Cálculo da Área do Canal de descida:

O dimensionamento dos canais é obtido pela menor secção do sistema despressurizado, que no caso é o canal de descida.

$$A = \frac{m}{\delta \cdot V \cdot t}$$

$$A = \frac{15206,6}{2,4 \cdot 60,25 \cdot 20}$$

$$A = 5,25 \text{ cm}^2$$

### 3.6.1-Cálculo das dimensões dos canais de descida, distribuição e ataque

Para a confecção dos canais são necessárias as medidas laterais deste, então arbitrando que a secção reta dos canais seja quadrada tem-se:

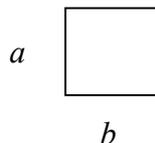
$$\text{Se } a = b$$

$$S = a^2$$

$$a = \sqrt{5,25}$$

$$b = 2,29 \text{ cm, logo } a = b = 2,29 \text{ cm}$$

Secção reta dos canais



### 3.6.2-Cálculo das áreas dos canais para as relações

Empregando a relação 2:2:4, as áreas dos canais de descida e distribuição foram de  $2,3 \text{ cm}^2$  e a área do canal de ataque foi de  $4,58 \text{ cm}^2$ .