## UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

# Estudo de Sistema de Canais para Fundição de Ligas de Alumínio por Gravidade

Autor: Jorge Kolososki Orientador: Rezende Gomes dos Santos Co-orientador: Ricardo Fuoco

42/2001

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

# Estudo de Sistema de Canais para Fundição de Ligas de Alumínio por Gravidade

Autor: Jorge Kolososki Orientador: Rezende Gomes dos Santos Co-orientador: Ricardo Fuoco

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

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

Campinas, 2001 S.P. - Brasil

United C Thunicamp K834e V. TOMEO BC/ 72164 PROC. 16.145-07 C D X PREÇO 11.00 DATA 256467 BIB-10 409445

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

K834e	Kolososki, Jorge. Estudo de sistema de canais para fundição de ligas de alumínio por gravidade / Jorge KolososkiCampinas, SP: [s.n.], 2001.			
	Orientadores: Rezende Gomes dos Santos, Ricardo Fuoco. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.			
	<ol> <li>Ligas de alumínio.</li> <li>Fundição em molde de areia.</li> <li>Santos, Rezende Gomes dos. II. Fuoco, Ricardo. III.</li> <li>Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.</li> </ol>			

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

### DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

# Estudo de Sistema de Canais para Fundição de Ligas de Alumínio por Gravidade

Autor: Jorge Kolososki Orientador: Rezende Gomes dos Santos Co-orientador: Ricardo Fuoco

Prof. Dr. Rezende Gomes dos Santos, Presidente UNICAMP

Prof. Dr. Claudemiro Bolfarini UFSCAR

Prof. Dr. Paulo Roberto Mei UNICAMP

Campinas, 27 de junho de 2001

111

## Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família: meus pais, esposa e filhas.

## Agradecimentos

À minha esposa Marta e minhas filhas Bárbara e Camila, pelo incentivo e apoio.

Aos meus pais, Basílio e Maria, pelo incentivo incondicional.

Ao Prof. Dr. Rezende Gomes dos Santos, da UNICAMP, meu orientador, pela ajuda, apoio, incentivo, acreditando sempre no meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Ricardo Fuoco, do IPT, meu co-orientador, pela amizade, confiança depositada, indicação do tema da pesquisa e por abrir as portas da Fundição e Laboratórios do IPT, possibilitando a realização deste trabalho.

Aos Professores Fernando Bressiani, Diretor da FEI, Erberto F. Gentile e Alcindo M. Ludovicce, do Departamento de Metalurgia, pelo incentivo e apoio.

Aos amigos Luiz Carlos Martinez e Rodrigo Magnabosco pelo estímulo, encorajamento, discussão, auxílio e revisão do texto.

Aos técnicos do IPT, Srs. Edison Roberto Corrêa e Marcelo de Andrade Bastos, pela ajuda incondicional, sem a qual este trabalho não poderia ser realizado.

À Adelaide Bispo de Sá e aos técnicos Ailton Custódio e Sandro A. Gimenez, do Centro de Laboratório de Materiais da FEI, pelo apoio, usinagem das placas e auxílio nos ensaios.

Aos Srs. Carlos Antonio Lind e Etevaldo S. Araujo, do Setor de Manutenção da FEI, pela confecção dos dispositivos de dobramento e basculamento e modelos de madeira.

Aos Engs. Cesar Augusto Filipini e Geraldo Liserre Junior, do Laboratório do Centro Tecnológico de Materiais, MTC, da Volkswagen do Brasil, pela realização dos ensaios de raios-x

E a todos que direta ou indiretamente me auxiliaram neste trabalho.

''A mente do homem, uma vez ampliada por uma nova idéia, jamais retorna à sua dimensão original"

**Oliver Wendell Holmes** 

## Resumo

KOLOSOSKI, Jorge, Estudo de Sistema de Canais para Fundição de Ligas de Alumínio por Gravidade, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001. 116 p. Dissertação (Mestrado)

Durante o vazamento dos moldes, o fluxo de metal através dos canais está sujeito a grande turbulência, gerando filmes de óxidos devido a exposição ao ar. Estes óxidos podem permanecer nas peças fundidas como descontinuidades, prejudicando as propriedades, em particular a resistência mecânica e a dutilidade. São apresentados os principais conceitos e as principais recomendações existentes na literatura para o projeto dos sistemas de canais de ligas com elevada tendência à oxidação, como as ligas de alumínio. Estes princípios e recomendações foram utilizados para projetar seis diferentes sistemas de canais para o preenchimento de placas na posição vertical, utilizando liga de alumínio UNS A03560. A avaliação do grau de turbulência alcançado em cada um dos sistemas de canais projetados foi feita através da maior ou menor geração de inclusões de óxidos, medida através de ensaios de flexão de corpos-de-prova retirados diretamente das placas. São apresentados os resultados destes ensaios de flexão e evidências de inclusões de óxidos nas fraturas dos corpos-de-prova ensaiados.

### Palavras Chave:

- Ligas de alumínio, Fundição, Sistema de canais, Basculamento do molde

## Abstract

KOLOSOSKI, Jorge, Study of runner system for gravity assisted casting of aluminum alloys,
Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001.
116 p. Dissertação (Mestrado)

During mould pouring, metal flow in runner system is submitted to large turbulence and air contact, producing oxide films. This oxide is incorporated to cast products as inclusions and discontinuities, reducing noticeably mechanical strength and ductility. The principal concepts and literature recommendations for the best runner system project applied to alloys with high oxidation tendency, like aluminum alloys, were presented in this work. This information was used to project six different runner systems for plate casting in vertical position, considering aluminum alloy UNS A03560 as the cast metal. The evaluation of turbulence degree reached in each one of the systems was made by oxide inclusion classification, comparing results of three-point bend tests in specimens obtained from the six plate cast procedures. Mechanical test results and oxide inclusion evidence in fracture surface of those broken specimens are presented.

### Key Words

- Aluminum alloy, Foundry, Runner system, Tilt pouring

# Índice

Resu	mo	vii
Abst	ract	viii
Lista	de Figuras	xii
Lista	de Tabelas	xvi
Nom	enclatura	xix
Capí	tulo 1 Introdução	1
1.1 (	Considerações iniciais	1
1.2	Estatísticas e aumento de consumo	2
1.3	Principais defeitos de fundição em ligas de alumínio	4
1.4	Objetivos	7
Capí	tulo 2 Revisão da Literatura	8
2.1	Oxidação dos metais	8
2.2	Oxidação do alumínio	9
2.3	Tipos de inclusões de óxido.	10
2.4	Mecanismos de formação de inclusões de óxido de alumínio	11
2.4.1	Turbulência superficial	12
2.4.2	Agitação superficial com projeção de líquido	14
2.4.3	Transferência de metal do forno para panelas e durante o vazamento nos moldes	15
2.5	Bolhas.	17
2.6	Efeito das bolhas de ar retidas e de inclusões de óxidos sobre as propriedades	.20
2.7	Normas de ensaio de flexão	. 24
2.8	Resistência à flexão.	25
2.9	Sistema de canais	27
2.9.1	Requisitos fundamentais	27

2.9.2	Princípios propostos em trabalhos pioneiros.	28
2.9.3	Recomendações para projeto de sistemas de canais	32
2.9.4	Novos conceitos utilizados no projeto de canais para ligas de alumínio	37
2.10	Tratamentos do banho	39
2.11	Processos de fundição	40
2.11.1	Fundição por gravidade	40
2.11.2	Fundição sob pressão (die casting)	42
2.11.3	Fundição sob baixa pressão	44
2.11.4	Fundição por gravidade utilizando basculamento do molde	47
Capítu	ilo 3 Materiais e Métodos	49
3.1	Introdução	49
3.2	Sistema de canais	49
3.2.1	Vazamento por cima	50
3.2.2	Vazamento por baixo	53
3.3	Moldagem	57
3.4	Liga utilizada e fundição	58
3.5	Desenvolvimento dos trabalhos experimentais	59
3.6	Vazamento usando basculamento do molde	59
3.7	Inspeção das placas por raio-x	60
3.8	Preparação dos corpos de provas	60
3.9	Ensaios	61
3.9.1	Ensaio de flexão	61
3.9.2	Medidas de densidade	65
3.9.3	Preparação e exame metalográfico	65
3.9.4	Exame da fratura	66

Capí	tulo 4 Resultados e Discussão	67
4.1	Introdução	67
4.2	Resultados gerais dos ensaios de flexão	71
	Х	

4.3	Análise dos resultados gerais	80
4.4	Resultados dos ensaios de flexão para faixas de densidade	82
4.5	Exame metalográfico	93
4.6	Exame fractográfico	98
Capí	ítulo 5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	101
5.1	Conclusões	101
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	103
Refe	rências Bibliográficas	104
Ane	хо І	109
- des	enho I.1: Sistema por Cima	110
- des	enho I.2: Sistema Basculante	111
- des	enho I.3: Sistema AFS	112
- des	enho I.4: Sistema Canal Faca	113
- des	enho I.5: Sistema com Filtro Vertical	114
- des	enho I.6: Sistema com Filtro Horizontal	115
- des	enho I.7: Placa Fundida	116

### Lista de Figuras

- Figura 2.1. Formação de uma gota (Runyoro et al., 1992)
- Figura 2.2. Desenho esquemático mostrando, num processo turbulento, a projeção de alumínio, a formação de óxido e a retenção de ar (Campbell, 1991)
- Figura 2.3. Esquema mostrando o enchimento instável de uma peça, com formação de múltiplas camadas de óxidos (Runyoro et al., 1992)
- Figura 2.4. Efeito do aumento da altura da queda do jato líquido de alumínio mostrando:
  (a) o filme de óxido permanece intacto; (b) o filme de óxido se acumulando para formar anéis de drosse e (c) o filme de óxido com ar aprisionado sendo incorporado ao banho líquido (Campbell, 1991)
- Figura 2.5. Esquema mostrando as vantagens do canal cônico em relação ao canal de seção constante. (a) Fluxo natural do um líquido em queda livre; (b) Aspiração de ar induzida pelo fluxo líquido em canal de seção paralela; (c) Fluxo líquido em um canal cônico (ASM Handbook, 1998)
- Figura 2.6. Desenho esquemático mostrando a formação de regiões de baixa pressão devido à variação abrupta de seção do canal (ASM Handbook, 1998)
- Figura 2.7. Desenho esquemático mostrando o escoamento de um fluído através de um duto formando um ângulo reto (a) e a conseqüente aspiração de ar (b); em (c) observa-se que o arredondamento minimiza ao problema e a turbulência (ASM Handbook, 1998).

- Figura 2.8. Desenho esquemático do dispositivo de flexão utilizado para quantificar a sanidade da placa fundida, vazada com diferentes velocidades de enchimento (Runyoro et al., 1992).
- Figura 2.9. Sistema de canais usados para fundir barras para ensaio de tração (Green e Campbell, 1994 e Sirrell e Campbell, 1997)
- Figura 2.10. Desenho de sistema de canais contendo todos detalhes pesquisados na época para diminuir a formação de inclusões de óxidos e aspirações de ar (Grube e Kura, 1955)
- Figura 2.11. Fundição sistema baixa pressão mostrando (a) equipamento convencional usando forno pressurizado e (b) usando bomba eletromagnética em forno aberto (Campbell, 1991).
- Figura 2.12. Arranjo esquemático da fundição por gravidade utilizando sistema de basculamento do molde (Campbell, 1991)

Figura 3.1. Desenho da placa usada na pesquisa. Medidas em mm

- Figura 3.2. Desenho esquemático dos sistemas de canais utilizados na pesquisa
- Figura 3.3. Desenho esquemático da bacia de vazamento e do canal de descida (mostrando as alturas  $h_1$  e  $h_2$ , as seções  $A_1$  e  $A_2$  e as velocidades  $V_1$  e  $V_2$ ). Medidas em mm
- Figura 3.4. Fotografia do dispositivo de basculamento do molde
- Figura 3.5. Esquema do dispositivo de dobramento utilizado para ensaiar os corpos de provas
- Figura 3.6. Fotografia do dispositivo de dobramento

- Figura 3.7. Fotografia do dispositivo de dobramento montado na máquina de tração mostrando o ensaio
- Figura 3.8. Fotografia dos 8 corpos de provas de uma determinada placa já ensaiados
- Figura 4.1. Fotografias das placas fundidas com seus respectivos canais. (a) Sistema Por Cima;
  (b) Basculante; (c) Sistema AFS; (d) Canal Faca; (e) Filtro Vertical; (f) Filtro Horizontal. Obs.: A numeração impressa em cada placa corresponde à identificação original das corridas.
- Figura 4.2. Fotografia de uma placa fundida por cima, descartada por apresentar elevado nível de defeito
- Figura 4.3. Fotografia de uma placa fundida utilizando canal recomendado pela AFS. (a) Bolhas de ar detectadas por raio-x; (b) Bolhas de ar afloradas após usinagem
- Figura 4.4. Gráfico mostrando as médias gerais obtidas de resistência à flexão e deformação para todos sistemas de canais
- Figura 4.5. Microestrutura de uma placa fundida destacando a presença de micro-poros. 150x
- Figura 4.6. Gráfico mostrando as médias e desvios padrões de resistência à flexão e deformação em função do sistema de canais para os corpos de provas da faixa 1
- Figura 4.7. Gráfico mostrando as médias e desvios padrões de resistência à flexão e deformação em função do sistema de canais para os corpos de provas da faixa 2
- Figura 4.8 Gráfico correlacionando os resultados médios obtidos nas faixas 1 e 2 de resistência à flexão e de deformação para todos sistemas de canais estudados

- Figura 4.9 Gráfico correlacionando os resultados médios de resistência à flexão em relação aos resultados médios de deformação dos corpos de provas da faixa 2, para todos os sistemas de canais estudados
- Figura 4.10 Microestrutura típica de placa fundida, constituída essencialmente por dendritas proeutéticas da fase  $\alpha$  e eutético  $\alpha$ +Si modificado. Sem ataque. 125x.
- Figura 4.11 Microestrutura típica de placa fundida, destacando a presença de inclusão de óxido associados com micro-porosidade. Sem ataque. 125x
- Figura 4.12 Microestrutura superficial de uma placa de alumínio mostrando o lado que solidificou em contato com: (a) o resfriador; (b) a areia. (a) e (b) 150x
- Figura 4.13 Microestrutura típica de placa fundida, destacando a presença de inclusão de óxido com morfologia de filme, do tipo amorfo. Sem ataque. 500x
- Figura 4.14 Aspecto típico das fraturas de corpos de prova retirados das placas fundidas quando observadas em microscópio eletrônico de varredura. A superfície de fratura é constituída por alvéolos (típica de fratura dúctil) e algumas micro-porosidades. (a) e (b) 40x
- Figura 4.15 Aspecto típico de inclusão de óxido tipo amorfo observado na superfície de fratura de corpos de prova retirados de placa fundida quando observados em microscópio eletrônico de varredura. (a) 500x e (b) 2000x

## Lista de Tabelas

- Tabela 1.1. Produção mundial de alumínio primário em1998 (Anuário estatístico ABAL, 1999)
- Tabela 1.2.Composição do consumo por produto e setor (1997) (Anuário estatístico ABAL,<br/>1999)
- Tabela 3.1.Descrição sucinta dos sistemas de canais (para maiores detalhes, ver Desenhos I.1 aI.6 no Anexo I)
- Tabela 3.2.Composição química da liga ANSI 356.0 e resultado da análise química de amostra<br/>de uma placa
- Tabela 3.3. Exemplo de tabela apurada após levantamento dimensional e ensaio de flexão. As últimas duas colunas mostram os resultados de resistência à flexão e deformação utilizados na análise
- Tabela 4.1.Resultados de resistência à flexão e de deformação dos corpos de prova e média e<br/>desvio padrão por placa fundida com enchimento por Cima
- Tabela 4.2.Resultados médios e geral e desvios padrões de resistência à flexão e de deformação<br/>por placa fundida por Cima
- Tabela 4.3.Resultados de resistência à flexão e de deformação dos corpos de prova e média e<br/>desvio padrão por placa fundidas pelo sistema AFS

- Tabela 4.4.Resultados médios e geral e desvios padrões de resistência à flexão e de deformaçãopor placa fundida pelo sistema AFS
- Tabela 4.5.Resultados de resistência à flexão e de deformação dos corpos de prova e média e<br/>desvio padrão por placa fundidas pelo sistema Basculante 10
- Tabela 4.6.Resultados médios e geral e desvios padrões de resistência à flexão e de deformaçãopor placa fundida pelo sistema Basculante 10
- Tabela 4.7.Resultados de resistência à flexão e de deformação dos corpos de prova e média e<br/>desvio padrão por placa fundidas pelo sistema Basculante 20
- Tabela 4.8.Resultados médios e geral e desvios padrões de resistência à flexão e de deformaçãopor placa fundida pelo sistema Basculante 20
- Tabela 4.9.Resultados de resistência à flexão e de deformação dos corpos de prova e média e<br/>desvio padrão por placa fundidas pelo sistema Basculante 30
- Tabela 4.10. Resultados médios e geral e desvios padrões de resistência à flexão e de deformaçãopor placa fundida pelo sistema Basculante 30
- Tabela 4.11. Resultados de resistência à flexão e de deformação dos corpos de prova e média e desvio padrão por placa fundidas pelo sistema Canal Faca
- Tabela 4.12. Resultados médios e geral e desvios padrões de resistência à flexão e de deformaçãopor placa fundida pelo sistema Canal Faca

e

Tabela 4.13. Resultados de resistência à flexão e de deformação dos corpos de provamédia e desvio padrão por placa fundidas pelo sistema Filtro Vertical

- Tabela 4.14. Resultados médios e geral e desvios padrões de resistência à flexão e de deformaçãopor placa fundida pelo sistema Filtro Vertical
- Tabela 4.15. Resultados de resistência à flexão e de deformação dos corpos de prova e média edesvio padrão por placa fundidas pelo sistema Filtro Horizontal
- Tabela 4.16. Resultados médios e geral e desvios padrões de resistência à flexão e de deformação de placa fundida pelo sistema Filtro Horizontal
- Tabela 4.17. Resultados de resistência à flexão e deformação dos corpos de provas com densidade acima de 2,650 até 2,660 g/cm<sup>3</sup> (faixa 1) para todos sistemas de canais.
- Tabela 4.18. Resultados de resistência à flexão e deformação dos corpos de provas com densidade acima de 2,660 até 2,670 g/cm<sup>3</sup> (faixa 2) para todos sistemas de canais.

## Nomenclatura

## Letras latinas

А	Área	$[mm^2]$	
d	Distância	[mm]	
D	Diâmetro	[mm]	
$d_h$	Diâmetro hidráulico	[mm]	
e	Espessura	[mm]	
F	Força	[N]	
g	Aceleração da gravidade	[10.000 mm/s <sup>2</sup> ]	
h	Altura	[mm]	
J	Momento de inércia		
1	Comprimento	[mm]	
L	Distância entre centros	[mm]	
Μ	Momento fletor	[Nmm]	
$M_{\text{máx}}$	Momento fletor máximo	[Nmm]	
Q	Vazão	[mm <sup>3</sup> /s]	
r	Raio	[mm]	
Re	Número de Reynolds		
t <sub>e</sub>	Tempo de enchimento	[s]	
V	Velocidade	[mm/s]	
V	Volume	[mm <sup>3</sup> ]	
$V_{\text{total}}$	Volume total	[mm <sup>3</sup> ]	
W	Módulo de resistência à flexão		

## Letras Gregas

α	Numa liga de alumínio com microestrutura multifásica, é o símbolo que indica a fase			
	rica em alumínio			
ν	Viscosidade cinemática	$[mm^2/s]$		
γ	Tensão superficial	[N/m]		
ρ	Densidade	[kg/m <sup>3</sup> ]		

## Siglas

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
AFS	American Foundrymen's Society
ASTM	American Society for Testing and Materials
CLM	Centro de Laboratórios de Materiais
FEI	Faculdade de Engenharia Industrial
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO	International Organization for Standardization
UFSCAR	Universidade Federal de São Carlos
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

## Capítulo 1 Introdução

#### 1.1 Considerações iniciais

Os materiais metálicos, como matéria prima, são indispensáveis para a construção civil e para todo o setor industrial, principalmente para as indústrias mecânica, elétrica e química. Em qualquer que seja o segmento, esses materiais passam por processos de conformação para tornarem-se adequados para uso. Entre os mais comuns, podemos citar fundição, laminação, forjamento, trefilação, extrusão, soldagem e metalurgia do pó.

A fundição, em particular, desempenha um papel importante, uma vez que permite obter peças com formatos complexos, muitas vezes necessitam um mínimo de usinagem para atingir sua forma final para utilização. Dada sua importância, muito se tem pesquisado, com o objetivo de aumentar a confiabilidade dos produtos obtidos por esse processo.

Todos metais têm suas particularidades, as quais influenciam, ajudando ou limitando os processos de fabricação e sua utilização. Este trabalho enfocará o **alumínio e suas ligas** devido às suas características, importância tecnológica e tendência crescente de consumo (Player global: ranking mundial, 1999; Anuário estatístico ABAL, 1999). Quanto ao processo, será enfocada a **fundição por gravidade** que, apesar de ser a mais antiga, necessita de novos desenvolvimentos.

#### 1.2 Estatísticas e aumento de consumo

O alumínio e suas ligas, graças às suas características físicas, químicas e mecânicas, têm apresentado tendência crescente de consumo. De 1994 a 1997, o país viveu um período de estabilidade econômica e a indústria do alumínio cresceu 70 %, o que significa uma taxa média anual de crescimento acima de 17 % no período (Anuário estatístico ABAL, 1999). Mesmo em 1998, ano em que a economia brasileira passou por dificuldades, o consumo de alumínio cresceu mais de 9 % (Azevedo, 1999).

Com a terceira maior reserva de bauxita, o Brasil já é o sexto produtor de alumínio, respondendo por cerca de 5 % da produção primária mundial, estimada em 22,6 milhões de toneladas em 1998, conforme mostra a Tabela 1.1 (Player global: ranking mundial, 1999).

País	Produção
	$(10^6 \text{ toneladas})$
EUA	3,712
Rússia	3,005
Canadá	2,374
China	2,419
Austrália	1,626
Brasil	1,208
Produção mundial	22,6

Tabela 1.1. Produção mundial de alumínio primário em1998 (Anuário estatístico ABAL, 1999)

Dos 1,38 milhões de toneladas de alumínio primário produzidos e reciclados em 1998, o país exportou mais da metade. A composição do consumo doméstico de 704.000 t é apresentada na Tabela 1.2. Dessa quantidade, parte origina-se da produção interna, mais 161.000 t importadas na forma de produtos acabados (Sobe e desce: conjuntura, 1999; Brasil, mercado altamente promissor, 1999; Player global: ranking mundial, 1999).

Produto	Consumo		Setor	Consumo
	(%)			(%)
Chapas e lâminas	39,7		Embalagens	27,8
Extrudados	21.4		Transporte	20,1
Fundidos e forjados	14.1		Construção civil	17,0
Fios e cabos condutores	8,5		Indústria de eletricidade	11,8
Folhas	7,1		Bens de consumo	8,9
Destrutivos	4,8		Máquinas e equipamentos	3,8
Pó	2,3		Outros	10,7
Outros	2,0			

Tabela 1.2. Composição do consumo por produto e setor (1997) (Anuário estatístico ABAL, 1999)

O consumo per capita de alumínio/ano no Brasil é de apenas 4 kg. Comparando-se esse valor com a média mundial de 16 kg, conclui-se que o Brasil apresenta um potencial de crescimento muito grande. Desde a crise do petróleo, a indústria de transporte vem aumentando o consumo de alumínio em substituição ao aço e ao ferro fundido (Azevedo, 1999; Anuário estatístico ABAL, 1999).

É esperado, ainda para os próximos 10 anos, um crescimento mais intenso que na década passada. Na indústria automobilística, a Audi, por exemplo, já está fabricando a carroceria de alguns modelos de carros em alumínio. A General Motors tem um plano que inclui a elevação de 25 % no consumo de alumínio em todos os seus carros. Seguindo a mesma tendência, empresas como a Volkswagen, Ford e Chrysler já deram seu aval para concretizar projetos que incluem a alternativa do alumínio (Aluminium Today, 1999; Azevedo, 1999; Brasil: mercado altamente promissor, 1999; Reinventando a roda, 1999).

Ainda na área de transporte, pode-se citar a fabricação de carrocerias de caminhões, ônibus e furgões, de tanques rodoviários para caminhões, vagões de passageiros de trens, onde o alumínio vem tendo aplicação crescente (Reinventando a roda, 1999).

Enfocando especificamente fundidos de alumínio, as perspectivas também são promissoras. O Brasil foi, em 1996, o 11° produtor mundial de fundidos, respondendo com uma produção de 96 mil toneladas, o que representou 1,5 % da produção mundial, de 6,4 milhões de toneladas (Relatório IPT: análise do setor de fundidos de alumínio no Brasil, 1998). Das cerca de 100 mil toneladas anuais produzidas nos últimos anos, aproximadamente 67 % foram destinadas ao setor automotivo. Considerando-se que, em 1995, o Brasil apresentava 0,1 veículo por habitante, muito inferior aos 0,5 veículo / habitante dos países do primeiro mundo e dos 0,85 veículos / habitante dos Estados Unidos, nosso país vislumbrava um forte potencial de crescimento neste setor, tendo como conseqüência, atraído inúmeras montadoras, das mais diversas marcas. Como reflexo, a produção nacional de veículos automotores e máquinas agrícolas que já vinha com tendência de crescimento, elevou-se de 980 mil em 1991 para 2.099 mil em 1997. Face à esses números e considerando-se que ainda se observa uma tendência crescente da quantidade de alumínio nos veículos médios e grandes, é de se esperar excelentes perspectivas de crescimento neste setor, o que justifica as pesquisas para melhoria da qualidade.

### 1.3 Principais defeitos de fundição em ligas de alumínio

Os defeitos de fundição de ligas de alumínio devem-se às variáveis metalúrgicas e projetos de fundição (ASM Handbook, 1998; Campbell, 1991; Runyoro et al., 1992; Fuoco, 1994; Fuoco, 1996; Fuoco, 1997), associados com sua:

- elevada porcentagem de contração de solidificação;
- alta solubilidade de hidrogênio quando no estado líquido;
- alta reatividade com o oxigênio do ar e com o vapor de água;
- baixa densidade;

Em consequência dessas características, os principais defeitos são os seguintes:

- rechupes
- microporosidades
- inclusões de óxido
- bolhas de ar

Os **rechupes** ocorrem como conseqüência da contração do metal durante a solidificação. São defeitos macroscópicos e localizam-se nas últimas regiões das peças a se solidificarem (regiões de maior massa). Sua presença na peça deve-se à falta de solidificação direcional para os massalotes, o que é caracterizado como falha no projeto de fundição (ASM Handbook, 1998; Campbell, 1991).

Para eliminar ou minimizar os efeitos do rechupe, duas medidas distintas podem ser adotadas, respectivamente:

- Eliminação: dimensionamento e posicionamento adequados de massalotes e utilização de resfriadores / isoladores, objetivando direcionar a solidificação de tal forma que o alimentador contenha o último líquido a se solidificar.
- Dispersão: para minimizar os efeitos do rechupe em ligas Al-Si usa-se ligas hipoeutéticas (teor de Si entre 6 e 10 %), as quais apresentam dendritas proeutéticas da fase α permeadas por líquido com composição eutética. A solidificação do tipo pastosa caracterizada pela formação da fase α com morfologia dendrítica distribui a fase líquida em inúmeras poças isoladas, dificultando a alimentação das contrações durante a sua solidificação. Em conseqüência, formam-se pequenos rechupes em forma de micro-porosidade (Fuoco, 1994).

As **microporosidades** são formadas por dois mecanismos que atuam simultaneamente (Fuoco, 1997):

- a) Segregação de hidrogênio para as últimas porções de líquido devido a sua alta solubilidade no alumínio líquido e baixa solubilidade no alumínio sólido.
- b) Alimentação inadequada para compensar as contrações volumétricas que ocorrem durante a solidificação das poças de líquido interdendrítico.

Normalmente as variáveis de processo mais utilizadas para minimizar sua ocorrência são realizar uma desgaseificação eficiente e aumentar a velocidade de resfriamento.

A escolha de ligas com composição próxima da eutética também minimiza a quantidade de poros pois a ausência da rede de dendritas torna a solidificação plana. Além disso, deve-se evitar, dentro do possível, o tratamento de modificação com sódio e com estrôncio que diminuem a capacidade de alimentação interdendrítica, aumentando a quantidade de poros (Fuoco, 1996).

Alumínio e suas ligas são muito susceptíveis à **formação de óxidos**, devido à alta afinidade com o oxigênio, desenvolvendo uma fina camada de  $Al_2O_3$  na superfície do banho líquido. Posteriormente, nas operações que desenvolvem turbulência no banho, esses filmes são quebrados e incorporados ao banho (ASM Handbook, 1998; Campbell, 1991; Runyoro et all, 1992). Uma vez incorporados, estes óxidos sofrem transformação alotrópica, passando de alumina amorfa para alumina gama e, mais raramente chegando a alumina alfa, cada uma com suas características e provocando defeitos típicos nas peças fundidas (Fuoco et al., 1999).

Em peças vazadas por gravidade, as **bolhas de ar** são formadas devido principalmente à grande turbulência no sistema de canais e na entrada do metal na cavidade do molde (Fuoco, 1997). Na fundição sob pressão o aprisionamento de ar ocorre devido às elevadas velocidades do fluxo de metal que promove turbulência e encontro de frentes de metal dentro da cavidade do molde, durante o enchimento.

A presença destes vários defeitos compromete a qualidade e a confiabilidade dos produtos fundidos devido à falta de estanqueidade e por reduzir as propriedades mecânicas, particularmente a dutilidade. É importante frisar que os defeitos rechupes e microporosidade têm soluções tecnológicas conhecidas, portanto passíveis de serem contornados, através de medidas preventivas. As formações de inclusões de óxidos e de bolhas de ar se dão de forma ainda não muito bem conhecidas o que dificulta a utilização de medidas preventivas.

### 1.4 Objetivos

O objetivo deste trabalho é estudar a influência de seis sistemas de canais (indicados a seguir) sobre a qualidade do produto fundido. Os seis sistemas de canais usados são:

- para vazamento por cima
- para vazamento por baixo, seguindo recomendação da literatura (AFS)
- para vazamento com basculamento do molde
- para vazamento por baixo, com canais tipo faca
- para vazamento por baixo, com filtro posicionado verticalmente no canal de distribuição
- para vazamento por baixo, com filtro posicionado horizontalmente no canal de ataque

Foi utilizada a liga de alumínio UNS A03560. São enfocados dois fatores importantes sobre o projeto de canais usados na fundição por gravidade: a minimização da inclusão de óxidos e a retenção de bolhas de ar. A avaliação é baseada nos resultados de ensaio de flexão.

## Capítulo 2 Revisão da Literatura

#### 2.1 Oxidação dos metais

A maioria dos metais existe na natureza na forma de óxido. Através de processos metalúrgicos estes óxidos são reduzidos e o metal obtido é purificado, refinado e combinado para formar ligas. Durante as etapas de processamento a elevadas temperaturas, na presença de oxigênio, tende a ocorrer naturalmente a sua reoxidação.

Como a oxidação é um fenômeno de superfície, a formação do primeiro filme de óxido inibe o contato entre o metal e o ar, tendendo a diminuir ou mesmo impedir a continuidade da reação. No metal líquido, a turbulência decorrente das transferências entre panelas e durante o vazamento contribui para quebrar esse filme, expondo novas superfícies metálicas para a oxidação.

Os metais são reativos e tendem naturalmente a se oxidarem, com exceção do ouro e da platina. O ferro fundido, quando vazado em areia verde, forma um silicato que, felizmente, aglomera facilmente e flutua no metal líquido. Mas se fundido em um molde contendo machos aglomerados com resina uretânica, tende a formar um filme de grafita. Em ferro fundido nodular também existe a ocorrência de óxido, neste caso composto por silício e magnésio (Runyoro et al., 1992).

#### 2.2 Oxidação do alumínio

O alumínio possui elevada afinidade por oxigênio, o que torna este metal bastante instável. A variação de energia livre para formação do óxido de alumínio é extremamente baixa ( $\Delta G^{\circ}$  = -324 kcal/mol de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a 1.000 K) (Kubaschewski, 1979). Como conseqüência, o alumínio líquido fica permanentemente recoberto por uma camada de óxido. Qualquer tentativa de remoção desta é seguida, instantaneamente, pela formação de outra camada. O alumínio sólido também fica recoberto por óxido; se uma peça for polida para, por exemplo, atender a especificação de fabricação de um produto, apresentará uma superfície metálica de alto brilho, porém rapidamente formará uma fina camada de óxido tornando-a mais fosca após um curto espaço de tempo.

A natureza dos óxidos formados depende da composição do metal líquido: para alumínio puro o óxido é alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Para muitas das ligas de alumínio que apresentam algum teor de magnésio, o produto é o espinélio (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), uma vez que a energia livre padrão de formação deste é ligeiramente mais negativa que a da alumina (Kubaschewski e Alcook, 1979).

As reações mais importantes entre ligas de alumínio líquidas e ar são as seguintes (citado em Fuoco et al., 1999):

Na superfície do alumínio líquido os óxidos  $Al_2O_3$  e Mg $Al_2O_4$  formam um filme sólido em mili-segundos (Crepeau, 1995). O principal produto de reação é composto por um filme de alumina amorfa que, subseqüentemente, transforma-se em um filme cristalino de alumina gama ( $\gamma$ ) após 5 a 10 minutos a 750 °C, a qual é mais estável que o óxido amorfo. Após um mais longo período de incubação, a alumina gama converte-se em alumina alfa ( $\alpha$ ) (Green e Campbell, 1994; Nyahumwa et al., 1998).

#### 2.3 Tipos de inclusões de óxido

Os óxidos observados na superfície ou incorporados ao banho de alumínio são alumina e espinélio, com predominância do primeiro, que pode ser classificado em:

- (a) filme de alumina amorfa
- (b) filme de alumina gama (Al<sub>2</sub>O<sub>3  $\gamma$ )</sub>
- (c) inclusões de alumina alfa (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $\alpha$ )

O filme de alumina amorfa é um produto da oxidação direta do alumínio fundido, que não teve tempo suficiente para cristalizar. Normalmente o aparecimento desta alumina em peças fundidas está associado com a turbulência durante o vazamento do molde, razão pela qual alguns autores chamam esta alumina de "filme de óxido novo" (Campbell, 1991; Green e Campbell, 1994; Nyahumwa et al., 1998). Seu aspecto é contínuo, com pequena espessura, apresentando enrugamento e, normalmente, dobramento e amassamento. Como os filmes novos são formados durante o vazamento no molde, seria razoável sua associação com alguns defeitos devidos ao vazamento turbulento, como bolhas de ar, encontros de frentes de solidificação e "tubos" de óxidos (resultado da passagem de bolhas de ar pelo banho). Além disso, as inclusões em suspensão no banho interagem com o hidrogênio dissolvido: a alta energia superficial entre as inclusões e o alumínio fundido favorece a nucleação de bolhas de hidrogênio nas regiões reentrantes da superfície sólida do filme (Crepeau, 1995).

O primeiro filme que se forma na superfície do alumínio líquido é muito fino e tende a engrossar rapidamente e estabilizar. O engrossamento deve-se à migração de ânion  $Al^{+3}$  através do filme, oxidando-se na superfície externa exposta ao oxigênio (este fenômeno ocorre tanto em alumínio líquido como em alumínio sólido). A difusão de  $Al^{+3}$  através do filme é preferencial devido ao seu menor diâmetro (0,51 A), quando comparado ao diâmetro do cátion O<sup>-2</sup> (1,32 A). Este processo de engrossamento é rápido inicialmente, mas tende a cair drasticamente à medida que a distância de difusão através do filme aumenta. Além disso, micro-fissuras que ocorrem durante a cristalização do filme e devido ao movimento do líquido, expõem o alumínio, acelerando o processo (Crepeau, 1995; Fuoco et al., 1999).

Dependendo da temperatura do banho, depois de alguns minutos a alumina amorfa cristalizase formando **alumina gama** ( $Al_2O_3 - \gamma$ ). Como sua formação demanda algum tempo de incubação, normalmente sua presença esta associada a operações turbulentas do metal antes do vazamento. Por essas razões alguns autores chamam este tipo de alumina de "filmes de óxido velho" (Nyahumwa et al., 1998; Campbell, 1991). Suas principais características são seu aspecto granular, enrugamento e amassamento. Normalmente são mais espessos que os filmes novos, apresentando dobramentos e associados com camada ou bolsas de ar.

Após um tempo maior a altas temperaturas, a alumina  $\gamma$  recristaliza-se formando **alumina alfa** (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -  $\alpha$ ) (Fuoco et al., 1999). Como as condições de incubação são severas, a alumina  $\alpha$  é normalmente formada devido à aderência e acúmulo de filmes de alumina  $\gamma$  nas paredes dos cadinhos, principalmente em fornos de manutenção contendo metal com alto teor de alumina  $\gamma$ (Fuoco e Correa, 1997). As principais características da alumina  $\alpha$  (corindon) são seu tamanho, normalmente com mais de 1 mm, cor preta e alta dureza. Este último aspecto reflete na usinabilidade do material, sendo referido como "pontos duros".

### 2.4 Mecanismos de formação de inclusões de óxido de alumínio

No processo de fundição de ligas de alumínio existe uma série de etapas de manipulação do material que, devido à elevada turbulência do metal líquido, pode promover quebra da camada superficial de óxido, sua incorporação e oxidação de novas superfícies expostas. As etapas mais críticas são as transferências do forno de fusão para as panelas, das panelas para os fornos de espera e o vazamento nos moldes.

Campbell (1991) calculou como sendo 500 mm/s a velocidade máxima de um fluxo de alumínio líquido para que não haja rompimento do filme de óxido e sua incorporação ao banho. Baseado na equação de queda livre:

$$\mathbf{v} = (2.g.h)^{1/2}$$
 (2.1)

onde **v** = velocidade do líquido em queda livre (mm/s);

- **g** = aceleração da gravidade  $(10.000 \text{ mm/s}^2)$ ;
- **h** = altura de queda livre (mm).

conclui-se que a velocidade de 500 mm/s é atingida para uma altura "h" de 12,5 mm, que é um valor muito baixo. Portanto conclui-se que é praticamente impossível executar as etapas de transferência de metal líquido em fundição sem a geração e incorporação de inclusões de alumínio (AFS, 1972; Fuoco, 1997). Para contornar esta dificuldade, as indústrias tomam uma série de medidas, como será discutido na seqüência deste trabalho.

#### 2.4.1 Turbulência superficial

A agitação da massa líquida pode provocar a formação de um fluxo metálico em direção à superfície do líquido onde se encontra o filme de óxido. Runyoro et al., 1992 consideraram a formação de uma gota como resultado de uma a pressão inercial,  $\rho v^2$ , dentro do líquido de densidade  $\rho$ , movendo-se à velocidade v, equilibrada contra a pressão restritiva  $2\gamma / r$ , onde  $\gamma$  é a tensão superficial e r é o raio da superfície em deformação (Figura 2.1). Tomando a relação destas duas pressões, define-se o adimensional Weber (We) dado por:

$$We = \frac{\rho v^2 r}{2\gamma}$$
(2.2)

No equilíbrio, assumindo We = 1, tem-se que:

$$\rho \mathbf{v}^2 \mathbf{r} = 2 \boldsymbol{\gamma} \tag{2.3}$$

ou

$$\mathbf{v}^2 = \frac{2\gamma}{\rho r} \tag{2.4}$$

que é a velocidade crítica para que o fluxo líquido vença a tensão superficial para romper a superfície líquida.

Para alumínio líquido,  $\gamma = 1$  [N/m] e  $\rho = 2500$  [kg/m<sup>3</sup>]. Se a gota formada e projetada tiver diâmetro de 8 mm, então a velocidade crítica para causar turbulência superficial é dada por:

$$v^{2} = \frac{[2 \text{ N/m}]}{2500 [\text{kg/m}^{3}].4.10^{-3} [\text{m}]}$$
 (2.5)

onde:

$$v = 500 \text{ mm} / \text{s}$$

Em dedução similar, utilizando o adimensional de Froude, os autores chegaram a conclusão parecida. Supondo isto verdadeiro, então esta seria a velocidade crítica para um banho líquido começar a sofrer incorporação de filme superficial.



Figura 2.1. Formação de uma gota (Runyoro et al., 1992)

Baseado nisso, Runyoro et al., 1992 realizaram experimentos que permitiram afirmar que fundidos, mesmo vazados por baixo, cuja velocidade de entrada do metal na cavidade do molde ultrapasse a velocidade crítica, apresentarão defeitos devido à incorporação de óxido. Para uma variedade de ligas de alumínio, a velocidade crítica seria 500 mm/s para placas de 5 mm de espessura, mas essa velocidade cai para 300 mm/s para 10 mm de espessura. Para placas mais grossas, com 100 mm de espessura ou mais, a velocidade crítica seria de 200 mm/s.

#### 2.4.2 Agitação superficial com projeção de líquido

Na superfície em repouso do alumínio líquido recoberto por óxido, a parte inferior do filme de óxido é molhada, sendo que o filme se forma e vai engrossando às custas da oxidação de átomos metálicos em contato com o mesmo. A parte superior do filme é seca.

No início de um vazamento, quando o jato inicial choca-se contra o fundo, seja do recipiente vazio ou já contendo alumínio líquido, ou num jato mais intenso num vazamento irregular, agitação provocada pode ser muito intensa, com a ocorrência inclusive de projeção de líquido. Turbulência intensa numa massa inicialmente em repouso, uma porção de massa líquida projetando-se para cima romperá o filme e a parte projetada, em contato com o ar, se oxidará, formando uma capa de óxido superficial, nova e fina. Ao retornar ao banho, após a queda, as camadas de óxido (a nova e fina da gota projetada e a antiga e grossa da superfície do banho) irão superpor-se formando uma dupla camada de óxido, conforme mostrado na Figura 2.2 (Campbell., 1991; Sandford, 1997). Na região de ruptura do filme antigo, a camada espessa dobra-se superpondo-se sobre si mesma formando, também, uma dupla camada de óxido (lado seco com lado seco), normalmente aprisionando ar internamente.



Figura 2.2. Desenho esquemático mostrando, num processo turbulento, a projeção de alumínio, a formação de óxido e a retenção de ar (Campbell, 1991)

Portanto, se não forem tomados os devidos cuidados pode ocorrer agitação superficial com projeção de líquido durante o enchimento de peças e, conseqüentemente, a formação e incorporação de filme de óxidos durante a fundição de peças de ligas de alumínio.

Outro aspecto que reflete a influência do filme de óxido refere-se à subida irregular do nível do líquido dentro do molde de uma peça complexa. À medida que o nível de metal sobe no molde, o filme superficial vai sendo repetidamente quebrado e levado para os lados, sendo incorporado pela parede superficial da peça. Se o nível de metal sobe de forma mais rápida, a camada de óxido será mais fina, e se quebrará com mais freqüência ocasionando menor restrição ao avanço da frente líquida. Se a subida do metal é lenta, conseqüência de uma menor velocidade de enchimento, então o filme terá mais tempo para engrossar e tornar-se mais resistente, o que leva a um retardamento de sua subida. Quando a velocidade de avanço da frente diminuir até um valor próximo de zero, ou mesmo parar momentaneamente, a resistência do filme e seu "agarramento" na parede do molde dificultarão seu avanço naquele local. Então, se o vazamento continuar, em um outro local da peça a frente em movimento se acelerará. No local que chegou a parar, o acúmulo de pressão provocará ruptura do filme num ponto mais fraço e o líquido inundará a superfície superior e seca do filme de óxido, conforme mostrado na Figura 2.3. Em alguma localização particular do fundido, portanto, o avanço do metal será uma sucessão de paradas e inundações, com sucessivas incorporações de filmes duplos e dobrados de óxido (Campbell, 1991).

Ocorrências como esta são previsíveis na prática de fundição. No entanto, seguindo a tendência tecnológica de utilização de simulações físicas, vazando água nos moldes, fenômenos como este introduzem maior erro na análise pela não ocorrência de oxidação similar pelo fluído utilizado. Além disso, simulação em computador oferece as mesmas dificuldades, implicando em erros acentuados devido à dificuldade de se prever o comportamento dessa barreira de óxido.

#### 2.4.3 Transferência de metal do forno para panelas e durante o vazamento nos moldes

Durante a transferência de metal entre panelas ou durante o vazamento de peças, o jato metálico em queda livre tende a oxidar-se e provocar incorporação de óxido conforme mostrado na Figura 2.4 (Campbell, 1991). Dada a alta afinidade do alumínio por oxigênio, o filme


Figura 2.3. Esquema mostrando o enchimento instável de uma peça, com formação de múltiplas camadas de óxidos (Runyoro et al., 1992)

superficial cresce tão rapidamente que forma um tubo de óxido envolvendo o jato descendente. Se a altura em questão for pequena, o óxido permanece intacto (Figura 2.4a). Para altura pouco maior, o jato em queda livre perturba a superfície gerando ondas, aumentando a quantidade de superfície e originando anéis de óxido que vão se acumulando na superfície (Figura 2.4b). Este processo gera considerável perda metálica. Se a altura for aumentada, então a força de cisalhamento do líquido em queda fará pressão na parede interna do tubo de óxido, rompendo-o e gerando fragmentos (Figura 2.4c). Além disso, ocorre arraste de ar, cujas bolhas podem ficar aprisionadas nos filmes. Se esses fragmentos de óxidos incorporados ao banho, contendo ou não bolhas de ar retido, forem arrastados para dentro da cavidade do molde, certamente passarão a fazer parte da peça, comprometendo sua qualidade.

Se a altura do vazamento for muito alta, então praticamente todo óxido formado no jato, fragmentado em tamanhos variáveis, juntamente com bolhas de ar, será incorporado ao banho, como pedaços individuais ou emaranhados concentrados, gerando uma abundância de defeitos (Polich et al., 1963; Chandley e Flemings, 1988 e Campbell, 1991).



Figura 2.4. Efeito do aumento da altura da queda do jato líquido de alumínio mostrando:
(a) o filme de óxido permanece intacto; (b) o filme de óxido se acumulando para formar anéis de drosse e (c) o filme de óxido com ar aprisionado sendo incorporado ao banho líquido (Campbell, 1991)

## 2.5 Bolhas

Outro defeito de fundição que também gera descontinuidades estruturais em componentes fundidos são as bolhas de gás, retidas no seio da peça durante a solidificação (Fuoco, 1997). Sempre que ocorrer grande turbulência, haverá introdução de bolhas na massa de metal líquido. Se essa turbulência ocorrer em transferências de metal entre panelas, haverá tempo para que ocorra sua flotação e eliminação. Porém, quando ocorre no sistema de canais durante o enchimento da peça, as bolhas serão arrastadas para dentro da cavidade do molde.

Além disso, pode ocorrer reação química entre o metal líquido e os materiais do molde e / ou do macho, que pode provocar a precipitação de poros sub-superficiais. Pode ocorrer, também, a interação térmica entre os materiais, com liberação de grandes bolhas de gás, conhecido como "sopro do macho" (Divandari e Campbell, 1999).

Como o processo de solidificação da peça é relativamente rápido, iniciando-se na superfície e propagando-se para dentro, essas bolhas podem, durante sua flotação, encontrar uma casca de metal solidificado que as retenha, passando a fazer parte da peça. Além das descontinuidades provocadas pela bolha, é importante lembrar que tanto ar retido como gases liberados pelos materiais de moldagem são oxidantes levando à formação de um filme de óxido na interface metal liquido/gás durante sua trajetória para a superfície, deixando atrás de si um "tubo" ("bubble trail") de óxido. À medida que a bolha sobe, a pressão do metal líquido comprime o tubo, fechando-o, dando-lhe uma forma compacta, quando observado na sua seção transversal (Divandari e Campbell, 1999).

Na Figura 2.2 é mostrado o dobramento de filme de óxido (filme antigo, espesso, dobrado sobre si mesmo, lado seco com lado seco). Na ocorrência desse dobramento, ar pode ser aprisionado e neste caso a incorporação desse óxido arrastará ar consigo.

A Figura 2.5a mostra um jato líquido em queda livre, onde se observa a redução de seção à medida que o fluxo acelera. O canal de descida de alimentação de um molde deve apresentar conicidade que acompanhe esse afinamento, caso contrário haverá a formação de uma região de baixa pressão que permitirá a aspiração de ar como mostrado na Figura 2.5b. O desenho do canal de descida recomendado, portanto, é o mostrado na Figura 2.5c. Além disso, variações bruscas de seção como a esquematizada na Figura 2.6 e mudanças bruscas de direção, como mostrada na Figura 2.7, geram regiões de baixa pressão que contribuem para aspiração de ar (ASM Handbook, 1998). Estes três exemplos representam regiões que antecedem o canal de ataque. Se o ar incorporado ao líquido não tiver oportunidade de flotar e sair naturalmente, ele será arrastado para a cavidade do molde. Neste caso, dependendo da forma e complexidade da peça, essas bolhas de ar passarão a fazer parte do fundido produzido.



Figura 2.5. Esquema mostrando as vantagens do canal cônico em relação ao canal de seção constante. (a) Fluxo natural do um líquido em queda livre;

١

- (b) Aspiração de ar induzida pelo fluxo líquido em canal de seção paralela;
- (c) Fluxo líquido em um canal cônico (ASM Handbook, 1998)



Figura 2.6. Desenho esquemático mostrando a formação de regiões de baixa pressão devido à variação abrupta de seção do canal (ASM Handbook, 1998)

O processo usado industrialmente para minimizar os efeitos deletérios das bolhas é a utilização de filtros. Estes, sendo adequadamente especificados e estrategicamente localizados no sistema de canais, irão impor uma considerável perda de carga no fluxo, diminuindo a velocidade do jato na entrada do molde e minimizando novas gerações e incorporações de filmes de óxidos.



Figura 2.7. Desenho esquemático mostrando o escoamento de um fluído através de um duto formando um ângulo reto (a) e a conseqüente aspiração de ar (b); em (c) observa-se que o arredondamento minimiza ao problema e a turbulência (ASM Handbook, 1998).

Sirrell, 1997 apresenta em seu trabalho uma placa usinada, da qual foi removida uma camada de 3 mm de espessura, paralela á sua superfície superior, associando a grande quantidade de poros encontradas com a elevada altura de vazamento, num sistema de canais sem filtro. Repetindo a experiência, usando filtro, o que garantiu uma menor velocidade de enchimento do molde, a peça apresentou-se praticamente sem poros.

## 2.6 Efeito das bolhas de ar retidas e de inclusões de óxidos sobre as propriedades

Diferentemente do que ocorre com ligas de alta densidade, os óxidos formados nas ligas de alumínio têm densidade ligeiramente maior que o metal líquido, não tendendo, portanto, a sobrenadar. Por isso, qualquer movimentação da superfície líquida provoca incorporação dos óxidos formados. Assim, as técnicas de escorificação superficial do banho e vazamento com panelas tipo "bico de chaleira" não garantem a limpeza da carga (Nieswaag e Deen, 1990).

A recuperação da pureza do banho nem sempre é fácil, sendo mais lógico evitar sua contaminação (Gouwens e Gouwens, 1995). Inclusões, uma vez incorporadas ao banho, se não forem removidas, tendem a ser incorporadas ao fundido, prejudicando a estanqueidade, as propriedades mecânicas, a usinabilidade e principalmente a dutilidade (Fuoco e Cabezas, 1999). Também há alguma evidência de que a presença de filmes de óxido no alumínio líquido reduz sua fluidez (Fuoco et al., 1999).

Se a incorporação do óxido ocorreu antes do enchimento da cavidade do molde, as inclusões podem ser removidas total ao parcialmente pelo tratamento do banho e/ou pela filtragem durante o vazamento. Porém, se as inclusões não forem removidas, ou se formarem durante o vazamento do molde (sistema sem filtro) ou se formarem após o filtro (durante o enchimento da cavidade do molde), o filme formado será incorporado ao fundido, podendo trazer uma série de problemas em relação às propriedades.

As bolhas de ar formadas devido à turbulência no sistema de canais tendem a flotar, deixando atrás de si um tubo de óxido, como discutido anteriormente. Por outro lado, se isso não ocorrer, sua incorporação ao fundido produzido acentuará os efeitos nocivos em relação às propriedades.

**Falta de estanqueidade** é um defeito muito comum em peças tais como carters e carcaças, principalmente pelas paredes finas (Fuoco e Correa, 1997). Grandes filmes de óxido podem causar vazamento uma vez que podem conectar as superfícies interna e externa da peça. O defeito pode ser causado pela presença de inclusões de filme de óxido amorfo ou de alumina gama, podendo ser agravado pela associação com bolhas (que ocorrem em posição aleatória na peça) e pela presença de rechupes (neste caso o vazamento - falta de estanqueidade - ocorrerá sempre na mesma posição).

A maioria dos defeitos do tipo pontos duros em ligas de alumínio são constituídos por inclusões de alumina alfa. Os pontos duros, quando presentes em componentes que devam ser usinados, conferem **redução da usinabilidade**, comprometendo esta operação de fabricação,

provocando quebra da ferramenta e prejudicando o acabamento superficial da peça (Fuoco e Correa, 1997; Fuoco et al., 1999).

Talvez o aspecto mais importante dos filmes de óxido seja a camada de ar associada com a superfície não molhada do filme ou aprisionada nas dobras (Campbell, 1991). O tamanho desta "trinca" determina a extensão do problema (Fuoco et al., 1999).

A presença de grandes inclusões do tipo filme de óxido amorfo ou de alumina gama e/ou bolhas de ar promovem efeitos de entalhe na microestrutura e **alterações nas propriedades mecânicas,** tais como (Fuoco e Correa, 1997; Nyahumwa et al., 1998):

- redução do alongamento
- redução do limite de resistência
- redução da deformação e resistência à flexão
- redução da resistência ao impacto
- nucleação de eventuais trincas de fadiga em componentes sujeitos a esforços cíclicos.

Com o objetivo de estudar a influência da velocidade de entrada do metal na cavidade do molde sobre a qualidade do produto fundido, Runyoro et al., 1992 vazaram placas medindo 100 x 200 mm, com 5 e 10 mm de espessura, com alumínio de 99,5 %pureza. As placas foram cortadas em tiras (com comprimento 1 igual à 100 mm) e ensaiadas, por flexão, em um dispositivo esquematizado na Figura 2.7. Os resultados apresentados pelos autores no referido trabalho mostram que, para velocidades de entrada do metal na cavidade do molde de até 500 mm/s, a resistência ao dobramento foi mais elevada e constante do que quando a velocidade ultrapassou este valor.



Figura 2.8. Desenho esquemático do dispositivo de flexão utilizado para quantificar a sanidade da placa fundida, vazada com diferentes velocidades de enchimento (Runyoro et al., 1992).

Em outro trabalho, Green e Campbell (1994) e Sirrell e Campbell (1997) estudaram a influência do sistema de canais no nível de turbulência e, conseqüentemente no nível de defeitos introduzidos no fundido. Estes pesquisadores fundiram barras redondas de 12 mm de diâmetro com a liga Al-7Si-Mg usando os sistemas mostrados na Figura 2.9. Os primeiros fundiram barras por cima e por baixo, ambas sem e com filtro. Sirrell e Campbell, 1997 vazaram os corpos de provas por baixo, usando canal paralelo e cônico, sem e com filtro. Em ambos casos, as barras foram solubilizadas e envelhecidas, usinadas e tracionadas. Para cada conjunto de amostras a resistência à tração foi medida e os resultados tratados e plotados. Examinando os resultados obtidos é possível observar o intervalo de resistência obtido, freqüência e distribuição, ficando evidente que a resistência mecânica é controlada pelo projeto de sistema de canais.



Figura 2.9. Sistema de canais usados para fundir barras para ensaio de tração (Green e Campbell, 1994 e Sirrell e Campbell, 1997)

## 2.7 Normas de ensaio de flexão

A norma ASTM E290-92 (Standard Test Method for Semi-Guided Bend Test for Ductility of Metallic Materials), que padroniza o ensaio de flexão, é usada para avaliar a qualidade de materiais metálicos, através de sua dutilidade, evidenciada pela sua capacidade de resistir ao trincamento durante o dobramento. O arranjo C descrito nessa norma consta em apoiar a amostra em dois pontos próximos às suas extremidades e aplicar uma carga, através de um cutelo, num ponto central entre os dois apoios.

Segundo a norma ASTM A370-97 (Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products), o ensaio de flexão é um método utilizado para avaliar a dutilidade, mas não pode ser considerado como um meio quantitativo para previsão de sua performance em serviço

nas operações de dobramento. A severidade do ensaio é função principalmente do ângulo de dobramento, diâmetro do cutelo e da seção transversal da amostra.

As normas citadas padronizam ensaios de materiais metálicos deformados plasticamente. Não foram encontradas normas de ensaio de flexão para materiais fundidos na ABNT e ASTM.

## 2.8 Resistência à flexão

Seguindo recomendação da norma ASTM E290 - arranjo C, para determinar a resistência à flexão de um material é aplicada uma força F no centro de uma barra de comprimento l, apoiada nas extremidades.

Assim, o momento fletor máximo  $(M_{máx})$  vale:

$$\mathbf{M}_{\text{máx}} = \mathbf{F} \mathbf{1} / \mathbf{4} \tag{2.6}$$

conforme mostrado no desenho esquemático abaixo.



Se a seção da barra é retangular, medindo b (base) por h (altura), tem-se:



$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{M} / \mathbf{W} \tag{2.7}$$

M = momento fletor na seção central

W = módulo de resistência à flexão e

$$\mathbf{W} = \mathbf{J} / \mathbf{d} \tag{2.8}$$

J = momento de inércia

 d = distância em relação à linha neutra que passa pelo CG - centro de gravidade da seção

Assim:

$$J = bh^3 / 12$$
 (2.9)

ou

$$\mathbf{W} = \mathbf{J} / \mathbf{d} = \mathbf{b}\mathbf{h}^2 / \mathbf{6} \tag{2.10}$$

uma vez que d = h/2

Assim a tensão  $\sigma$  vale:

$$\sigma = \underline{M}_{W} = \underline{F \times I}_{4} \times \underline{6}_{bh^{2}}$$

$$\sigma = F \underbrace{3 I}_{2 b h^{2}}$$
(2.12)

Utilizando: F em (N),

l, b e h em (mm),

 $\sigma$  será dado em Mpa.

## 2.9 Sistemas de canais

## 2.9.1 Requisitos fundamentais

O sistema de canais compreende o conjunto formado por bacia de vazamento, canal de descida, canal de distribuição e canal de ataque. É por este último que o metal líquido escoa para atingir e preencher a cavidade do molde. Os requisitos fundamentais de um sistema de canais são os seguintes (Swift et al., 1949; AFS: Basic principles of gating,1967; Mariotto et al., 1986):

- O metal deve fluir pelo sistema de canais com turbulência tão pequena quanto possível, de forma que não produza e não introduza inclusão de óxido, ar não seja aprisionado pelo fluxo líquido e nem provoque erosão do molde de areia;
- O sistema de canais deve fornecer metal limpo (isento de inclusões e gases), a uma velocidade suficiente para completar o enchimento da cavidade do molde antes da solidificação;

- O metal deve entrar na cavidade do molde de uma maneira tal que produza uma diferença de temperatura entre pontos do fundido, de tal forma que promova uma solidificação direcionada;
- O sistema de canais deve ser projetado e calculado de forma a eliminar ao máximo os aspectos subjetivos e a dependência em relação às habilidades individuais do operador no momento do vazamento da peça;
- O sistema de canais deve ser econômico e prático e a quantidade de metal que envolve deve ser a mínima possível para produzir os resultados desejados;

Estudo de sistema de canais já foi, no passado, objeto de intensos e contínuos estudos, o que pode ser confirmado pela vasta literatura da época que aborda o assunto (Swift et al., 1949; Grube et al., 1953; Grube e Kura, 1954; Grube e Kura, 1955; Grube et al., 1956). Após um período de produção científica não muito intensa, o assunto voltou a ser intensamente estudado, em particular para as ligas de alumínio, buscando melhorar o entendimento e estabelecer novos conceitos para o projeto de sistemas de canais, como pode ser verificado pelos recentes trabalhos apresentados na literatura (Runyoro et al., 1992; Green e Campbell, 1994; Nyahumwa et al., 1998; Rezvani et al., 1999) e a realização da 1ª Conferência Internacional da AFS em Sistemas de Canais, Enchimento e Alimentação de Peças Fundidas em Ligas de Alumínio, em 1999 (AFS, 1999). Esforço semelhante tem sido feito pelo Laboratório de Fundição do IPT através da filmagem de moldes durante o preenchimento com água (Fuoco e Correa, 1997; Fuoco et al., 1998; Fuoco e Cabezas, 1999).

## 2.9.2 Princípios propostos em trabalhos pioneiros

Trabalhos pioneiros foram realizados no Battelle Memorial Institute, Columbus, Ohio (Swift et al., 1949; Grube et al., 1953; Grube e Kura, 1954; Grube e Kura, 1955; Grube et al., 1956) que serviram de base para publicações de manuais e livros especializados, os quais reuniram os princípios a serem observados no projeto e cálculo de sistema de canais (AFS: Basic

principles of gating, 1967; AFS: Basic principles of gating and risering, 1972; Mariotto et al., 1986; ASM Handbook, 1998).

Swift et al., 1949 estudaram o enchimento de uma placa medindo 13 x 152 x 254 mm, posicionada horizontalmente, utilizando a filmagem de moldes transparentes enchidos com água. A preocupação principal neste trabalho foi evitar turbulência do líquido e aspiração de ar durante o enchimento do molde. Eram feitas alterações no projeto; essas alterações eram aplicadas e observados os resultados. Das inúmeras recomendações feitas a partir deste trabalho, destacam-se:

- Uso de bacia de vazamento. Esta deve ser longa (grande relação comprimento / largura) e o furo de escoamento deve ter sua borda superior arredondada. Durante o vazamento, o jato líquido da panela deve ser dirigido do lado oposto ao furo e, se necessário, usar filtro tipo tela antes do furo. Recomenda-se usar um tampão para encher a bacia antes de iniciar o vazamento para dentro do molde. Após remoção do tampão, deve-se manter a bacia cheia. A utilização de um tampão fusível (que fundiria e permitiria a passagem do líquido após o tempo necessário para formar a coluna líquida) e de outras técnicas descritas no texto oferecem, segundo os autores, consideráveis promessas futuras.
- Canal de descida. Sua seção deve ser tal que exerça a função de restrição da vazão, determinando a taxa de enchimento (a restrição não pode ser feita nos canais de distribuição e/ou ataque: ao contrário, estes canais devem ter sua seção ampliada para reduzir a velocidade do líquido). Sua seção deve ser cônica, diminuindo à medida que aumenta a velocidade do líquido descendente (canais não cônicos aspiram ar; canal "cônico ao contrário", como os usados em muitas fundições, para favorecer a saída na desmoldagem, são piores ainda). Observou-se que quando a seção é retangular, há queda de vazão, para mesma seção.
- Bacia de choque. Esta bacia, posicionada na base do canal de descida, mostrou-se ineficiente e mesmo prejudicial no que diz respeito à aspiração de ar. No entanto, para as dimensões usadas, diminuiu em 27 % a vazão.

- Canal de distribuição. Deve ser feito um arredondamento na união com o canal de descida para eliminar a aspiração de ar, apesar deste procedimento aumentar a velocidade, o que é contornado com o aumento da seção. Esta deve ser ampliada, partindo-se da mesma seção da base do canal de descida até chegar a quatro vezes o valor inicial, junto ao(s) canal(is) de ataque.
- Canal de ataque. Recomenda-se, sempre que praticável, que o canal de distribuição envolva a peça utilizando vários pontos de ataque. Deve-se evitar cantos vivos entre o canal de distribuição e o canal de ataque e entre o canal de ataque e a peça e variação brusca de seção para não haver aspiração de ar. Se a seção for reduzida, haverá aumento na velocidade do líquido. Por outro lado, se houver aumento acima do aumento correspondente do fluxo, ocorrerá descolamento da parede, com conseqüente aspiração de ar.

Grube et al., 1953 estudaram seis sistemas de canais com seção retangular e redonda para vazamento de uma placa medindo 13 x 152 x 305 mm. A simulação também foi feita com água, vazada em moldes transparentes, objetivando encher a placa posicionada verticalmente. Apesar dos objetivos da pesquisa, muitas recomendações não foram seguidas. Mesmo o canal de descida que deveria ser cônico, foi mantido paralelo. Como conseqüência disso, observou-se a elevada turbulência e aspiração de ar.

Tanto no primeiro trabalho (Swift et al., 1949) quanto no seguinte (Grube et al., 1953), não foram realizados testes com metal.

Grube e Kura, 1954 apresentaram um trabalho onde, numa primeira etapa, fizeram simulações usando cinco diferentes tipos de sistemas de alimentação, com canal de descida não cônico, cujo resultado não trouxe novidades. Numa segunda etapa foi estudado sistema com canal de descida cônico, bacia de choque, ampliação da seção do canal de distribuição, extensão do canal de distribuição, etc., seguindo sugestões do trabalho anterior (1949) para vazamento horizontal de placa e chegando a conclusões parecidas, dentro do espectro estudado.

Grube e Kura, 1955 reforçaram os conceitos já discutidos, com maior detalhamento. Ficou clara a eficiência do modelo proposto para vazamento vertical de uma placa, mostrada na Figura 2.10 contendo, além dos detalhes discutidos, a existência do canal de subida, ligado à peça, em toda a sua altura. Além disso, foi aumentada a extensão do canal de distribuição ("cata-lixo"), em cuja extremidade foi colocado um "respiro" para facilitar a saída dos gases. A relação proposta como ideal para minimizar a turbulência foi 1:2:2:4 (seção da base do canal de descida : seção do canal de distribuição : seção da extensão : seção do canal de ataque na interface com a peça).



Figura 2.10. Desenho de sistema de canais contendo todos detalhes pesquisados na época para diminuir a formação de inclusões de óxidos e aspirações de ar (Grube e Kura, 1955)

Neste trabalho, além das simulações, foram fundidas placas de alumínio, usando um sistema ruim de alimentação e um sistema contendo todos avanços estudados até aquele momento. A primeira placa apresentou defeitos superficiais e elevada quantidade de defeitos internos, observados por radiografia. A segunda placa não apresentou defeitos, tendo sido considerada de excelente qualidade. Um detalhe que chamou a atenção, nesta última, foi a presença de óxidos na extensão do canal de distribuição e no respiro, reforçando a teoria de que os recursos pesquisados são indispensáveis para obtenção de produtos fundidos de boa qualidade. O rendimento peso da placa / peso total do conjunto fundido, foi de 42 %.

### 2.9.3 Recomendações para projeto de sistemas de canais

Para fundição de peças de ligas de alumínio com boa qualidade é fundamental partir-se de um metal líquido limpo, isto é, adequadamente desgaseificado, com os mais baixos teores possíveis de hidrogênio dissolvido e óxidos em suspensão.

A partir desse momento, para vazamento da peça, o sistema de canais desenvolve sua função essencial para preenchimento da cavidade do molde, porém não deve degradar a qualidade do metal.

Durante o vazamento do molde por gravidade, o fluxo de metal líquido está sujeito à pelo menos três ações, a saber:

- Aumento da velocidade no canal de descida, por efeito da ação da gravidade.
- Alterações de direção e de seção nos canais de distribuição e de ataque
- Entrada na cavidade do molde, onde ocorre descolamento das paredes do molde.

A alta velocidade, alterações de direção e seção e descolamento do metal da parede do molde expõem superfícies de metal líquido, propiciando oxidação, absorção de hidrogênio e arraste de gases que comprometem a qualidade do metal líquido. Para minimizar esses efeitos danosos, seguem algumas recomendações, as quais devem ser observadas durante o projeto de um sistema de canais.

## Canal de descida

De todo o sistema, sem dúvida, o canal de descida é o ponto mais crítico, devido à ação da aceleração da gravidade, resultando em alta velocidade do fluxo: dependendo da altura de queda, a velocidade é da ordem de 2 a 4 m/s. Desprezando-se o atrito do metal com as paredes do molde, é possível determinar a velocidade do fluxo de metal no final do canal de descida, em função da altura de queda, por meio da equação de queda livre (AFS, 1972).

$$\mathbf{v} = (2.g.h)^{1/2} \tag{2.13}$$

- v = velocidade do líquido em queda livre (mm/s);
- g = aceleração da gravidade (10.000 mm/s<sup>2</sup>);
- h = altura de queda livre (mm).

Como a velocidade do metal no canal de descida vai aumentando progressivamente, á medida em que o metal desce, a área da seção ocupada pelo metal diminui, conforme mostrado na Figura 2.4(a). Descrito pela lei da continuidade, para qualquer ponto do sistema, tem-se que:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{A}_1 \mathbf{v}_1 = \mathbf{A}_2 \mathbf{v}_2 \tag{2.14}$$

- Q = vazão em todos os pontos do sistema de canais (mm<sup>3</sup>/s);
- A = área da seção transversal  $(mm^2)$ ;
- v = velocidade do fluxo (mm/s).

Em conseqüência, quando canais de descida de seção constante são utilizados, o fluxo de metal descola das paredes do canal, permitindo a absorção de ar e a geração de inclusões de óxidos (Figura 2.4(b). Assim, é recomendada a utilização de canais de descida cônicos, como mostra a Figura 2.4(c).

O fluxo de metal pode apresentar diferentes tipos de regimes de movimentação em função da sua velocidade. Estes regimes podem ser classificados por meio do número de Reynolds, calculado pela equação abaixo:

$$\mathbf{Re} = \underbrace{\mathbf{V} \cdot \mathbf{d}_{\mathbf{h}}}_{\mathbf{v}} \tag{2.15}$$

Re = número de Reynolds

v = velocidades do fluxo

 $d_h$  = diâmetro hidráulico =  $\frac{4 x \text{ área da seção transversal}}{\text{perímetro da seção transversal}}$ 

v = viscosidade cinemática do metal

Conceitualmente temos que:

Re até 2000:	fluxo laminar
Re entre 2000 e 20000:	fluxo turbulento
Re acima de 20000:	fluxo severamente turbulento

O cálculo de Re usando-se valores usuais de projetos (tais como v = 500 mm/s e diâmetro hidráulico = 10 mm, portanto Re igual a 4000), leva à conclusão que o fluxo do metal na maioria dos casos reais de fundição é turbulento. Entretanto verificou-se que, para Re entre 2000 e 20000 a turbulência é de certa maneira mais interna ao fluxo, mantendo-se uma fina camada junto às paredes do canal praticamente sem agitação. Assim, a camada de óxido que se forma na superfície não é quebrada e, portanto, não incorporada ao líquido.

Na prática de fundição, o fluxo severamente turbulento deve ser evitado, pois causa ruptura da camada superficial, o que traz danos à pureza do líquido e à qualidade do fundido produzido. Assim, manter a turbulência dentro de limites pouco prejudiciais, ou seja, Reynolds menor que 20000, deve constituir em um dos critérios a se adotar no projeto e dimensionamento dos canais.

#### Canais de distribuição e de ataque

Durante a passagem do fluxo de metal do canal de descida para os canais de distribuição e, posteriormente, para os canais de ataque, ocorrem mudanças abruptas de direção. Neste caso, são criadas zonas de baixa pressão (como as mostradas na Figura 2.6), que favorecem o descolamento do fluxo das paredes do molde e tendem a promover a absorção de ar pelo fluxo de metal. Recursos como arredondamentos de cantos auxiliam a manutenção do fluxo sem descolamento das paredes (AFS, 1972).

A utilização de bacias no fundo dos canais de descida, apesar de recomendadas pela literatura técnica, favorecem a absorção de bolhas de ar pelo sistema (Fuoco et al., 1999).

A relação entre a área do canal de descida e as somatórias das áreas dos canais de distribuição e da somatória das áreas dos canais de ataque define o tipo de regime de preenchimento do molde. Geralmente recomenda-se sistemas de canais despressurizados para ligas de alumínio, com relações 1:2:2, 1:2:4 ou 1:4:4. Neste tipo de sistema, pretende-se que com o aumento das seções dos canais, a velocidade do fluxo tenda a diminuir antes da entrada na cavidade do molde (AFS, 1972; Mariotto et al., 1986)

O aspecto positivo é a diminuição da turbulência na cavidade do molde. Entretanto, nos primeiros momentos do vazamento os canais trabalham parcialmente vazios, promovendo oxidação e aspiração de ar. Um recurso adicional para reduzir a velocidade do fluxo nos canais de

distribuição é a utilização de filtros no sistema. Além de reduzir a velocidade do líquido, os filtros tendem a reter eventuais inclusões geradas anteriormente (AFS, 1972).

#### Entrada do metal na cavidade do molde

O principal problema durante a entrada do metal na cavidade do molde é a elevada velocidade do líquido vindo dos canais, provocando descolamento da superfície do molde e favorecendo a exposição de superfície de alumínio líquido (Campbell, 1991).

Vazamentos por cima e pelo meio das peças são menos recomendados por apresentar maiores problemas de turbulência, devido à queda de metal na cavidade e à não restrição à velocidade do metal vindo dos canais de ataque. Certamente, o vazamento por cima, além da maior simplicidade do molde, é o que impõe o melhor gradiente térmico para alimentação pelos massalotes (Campbell, 1991).

De uma forma geral, recomenda-se que a entrada do metal na cavidade do molde ocorra pela parte inferior. Com isto, as quedas do metal na cavidade seriam eliminadas e conforme transcorresse o preenchimento, o metal acumulado na cavidade formaria uma contrapressão à entrada de novas porções de metal, diminuindo a velocidade do fluxo (AFS, 1972). Entretanto, esta prática leva à imposição de um gradiente térmico de maior temperatura nas partes inferiores da peça e uma menor temperatura nas áreas superiores, onde geralmente estão os massalotes (Campbell, 1991).

O vazamento de moldes por meio de sistemas basculantes constitui-se em uma excelente opção por reduzir a turbulência durante o preenchimento (devido ao pequeno desnível imposto) e, ao mesmo tempo, por permitir o preenchimento das peças pela região superior, impondo um gradiente positivo de temperatura aos massalotes. Este sistema tem sido bastante utilizado na fundição de peças em ligas de alumínio com moldes metálicos (Fuoco, 1998).

## 2.9.4 Novos conceitos utilizados no projeto de canais para ligas de alumínio

Recentemente tem havido um esforço no sentido de melhorar o entendimento e estabelecer novos conceitos para o projeto dos sistemas de canais, conforme citado anteriormente, baseados na manutenção da estabilidade do menisco superficial durante o enchimento dos moldes, evitando a incorporação dos óxidos superficiais pelo metal. Para isto, duas condições devem ser mantidas (Campbell, 1991; Runyoro et al., 1992; Fuoco e Correa, 1997; Fuoco et al., 1999):

- a) deve-se manter o fluxo restrito às paredes dos canais;
- b) quando o fluxo não puder ser restrito pelas paredes do molde, a velocidade deve ser mantida abaixo de 500 mm/s.

As diretrizes a serem seguidas para o projeto de sistemas de canais visando a adequação a estes novos conceitos seriam (Campbell, 1991; Fuoco e Correa, 1997; Fuoco et al., 1999):

- 1. Os canais de descida devem ser projetados para garantir a vazão necessária ao preenchimento das peças, sem promover aspiração de ar (canal cônico) e limitando a velocidade do fluxo. Esta limitação da velocidade pode ser alcançada através da maximização do atrito metal/molde, com o uso de canais de grande retangularidade que diminuem o "diâmetro hidráulico" e limitam a turbulência descrita pelo número de Reynolds (canal tipo faca). Por exemplo, para uma seção quadrada de 20 mm, o diâmetro hidráulico é de 20 mm. Para uma seção retangular de mesma área (seção tipo "faca"), medindo 10 x 40 mm, o diâmetro hidráulico é de 16 mm.
- 2. Visando reduzir a tendência de descolamento do fluxo de metal na junção entre canal de descida e canal de distribuição utiliza-se canais de distribuição de pequena espessura (canal em faca), tipicamente entre 3 e 6 mm. Certamente, estes canais também contribuem na redução das velocidades devido à intensificação do atrito do metal com as paredes. Além do efeito de atrito, o canal de distribuição pode ser utilizado como forma adicional para promover redução de velocidade, através do

aumento da sua seção, desde que seja um aumento contínuo na largura do canal da região de junção com o canal de descida até a junção com os ataques;

- 3. O mesmo conceito de canais em faca pode ser estendido para os canais de ataque;
- 4. A secção do canal de descida (base do canal de descida), as somatórias das seções dos canais de distribuição e de ataque devem ter relação 1:1:1, visando não aumentar a velocidade do fluxo (como em canais convergentes) e evitar aspiração de ar (que ocorrem em canais divergentes);
- 5. Para sistemas de canais com filtros cerâmicos, o próprio filtro introduz uma grande perda de carga e redução de velocidade. Os conceitos anteriores podem ser aplicados, mas a seção imediatamente antes e depois do filtro deve ser calculada para garantir que a velocidade do fluxo esteja abaixo de 500 mm/s para evitar turbulência durante o preenchimento da cavidade do moldes.

Resumindo, há pelo menos duas maneiras de projetar um sistema de canais para peças fundidas por gravidade em ligas de alumínio (Campbell, 1991; Fuoco e Correa, 1997; Fuoco et al., 1999):

- Projetar os canais de descida, de distribuição e de ataque baseados na redução da velocidade do fluxo através do atrito do metal com o molde. A maximização deste conceito leva a canais de descida, de distribuição e de ataque em faca com espessuras de 3 a 6 mm;
- Utilizar filtros cerâmicos como forma de reduzir a velocidade do fluxo de metal antes da entrada na cavidade do molde. Certamente a eficiência de redução de velocidade dependerá do tipo de filtro e tamanho dos poros.

#### 2.10 Tratamentos do banho

Para a produção de peças fundidas utilizando uma liga Al-Si hipoeutética, como é o caso deste trabalho, é necessário, após fusão do material, promover um tratamento do banho. Este tratamento consta de refino microestrutural, modificação da forma do silício e desgaseificação, objetivando uma microestrutura mais fina e homogênea, com um mínimo de defeitos (inclusões de óxidos, porosidade e bolhas) o que repercute diretamente em melhora de propriedades.

O refino químico, atuante sobre a fase  $\alpha$ , tem como principal objetivo o de reduzir o tamanho das dendritas, evitando a formação de grãos colunares e aumentando a tendência à formação de grãos equiaxiais. Como conseqüência ocorre melhora das condições de alimentação, das propriedades mecânicas e da estanqueidade das peças fundidas, bem como reduz a tendência à formação de trincas a quente (Fuoco, 1994). A modificação, por outro lado, afeta a formação das células eutéticas, atuando sobre a forma do silício, alterando sua morfologia, que passa de acicular para uma forma fibrosa. Esta alteração morfológica acarreta melhorias substanciais nas propriedades mecânicas do material, notadamente da dutilidade. Seguindo recomendação da literatura, foi adicionado elemento refinador, objetivando atingir um teor residual final na liga de 0,05 %Ti e modificador para atingir um teor residual de estrôncio na faixa de 0,005 a 0,015 % (Backerud et al., 1991; Jorstad e Rasmussen, 1993; Fuoco, 1994).

As ligas de alumínio são muito susceptíveis à absorção de hidrogênio quando no estado líquido. Por ocasião da solidificação ocorre uma brusca redução de solubilidade fazendo com que cerca de 95 % do hidrogênio seja segregado para as últimas porções líquidas, promovendo a formação de porosidades nas regiões interdendríticas. Para evitar este problema, torna-se necessária a desgaseificação do banho, o que é feito através de borbulhamento de gás inerte. Além de baixar substancialmente o teor de hidrogênio no banho, o borbulhamento tende a arrastar partículas sólidas de inclusões de óxidos, conferindo limpeza do banho. Para quantificar o nível de hidrogênio residual é utilizado o processo de pressão reduzida. Para este teste uma amostra de aproximadamente 130 g é colhida e vazada num cadinho metálico pré-aquecido. Imediatamente envolve-se o material colhido com uma campânula, para que o mesmo solidifique sob baixa pressão (pressão de 80 mm de mercúrio) para aumentar a precisão do teste, uma vez que

nesta condição os poros são expandidos, facilitando a visualização. Para avaliação, o corpo de provas é cortado, lixado e examinado visualmente, afim de verificar o nível de porosidade. Estando baixo, o banho é liberado para vazamento. Como a expansão dos poros diminui a densidade do material, é possível também avaliar o teor de hidrogênio residual através da medida dessa propriedade. Se o valor obtido estiver próximo de um valor de referência (entre 2,65 e 2,67 g/cm<sup>3</sup>), o banho pode ser liberado para vazamento.

#### 2.11 Processos de fundição

Uma série de processos de fundição é explorada industrialmente, os quais serão discutidos sucintamente neste capítulo.

## 2.11.1 Fundição por gravidade

A fundição por gravidade pode ser feita usando molde de areia (a verde, cura a frio, silicato de sódio /  $CO_2$ , shell molding, etc.) ou metálico (coquilha). O primeiro passo para o projeto do molde é definir a forma de enchimento da peça, ou seja, o sistema de canais. A posição do(s) canal(is) de ataque, sua forma e seção é que vão definir os canais de descida e de distribuição. A qualidade do projeto será vital na sanidade do produto fundido.

A peça a ser produzida pode ser atacada por cima, horizontalmente pela lateral (no meio ou embaixo) ou verticalmente por baixo. Qualquer que seja a escolha, haverá vantagens e desvantagens quanto à complexidade do molde, qualidade do fundido, custo de produção, etc.

## Vazamento por cima

No vazamento por cima o metal é vertido diretamente na cavidade do molde através do massalote. É o processo mais vantajoso economicamente, pelas seguintes razões:

- projeto simples
- facilidade de confecção da placa modelo

- não necessita de canais
- menor custo devido à maior rapidez de moldagem
- não usa filtro
- maior facilidade de enchimento
- maior facilidade de corte e rebarbação
- menor volume de retorno
- promove gradiente térmico positivo em direção ao massalote

No entanto, a grande deficiência deste processo está associada com a grande altura de vazamento, ou seja, no início do mesmo, o metal liberado pela panela cai, em queda livre, até chocar-se contra o fundo da cavidade do molde. A turbulência gerada é muito grande e, em particular para fundição de alumínio, a geração e incorporação de óxido e bolhas é tão grande que inviabiliza o processo quando se deseja uma produção com algum requisito de sanidade interna e de propriedades mecânicas.

### Vazamento lateral

Para o vazamento lateral o canal de ataque pode localizar-se à meia altura do modelo da peça ou na sua base ou numa altura intermediária e o metal, impulsionado pela coluna líquida é impulsionado horizontalmente para dentro da cavidade do molde, podendo, numa situação limite, chocar-se contra a parede oposta. Qualquer que seja a localização do ataque, a turbulência gerada é grande, agravada quando o ataque é à meia altura, pois soma-se a altura da queda dentro da cavidade do molde. Além disso, o sistema impõe gradiente térmico não adequado.

## Vazamento por baixo

O vazamento por baixo é uma opção melhorada em relação aos sistemas anteriores, uma vez que é possível atuar no desenho do canal e controlar a velocidade de descida do fluxo e, conseqüentemente da velocidade de enchimento da cavidade do molde. Como discutido anteriormente (Runyoro et al., 1992), sempre que a velocidade do metal na entrada da cavidade do molde ultrapassar a velocidade crítica de 500 mm/s (para peças com até 10 mm de espessura), haverá geração de defeitos. Para reduzir essa velocidade, uma das possibilidades é reduzir a seção do canal de descida. A outra possibilidade é a colocação de filtro no canal de distribuição ou de ataque. Esta medida é a mais usada e muito mais lógica, pois além de filtrar o alumínio líquido, aumentando sua pureza, a perda de carga imposta reduz a velocidade, melhorando a qualidade do produto fundido. O efeito sobre a redução de velocidade é considerado tão importante que permite afirmar ser essa a razão principal da ausência de defeitos em fundidos e não da filtragem propriamente dita (Sirrell e Campbell, 1997).

Apesar de se obter produtos de boa qualidade usando esse processo e tomando-se todos cuidados inerentes, existe alguns aspectos que merecem ser discutidos, tais como:

- a maior complexidade de canais torna esse processo mais difícil de ser calculado e projetado;

- a placa modelo com mais detalhes é mais difícil de ser construída;
- o molde é maior e mais volumoso;
- o uso de filtro torna a moldagem mais cara, devido ao seu custo;
- é maior o volume de retorno;

Do ponto de vista de troca térmica, a alimentação por baixo faz com que esta região seja a mais quente da peça. O metal que irá compor o topo da peça e o massalote chega na região mais frio, gerando um gradiente negativo de temperatura começando ai a solidificação e direcionando-a ao contrário do desejado. Isto é minimizado pelo aumento do tamanho do alimentador para compensar as diferenças de temperaturas.

## 2.11.2 Fundição sob pressão (die casting)

Este processo de fundição utiliza máquina de injeção de câmara fria (cadinho externo; vazamento através de concha) ou de câmara quente (cadinho incorporado à máquina, com alimentação automática do pistão) e consiste em comprimir o metal líquido, forçando-o a

preencher a cavidade do molde. A pressão envolvida é elevada (acima de 100 MPa), exigindo equipamentos e cuidados específicos.

Algumas vantagens deste processo são:

- menor necessidade de tratamento do banho líquido (não necessita refinador de grão e modificador de Si)
- enchimento completo das peças, mesmo das pequenas e as de paredes finas
- excelente capacidade de reproduzir detalhes do modelo
- excelente acabamento superficial
- excelente precisão dimensional
- possibilidade de automação
- alta produção
- menor custo

Mas, por outro lado, esse processo apresenta muitos problemas operacionais, os quais comprometem a qualidade do produto fundido. Foi demonstrado, através de enchimento de molde transparente, que o jato líquido, comprimido pelo pistão, é impulsionado para dentro da cavidade do molde e, freqüentemente atinge os pontos de respiro, imediatamente solidificando, obstruindo a passagem do ar, de forma que a alta pressão, nestas ocorrências, apenas comprime os gases aprisionados (Campbell, 1991).

Nesse processo, mesmo partindo de um alumínio líquido limpo, é intensa a ocorrência de contaminação. No enchimento do pistão e nos primeiros estágios de injeção ocorre elevada turbulência, gerando e incorporando óxido e bolhas de ar. Estes fatos, associados com a alta velocidade de solidificação, são fatores que favorecem o aprisionamento de bolhas de ar, tão freqüentes nos fundidos obtidos por esse processo.

Esses produtos, cheios de descontinuidades, têm que ser tratados de forma diferenciada da maioria dos fundidos, como, por exemplo:

 não podem receber tratamento térmico de solubilização, pois a alta temperatura provoca expansão dos gases das bolhas superficiais (empolamento). Por outro lado, a baixa dutilidade devido à presença de filmes de óxido e bolhas neutraliza os efeitos benéficos do tratamento térmico.

- não devem se usinados, ou se necessário, sê-los o mínimo possível, pois a remoção da camada externa expõe material com maior nível de defeitos.

- deve-se evitar tratamento químico das peças, pois o meio aquoso agressivo, penetrando pelos poros e outros defeitos, provocam corrosão posterior.

- não devem ser soldados, pois as altas temperaturas envolvidas provocarão empolamento e deformação.

#### 2.11.3 Fundição sob baixa pressão

Fundição sob baixa pressão é diferente de fundição sob pressão sob vários aspectos. Pela sua própria natureza, a injeção é sempre vertical. As pressões envolvidas são, normalmente, da ordem de 0,2 a 0,6 bar, muito inferior aos 1000 bar (100 MPa) usados no segundo processo, o que permite fundir peças em moldes confeccionados tanto em areia como metálicos.

O deslocamento do metal é feito, não por pistão, mas através de pressurização do forno: a pressão do gás na superfície do líquido força-o a subir, através de um tubo metálico ou cerâmico, em direção ao molde (Figura 2.11a).

A baixa pressão necessária para deslocar o metal líquido para encher o molde também pode ser gerada por uma bomba eletromagnética. Entre os vários desenhos e exemplos, um dos mais conhecidos é o processo Cosworth, mostrado na Figura 2.11b.

O processo de baixa pressão é mais comumente usado para ligas de alumínio para fundir, por exemplo, rodas de automóvel, mas é usado também para aços, na produção de rodas de trem em moldes de grafite (processo Griffin) e, mais recentemente, aplicado para ligas de magnésio na obtenção de fundidos aeroespaciais.

As vantagens do processo de fundição sob baixa pressão são:

- baixa velocidade de enchimento, gerando pouca turbulência e, conseqüentemente, baixo nível de oxidação do alumínio, produzindo fundidos de boa qualidade.
- alto rendimento metálico, uma vez que o sistema de canais de enchimento resume-se no canal de subida (através do tubo de vazamento) o qual, após alívio da pressão, retorna ao banho. A perda resume-se no no pequeno cilindro, junto ao molde, o qual contém os pontos de ataque.
- baixo nível de arraste de óxidos superficiais do banho, uma vez que a extremidade do tubo vazador está imerso no seio da massa líquida.

No entanto, algumas desvantagens também devem ser citadas, tanto do ponto de vista econômico como técnico, tais como:

- investimento inicial relativamente alto
- reoxidação do banho, já tratado durante o abastecimento do forno
- formação de óxido, a cada ciclo, na subida e descida do metal dentro do tubo
- eventual oxidação superficial, conseqüência de turbulência, se a velocidade de enchimento não for adequadamente especificada. Tais turbulências são mais comuns do que se poderia esperar, se não existir um adequado controle da elevação da pressão dentro do forno.



Figura 2.11. Fundição sistema baixa pressão mostrando (a) equipamento convencional usando forno pressurizado e (b) usando bomba eletromagnética em forno aberto (Campbell, 1991).

#### 2.11.4 Fundição por gravidade utilizando basculamento do molde

Por este processo o molde, esquematizado na Figura 2.12, é mantido na posição horizontal enquanto o metal é depositado na bacia. Tão logo termine esta operação, ou mesmo antes de terminá-la, inicia um movimento de rotação do molde, permitindo que o metal líquido escoe suavemente da bacia para o interior da cavidade do molde. Controlando a velocidade de rotação é possível controlar a velocidade com que o metal entra no molde, o que permite controlar o nível de turbulência do líquido e, evidentemente, o nível de inclusões de óxido e bolhas.

O projeto do molde é bastante simples, constando basicamente do modelo da peça, massalote e bacia, esta última com volume suficiente para encher a peça e massalote. Com isso o material de retorno diminui, pois normalmente não existem canais (somente o massalote). A eliminação de filtro contribui para minimizar custo e simplificar a moldagem. A operação de corte de canais também é simplificada, pois restringe-se ao corte do massalote.

Outra grande vantagem do processo é a solidificação direcionada, pois o enchimento feito através do massalote aquece esta região. O metal líquido que irá compor a parte inferior da peça chega ao local com temperatura mais baixa, iniciando ai a solidificação. Esta progride em direção à parte superior da peça, sendo que a região junto ao massalote será a última a solidificar, com o alimentador exercendo corretamente suas funções.

Além das vantagens citadas, Stahl, 1986 e Bain, 1999, da Stahl Speciality, empresa especializada em equipamentos para fundição por esse processo, num artigo de revisão, cita ainda:

- elimina parte das operações de corte de canais
- permite fundir peças maiores (o vazador pode verter duas ou mais conchas de metal líquido, até encher a bacia, para depois iniciar o basculamento, o que, em outros processos, exige dois ou mais vazadores).
- permite fundir peças mais longas, com maior altura de vazamento.
- a qualidade do produto é superior à do obtido por fundição sob pressão.

- permite automação, refletindo em aumento de produção.
- o equipamento, sendo automatizado, garante reprodutibilidade e pode ser usado para fundir uma grande variedade de peças.



Figura 2.12. Arranjo esquemático da fundição por gravidade utilizando sistema de basculamento do molde (Campbell, 1991)

# Capítulo 3 Materiais e Métodos

# 3.1 Introdução

Para realização do estudo, foram fundidas placas planas medindo 10 mm x 150 mm x 200 mm (Figura 3.1), na posição vertical, similar às usadas em outros estudos (Runyoro et al., 1992; Fuoco e Cabezas, 1999), usando seis diferentes sistemas de canais de vazamento.



Figura 3.1. Desenho da placa usada na pesquisa. Medidas em mm

# 3.2 Sistemas de canais

Foram projetados e calculados os seguintes sistemas de canais:

 $\Rightarrow$  Vazamento por cima: alimentação da placa através do massalote

- Sistema de vazamento por cima (direto)
- Sistema de vazamento através de basculamento do molde

 $\Rightarrow$  Vazamento por baixo: canal de descida lateral e alimentação por baixo, pelo centro da placa.

- Sistema AFS
- Sistema de canal tipo faca
- Sistema utilizando filtro no canal de distribuição, posicionado verticalmente
- Sistema utilizando filtro no canal de ataque, posicionado horizontalmente

Na Tabela 3.1 é feita uma descrição sucinta dos vários sistemas de canais, mostrados esquematicamente na Figura 3.2. Os cálculos feitos que permitiram dimensionar os canais são mostrados a seguir. O desenho final de cada sistema, com detalhes e cotas estão no Anexo I (Desenhos I.1 a I.6).

### 3.2.1 Vazamento por cima

#### Sistema de vazamento por CIMA

O primeiro desenho de molde proposto para fundição da placa foi o de enchimento por cima (identificado como **Sistema por CIMA**). Neste caso é utilizado um canal que tem funções de enchimento (ataque) e de alimentação das contrações (massalote).

O volume da placa é:  $10 \times 150 \times 200 = 300.000 \text{ mm}^3 = 300 \text{ cm}^3$ 

A massa de alumínio envolvida, para preencher a placa e o canal, é da ordem de 1,2 kg. Considerando uma vazão da ordem de 0,5 kg / segundo, estimou-se um tempo de enchimento te = 2,5 segundos. A partir destes valores foi fixado um canal de seção retangular medindo 20 mm x 40 mm e 170 mm de altura (Figura 3.2a e Desenho I.1). Para facilitar a operação de enchimento do molde foi utilizada uma bacia medindo internamente 85 mm x 140 mm de base por 64 mm de altura, mostrada na Figura 3.3.

Sistema	Descrição	Desenho
Por	Vazamento por cima (o massalote é utilizado como canal de	Fig. 3.2a
<b>C1</b>	ataque)	Des. I.1
Cima		
	Desenno similar ao primeiro sistema (vazamento por cima), com	
Bascu-	enchimento da cavidade utilizando basculamento do molde. Os	Fig. 3.2b
lante	tempos usados para rotação de 90º do molde foram de 10, 20 e 30	Des. I.2
	segundos.	
	Vazamento por baixo, com canal de descida cônico, ao final do	
AFS	qual encontra-se uma bacia de choque (recomendação AFS). Após	Fig. 3.2c
	esta, os canais são despressurizados com relação de 1:4:4. Sem	Des. I.3
	filtro.	
	Vazamento por baixo, com canais de descida, distribuição e ataque	
Canal tipo	com espessura constante de 6 mm. O canal de descida é cônico. A	Fig. 3.2d
Faca	partir da extremidade deste, o canal de distribuição amplia-se; a	Des. I.4
	partir deste, o canal de ataque permanece paralelo, com seção	
	constante. Sem filtro.	
	Vazamento por baixo, com canal de descida cônico. Utilização de	
Filtro Vertical	filtro cerâmico com 20 poros por polegada, medindo 50 x 50 x 20	Fig. 3.2e
	mm, posicionado verticalmente no canal de distribuição. Após o	Des. I.5
	filtro, o canal é paralelo, com seção constante.	
Filtro	Vazamento por baixo, com canal de descida cônico. A partir da	
Horizon-tal	extremidade deste, o canal de distribuição é paralelo e de seção	Fig. 3.2f
	constante. Com filtro posicionado horizontalmente no canal de	Des. I.6
	ataque.	

Tabela 3.1. Descrição sucinta dos sistemas de canais para maiores detalhes, ver Desenhos I.1 a I.6 no Anexo I)


Figura 3.2. Desenho esquemático dos sistemas de canais utilizados na pesquisa

#### Sistema BASCULANTE (vazamento utilizando basculamento do molde)

Para estudar este sistema de alimentação, identificado por **Sistema Basculante**, foi projetado e desenhado um molde (Figura 3.2b e Desenho I.2) com placa, canal e bacia. O canal foi dimensionado com a mesma seção do sistema anterior (20 mm x 40 mm) e o comprimento diminuiu para 50 mm. A bacia, que tem função de reservatório, mede 85 mm por 140 mm de base por 64 mm de altura; esta deve receber o alumínio líquido, para encher a placa e o canal, antes de iniciar o basculamento do molde.

Uma variável importante no processo é a velocidade de rotação do conjunto: velocidade alta implicaria em maior turbulência do que em velocidade baixa. Por outro lado, baixa velocidade de basculamento propicia perda excessiva de calor, podendo não completar o enchimento do molde.

Apesar da carência de informações na literatura, o processo é usado por algumas fundições. Optou-se por utilizar, inicialmente, um tempo de 20 segundos para rotação dos 90° do molde. Posteriormente, objetivando evidenciar a importância dessa variável, novas corridas foram feitas, utilizando tempos de 10 e 30 segundos.

#### 3.2.2 Vazamento por baixo

## Sistema de vazamento AFS

Para dimensionamento dos canais do conjunto identificado por **sistema AFS** (Figura 3.2c e Desenho I.3), utilizando a mesma bacia de enchimento usada no sistema por cima (Figura 3.3), os seguintes cálculos foram efetuados:

### Volume total do conjunto fundido (V)

-	volume da placa:	$10 \ge 150 \ge 200 =$	$300.000 \text{ mm}^3 = 300 \text{ cm}^3$
-	massalote:	$20 \times 40 \times 170 =$	$136.000 \text{ mm}^3 = 136 \text{ cm}^3$

- sistema de canais de enchimento (aproximado):  $200.000 \text{ mm}^3 = 200 \text{ cm}^3$ 

 $V_{total} = 636.000 \text{ mm}^3 = 636 \text{ cm}^3$ 

Tempo de enchimento (te)

Baseado em cálculo similar ao anterior, foi fixado um tempo de enchimento de:

$$te = 3,5$$
 segundos

Vazão (Q)  
Q = V<sub>total</sub> / te = 636.000 mm<sup>3</sup> / 3,5 s → 
$$Q = 182.000 \text{ mm}^3 / \text{ s} = 182 \text{ cm}^3 / \text{ s}$$

Velocidade do fluxo ( $v_1$ , em  $A_1 e v_2$ , em  $A_2$  – ver Figura 3.3)

$$v_{1} = \sqrt{2.g.h_{1}} \qquad v_{1} = \sqrt{2 \times 980 \times 2} \qquad v_{1} = 600 \text{ mm/s} = 60 \text{ cm/s}$$
$$v_{2} = \sqrt{2.g.h_{2}} \qquad v_{2} = \sqrt{2 \times 980 \times 45} \qquad v_{2} = 3.000 \text{ mm/s} = 300 \text{ cm/s}$$

Seção do canal de descida  $(A_1)$ 

$$Q = A_{1.} v_{1} \qquad A_{1} = Q / v_{1} = 182 \text{ cm}^{3} \text{s}^{-1} / 60 \text{ cm.s}^{-1} \qquad A_{1} = 300 \text{ mm}^{2} = 3 \text{ cm}^{2}$$
Para um canal de seção quadrada,  $l_{1} = \sqrt{A_{1}} \qquad l_{1} = 17 \text{ mm} = 1,7 \text{ cm}$ 

# Seção inferior do canal de descida (A<sub>2</sub>)

Seguindo as dimensões dos desenhos indicados, o canal de descida ficou com comprimento de 430 mm (ver na Figura 3.3).



Figura 3.3. Desenho esquemático da bacia de vazamento e do canal de descida (mostrando as alturas h<sub>1</sub> e h<sub>2</sub>, as seções A<sub>1</sub> e A<sub>2</sub> e as velocidades v<sub>1</sub> e v<sub>2</sub>). Medidas em mm

Pela Lei da Continuidade:

$$A_{1.} v_{1} = A_{2.} v_{2} \rightarrow A_{2} = A_{1.} v_{1} / v_{2} = 300 \times 600 / 3000$$

$$A_{2} = 60 \text{ mm}^{2}$$
Para canal quadrado,  $l_{2} = \sqrt{A_{2}}$ 

$$l_{2} = 7,5 \text{ mm}$$

Apesar de ser um recurso criticado pelos pesquisadores atuais (Campbell, 1991; Fuoco et al., 1999; Kolososki et al., 2000), procurou-se seguir uma recomendação da literatura especializada (AFS, 1967; AFS, 1972; ASM Handbook, 1998), para verificar sua validade, colocando uma "bacia de choque", de base quadrada, medindo 25 x 25 x 30 mm, na extremidade inferior do canal de descida, objetivando "amortecer o choque" do fluxo metálico. A partir desta,

a seção dos canais de distribuição e ataque sofreram ampliação estabelecendo uma relação de 1 : 4 : 4 (seção da base do canal de descida : seção do canal de distribuição : seção do canal de ataque). O objetivo desta ampliação é diminuir a velocidade do fluxo, garantindo que não seja excedido o valor crítico indicado por Runyoro et al., 1992, de 500 mm / s.

#### Sistema de vazamento tipo FACA

Para dimensionamento do canal identificado por **Sistema tipo FACA** (Figura 3.2d e Desenho I.4) levou-se em conta novos conceitos propostos objetivando diminuir o diâmetro hidráulico do sistema de canais, diminuindo, conseqüentemente, o número de Reynolds. Para desenhá-lo considerou-se propostas de:

- Rezvani et al., 1999, que recomenda canal de distribuição e ataque com pequena espessura (canal tipo faca), sendo o primeiro divergente, a fim de desacelerar o fluxo metálico.
- Fuoco e Correa, 1999 e Fuoco et al., 1999 que propõem não só os canais de distribuição e ataque com pequena espessura, mas também o canal de descida. Propõem, também, que a seção inferior do canal de descida, a somatória das seções dos canais de distribuição e a somatória dos canais de ataque obedeçam a relação 1:1:1. Assim, durante o enchimento da peça, o canal de descida também contribuirá para conter a aceleração do fluxo e a seção constante evitará o deslocamento do fluxo das paredes do molde, ambas medidas contribuindo para minimizar a exposição do líquido à oxidação e retenção de bolhas de ar.

O canal de descida dimensionado tem espessura constante de 6 mm e largura inicial de 50 mm, que diminui gradativamente à medida que o líquido acelera durante a queda (o ideal seria espessura menor mas, para manter a seção, a largura ficaria excessivamente grande). As seções  $A_1 (300 \text{ mm}^2)$  e  $A_2 (60 \text{ mm}^2)$  foram mantidas (Figura 3.3). O canal de distribuição foi ampliado, de forma gradativa, em até aproximadamente 5 vezes seu valor inicial. A seção máxima foi mantida no canal de ataque, porém sempre com 6 mm de espessura.

## Sistema de vazamento utilizando FILTRO VERTICAL

Para dimensionar os canais identificados por **Sistema FILTRO VERTICAL** (Figura 3.2e e Desenho I.5), foi utilizado o mesmo canal de descida usado no sistema AFS, porém com as seguintes alterações foram feitas:

- eliminação da bacia de choque
- colocação de um filtro no canal de distribuição, posicionado verticalmente

Para posicionar o filtro e objetivando velocidade máxima de entrada do metal na cavidade do molde de 500 mm/s, o canal de distribuição passou de 60 para 500 mm<sup>2</sup>, seção esta mantida após ele, incluindo a extensão ("cata-lixo") e canal de ataque.

# Sistema de vazamento utilizando FILTRO HORIZONTAL

A partir de modificações do sistema filtro vertical, foi desenhado o **Sistema FILTRO HORIZONTAL**, mostrado na Figura 3.2f e Desenho I.6. A partir da base do canal de descida, com área de 60 mm<sup>2</sup>, estendeu-se o canal de distribuição com mesma seção. A partir deste, para o canal de ataque, seguindo a mesma recomendação usada no sistema anterior, houve ampliação da seção para 500 mm<sup>2</sup>, onde foi posicionado o filtro.

#### 3.3 Moldagem

Uma vez projetados os canais e construídas as placas modelos foi iniciada a moldagem. Para confecção dos moldes foi utilizada areia módulo de finura 60 / 70 AFS, aglomerada com resina furânica de cura a frio, na proporção de 1 % em relação ao peso da areia. A adição de catalisador foi de 30 % sobre o peso da resina. A mistura foi feita em um misturador contínuo, modelo ST200, da BEPEX CORPORATION, da Fundição do IPT.

Durante os ensaios preliminares, observou-se na placa fundida a existência de microporos, conseqüência da solidificação interdendrítica do material. Na produção das placas objeto de

estudo procurou-se dispersar estes micro-poros da superfície principal de ensaio (lado a ser tracionado no ensaio), colocado um resfriador, na forma de uma chapa de aço, com espessura de 9,5 mm por 170 mm de largura e 200 mm de altura, em apenas um lado do molde.

## 3.4 Liga utilizada e fundição

A liga usada para as experiências foi a ANSI 356.0, equivalente às ligas UNS A03560 e SAE 323, conforme norma SAE J452, 1985.

Esta liga foi preparada no Laboratório de Fundição do Agrupamento de Processos Metalúrgicos do IPT, a partir de alumínio de pureza comercial e silício e magnésio puros. Feito o balanço de carga para obter cerca de 200 kg de liga, o material foi fundido num forno de indução, marca Pillar, com 250 kW de potência.

Após refusão para obtenção das placas, foram feitas várias análises químicas visando o controle da composição. A Tabela 3.2 apresenta a composição química teórica da liga ANSI 356.0 e o resultado de uma análise, realizada a partir de amostra de uma placa.

	%Si	%Mg	%Fe	%Cu	%Mn	%Ti	%Zn	%Sr
ANSI 356.0	6,5 / 7,5	0,2 / 0,45	0,6	0.25	0,35	0,25	0,35	
Resultado da análise química	7,24	0,30	0,28	não analisado	não analisado	0,05	não analisado	0,014

Tabela 3.2. Composição química da liga ANSI 356.0 e resultado da análise química de amostra de uma placa

#### **3.5** Desenvolvimento dos trabalhos experimentais

As corridas foram fundidas em um forno de indução de 50 kW / 3000 Hz (especificação Inducto 50 da INDUCTOTHERM) num cadinho de grafite com capacidade para 6 kg de alumínio e o banho foi tratado conforme descrito no item 2.8.

Ao atingir a temperatura de aproximadamente 750 °C, para fazer o refino da liga, foi adicionado 1 % de Al-5 %Ti-1 %B na forma de vergalhão de 10 mm de diâmetro (especificação TiBAl 5 da Companhia Industrial Fluminense). Oito minutos depois, para fazer a modificação, foi adicionado 0,15 % de Al-10 %Sr (também da Companhia Industrial Fluminense), na forma de tabletes. Dois minutos depois o metal foi transferido para um forno de espera de 6,5 kW, fabricado pela ETIL, com capacidade para 7 kg de alumínio, onde se procedeu a desgaseificação; esta foi feita, durante 15 minutos, utilizando somente nitrogênio, super seco, fornecido pela White Martins, introduzido através de um plug poroso fixo, de material cerâmico (tipo Bell, com base de 102 mm de diâmetro e 610 mm de altura, da Pyrotec). Finda a desgaseificação, o banho foi limpo para remoção da drosse e tirada uma amostra para avaliação do teor de hidrogênio residual Após avaliação (e aprovação), foi feita a última medida de temperatura e o alumínio foi vazado.

Para o vazamento, o metal foi vertido num copo medindo aproximadamente 50 mm de diâmetro por 80 mm de altura, na base do qual tinha um filtro cerâmico tipo esponja, medindo 50 x 50 x 20 mm, com 20 poros por polegada. Deste copo o metal caiu numa bacia de enchimento, com dois furos, para distribuição do metal para os dois moldes.A maioria das corridas realizadas foi feita vazando-se dois moldes por vez, sempre fundindo placas com canais diferentes, procurando tornar mais aleatória possível a distribuição do metal.

# 3.6 Vazamento usando basculamento do molde

Para realizar o vazamento da placa com o basculamento do molde, foi projetado, desenhado e construído um dispositivo constituído por uma estrutura metálica, motor de 12 volts, sistema de transmissão de movimento por meio de roda dentada e corrente e uma bandeja (Figura 3.4):

dentro desta é colocado o molde, na posição horizontal, para ser vazado. Uma vez enchida a bacia do molde (reservatório), o sistema é acionado para que, por meio do basculamento, o metal líquido escoe para o interior da cavidade do molde. O controle da velocidade de rotação é feito variando a alimentação elétrica do motor, fornecida por uma fonte de tensão constante marca Minipa e modelo MSP3006D.



Figura 3.4. Fotografia do dispositivo de basculamento do molde

## 3.7 Inspeção das placas por raio-x

Depois da remoção do canal e de eventuais rebarbas, as placas foram inspecionadas por raiox com o objetivo de verificar existência de bolhas de ar. O equipamento utilizado, do Laboratório do Centro Tecnológico de Materiais, MTC, da Volkswagen do Brasil, é um modelo MG160 Constant Potencial Unit, de duplo foco e tensão nominal de 160 kV, da Philips.

# 3.8 Preparação dos corpos de provas

Cada placa foi riscada horizontalmente de forma a ser subdividida em 10 "tiras", sendo que a primeira (inferior) e a última ficaram com 10 mm e as oito intermediárias com 22,5 mm cada,

conforme Desenho I.7 – Placa Fundida. Antes do corte, estas oito tiras foram numeradas, de baixo para cima, utilizando o número da placa, seguido do número 1 ao 8.

Após o corte, realizado no Centro de Laboratórios de Materiais da FEI, as primeiras e últimas tiras (extremidades da placa), com 10 mm de largura, foram descartadas em razão de sofrerem resfriamento mais rápido, o que provoca maior refino de grão e, consequentemente, maiores propriedades mecânicas, com resultados superiores aos das demais tiras. As oito tiras, denominadas de corpos de provas, numerados de 1 a 8, foram usinados, somente nas faces cortadas, a fim de ajustar o paralelismo dessas faces. As dimensões finais de cada corpo de prova foram de aproximadamente:

- 10 mm (espessura original da placa)
- 18 mm (largura do corpo de provas)
- 150 mm (comprimento, correspondente à largura original da placa).

#### 3.9 Ensaios

#### 3.9.1 Ensaio de Flexão

Para proceder ao ensaio de flexão, foi projetado e construído, no Setor de Manutenção da FEI, o dispositivo mostrado nas Figuras 3.5 (esquematicamente) e 3.6 (fotografia). Apesar de não seguir nenhuma norma internacional, as medidas do dispositivo seguiram um desenho (Figura 2.7), utilizado por Runyoro et al., 1992 em seus experimentos. O cutelo, que exerce pressão sobre o corpo de provas, tem raio de 25 mm. Os apoios, presos em eixos que os mantém livres para girar, tem diâmetro de 80 mm e distância entre os apoios de 150 mm, que corresponde ao comprimento do corpo de provas.

# O ensaio

Antes de iniciar o ensaio, os corpos de provas (todos os oito de cada placa) devidamente identificados, foram medidos (espessura e largura) para determinação de sua área. A seguir foram

posicionados (um por vez) no dispositivo de dobramento, ficando para baixo a face solidificada em contato com o resfriador, de forma a ser tracionada durante o ensaio. A força de compressão aumenta até que ocorra ruptura, diminuindo bruscamente a tensão, o que provoca interrupção do ensaio, porém o pico de força fica memorizado na máquina.



Figura 3.5. Esquema do dispositivo de dobramento utilizado para ensaiar os corpos de provas



Figura 3.6. Fotografia do dispositivo de dobramento

A máquina utilizada neste ensaio foi um modelo K2000 da KRATOS, do Centro de Laboratórios de Materiais da FEI, utilizando um fundo de escala de 500 kgf e velocidade de deslocamento do cabeçote de 22,5 mm/minuto. O sinal da tensão de compressão, indicativo da resistência à flexão do corpo de provas em análise, é injetado num registrador gráfico tipo x-t, cujo papel desloca-se com velocidade de 150 mm/min, descrevendo uma curva que se interrompe

com a fratura do corpo de provas (pico de tensão). Assim a deformação (flexa) é medida a partir da projeção da curva desenhada pelo registrador gráfico, respeitada a relação entre as velocidades.

A Figura 3.7 mostra uma fotografia do dispositivo de dobramento instalado na máquina de tração, tomada durante um ensaio e a Figura 3.8 mostra um conjunto de oito corpos de provas já ensaiados.

Na Tabela 3.3 é apresentado um exemplo da seqüência adotada para chegar-se aos valores finais de resistência à flexão e deformação. Inicialmente são lançados na tabela os valores obtidos com o levantamento dimensional do corpo de provas (espessura e largura), a força máxima aplicada até ruptura e o comprimento da projeção do gráfico traçado pelo registrador. Esses dados, com exceção do último, são introduzidos na equação 2.12, a qual permite calcular a tensão de flexão, em MPa. O comprimento da projeção, dividido pela velocidade do papel do registrador e multiplicado pela velocidade de deslocamento do cabeçote fornece a "flexa", indicativa da deformação.



Figura 3.7. Fotografia do dispositivo de dobramento montado na máquina de tração mostrando o ensaio



Figura 3.8. Fotografia dos 8 corpos de provas de uma determinada placa já ensaiados

Placa /	Espessura	Largura	Força(pico)	Deformação	Tensão	Res.flexão	Deformação
C.Prova	(h, mm)	(b, mm)	(kgf)	(gráfico)	(kgf/mm2)	(Mpa)	(flexa, mm)
9.1	11.5	19.4	394	87	33.6	330	13.1
9.2	11.2	19.4	324	71	29.1	286	10.7
9.3	10.3	18.4	255	70	28.6	281	10.5
9.4	10.1	18.5	197	48	22.9	224	7.2
9.5	10.2	19.5	219	53	23.6	231	8.0
9.6	10.1	19.5	276	70	30.4	298	10.5
9.7	10.5	19.2	303	69	31.3	308	10.4
9.8	10.8	19.1	374	115	36.8	361	17.3

Tabela 3.3. Exemplo de tabela apurada após levantamento dimensional e ensaio de flexão. As últimas duas colunas mostram os resultados de resistência à flexão e deformação utilizados na análise

#### 3.9.2 Medidas de densidade

As medidas de densidade foram realizadas no Laboratório de Fundição da Divisão de Metalurgia do IPT. Para realização dessas medidas foi utilizada uma balança digital modelo JP-200, fabricada pela Chyo Balance Corporation, com precisão de 0,0005 g. As medidas foram feitas conforme norma ISO 3369-4, 1975 utilizando o princípio de Arquimedes, determinando-se o peso das amostras ao ar e submersa em água, contendo algumas gotas de umectante (Teepol 610), para melhorar a molhabilidade.

#### 3.9.3 Preparação e exame metalográfico

O exame metalográfico permite levantar informações sobre:

- fases e constituintes que compõem a microestrutura do material
- presença, identificação e morfologia de terceiras fases eventualmente presentes
- eficiência do refinador de grão, através da avaliação da distância interdendrítica
- eficiência do tratamento de modificação, através da observação da forma, tamanho e distribuição das fibras de silício.

Além destas informações, o exame metalográfico é uma excelente ferramenta para avaliação da presença, identificação e mesmo quantificação de heterogeneidades microestruturais. Dentro dos objetivos deste trabalho, é esperada a presença de óxidos de alumínio, cuja identificação é facilitada pela sua cor escura e morfologia típica.

A partir da análise do resultado do ensaio de flexão, selecionou-se os corpos de provas que apresentaram os piores resultados para deles extrair amostra para exame metalográfico, partindose da hipótese de que teriam maior concentração de heterogeneidades, as quais seriam visualizadas através da observação micrográfica. Uma vez selecionados, estes corpos de provas foram cortados transversalmente e as amostras extraídas foram embutidas em resina polimérica, lixadas em lixas grana 220, 320, 400 e 600 e polidas em feltros impregnados com pasta de diamante de 6, 1 e 0,3 micrometro. As observações foram feitas, na maioria das vezes, sem ataque. Porém, quando este foi necessário, utilizou-se uma solução aquosa com 0,5 %HF. O microscópio utilizado foi um modelo DMLM da Leica, do Centro de Laboratórios de Materiais da FEI.

# 3.9.4 Exame da fratura

Amostras rompidas no ensaio de dobramento tiveram suas partes separadas objetivando expor suas superfícies de fratura. Utilizando uma lupa estereoscópica Olympus, modelo SZ-CTV da Olympus, estas duas superfícies foram examinadas, a fim de verificar presença de bolhas de ar retido, vazios de contração e, principalmente, filme de óxido. Algumas amostras, cuja fratura apresentou filme de óxido mais evidente no exame estereoscópico, foram selecionadas para exame no microscópio eletrônico de varredura. Este último exame foi realizado no Laboratório de Metalografia do IPT, utilizando um equipamento modelo 6300 da JEOL.

# Capítulo 4 Resultados e Discussão

# 4.1 Introdução

O enfoque deste trabalho é o estudo das conseqüências da elevada tendência de oxidação do alumínio em contato com o ar. Em processos de fundição, quanto mais exposta a superfície do metal líquido à atmosfera oxidante, mais intensa será a formação de óxidos. Estes óxidos, por sua vez, não sendo removidos, passam a fazer parte da peça e influirão em suas propriedades, em particular naquelas que dependem da nucleação e propagação de trincas. Assim é esperado que, quanto maior o nível de oxidação, piores serão essas propriedades. Para quantificar estas propriedades, optou-se pelo ensaio de flexão uma vez que ao ser submetido à carga compressiva de um lado, o corpo de provas é tracionado do outro lado e a presença de óxido, particularmente na forma de filme, propicia a nucleação de trinca, refletindo em menor resistência à flexão e menor deformação.

O trabalho experimental realizado na fundição resultou em 36 placas, contemplando os seis sistemas de canais (Figura 4.1). Para obtenção destas foram realizadas corridas fundindo, na maioria dos casos, duas placas de diferentes sistemas por corrida. Houve vários casos de rejeição de placas, conseqüência de enchimento incompleto, qualidade insatisfatória e aprisionamento de bolhas de ar, as quais foram descartadas.



Figura 4.1. Fotografias das placas fundidas com seus respectivos canais. (a) Sistema Por Cima;(b) Basculante; (c) Sistema AFS; (d) Canal Faca; (e) Filtro Vertical; (f) Filtro Horizontal Obs. A numeração impressa em cada placa corresponde à identificação original das corridas.

Dos vários desenhos de canais estudados, a maior incidência de rejeição de placas recaiu sobre o sistema de enchimento por cima, conseqüência de elevada quantidade de defeitos superficiais. Para entender a geração deste tipo de defeito é importante lembrar que no início do enchimento do molde, neste processo, o metal direcionado pelo furo da bacia, atravessaria o canal de alimentação e toda altura da peça indo chocar-se no fundo do molde. No caso em questão, esta altura corresponde a aproximadamente 400 mm. O choque contra o fundo da cavidade do molde provocaria espalhamento do metal, com intensa oxidação e aprisionamento de bolhas, o que implicaria na má qualidade da placa, conforme mostrado na Figura 4.2.

No sistema AFS apenas uma placa foi descartada pela presença de bolhas. Este defeito é conseqüência de intensa turbulência do líquido nos canais de descida, distribuição e ataque. Neste caso, é provável que a bacia de choque (no fim do canal de descida) tenha contribuído negativamente para aspiração de bolhas de ar. Uma vez formada a bolha de ar é arrastada para o interior do molde. Caso não haja tempo para sua flutuação, fatalmente ocorrerá o aprisionamento no seio da peça, como ocorreu na placa mostrada na Figura 4.3(a), detectada por de raio-x e marcada na peça. A usinagem feita até metade de sua espessura, aflorou as bolhas, como mostrado na Figura 4.3(b).

Quanto às demais placas fundidas, num total de 36, todas foram cortadas, gerando 288 corpos de provas, os quais foram ensaiados, gerando os resultados que serão a seguir analisados.



Figura 4.2. Fotografia de uma placa fundida por cima, descartada por apresentar elevado nível de defeito



Figura 4.3. Fotografia de uma placa fundida utilizando canal recomendado pela AFS. (a) Bolhas de ar detectadas por raio-x; (b) Bolhas de ar afloradas após usinagem

#### 4.2 Resultados gerais dos ensaios de flexão

Os 288 corpos de provas, oriundos das 36 placas fundidas utilizando os seis sistemas de canais, foram ensaiados conforme descrito no item 3.9.1 determinando-se a resistência à flexão e deformação, cujos resultados são apresentados a seguir.

## Sistema por cima

A Tabela 4.1 mostra o resultado geral de resistência à flexão e deformação dos corpos de provas oriundos das cinco placas fundidas com enchimento por cima. A tabela mostra também as médias dessas propriedades de cada placa individual e seus respectivos desvios padrões. A Tabela 4.2 repete essas médias e mostra ainda a média geral e desvio padrão do sistema por cima.

	SIS	ТЕМА	POR C	IMA: 5	Placa	s (40 c	orpos	de pro	vas)	
Número	PLAC	CA 1	PLACA 2		PLACA 3		PLACA 4		PLAČA 5	
do	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-
Corpo de	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação
Provas	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)
1	330		217	5,0	291	9,8	321	11,3	326	10,1
2	286		252	8,4	247	7,4	294	10,5	209	6,3
3	281		216	6,6	257	8,1	277	9,5	265	7,4
4	224		261	9,2	224	6,1	247	6,9	264	7,1
5	231		274	9,8	261	9,0	256	7,8	258	6,9
6	298		99	1,7	272	9,6	283	8,7	275	7,7
7	308		243	8,1	298	11,9	275	8,1	282	6,6
8	361		242	7,7	332	13,5	313	12,2	324	9,8
Média	290		226	7,0	273	9,4	283	9,4	275	7,7
Desvpad	46		55	2,6	34	2,4	26	1,8	38	1,4

Tabela 4.1. Resultados de resistência à flexão e de deformação dos corpos de provae média e desvio padrão por placa fundida com enchimento por cima

Os resultados de deformação da placa 1 não foram apresentados devido a problemas operacionais dos equipamento de medida dessa propriedade ao realizar essa bateria de ensaios.

MÉDIA E	E DESVIC	) PADRÂ	O POR F	PLACA E	GERAL					
R.Flexão Deform.										
		(MPa)	desvpad	(mm)	desvpad					
	Placa 1	290	46							
Sistema	Placa 2	226	55	7,0	2,6					
por Cima	Placa 3	273	34	9,4	2,4					
	Placa 4	283	26	9,4	1,8					
	Placa 5	275	38	7,7	1,4					
Média G	ieral	269		8,4						
Desvpad (	Geral		45		2,3					

Tabela 4.2. Resultados médios e geral e desvios padrões de resistênciaà flexão e de deformação por placa fundida por Cima

Analisando os resultados em geral verificamos grande dispersão da resistência à flexão, cujos valores variaram entre 99 MPa (corpo de prova 6 da placa 2) e 361 MPa (corpo de prova 8 da placa 1). O exame macroscópico superficial e da fratura do primeiro indicou a existência de um filme grosseiro de óxido junto à superfície tracionada, o que induziu uma fratura com baixas carga e deformação.

## Sistema AFS

A Tabela 4.3 mostra o resultado geral de resistência à flexão e deformação dos corpos de prova oriundos das seis placas fundidas pelo sistema AFS. A tabela mostra também as médias dessas propriedades de cada placa individual e seus respectivos desvios padrões. A Tabela 4.4 repete essas médias e mostra ainda a média geral e desvio padrão do sistema AFS.

Os resultados de deformação da placa 1 não foram apresentados por problemas operacionais do equipamento de medida dessa propriedade ao realizar essa bateria de ensaios. Analisando os resultados em geral verificamos uma considerável dispersão da resistência à flexão e deformação, cujos valores variaram entre 219 MPa (e 6,2 mm, para o corpo de prova 4 da placa 3) e 419 MPa (e 22,2 mm, para o corpo de prova 5 da placa 6) respectivamente. Examinando a média, verificou-se que a placa 3 e principalmente a 2, apresentaram valores baixos (abaixo de 300 MPa e de 9 mm). A explicação para estes baixos valores pode ter várias origens, mas mais

provavelmente seja devido à presença de elevado nível de micro-porosidades, conseqüência de uma desgaseificação com qualidade abaixo da obtida com as demais placas.

		SISTEMA AFS: 6 Placas (48 corpos de provas)											
Número	úmero PLAČA 1 P		PLAC	CA 2 PL		LACA 3		PLACA 4		PLACA 5		PLACA 6	
do	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-	
Corpo de	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação	
Provas	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	
1	325		297	11,0	299	8,6	380	15,6	384	16,9	358	13,2	
2	302		262	8,9	308	10,4	391	17,4	405	19,0	371	14,7	
3	308		244	8,7	269	9,1	362	14,6	401	19,2	410	19,7	
4	308		221	7,5	219	6,2	250	6,2	354	15,4	401	19,1	
5	283		223	7,4	236	5,9	293	9,0	312	12,0	419	22,2	
6	288		236	8,6	261	8,3	300	9,4	290	10,4	359	15,0	
7	283		254	9,2	279	8,9	287	9,2	288	9,6	363	15,4	
8	336		268	10,2	299	8,7	313	8,7	413	23,0	399	19,1	
Média	304		251	8,9	271	8,3	322	11,2	356	15,7	385	17,3	
Desvpad	19		25	1,2	32	1,5	50	4,0	53	4,7	25	3,1	

Tabela 4.3. Resultados de resistência à flexão e de deformação dos corpos

de prova e média e desvio padrão por placa fundidas pelo sistema AFS

MÉDIA E	DESVI	) PADRÃ	O POR F		GERAL		
		R.Flexão		Deform.			
		(MPa)	desvpad	(mm)	desvpad		
	Placa 1	304	19				
Sistema	Placa 2	251	25	8,9	1,2		
AFS	Placa 3	271	32	8,3	1,5		
	Placa 4	322	50	11,2	4,0		
	Placa 5	356	53	15,7	4,7		
	Placa 6	385	25	17,3	3,1	'	
Média Geral 315 12,3							
Desvpad G	eral		58		4,8		

Tabela 4.4. Resultados médios e geral e desvios padrões de resistência à flexão e de deformação por placa fundida pelo sistema AFS

# Sistema basculante

A fundição das placas usando este sistema foi feita conforme descrito no item 3.6, utilizando o dispositivo de basculamento mostrado na Figura 3.4.

Uma vez cortadas as placas produzidas e preparados os corpos de provas, estes foram ensaiados. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6, Tabelas 4.7 e 4.8 e Tabelas 4.9 e 4.10, respectivamente para os tempos de basculamento de 10, 20 e 30 segundos, identificados por basculante 10, basculante 20 e basculante 30.

A exemplo dos itens anteriores, as Tabelas 4.5, 4.7 e 4.9 mostram os resultados gerais de resistência à flexão e deformação dos corpos de prova oriundos das placas fundidas com seus respectivos tempos de basculamento, assim como as médias dessas propriedades de cada placa individual e seus respectivos desvios padrões. Além disso, as Tabelas 4.6, 4.8 e 4.10 repetem essas médias e mostram ainda as médias gerais e desvios padrões, que foram plotados na Figura 4.4, sendo identificados por Basc10, Basc20 e Basc30, respectivamente.

SISTEM	IA BAS	SCUL.1	0: 3 PI	acas (2	24 c.pr	ovas)	
Número	PLAC	CA 1	PLAC	CA 2	PLACA 3		
do	Res.	Defor-	Res. Defor-		Res.	Defor-	
Corpo de	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação	
Provas	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	
1	343	13,3	384	16,1	454	26,3	
2	335	13,4	304	8,7	411	19,1	
3	301	10,4	327	11,9	309	10,1	
4	293	11,0	308	10,4	310	10,2	
5	255	8,0	285	10,4	300	10,6	
6	310	12,4	274	8,1	286	10,1	
7	198	4,0	297	11,5	304	11,0	
8	321	15,3	328	13,4	258	7,3	
Média	294	11,0	313	11,3	329	13,1	
Desvpad	48	3,6	34	2,6	67	6,3	

Tabela 4.5	. Resultados	de resistência	à flexão e	de deform	nação dos co	orpos de pro	va
	e média e	desvio padrão	por placa	fundidas p	elo sistema	Basculante	10

MÉDIA E DESVIO PADRÃO POR PLACA E GERAL										
		Res.Flex.		Deform.						
		(MPa)	desvpad	(mm)	desvpad					
Sistema Placa 1 294 48 11,0 3,6										
Bascul.	Placa 2	313	34	11,3	2,6					
10	Placa 3	329	67	13,1	6,3					
Média	Geral	312		11,8						
Desvpac	d Geral		51		4,4					



Tabela 4.6. Resultados médios e geral e desvios padrões de resistência à flexão e de deformação por placa fundida pelo sistema Basculante 10

SISTE	SISTEMA BASCULANTE 20: 4 Placas (32 corpos provas)										
Número	PLAC	CA 1	PLAC	CA 2	PLAC	CA 3	PLACA 4				
do	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-			
Corpo de	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação			
Provas	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)			
1	361	15,0	376	16,8	342	12,6	369	15,5			
2	314	11,1	346	14,7	308	9,9	334	11,3			
3	287	8,4	307	9,8	299	9,5	306	6,9			
4	297	9,3	284	10,7	251	7,2	279	8,6			
5	269	9,0	296	12,0	285	9,9	262	7,1			
6	270	8,3	282	11,4	289	9,0	264	8,0			
7	291	11,4	294	12,5	334	12,5	284	9,8			
8	316	13,5	346	17,0	346	13,2	276	8,6			
Média	301	10,7	316	13,1	307	10,5	297	9,4			
Desvpad	30	2,5	35	2,7	33	2,1	37	2,8			

Tabela 4.7. Resultados de resistência à flexão e de deformação dos corpos de provae média e desvio padrão por placa fundidas pelo sistema Basculante 20

MÉDIA E	MÉDIA E DESVIO PADRÃO POR PLACA E GERAL										
		Res.Flex.		Deform.							
		(MPa)	desvpad	(mm)	desvpad						
Sistema	Placa 1	301	30	10,7	2,5						
Bascul.	Placa 2	316	35	13,1	2,7						
20	Placa 3	307	33	10,5	2,1						
	Placa 4	297	37	9,4	2,8						
Média Geral 305 10,9											
Desvpac	d Geral		33		2,8						

Tabela 4.8. Resultados médios e geral e desvios padrões de resistência àflexão e de deformação por placa fundida pelo sistema Basculante 20

BASC.30: 2 Placas (16 c.provas)										
Número	PLAC	CA 1	PLACA 2							
do	Res.	Defor-	Res.	Defor-						
Corpo de	Flexão	mação	Flexão	mação						
Provas	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)						
1	354	13,9	398	19,4						
2	313	11,0	340	13,1						
3	291	10,4	310	11,4						
4	314	12,5	287	9,8						
5	381	16,8	287	10,4						
6	446	29,1	272	9,6						
7	405	19,7	223	6,6						
8	403	18,6	343	15,6						
Média	363	16,5	308	12,0						
Desvpad	54	6,1	53	4,0						

Tabela 4.9. Resultados de resistência à flexão e de deformação dos corpos de provae média e desvio padrão por placa fundidas pelo sistema Basculante 30

MÉDIA E DESVIO PADRÃO POR PLACA E GERAL										
		Res.Flex.		Deform.						
		(MPa)	desvpad	(mm)	desvpad					
Bascul.	Placa 1	363	54	16,5	6,1					
30	Placa 2	308	53	12,0	4,0					
Média	Geral	335		14,2						
Desvpac	d Geral		59		5,5					

Tabela 4.10. Resultados médios e geral e desvios padrões de resistência àflexão e de deformação por placa fundida pelo sistema Basculante 30

## Sistema canal faca

SISTI	SISTEMA CANAL FACA: 4 Placas (32 corpos de provas)											
Número	PLAC	CA 1	PLAC	CA 2	PLAC	CA 3	PLACA 4					
do	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-				
Corpo de	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação				
Provas	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)				
1	343	11,5	360	14,2	316	10,1	326	11,1				
2	363	13,4	293	9,3	345	13,5	365	16,2				
3	419	21,6	369	15,7	393	20,4	346	12,9				
4	397	18,3	347	15,0	364	15,9	273	6,3				
5	326	11,9	287	11,1	306	9,3	246	7,5				
6	343	13,8	264	7,8	346	13,5	251	6,2				
7	348	15,5	331	12,3	393	18,9	320	10,8				
8	422	22,9	415	22,1	407	21,5	407	21,6				
Média	370	16,1	333	13,4	359	15,4	317	11,6				
Desvpad	37	4,4	50	4,4	37	4,6	57	5,3				

Os resultados obtidos com o sistema canal faca estão apresentados nas Tabelas 4.11 e 4.12.

Tabela 4.11. Resultados de resistência à flexão e de deformação dos corpos de prova e média e desvio padrão por placa fundidas pelo sistema Canal Faca

MÉDIA E DESVIO PADRÃO POR PLACA E GERAL										
		Res.Flex.		Deform.						
		(MPa)	desvpad	(mm)	desvpad					
Sistema	Placa 1	370	37	16,1	4,4					
Canal	Placa 2	333	50	13,4	4,4					
Faca	Placa 3	359	37	15,4	4,6					
	Placa 4	317	57	11,6	5,3					
Média	Geral	345		14,1						
Desvpac	d Geral		49		4,8					



Tabela 4.12. Resultados médios e geral e desvios padrões de resistência à flexão e de deformação por placa fundida pelo sistema Canal **Faca** 

Os piores resultados observados no sistema canal Faca apareceram na placa 4, nos corpos de provas da seqüência 4, 5 e 6, com menor resistência à flexão (246 MPa para o corpo de provas número 5 e deformação de 6,2 e 6,3 para os corpos de provas 6 e 4, respectivamente). Por outro lado, dos 32 corpos de provas, 5 apresentaram resistência à flexão superior a 400 MPa com destaque para o corpo de provas número 8 da placa 1, com 422 MPa e 22,9 mm de deformação.

# Sistema filtro vertical

		SISTE	MA FII	_TRO \	/ERTIC	CAL: 6	Placas	; (48 cc	orpos d	le prov	vas)	
Número	PLAC	CA 1	PLAC	CA 2	PLACA 3 PLACA		CA 4	4 PLACA 5			PLACA 6	
do	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-
Corpo de	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação
Provas	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)
1	372		297	9,5	351	13,4	391	15,5	374	16,8	335	12,6
2	343		334	11,7	405	18,7	372	15,1	382	17,7	387	18,4
3	347		340	13,5	397	19,1	382	14,8	414	24,6	344	12,2
4	337		326	14,4	338	12,5	365	14,0	335	12,0	333	12,2
5	293		339	14,9	332	13,9	385	18,3	302	11,6	370	16,7
6	264		359	16,8	310	11,3	336	11,6	289	10,0	327	12,9
7	294		383	19,2	378	16,8	365	14,7	302	10,3	333	14,3
8	383		386	16,1	407	20,3	361	13,1	391	22,2	348	15,5
Média	329		346	14	365	16	370	15	349	16	347	14
Desvpad	42		30	3,0	37	3,4	17	2,0	48	5,6	21	2,3

Os resultados obtidos com este sistema estão apresentados nas Tabelas 4.13 e 4.14.

Tabela 4.13. Resultados de resistência à flexão e de deformação dos corpos de prova e média e desvio padrão por placa fundidas pelo sistema Filtro Vertical

MÉDIA E DESVIO PADRÃO POR PLACA E GERA											
		Res.Flex.		Deform.							
		(MPa)	desvpad	(mm)	desvpad						
	Placa 1	329	42								
Sistema	Placa 2	346	30	14,5	3,0						
Filtro	Placa 3	365	37	15,7	3,4						
Vertical	Placa 4	370	17	14,6	2,0						
	Placa 5	349	48	15,6	5,6						
	Placa 6	347	21	14,3	2,3						
Média Gera	al	351		15,0							
Desvpad G	eral		35		3,4						

Tabela 4.14. Resultados médios e geral e desvios padrões de resistência àflexão e de deformação por placa fundida pelo sistema Filtro Vertical

A resistência à flexão obtida com este sistema variou entre 264 e 414 MPa e a deformação entre 9,5 e 24,6 mm. Considerando os valores de média geral, este sistema superou os demais sistemas já descritos, ficando abaixo apenas do sistema com filtro horizontal.

Essa disposição do filtro, alocado no canal de distribuição, é recomendada pelos seus fabricantes. No entanto, em função do desenho, é esperada alguma turbulência após o filtro, aumentando a probabilidade de formação de inclusões que, na média, explicaria os valores inferiores ao sistema com filtro no canal de ataque.

## Sistema filtro horizontal

Este sistema foi o que apresentou o melhor conjunto de resultados, superando todos os outros sistemas, mostrado nas Tabelas 4.15 e 4.16.

	S	ISTEM	A FILT	RO HO	RIZON	ITAL:	6 Placa	ns (48 c	orpos	de pro	ovas)	
Número	PLAC	CA 1	PLAC	PLACA 2		PLACA 3 PL		CA 4	PLACA 5		PLACA 6	
do	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-	Res.	Defor-
Corpo de	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação	Flexão	mação
Provas	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)
1	363	15,3	331	12,2	304	9,9	359	17,3	313	10,3	384	18,7
2	331	12,6	351	15,3	362	14,4	379	19,5	322	11,2	363	16,5
3	396	21,8	361	15,9	375	16,7	355	15,6	360	15,4	428	27,6
4	370	17,6	374	17,1	389	18,9	345	15,9	401	19,3	424	26,4
5	323	12,2	406	22,2	344	13,5	370	17,9	406	21,3	404	22,4
6	322	12,3	384	19,2	305	10,5	369	16,1	415	21,5	322	13,2
7	303	10,4	392	18,9	291	8,8	401	22,5	396	19,8	350	16,7
8	353	13,7	382	16,7	336	12,7	413	21,1	380	17,6	401	21,8
Média	345	14,5	373	17,2	338	13,2	374	18,2	374	17,0	384	20,4
Desvpad	31	3,7	24	3,0	36	3,5	23	2,6	39	4,4	37	5,0

Tabela 4.15. Resultados de resistência à flexão e de deformação dos corpos de provae média e desvio padrão por placa fundidas pelo sistema Filtro Horizontal

MÉDIA E	MÉDIA E DESVIO PADRÃO POR PLACA E GERAL											
		Res.Flex.		Deform.								
		(MPa)	desvpad	(mm)	desvpad							
	Placa 1	345	31	14,5	3,7							
Sistema	Placa 2	373	24	17,2	3,0							
Filtro	Placa 3	338	36	13,2	3,5							
Horizontal	Placa 4	374	23	18,2	2,6							
	Placa 5	374	39	17,0	4,4							
	Placa 6	384	37	20,4	5,0							
Média G	ieral	365		16,7								
Desvpad	Geral		35		4,3							



Tabela 4.16. Resultados médios e geral e desvios padrões de resistência à flexão e de deformação de placa fundida pelo sistema Filtro Horizontal

O pior resultado, obtido com o corpo de prova número 7 da placa 3, é um valor considerado alto, acima da média obtida pelo sistema de vazamento por cima, tanto de resistência à flexão como de deformação. O melhor resultado, apresentado pelo corpo de prova número 3 da placa 6, atingiu o valor excepcional de 428 MPa de resistência à flexão e 27,6 mm de deformação.

#### 4.3 Análise dos resultados gerais

A Figura 4.4 apresenta a média geral dos resultados de resistência à flexão (em MPa) e de deformação (em mm), obtidos com os seis sistemas de canais estudados. Para fazer uma análise comparativa destes resultados, é importante lembrar das duas restrições já discutidas:

- Entre as placas fundidas utilizando o sistema por cima, várias foram descartadas devido à má qualidade (ver Figura 4.2), que impediu a confecção dos corpos de provas. Portanto, o resultado obtido, baseado na seleção das placas consideradas isentas de bolhas, pode ter sido artificialmente elevado.
- Corpos de provas contendo poros ou mesmo bolhas de ar junto à região tracionada provavelmente tiveram trincas induzidas nestes defeitos durante o ensaio. Portanto estes resultados podem estar distorcidos (resultados da análise dos corpos de provas teoricamente sem poros são apresentados no próximo item – faixa 2).

Sem perder de vista essas duas restrições, é possível verificar que o vazamento por cima gerou muitos defeitos, o que comprometeu as propriedades das peças obtidas por esse sistema. Quanto ao sistema basculante, observa-se que diminuindo a velocidade de rotação do conjunto, há uma tendência de melhora das propriedades, conseqüência da diminuição da turbulência gerada durante o vazamento.

Comparando-se os sistemas AFS e faca, nota-se um melhor resultado apresentado pelo segundo. O sistema AFS, criticado por pesquisadores atuais, geraria uma turbulência na bacia de choque, propiciando aspiração de ar e expondo superfícies líquidas de alumínio para oxidação, comprometendo as propriedades finais do produto. Por outro lado, o sistema faca, devido à



Figura 4.4. Gráfico mostrando as médias gerais obtidas de resistência à flexão e deformação para todos sistemas de canais

diminuição do diâmetro hidráulico, diminui o número de Reynolds, que indica menor velocidade do fluxo de alumínio líquido no sistema de canais e enchimento mais suave da cavidade do molde. Além de aumentar o atrito com as paredes do molde, o canal de menor espessura aumenta a probabilidade de filmes de óxidos eventualmente presentes no líquido tocarem a superfície rugosa do molde de areia e, por adsorção, serem retidos, purificando o metal e melhorando a qualidade do produto obtido.

Comparando os sistemas com filtros, o pior resultado apresentado pelo filtro vertical, posicionado no canal de distribuição, provavelmente deveu-se à turbulência que ocorre após o filtro, quando o primeiro fluxo metálico, deslocando-se horizontalmente, percorre o canal de distribuição e choca-se com a parede do molde no fim da extensão, ocorrendo um refluxo turbulento, que expõe superfícies de alumínio líquido, propiciando a ocorrência de novos filmes de óxidos, os quais passarão a fazer parte da peça, comprometendo sua qualidade. No sistema que utiliza filtro no canal de ataque, mesmo que ocorra oxidação nos canais de descida e distribuição, como foi descrito anteriormente, a filtragem final imediatamente antes do líquido adentrar na cavidade do molde, garante limpeza, além de impor perda de carga no fluxo, garantindo alimentação suave com menor risco de re-oxidação do metal.

## 4.4 Resultados dos ensaios de flexão por faixas de densidade

Apesar dos cuidados tomados para realizar um adequado tratamento do banho de alumínio, em particular da desgaseificação, durante a etapa preparatória para a fundição das placas, assim como a utilização do resfriador (placa de 9,5 mm de espessura colocada de um lado do molde para diminuir o tamanho dos poros da superfície a ser tracionada durante o ensaio), observou-se, no exame metalográfico, que os corpos de provas com piores resultados de resistência à flexão e deformação apresentavam, além de filmes de óxidos, poros na microestrutura do material, como os mostrados na Figura 4.5, os quais poderiam estar concorrendo com a nucleação de trincas. Considerando que isso tornaria menos real a comparação dos resultados das medidas, decidiu-se medir a densidade de todos os corpos de provas, o que foi feito conforme descrito no item 3.9.2. Uma vez obtidos os resultados, os corpos de provas foram classificados em ordem crescente de densidade, por sistema de canais. Fazendo uma análise dos resultados quanto à faixa de dispersão

82



Figura 4.5. Microestrutura de uma placa fundida destacando a presença de micro-poros. 150x

de densidade de cada sistema, decidiu-se selecionar os corpos de provas contidos dentro de duas faixas, partindo-se da hipótese que corpos de provas com densidades muito próximas teriam níveis de micro-porosidades equivalentes e, portanto, as diferenças de propriedades (resistência à flexão e deformação) seriam atribuídas somente aos efeitos deletérios dos filmes de óxidos. As duas faixas selecionadas foram:

- faixa 1: densidade acima de 2,650 até 2,660 g.cm<sup>-3</sup>
- faixa 2: densidade acima de 2,660 até 2,670 g.cm<sup>-3</sup>

As Tabelas 4.17 e 4.18 apresentam os resultados obtidos e selecionados para esta análise. Visando facilitar a comparação entre os vários sistemas de canais, estes resultados foram plotados mostrando os valores obtidos de resistência à flexão e de deformação para as duas faixas, mostrados nas Figuras 4.6 e 4.7. Na Figura 4.8 é feito um comparativo entre as faixas 1 e 2, tanto de resistência à flexão como de deformação e na Figura 4.9 uma correlação entre os resultados médios das duas propriedades, para a faixa 2.

	FAIXA 1 - RESULTADOS E GRÁFICOS (densidade: 2,650 a 2,660)										
0.075				0.07							
SISTE	MA POR CI	MA Defermes		SIST	EMA FACA	Defermes		SIST FILT	RO HORIZ	Defermes	
Densidade	Res.flexao	Deformaç.		Densidade	Res.flexao	Deformaç.		Densidade	Res.flexao	Deformaç.	
g/cm3	MPa			g/cm3		7.5			MPa 410		
2,650	290	11,9		2,654	240	7,5		2,650	413	21,1	
2,652	282	6,6		2,656	2/3	6,3		2,650	300	10,6	
2,652	313	12,2		2,657	346	12,9		2,651	305	10,5	
2,653	321	11,3		2,658	251	6,2		2,652	344	13,5	
2,653	247	7,4		2,659	320	10,8		2,653	291	8,8	
2,654	332	13,5		2,659	407	21,6		2,653	389	18,9	
2,655	281			2,659	306	9,3		2,654	375	16,7	
2,655	291	9,8		2,658	307	10,7		2,654	379	19,5	
2,655	224			0,002	57	5,4		2,655	336	12,7	
2,656	209	6,3						2,655	362	14,4	
2,658	298							2,658	359	17,3	
2,659	324	9,8						2,653	355	15,4	
2,654	285	9,9		SIST. FI	LTRO VER	TICAL		0,002	35	3,8	
0,003	40	2,6		Densidade	Res.flexão	Deformaç.		SISTEM	A Bascular	ite 10	
				g/cm3	MPa	mm		Densidade	Res.flexão	Deformaç.	
				2,651	385	18,3		g/cm3	MPa	mm	
SIS	TEMA AFS			2,651	336	11,6		2,651	293	11,0	
Densidade	Res.flexão	Deformaç.		2,651	365	14,0		2,651	304	11,0	
g/cm3	MPa	mm		2,652	361	13,1		2,651	308	10,4	
2,652	261	8,3		2,652	372	15,1		2,652	297	11,5	
2,654	236	5,9		2,652	289	10,0		2,654	310	10,2	
2,654	244	8,7		2,652	294			2,654	310	12,4	
2,654	283			2,652	365	14,7		2,658	301	10,4	
2,654	308			2,652	382	14,8		2,653	303	11,0	
2,655	236	8,6		2,653	333	14,3		0,003	7	0,8	
2,655	325			2,654	327	12,9		SISTEM	A Bascula	nte 20	
2,656	283			2,654	264			Densidade	Res.flexão	Deformaç.	
2,656	288			2,654	293			g/cm3	MPa	mm	
2.656	308			2.655	302	11.6		2.650	291	11.4	
2.656	302			2.655	302	10.3		2.654	289	9.0	
2,656	336			2.655	370	16.7		2.657	294	12.5	
2,656	279	8.9		2.656	383	,.		2.659	287	8.4	
2.657	308	10.4		2.656	391	15.5		2.659	334	12.5	
2,657	221	7.5		2,656	372			2,656	299	10.7	
2 657	223	7 4		2,656	391	22.2		0.004	19	1.9	
2 658	254	92		2 657	343	,_		SISTEM		nte 30	
2,658	299	8.7		2,657	348	15.5		Densidade	Res flexão	Deformac	
2 659	250	6.2		2 658	333	12.2		a/cm3	MPa	mm	
2,000	262	8.9		2,000	337	12,2		2 651	201	10.4	
2,000	268	10.2		2,658	330	13.0		2,657	212	11 0	
2,000	200	17 /		2,000	3/7	10,9		2,007	31/	12.5	
2,009	360	1/,4		2,000	2//	10.0		2,000	210	11 /	
2,009	284	Q /		2,009	2/2	1/ 1		2,009	310	11.9	
2,000	204 12	3,4		2,000	25	20		2,000	11	0.0	
0,002	43	3,0		0,003	30	2,9		0,004		0,9	

Tabela 4.17. Resultados de resistência à flexão e deformação dos corpos de provas com densidade acima de 2,650 até 2,660 g/cm<sup>3</sup> (faixa 1) para todos sistemas de canais.



Figura 4.6. Gráfico mostrando as médias e desvios padrões de resistência à flexão e deformação em função do sistema de canais para os corpos de provas da faixa 1

	FAIXA 2 - RESULTADOS E GRÁFICOS (densidade: 2,660 a 2,670)									
SISTEM		10		510		<b>Γ</b> Δ		SIST FIL		
Densidade	Res flexão	Deformac		Densidade	Res flexão	Deformac		Densidade	Res flexão	Deformac
a/cm3	MPa	mm		g/cm3	MPa	mm		g/cm3	MPa	mm
2,66	324	9,8		2,661	287	11,1		2,660	304	9,9
2,664	326	10,1		2,661	316	10,1		2,661	415	21,5
2,664	286			2,661	364	15,9		2,661	392	18,9
2,666	308			2,661	365	16,2		2,662	384	19,2
2,666	361			2,661	407	21,5		2,662	406	21,3
2,668	330			2,662	346	13,5		2,662	382	16,7
2,665	322	9,9		2,662	331	12,3		2,662	374	17,1
0,003	25	0,2		2,662	345	13,5		2,662	401	19,3
				2,663	393	18,9		2,662	406	22,2
SIS	TEMA AFS	j Defermere		2,663	326	11,1		2,662	322	12,3
Densidade	Res.flexao	Deformaç.		2,664	264	7,8		2,663	396	19,8
g/cm3	MPa 202	mm 0.0		2,004	393	20,4		2,003	322	13,2
2,000	293	9,0		2,004	415	15.0		2,003	323	12,2
2,001	207	9,2		2,000	360	15,0		2,004	301	11.2
2,001	313	8.7		2,007	343	13.8		2,004	360	15.4
2,661	300	9.4		2,668	293	9.3		2,665	370	17.6
2.661	380	15.6		2.669	397	18.3		2.665	351	15.3
2,662	290	10,4		2,669	326	11,9		2,665	313	10,3
2,662	288	9,6		2,669	422	22,9		2,666	303	10,4
2,662	359	15,0		2,664	352	15,1		2,666	380	17,6
2,662	297	11,0		0,003	44	4,4		2,666	350	16,7
2,662	312	12,0						2,667	404	22,4
2,663	363	15,4						2,668	353	13,7
2,664	419	22,2						2,668	401	21,8
2,664	401	19,1						2,668	396	21,8
2,665	399	19,1		SISTEMA	FILTRO \	/ERTICAL		2,668	331	12,6
2,665	354	15,4		Densidade	Res.flexão	Deformaç.		2,669	428	27,6
2,665	410	19,7		g/cm3	MPa	mm		2,669	424	26,4
2,666	3/1	14,7		2,661	335	12,0		2,664	368	17,2
2,667	358	13,2		2,662	335	12,6		0,003	38	4,7
2,668	413	23,0		2,662	338	12,5		CICTER	A Descula	
2,008	401	19,2		2,002	387	18,4		Dopoidado	Dog floy ão	Defermen
2,000	403	19,0		2,003	378	16.8			MDo	mm
2,003	352	14.6		2,003	386	16.1		2 662	327	11 9
0.003	48	4.6		2,004	359	16.8		2,663	309	10.1
0,000	10	1,0		2,664	326	14.4		2,665	328	13.4
SISTEN	IA Bascula	ante 20		2,665	383	19.2		2,667	335	13.4
Densidade	Res.flexão	Deformac.		2,665	339	14,9		2,669	343	13.3
g/cm3	MPa	mm		2,665	397	19,1		2,670	304	8,7
2,661	342	12,6		2,665	340	13,5		2,670	384	16,1
2,662	306	6,9		2,665	407	20,3		2,667	333	12,4
2,662	307	9,8		2,665	414	24,6		0,003	26	2,4
2,662	316	13,5		2,665	334	11,7				
2,663	346	13,2		2,665	405	18,7		SISTEM	A Bascula	nte 30
2,664	346	17,0		2,666	297	9,5		Densidade	Res.flexão	Deformaç.
2,665	314	11,1		2,668	351	13,4		g/cm3	MPa	mm
2,666	334	11,3		2,668	382	17,7		2,666	354	13,9
2,667	346	14,7		2,669	374	16,8		2,667	381	16,8
2,668	369	15,5		2,664	361	15,7		2,668	343	15,6
2,668	361	15,0		0,002	33	3,7		2,669	340	13,1
2,664	335	12,8						2,667	355	14,9
0,003	- 22	2,9						0,001	19	1,/

Tabela 4.18. Resultados de resistência à flexão e deformação dos corpos de provas com densidade acima de 2,660 até 2,670 g/cm<sup>3</sup> (faixa 2) para todos sistemas de canais.



Figura 4.7. Gráfico mostrando as médias e desvios padrões de resistência à flexão e deformação em função do sistema de canais para os corpos de provas da faixa 2


Figura 4.8. Gráfico correlacionando os resultados médios obtidos nas faixas 1 e 2 de resistência à flexão e de deformação para todos sistemas de canais estudados



Figura 4.9. Gráfico correlacionando os resultados médios de resistência à flexão em relação aos resultados médios de deformação dos corpos de provas da faixa 2, para todos os sistemas de canais estudados

Considerando-se que a faixa 2 de densidade apresenta os resultados mais elevados, indicando menor quantidade de vazios, havendo portanto uma menor influência dos poros sobre as propriedades mecânicas, é neste universo de resultados que será enfocada a discussão e conclusões deste trabalho (salvo citação de outra referência). Além disso, entre as duas propriedades analisadas, considera-se que a deformação é mais sensível à presença dos filmes nocivos de óxidos, portanto esta será priorizada na análise.

De uma forma geral, fica evidente que os piores resultados foram obtidos pelo sistema por cima e pelo sistema basculante com velocidade de rotação mais alta. Durante o vazamento dos moldes usando o sistema por cima, como já mencionado, o metal cai de uma altura de aproximadamente 400 mm e, ao chocar-se contra o fundo do molde, haveria exposição de grande quantidade de superfície para oxidação, além de propiciar o aprisionamento de bolhas de ar. Esta afirmação fica mais evidente se considerarmos que, das cinco placas fundidas por este processo, gerando portanto 40 corpos de provas, apenas seis apresentaram densidade acima de 2,660 g/cm<sup>-3</sup> (faixa 2).

Este sistema de vazamento é inadequado para produção de peças em ligas com grande tendência à oxidação pois, os defeitos gerados, sendo incorporados à peça, fatalmente irão aumentar o índice de refugo e contribuir para nucleação de trincas numa solicitação envolvendo tensão de tração, diminuindo sua resistência mecânica e dutilidade.

A diminuição de propriedades associadas com defeitos ficou comprovada ao examinar-se corpos de provas que apresentaram baixos valores de resistência e deformação e constatar-se a presença de heterogeneidades grosseiras na superfície de fratura, as quais, por efeito de entalhe, teriam nucleado as trincas.

O sistema basculante oferece uma alternativa promissora, para baixas velocidades de rotação do sistema. Dentro da faixa estudada, utilizando tempos para rotação dos 90° de 10, 20 e 30 segundos, obteve-se resultados crescentes, tanto de resistência à flexão como de deformação. É importante frisar que os tempos estudados, citados acima, não esgotam, de forma alguma o assunto, uma vez que a curva de tendência mostrou-se crescente, ou seja, dando a impressão que diminuindo mais a velocidade de rotação, melhorará mais os resultados. É óbvio que essa diminuição tem um limite, pois irá contrapor-se a perda de calor, com esfriamento do material, não concluindo o enchimento do molde e/ou provocando o aparecimento de defeitos associados à baixa temperatura de vazamento.

Quanto aos valores obtidos, utilizando tempos de basculamento de 10 e 20 segundos, observa-se praticamente igualdade de resultados, o que indica que o nível de turbulência para ambos os casos, provoca danos equivalentes. Diminuindo a velocidade de rotação do sistema, ou seja, utilizando 30 segundos para bascular, obviamente a turbulência diminui. Como conseqüência, a degradação do alumínio líquido também diminui, o que reflete em melhores resultados de resistência e dutilidade. Além disso, a reprodutibilidade também é melhor, já que o desvio padrão apresentou-se baixo.

Quanto ao sistema AFS, na análise dos resultados gerais, a média ficou abaixo das médias dos sistemas basculante 30 e faca. Na análise das médias dos resultados da faixa 2, os três sistemas (AFS, basculante 30 e faca) apresentaram resultados muito próximos (na faixa 2 praticamente exclui-se efeito dos poros), indicando equivalente degradação do alumínio líquido. No entanto, a reprodutibilidade foi uma das piores, já que o desvio padrão foi dos mais altos, provavelmente devido à presença da bacia e do sistema divergente (1:4:4) que favoreceriam a exposição de grandes quantidades de superfície à oxidação e a aspiração de ar durante a passagem do metal.

O sistema faca apresentou, na análise geral, resultados médios de resistência à flexão acima dos já discutidos, ficando abaixo apenas dos sistemas com filtros. Na análise da faixa 2 esse sistema apresentou performance equivalente ao basculante 30, porém com desvio padrão significativamente maior, provavelmente devido à geometria divergente do canal de distribuição e espessura excessiva dos canais (melhor seria espessura menor que 6 mm). Comparando-o com o sistema AFS, os resultados médios e de desvio padrão indicam, também, comportamento muito parecido.

Utilizando o sistema de canais tipo faca obteve-se placas que apresentaram, na média, resultados ligeiramente superiores, dentre os sistemas sem filtro, mostrando que a intensificação do atrito é uma ferramenta importante para reduzir a turbulência, diminuindo o nível de inclusões e melhorando a qualidade do produto. Mesmo assim, a dispersão de resultados foi grande, semelhante, por exemplo, à obtida com o sistema AFS. É provável que esta dispersão possa ser reduzida e, talvez, os resultados aumentados, com espessuras dos canais ainda menores que a utilizada, que foi de 6 mm. Obviamente menor espessura implicará em maior perda de carga, diminuindo a velocidade do fluxo. Além disso, aumenta a probabilidade de que inclusões eventualmente presentes possam ser retidas pela parede e o líquido que chega à cavidade do molde tenha maior pureza.

O sistema faca (assim como o sistema AFS), por não usar filtro, representa uma alternativa vantajosa do ponto de vista econômico. Porém, ofereceu algumas dificuldades durante a moldagem, para confeccionar o canal de distribuição, devido à sua baixa espessura e grande

largura, num plano perpendicular ao plano de partição do molde (ver detalhes no Desenho I.4). Foi necessária a utilização de um postiço, praticamente sem ângulo de saída, que ficava preso na areia, todas vezes que o molde era aberto para remoção da placa modelo, exigindo uma atividade manual, adicional, para sua remoção. Certamente esta dificuldade poderia ser diminuída se a seção do canal estivesse dividida com metade em cada semi-molde. Com exceção deste detalhe, o sistema apresenta uma alternativa relativamente simples, além de oferecer um bom conjunto de propriedades.

Indubitavelmente os melhores resultados foram obtidos com sistemas com filtros, utilizando filtros cerâmicos tipo esponja. Comparando o sistema tipo faca com o sistema filtro vertical observa-se um ganho de propriedades que provavelmente justifique o aumento de custo devido ao filtro. Sistematicamente a utilização de filtro no canal de ataque em posição horizontal apresentou resultados superiores ao sistema com filtro na posição vertical, posicionado no canal de distribuição.

O posicionamento do filtro no canal de ataque é uma medida racional, pois ficando posicionado na parte final dos dutos que conduzem o líquido, qualquer turbulência acontecerá antes do filtro e, portanto, qualquer inclusão de óxido formada deverá ficar retida, passando a compor a peça um líquido limpo. Teoricamente, considerando uma eficiência total do filtro, óxidos eventualmente presentes na peça seriam formados apenas durante o enchimento da cavidade do molde, particularmente do primeiro jato, uma vez que o enchimento até completar a peça deve ocorrer de forma laminar, sem geração de bolhas e sem exposição de superfícies líquidas para oxidar. De forma geral, os resultados obtidos neste trabalho estão em concordância com os resultados de simulações de preenchimentos de moldes com água, cuja turbulência e aspiração de ar foram observadas e filmadas através da placa transparente e posteriormente analisadas (Fuoco e Cabezas, 1999; Fuoco et al., 1999).

Reportando-se ainda à Figura 4.8, de forma abrangente, fica evidente a influência da porosidade sobre as propriedades analisadas. A faixa 1, de menor densidade, ou seja, com maior volume de vazios, apresentou, sistematicamente, menores valores de resistência à flexão e de

deformação, indicando que estes defeitos, além das inclusões de óxidos, por efeito de entalhe, nucleiam trincas, induzindo fratura do corpo de provas sob menor carga.

#### 4.5 Exame metalográfico

As amostras preparadas para exame metalográfico, conforme descrito no item 3.9.3, foram examinadas e fotografadas. A Figura 4.10 mostra a microestrutura típica do material em análise, constituída por dendritas proeutéticas da fase  $\alpha$  envolvidas por eutético interdendrítico modificado. Esta microestrutura está de acordo com a esperada, para uma liga hipoeutética Al-Si-Mg refinada e modificada com estrôncio. Esta microestrutura apresentou-se constante nas placas fundidas utilizando os vários sistemas de canais.

As heterogeneidades intrínsecas ao processo, tais como micro-porosidade, filmes de óxidos e bolhas de ar associadas com filmes de óxidos (Figura 4.11) também foram observadas. A microporosidades, como comentado no item 1.3, estão associadas com a presença de hidrogênio em solução no banho antes da fundição e falta de alimentação interdendrítica, típica de ligas hipoeutéticas. Neste trabalho, a desgaseificação foi feita objetivando atingir um nível ótimo, a fim de reduzir o aparecimento de poros que pudessem interferir nos resultados. Quanto à contração interdendrítica, devido à falta de alimentação, é inevitável para a liga estudada, assim como de qualquer outra liga Al-Si com composição hipoeutética. A solução utilizada para minimizar o efeito da microporosidade foi a colocação do resfriador (citado no item 3.3), na forma de uma placa de aço, de um lado do molde. Como conseqüência deste recurso, ocorre um refino microestrutural, reduzindo o tamanho dos eventuais poros da superfície da placa de alumínio, além de apresentar uma aresta mais reta, detalhes estes mostrados na Figura 4.12(a).

Por ocasião do ensaio de flexão, os corpos de provas foram posicionados no dispositivo com esta superfície ficando do lado oposto ao cutelo, a fim de ser submetida à tração. A Figura 4.12(b), por sua vez, mostra o lado oposto da placa, ou seja, do lado que solidificou em contato com o molde de areia, onde pode ser observada uma aresta rugosa, com poros e estrutura mais grosseira.



Figura 4.10. Microestrutura típica de placa fundida, constituída essencialmente por dendritas proeutéticas da fase  $\alpha$  e eutético  $\alpha$ +Si modificado. Sem ataque. 125x.



Figura 4.11. Microestrutura típica de placa fundida, destacando a presença de inclusão de óxido associados com micro-porosidade. Sem ataque. 125x



Figura 4.12. Microestrutura superficial de uma placa de alumínio mostrando o lado que solidificou em contato com: (a) o resfriador; (b) a areia. (a) e (b) 150x

É esperado que corpos de provas com estrutura homogênea, ou seja, sem poros e sem inclusões de óxidos na forma de filme, ofereçam grande resistência à nucleação de trincas, apresentando elevada resistência à flexão e deformando bastante antes de romper. É esperado também que os corpos de provas de elevada densidade, identificados pela faixa 2, com densidade entre 2,660 e 2,670 g/cm<sup>3</sup>, ao serem submetidos à tração (parte central e meia espessura, de um lado do corpo de provas, no ensaio de flexão), tenham trincas nucleadas prematuramente somente nos filmes de óxidos, devido não só à sua morfologia, mas também pelo seu tamanho, comparativamente maior que os braços de dendritas.

Partindo-se destes princípios foram examinados metalograficamente corpos de provas que romperam com baixas carga e deformação, objetivando encontrar essas heterogeneidades. É importante frisar que, apesar de fornecer informações indiscutíveis sobre as heterogeneidades, este recurso, neste caso, não pode ser utilizado para quantificação de óxidos, por envolver uma região muito pequena, portanto uma amostragem não representativa. Assim o ensaio de flexão, que envolve um volume maior do corpo de provas durante o ensaio, foi considerado um recurso mais representativo e também mais direto para indicar a influência do desenho do sistema de canais na geração e incorporação de filmes de óxidos e, conseqüentemente, sobre a resistência à flexão e sobre a deformação.

A Figura 4.13 mostra a microestrutura de uma região de um corpo de prova contendo inclusão de óxido com morfologia de filme (indicado pelas setas). Por outro lado, as Figuras 4.5 e 4.11, apresentadas anteriormente, mostram o aspecto metalográfico de micro-poros e de um filme de óxidos associado com porosidade. Esta porosidade tem, normalmente, sua nucleação (e crescimento) devido a dois fatores que podem atuar isoladamente ou em conjunto:



Figura 4.13. Microestrutura típica de placa fundida destacando a presença de inclusão de óxido com morfologia de filme, do tipo amorfo. Sem ataque. 500x

- Fator termodinâmico. Nucleação de um micro-vazio induzida pela baixa energia da interface óxido / alumínio devido à: (a) contração volumétrica de solidificação ou (b) segregação de hidrogênio para a última região a solidificar que concentre uma porcentagem limite deste gás em solução
- Fator mecânico. Aprisionamento, pelo filme de óxido, de gás desgaseificante borbulhado durante o tratamento do líquido ou de ar aspirado durante o enchimento da placa.

Na fundição das placas objetos deste trabalho, a desgaseificação foi cuidadosa e o líquido tratado foi filtrado antes de ser introduzido no molde. Assim, é provável que o aparecimento de porosidade associada com óxido seja devido à: (a) contração volumétrica de solidificação, fenômeno normal em ligas hipoeutéticas ou (b) retenção mecânica de ar aspirado no sistema de canais em óxidos formados durante o enchimento, que não tiveram tempo de flotar e, conseqüentemente, passaram a fazer parte da peça.

#### 4.6 Exame fractográfico

Superfícies fraturadas, previamente selecionadas no exame fractográfico usando microscópico estereoscópico, foram observadas em microscópio eletrônico de varredura objetivando a identificação de inclusões de óxidos na superfície de fratura dos corpos de prova. A Figura 4.14 apresenta o aspecto típico das fraturas de corpos-de-prova sem a presença de inclusões de óxidos, onde observam-se estrutura dúctil, caracterizada pela presença de alvéolos e algumas micro-porosidades. A Figura 4.15 apresenta o aspecto típico de inclusões de óxido (do tipo amorfo) na superfície de fratura dos corpos de prova, formada nos canais durante o vazamento ou durante o enchimento do molde. Deste exame fica evidente a diferença microestrutural induzida pela presença do filme de óxido e seu efeito, pela sua localização, em nuclear trinca ao ser submetido a tensão de tração.

É importante considerar que no ensaio de flexão o volume tracionado durante o ensaio é pequeno, posicionado no centro do corpo de provas e próximo à superfície do lado oposto ao cutelo. É neste pequeno volume que inclusões de óxidos, na forma de filme, nucleiam trincas, indicando menor resistência à flexão do corpo de provas e, conseqüentemente, da placa. Apesar desta consideração, é um recurso coerente, confirmado pelos diferentes resultados obtidos, ensaiando corpos de provas extraídos de placas fundidas utilizando diferentes desenhos de canais.



Figura 4.14. Aspecto típico das fraturas de corpos de provas retirados das placas fundidas quando observadas em microscópio eletrônico de varredura. A superfície de fratura é constituída por alvéolos (típica de fratura dúctil) e algumas micro-porosidades. (a) e (b) 40x



Figura 4.15. Aspecto típico de inclusão de óxido tipo amorfo observado na superfície de fratura de corpos de prova retirados de placa fundida quando observados em microscópio eletrônico de varredura. (a)500x e(b)2000x

# Capítulo 5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

### 5.1 Conclusões

Em relação aos seis diferentes sistemas de canais utilizados para o preenchimento de placas na posição vertical, utilizando a liga de alumínio UNS A03560, pode-se obter as seguintes conclusões:

1. Apesar das diferentes propriedades obtidas, assim como diferentes índices de refugo e relações de peso peça / retorno, foi possível obter placas com os seis diferentes sistemas utilizados;

 Com base nos resultados obtidos foi possível classificar (em ordem crescente de desempenho) os sistemas de canais estudados, como sendo: Vazamento por cima;

Vazamento através de basculamento do molde usando 10 segundos para rotação de 90°; Vazamento através de basculamento do molde usando 20 segundos para rotação de 90°; Vazamento por baixo, seguindo recomendação da literatura (AFS);

Vazamento através de basculamento do molde usando 30 segundos para rotação de 90°; Vazamento por baixo com canais tipo faca;

Vazamento por baixo com filtro posicionado verticalmente no canal de distribuição; Vazamento por baixo com filtro posicionado horizontalmente no canal de ataque;

 Comparando todos os resultados obtidos, destacam-se as propriedades dos sistemas com filtro, particularmente quando colocados no canal de ataque;

- Para todos sistemas estudados, os resultados inferiores obtidos com os corpos de provas da faixa 1 (com densidade maior que 2,650 até 2,660 g/cm3), comparados com os da faixa 2 (que tem menor quantidade de micro-porosidades), é um indicativo que as micro-porosidades concorrem para a nucleação de trincas;
- 5. É possível avaliar a qualidade do fundido pelo do ensaio de flexão, analisando e comparando os resultados de resistência à flexão e deformação;
- 6. Peças fundidas com canais inadequados provocam a formação de inclusões de alumina do tipo amorfa e aprisionamento de bolhas de ar. Suas presenças no fundido prejudicam as propriedades do material. Peças fundidas em moldes com sistemas de canais melhor projetados, ao contrário, refletem em melhor qualidade do fundido, quantificado pelos maiores valores de resistência à flexão e deformação até ruptura;
- Utilizando processo basculante, as peças produzidas com menor velocidade de rotação do molde (30 segundos para girar 90 graus) apresentaram melhores resultados mecânicos;

### 5.2 Recomendações

Os resultados obtidos com o trabalho realizado permitiram estabelecer as seguintes recomendações:

- Visando minimizar a turbulência e a conseqüente degradação da qualidade do metal, para o projeto de sistemas de canais sem a utilização de filtro, são importantes as seguintes considerações:
  - usar canais de descida cônicos;
  - manter a velocidade do fluxo abaixo de 500 mm/s restringindo as seções dos canais de descida, de distribuição e de ataque;
  - usar canais de grande retangularidade que diminuem o diâmetro hidráulico (canal tipo faca) para maximização do atrito metal/molde;

 - arredondar as junções onde ocorrem mudanças de direção do fluxo e minimização das variações de seção que geram regiões de baixa pressão e contribuem para a aspiração de ar;

- No projeto de sistemas de canais com a utilização de filtros, com o mesmo objetivo, são importantes as seguintes considerações:
  - evitar canais na posição horizontal após o filtro;
  - a aplicação do filtro na posiçao horizontal, o mais próximo possível da região de ataque;
  - calcular a seção dos canais de forma que a somatória das perdas de carga, incluindo a imposta pelo filtro, garanta velocidade de fluxo abaixo de 500 mm/s;

## 5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

- 1. Fazer simulações físicas utilizando molde transparente e vazamento com água a fim de localizar os pontos mais críticos durante o enchimento que geram turbulência e aspiração de ar;
- 2 Fazer simulações em computador usando aplicativos disponíveis no mercado e comparar os resultados destas com a simulação física e principalmente com os resultados práticos, obtidos fundindo e ensaiando peças, a fim de apurar a validade das simulações;
- 3 Explorar mais o sistema de enchimento utilizando basculamento do molde, no que diz respeito à velocidade de rotação do sistema, uma vez que dentro da faixa de tempo estudada não foi possível determinar o tempo ótimo;
- 4 Explorar mais o sistema de canais tipo faca, utilizando menores espessuras e relação de seção 1:1:1;
- 5 Comparar sistemas com filtros, utilizando filtro esponja e filtro prensado;

## **Referências Bibliográficas**

AFS. 1<sup>st</sup> International Conference on the Gating, Filling and Feeding of Aluminum Casting. American Foundrymen's Society, Nashiville – TN, october 1999

AFS. *Basic principles of gating and risering*. American Foundrymen's Society Training and Research Institute, Instructional material – Des Plaines , Illinois – USA – 1972.

AFS. *Basic principles of gating*. American Foundrymen's Society Training and Research Institute, Cast Metals Technology Series, Addison-Welley Publishing Company, 1967.

Aluminium Today. *Brasil, mercado altamente promissor*. Edição Especial Latino-Americana – DMG Business Media Ltd. / ABAL – Junho de 1999.

Aluminium Today. *Carros de alumínio*. Edição Especial Latino-Americana – DMG Business Media Ltd. / ABAL – Junho de 1999.

Anuário estatístico da ABAL. Associação Brasileira do Alumínio, 1997.

ASM Handbook. Casting. v.15 - ASM, 1998

ASTM E290-92. *Standard Test Method for Semi-Guided Bend Test for Ductility of Metallic Materials*. American Society for Testing and Materials, 1992.

ASTM A370-97. *Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. American Society for Testing and Materials, 1997.

Azevedo, A. *Pé no acelerador: Entrevista.* Alumínio: Suplemento nº 1 da Revista Metalurgia e Materiais – Edição 490 – ABM - Agosto de 1999.

Backerud, L., Chai, G. e Tamminem, J. *Solidification characteristics of aluminum alloys.* v. 2 - Foundry Alloys - AFS / Skanaluminium, 256 p., 1991

Bain, R. *Tilt-pour gating – key parameters*. 1<sup>st</sup> International Conference on Gating, Filling and Feeding of Aluminum Castings – Oct. 11 – 13, 1999 – Nashville, TN

Campbell, J. Castings. Butterworth-Heinemann Ltd. - 1st edition, 287 p., 1991

Chandley, G. D., Flemings, M. C. *Gating premium quality castings*. AFS Transactions, v. 88-37, p. 121-128, 1988

Crepeau, P.N. *Molten aluminum contamination – gas, inclusions and dross*. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Molten Aluminum Processing, AFS, Orlando, Florida, November 12-14, 1995.

Divandari, M., Campbell, J. *The mechanism of bubble damage in castings*. In: 1<sup>st</sup> International Conference on Gating, Filling and Feeding Aluminum Castings, Nashville, october 1999, 49-63

Fuoco, R. Curso de fundição de ligas de alumínio. ABAL, 78 p., agosto de 1994

Fuoco, R. *Curso Defeitos de fundição de origem metalúrgica em ligas alumínio-silício*. ABAL, 148 p., novembro de 1997

Fuoco, R. e Correa, E.R. *O problema de microporosidades em peças fundidas em ligas de alumínio.* CONAF, ABIFA, 1997.

Fuoco, R. e Cabezas, C. Importância do projeto dos sistemas de canais na geração de inclusões de óxidos. CONAF, ABIFA, 1999.

Fuoco, R. *Efeito do tratamento de modificação na formação de microporosidade em ligas de alumínio A356*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1996. 300 p. Tese (Doutorado).

Fuoco, R., Cabezas, C. S., Correa, E. R. e Bastos, M. A. *Study on gating system design for aluminum gravity castings using water models*. 1<sup>st</sup> International Conference on Gating, Filling and Feeding of Aluminum Castings – Oct. 11 – 13, 1999 – Nashville, TN

Fuoco, R., Corrêa, E.R. Inclusões de óxidos em ligas alumínio-silício: origem, caracterização e efeitos. VI Seminário de Tecnologia da Indústria do Alumínio – ABAL, Setembro 1997, SP

Fuoco, R., Corrêa, E.R., Bastos, M.A., Escudero, L.S. *Metallographic characterization of some types of oxides inclusions in aluminum alloy castings*. In: 103<sup>rd</sup> AFS Casting Congress, Saint Louis, Missouri, 1999, p. 01-15

Fuoco, R., Corrêa, E.R., Bastos, M.A., Kolososki, J. e Santos, R.G. *Projeto de sistemas de canais para fundição de alumínio por gravidade*. CONAF, ABIFA, 2001.

Gouwens, P.R. e Gouwens, L.A. *Controlled pouring for aluminum casting production*. In: 4<sup>th</sup> International Conference Molten Aluminum Processing, AFS, Orlando, Florida, 1995, p.170-183

Green, N.R. e Campbell, J. Influence of oxide film filling defects on the strength of Al-7Si-Mg alloy castings. AFS Transaction – 94-114, 1994.

Grube, K. R., Kura, J. G., Jackson, J. H. *The study of vertical gating*. AFS Transactions, vol. 61, p. 81-95, 1953

Grube, K. R., Lang, R. M., Kura, J. G. *Modifications in vertical – gating principles*. AFS Transactions, v. 64, p. 54-61, 1956

Grube, K. R., Kura, J. G. The study of vertical gating. AFS Transaction, vol. 62, p. 33-42, 1954

Grube, K.R., Kura, J.G. *Principles applicable to vertical gating*. AFS Transactions, v. 63, p.35-48, 1955

ISO 3369-4-1975 (E). *Materiais sinterizados impermeáveis e metal duro – determinação de densidade*. International Organization for Standardization, 1975.

Jorstad, J. L. e Rasmussen, W. M. *Aluminum Casting Technology*. American Foundrimen's Society, Des Plaines, Illinois, 356 p., 1993

Kolososki, J., Fuoco, R., Corrêa, E.R., Bastos, M.A., Santos, R.G. *Projeto de sistemas de canais para fundição de ligas de alumínio por gravidade*. In: 1º Congresso Internacional da Industria do Alumínio, São Paulo, ABAI, 1999

Kubaschewski, O. e Alcook, C. B. Metallurgical thermochemistry. Pergamon Press, 1979.

Mariotto, C. L., Albertin, E., Fuoco, R. Sistemas de enchimento e alimentação de peças fundidas. São Paulo: ABM, 1ª ed., 1986, 135 p.

Nieswaag, H., Deen, H.J.J. *Experiments on mould flow in thin wall castings*. In: 57<sup>e</sup> World Foundry Congress, Osaka, September 1990

Nyahumwa, C., Green, N.R. e Campbell, J. *Effect of mold filling turbulence on fatigue properties of cast aluminum alloys.* 102nd AFS Casting Congress, Atlanta, Georgia – U.S.A., 1998.

Player global: Ranking mundial - Alumínio: Suplemento nº 1 da Revista Metalurgia e Materiais – Edição 490 – ABM - Agosto de 1999.

Polich, R.F., Saunders, A., Flemings, M.C. *Gating premium quality castings*. AFS Transactions, v. 63, p.418-426, 1963

Reinventando a roda: Aplicações - Alumínio: Suplemento nº 1 da Revista Metalurgia e Materiais – Edição 490 – ABM - Agosto de 1999.

Relatório IPT / DEES N° 37034 /98. Análise do setor de fundidos de alumínio no Brasil – primeira fase. São Paulo, IPT, 1998, 96 p.

Rezvani, M., Yaang, X., Campbell, J. *The effect on ingate design on the strength and reliability of Al castings*. In: 103rd AFS Casting Congress, Saint Louis, march 1999

Runyoro, J., Boutorabi, S.M.A., Campbell, J. *Critical gate velocities for film-forming casting alloys: a basis for process specification*. AFS Transactions, v. 92-37, p. 225-234, 1992.

SAE J452. General information – chemical compositions, mechanical and physical properties of SAE aluminum casting alloys. Society Automotive Engineers. Warrendale, 1983. Vol.1, p.10.05-10.13, 1985.

Sandford, P. *Optimization of gating systems*. In: 4<sup>th</sup> International Conference on Permanent Mold Casting of Aluminum, Anaheim Ca, november 1997.

Sirrel, B. e Campbell, J. *The mechanism of filtration in the reduction of casting defects due to surface turbulence during mold filling*. In: 103rd AFS Casting Congress, Seattle, Washington, april 1997.

Sobe e desce: Conjuntura - Alumínio: Suplemento nº 1 da Revista Metalurgia e Materiais – Edição 490 – ABM - Agosto de 1999.

Stahl, G. W. *Twenty-five years tilt pouring aluminum*. AFS Transactions, v. 86-146, p.793-796, 1986.

Swift, R.E., Jackson, J.H. e Eastwood, L.W. *A study of the principles of gating*. T AFS, vol. 57, p.76-88, 1949.

Anexo I













