

MAURO SIMÕES ALVES

***ANÁLISE DE DEFEITOS EM PEÇAS
FUNDIDAS SOB PRESSÃO***

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a disciplina de
Trabalho de Formatura

Área de Concentração:
Engenharia de Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Hélio Goldenstein

Coordenador:
Dr. Ricardo Fuoco

*São Paulo
2001*

MAURO SIMÕES ALVES

***ANÁLISE DE DEFEITOS EM PEÇAS
FUNDIDAS SOB PRESSÃO***

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a disciplina de
Trabalho de Formatura

Área de Concentração:
Engenharia de Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Hélio Goldenstein

Coordenador:
Dr. Ricardo Fuoco

São Paulo
2001

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Hélio Goldenstein e ao Dr. Ricardo Fuoco pelas diretrizes e orientações dadas.

À Metalúrgica NEL Ltda. e seus funcionários pelo apoio e colaboração para a execução do trabalho.

Às pessoas que me ajudaram diretamente no trabalho (Prof. Nicole, Érica, Édson, Tiago, Thiago e Tatiana).

À minha família, namorada e aos amigos que sempre colaboraram e me apoiaram em quaisquer situações.

RESUMO

Atualmente, a fundição sob pressão é um dos processos de fundição mais econômico, fabricando, com alta produtividade, peças perto da sua forma final ("near-net shape"). Este tipo de processo é muito utilizado para a injeção de ligas de alumínio, entre outras, obtendo peças com baixo peso a serem utilizadas em diversos ramos da indústria. A fundição sob pressão é um processo no qual um metal fundido é injetado a altas velocidades num molde permanente (metálico). Existem três fatores fundamentais para se ter sucesso na fabricação de peças metálicas injetadas: operação adequada da máquina; projeto do molde e dos sistemas de canais; seleção da liga. Este trabalho terá como escopo a análise de defeitos de fundição em peças de alumínio, visando a redução do índice de refugo (principal preocupação das indústrias). Para tanto, serão sugeridas algumas alterações no projeto do sistema de canais das peças selecionadas. Assim, o enfoque principal será dado no estudo do sistema de canais, mostrando a influência exercida por este elemento na qualidade final das peças injetadas.

ÍNDICE

	<i>Página</i>
<i>Lista de Figuras</i>	
<i>Lista de Tabelas</i>	
<i>Resumo</i>	
I) Objetivos	1
II) Conceitos Teóricos	2
1) Introdução	2
1.1) Histórico	2
1.2) Aspectos Gerais	3
1.3) Vantagens e limitações	5
2) Máquinas	7
2.1) Componentes das máquinas injetoras	7
2.2) Máquinas de câmara quente	9
2.3) Máquinas de câmara fria	10
3) Moldes.....	13
3.1) Material do Molde	14
3.2) Componentes do Molde	15
3.2.1) Refrigeração do Molde	18
3.3) Sistema de Canais	18
3.3.1) Projeto do sistema de canais	19
3.3.2) Funções do Sistema de Canais em Fundição sob Pressão	24
4) Ligas	24
4.1) Ligas de alumínio	24
4.1.1) Composição química e propriedades mecânicas	25
4.1.2) Efeito dos elementos de liga	27
4.1.3) Impurezas	27
4.1.4) Efeito da presença do ferro	28
4.1.5) Formação das inclusões de óxidos	28
4.1.6) Velocidade crítica de fluxo e turbulência.....	29

	<i>Página</i>
4.1.7) Tratamentos do metal líquido	31
5) Etapas complementares	31
6) Principais Defeitos	32
6.1) Rechupes	33
6.2) Inclusões de óxidos (tipo pontos duros)	33
6.3) Bolhas de ar preso	34
6.4) Soldagem (ou colamento)	34
6.5) Possíveis soluções	35
III) Parte Prática	36
7) Materiais e Métodos	36
7.1) Seleção e estudo das peças	36
7.2) Estatística dos defeitos	39
7.3) Análise dos defeitos	40
7.4) Estudo dos sistemas de canais	40
7.5) Sugestões de alteração dos sistemas de canais	41
Modelo “α”	42
8) Resultados Obtidos	42
8.1) Estatística dos defeitos	42
8.2) Análise dos defeitos	43
8.3) Estudo dos sistemas de canais	44
9) Discussão dos Resultados	47
9.1) Estatística dos defeitos	47
9.2) Análise dos defeitos	47
9.3) Estudo dos sistemas de canais	49
9.4) Sugestões de alteração dos sistemas de canais	50
Modelo “β”	56
8') Resultados Obtidos	56
8.1') Estatística dos defeitos	56

	<i>Página</i>
8.2') Análise dos defeitos	57
8.3') Estudo dos sistemas de canais	59
9') Discussão dos Resultados	63
9.1') Estatística dos defeitos	63
9.2') Análise dos defeitos	63
9.3') Estudo dos sistemas de canais	64
9.4') Sugestões de alteração dos sistemas de canais	65
IV) Conclusão	67
V) Bibliografia	68

LISTA DE FIGURAS

	<i>Página</i>
Figura 1. Procedimento de alimentação da máquina com metal líquido	3
Figura 2. Procedimento de injeção do metal líquido (molde fechado)	3
Figura 3. Procedimento de aplicação de desmoldante	4
Figura 4. Joelhos de articulação	8
Figura 5. Desenho esquemático da máquina de câmara quente	9
Figura 6. Sistema de injeção de uma máquina de câmara quente	10
Figura 7. Desenho esquemático da máquina de câmara fria	11
Figura 8. Exemplo de máquina de câmara fria	12
Figura 9. Detalhe da bucha de injeção	12
Figura 10. Exemplo de um tipo de molde com duas partes	13
Figura 11. Desenho esquemático do molde (para máquina de câmara fria)	17
Figura 12. Partes do sistema de canais	19
Figura 13. Diagrama de fases Al-Si	25
Figura 14. Turbulência na transferência do metal líquido por gravidade	30
Figura 15. Turbulência no metal líquido pelo movimento do pistão de injeção ...	30
Figura 16. Modelo “α”.....	37
Figura 17. Amostra do canal de 8 cavidades da modelo “α”.....	37
Figura 18. Modelo “β”.....	38
Figura 19. Amostra do canal de 12 cavidades da modelo “β”	39
Figura 20. Aspecto visual do defeito (modelo “α”)	43
Figura 21. Análise dos defeitos (“α” cavidade N8), com auxílio de uma lupa	43
Figura 22. Análise dos defeitos (“α” cavidade N6), com auxílio de uma lupa	44
Figura 23. Croqui do Sistema de Canais (modelo “α”).....	44
Figura 24. 1º canal do modelo “α” injetado com menos material	45
Figura 25. 2º canal do modelo “α” injetado com menos material	46
Figura 26. 3º canal do modelo “α” injetado com menos material	46
Figura 27. Simulação do preenchimento da cavidade do modelo “α”.....	48
Figura 28. Ilustração sobre o preenchimento do metal líquido na cavidade	48
Figura 29. Croqui da config1 do sistema de canais para o modelo “α”.....	52
Figura 30. Croqui da config2 do sistema de canais para o modelo “α”	52

Página

Figura 31. Detalhe do novo canal de ataque	53
Figura 32. Detalhe esquemático da configuração do canal de entrada	55
Figura 33. Aspecto visual do defeito (modelo “ β ”)	57
Figura 34. Análise dos defeitos (“ β ” cavidade N11), com auxílio de uma lupa	58
Figura 35. Análise dos defeitos (“ β ” cavidade N6), com auxílio de uma lupa	58
Figura 36. Croqui do Sistema de Canais (modelo “ β ”)	59
Figura 37. 1º canal injetado com menos metal líquido (modelo “ β ”)	60
Figura 38. 2º canal injetado com menos metal líquido (modelo “ β ”)	61
Figura 39. Simulação do preenchimento da cavidade pelo metal líquido	64

LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

	<i>Página</i>
Tabela 1. Composição química dos principais aços-ferramenta	15
Tabela 2. Composição química das principais ligas de alumínio – silício	26
Tabela 3. Propriedades das principais ligas de alumínio – silício	26
Tabela 4. Ações sugeridas para eliminar ou amenizar os principais defeitos	37
Tabela 5. Dados da ocorrência de defeitos de acordo com a cavidade ("α")	42
Gráfico 1. Ocorrência dos Defeitos por Cavidade – Modelo "α"	42
Tabela 6. Dados para o cálculo da área do canal de ataque ("α")	51
Tabela 7. Cálculo da espessura do canal de ataque ("α")	54
Tabela 8. Dados da ocorrência de defeitos de acordo com a cavidade ("β")	56
Gráfico 2. Ocorrência dos Defeitos por Cavidade – Modelo "β"	57
Tabela 9. Medidas da área do canal de entrada, para cada cavidade ("β")	62
Tabela 10. Medidas da área do canal secundário, para cada cavidade ("β")	62

Análise de Defeitos em Peças Fundidas sob Pressão

I) Objetivos

Este trabalho de formatura tem como principais objetivos:

- Aprofundamento dos conceitos da fundição sob pressão;
- Análise de alguns defeitos em peças de alumínio fundidas sob pressão;
- Estudo sobre o projeto de canais das peças em questão;
- Sugestão de alternativas de modificação do sistema de canais, para a solução dos defeitos.

É importante se salientar que a análise da eficácia das alterações sugeridas não foram incluídas nos objetivos nem no plano de trabalho. Isso porque tais alterações dependem das disponibilidades da empresa em questão, da complexidade das modificações, do tempo de execução das alterações nos moldes e programação de produção das peças selecionadas. Sendo assim, seria temerário a inclusão deste item no escopo do trabalho.

Para tanto, é necessário se levantar os aspectos teóricos da fundição sob pressão, para então seguir para o estudo prático, ou seja, o desenvolvimento das análises. Assim, resolveu-se dividir, basicamente, o trabalho nos seguintes pontos:

II) Conceitos teóricos

- 1) Introdução
- 2) Máquinas
- 3) Moldes
- 4) Ligas
- 5) Etapas complementares
- 6) Principais defeitos

III) Parte Prática

- 7) Materiais e Métodos
- 8) Resultados Obtidos
- 9) Discussão de Resultados
- 10) Conclusão

II) Conceitos teóricos

1) Introdução

1.1) Histórico

O método de fundição sob pressão foi introduzido, inicialmente, para a produção de balas para canhão, em 1838. Porém, as primeiras máquinas de fundição sob pressão foram patenteadas por Sturges (1849), Barr (1852), Pelize (1856), Dusenbury (1877), e eram operadas manualmente. Assim, a fundição sob pressão começou a ser caracterizada como um tipo de fundição rápido. ^[1]

Esta característica motivou o desenvolvimento da máquina linotipo por Ottmar Mergenthaler. Nesta máquina eram montadas, automaticamente, as formas ou matrizes e uma linha de tipo das colunas de jornal era fundida. O metal era forçado para o interior do molde, por meios de um pistão e um cilindro submerso no metal líquido. ^[1]

As primeiras peças fabricadas, por fundição sob pressão, e vendidas comercialmente foram produzidas com ligas de chumbo e de estanho (em máquinas de câmara quente), principalmente para produção de mancais para indústria automobilística. Tal processo se tornou interessante na fabricação de peças metálicas. Assim, iniciou-se a idéia de se utilizar a fundição sob pressão para ligas de com melhores propriedades mecânicas e mais elevado ponto de fusão, porém, com maiores problemas de fundição. Em seguida, utilizou-se ligas de zinco, com um ponto de fusão um pouco mais elevado, pois possuíam boas propriedades mecânicas. As ligas de zinco foram fundamentais para o desenvolvimento da fundição sob pressão. ^[1]

A utilização de ligas de alumínio para fundição sob pressão de peças vendidas comercialmente começou em 1915. Durante a I Guerra Mundial, estas ligas foram utilizadas na fabricação de peças para máscaras de gás, componentes de armas e de binóculos. Essas ligas, com ponto de fusão superior ao do zinco, provocaram algumas diversificações nas máquinas de fundição sob pressão (máquinas de câmara fria). Atualmente, as ligas de alumínio são largamente utilizadas para a fabricação de peças com este tipo de processo. Nos últimos anos, as ligas de magnésio têm conquistado um grande espaço para a fabricação de peças injetadas. ^[1]

1.2) Aspectos Gerais

A fundição sob pressão é um processo no qual um metal fundido é injetado a altas velocidades num molde permanente (metálico). Basicamente, o processo segue o roteiro a seguir:

i) No início da produção, monta-se o molde (geralmente dividido em duas partes) na máquina injetora (nas placas móvel e fixa). Fecha-se o molde com o mecanismo de travamento da máquina (por exemplo, hidráulico ou pneumático), para se ter uma alta pressão de fechamento. Caso seja máquina de câmara fria (que será descrita posteriormente), alimenta-se a máquina com metal líquido, manualmente (figura 1) ou automaticamente. No caso de câmara quente, o metal já está junto com a máquina (no forno).



a)



b)

Figura 1. Procedimento de alimentação da máquina injetora com metal líquido

- Retirada do metal líquido do forno de espera.
- Colocação do metal líquido na bucha de injeção (câmara fria).

ii) Injeta-se o metal fundido para dentro do molde fechado (figura 2), preenchendo-o rapidamente. Aplica-se uma pressão final para alimentar as contrações de solidificação.



Figura 2. Procedimento de injeção do metal líquido (molde fechado)

iii) O metal se solidifica, abre-se o molde, retira-se a peça. Prepara-se a superfície do molde: limpeza e aplicação de desmoldante (figura 3). Fecha-se o molde e se tem o início de um novo ciclo. Estes ciclos são, geralmente, bastante rápidos, na ordem de um minuto.



Figura 3. Procedimento de aplicação de desmoldante

A peça extraída ainda está ligada com o sistema de canais. Retira-se então estes canais e rebarba-se a peça. Dependendo das exigências, são utilizadas etapas posteriores de acabamento.

O processo de fundição sob pressão é caracterizado pelos seguintes aspectos:

- Altas velocidades de injeção (em torno de 20 a 60m/s);
- Grande turbulência do metal líquido (decorrente das altas velocidades de preenchimento do molde);
- Aplicação de elevadas pressões para alimentar as contrações de solidificação;
- Uso de moldes metálicos (que promove uma alta taxa de extração de calor);
- Altas velocidades de resfriamento (e portanto de solidificação);
- Ciclos rápidos de produção;
- Várias peças podem ser produzidas em um único ciclo (dependendo do número de cavidades do molde);
- Os canais de enchimento são usados também como massalotes, para alimentação das contrações de solidificação;
- Vários tipos de ligas podem ser utilizados.

O processo de injeção da fundição sob pressão é constituída de três fases: ^[2]

- a) Primeira fase → aproximação lenta do pistão para se expulsar todo o ar do êmbolo (ou bucha) antes da injeção (enchimento inicial recomendado: deve estar entre 30 e 70% do volume total do êmbolo). A velocidade deste estágio é reduzida para evitar alto nível de turbulência. No final deste estágio, o nível de metal deve chegar até o início do sistema de canais.
- b) Segunda fase → aqui ocorre o preenchimento da cavidade do molde. Este estágio é caracterizado pelas altas velocidades que o metal líquido atinge (devido à velocidade do pistão).
- c) Terceira fase → é uma fase de compactação, onde a pressão exercida sobre o metal é máxima, a fim de se alimentar as contrações de solidificação e o fechamento das bolhas de ar preso. Para se transmitir esta pressão até a cavidade do molde, os canais devem permanecer líquidos, isto é, a solidificação deve ocorrer direcionalmente no sentido dos canais.

1.3) Vantagens e limitações

Todas as características citadas acima provocam uma vasta gama de consequências. Tais consequências exercem influências tanto no estado final da peça, como no processo de produção e nas condições do molde. Assim, se comparado com os outros processos de fundição, pode-se listar um conjunto de vantagens da fundição sob pressão:

- ✓ Alta produtividade: decorrentes das altas velocidades de preenchimento do molde e de solidificação, de ciclos curtos de produção e da possibilidade do molde ter mais de uma cavidade (podendo se injetar mais de uma peça por ciclo);
- ✓ Boa qualidade do acabamento superficial: devido ao uso do molde metálico;
- ✓ Excelente precisão dimensional: as peças injetadas podem apresentar dimensões dentro de tolerâncias muito estreitas, já que se usa o molde metálico;
- ✓ Boas propriedades mecânicas: o molde metálico proporciona altas taxas de extração de calor, exibindo elevadas velocidades de solidificação. Assim, a peça final apresenta microestruturas extremamente finas, com elevadas propriedades mecânicas;

- ✓ Redução de etapas posteriores de rebarbação e limpeza: decorrente do uso do molde metálico, as peças são próximas da forma final ("near-net shape"), reduzindo o custo com tais etapas;
- ✓ Isenção de porosidades devido à solidificação: pois há a aplicação de altas pressões para a alimentação da contração de solidificação;
- ✓ Possibilidade de se injetar peças com geometria complexa e com paredes finas;
- ✓ Alto rendimento metálico: já que os canais de enchimento são utilizados também com a função de massalotes;
- ✓ Reaproveitamento dos canais: é possível se reutilizar os canais de enchimento (fundindo outra vez) com poucas perdas
- ✓ Menor custo para altas produções: deve-se considerar a alta produtividade, o alto rendimento metálico, o reaproveitamento dos canais e o baixo custo com as etapas de rebarbação e limpeza;
- ✓ Longa vida útil dos moldes metálicos;
- ✓ Versatilidade de aplicações: várias ligas de alumínio podem ser utilizadas para se injetar peças para resistir à corrosão, para receber acabamentos orgânicos ou eletroquímicos...

Apesar destas vantagens serem extremamente relevantes, o processo de fundição sob pressão apresenta também algumas limitações:

- Exige um elevado investimento inicial (máquina injetora e ferramental), sendo necessária uma alta produção para se justificar tal custo;
- Peças com massa muito elevada não podem ser injetadas;
- Presença de inclusões de óxidos e bolhas de ar preso no interior da peça são comuns (devido a alta turbulência), prejudicando a sanidade da peça e sua estanqueidade;
- O aprisionamento de bolhas de ar também impede um posterior tratamento térmico e diminuem a ductilidade da peça (limitando sua aplicação);
- Alto desgaste erosivo nos moldes, principalmente nos locais de incidência direta do metal líquido, ocorrendo problemas de trincamento superficial (fadiga térmica) e colamento das peças na matriz;
- Alto custo de modificação do molde.

Existem três fatores fundamentais para se ter sucesso na fabricação de peças metálicas injetadas: operação adequada da máquina; projeto do molde e dos sistemas de canais; seleção da liga. Estes fatores serão apresentados, brevemente, a seguir.

2) Máquinas

A máquina de fundição sob pressão (máquina injetora) tem a função de: fechar as duas metades do molde, mantendo-as fechadas durante o processo de injeção e solidificação; injetar metal líquido para dentro do molde com elevada velocidade e, posteriormente aplicar elevadas pressões para garantir a alimentação das contrações de solidificação da liga; abrir as metades do molde no momento da remoção da peça. As máquinas injetoras também são projetadas para se ter ciclos de produção curtos. Assim, a máquina se torna bastante complexa.

2.1) Componentes das máquinas injetoras

Uma máquina injetora possui, basicamente, os seguintes componentes: ^[1,3]

- Placa móvel: nesta placa está presa uma das partes do molde, o molde ejetor. A placa móvel é ligada a um conjunto hidráulico para fechamento e abertura da mesma (cilindros). Este conjunto é composto por um cilindro de abertura e de fechamento ligados a uma placa traseira, composta de joelhos articulados, e por um cilindro de extração da peça. O cilindro de abertura ou de fechamento é responsável pelos movimentos da placa móvel e, portanto, do molde.
- Conjunto hidráulico de fechamento e extração: é composto por um cilindro de fechamento ligado a uma placa traseira, composta de joelhos articulados, e por um cilindro de extração da peça. Os joelhos articulados (figura 4) servem para o travamento da placa móvel, no momento da injeção (molde fechado), não permitindo a abertura das placas (e dos moldes).
- Placa fixa: nesta placa está presa a outra parte do molde, o molde de recobrimento. Conectado à placa fixa está o sistema de injeção.
- Colunas guia: que servem, como o nome sugere, de guia para o movimento da placa móvel, deixando-a no mesmo nível da placa fixa.
- Sistema de injeção: aqui se encontra uma das diferenças entre as máquinas de câmara fria e quente, sendo assim explicadas posteriormente.

- Forno e cadiño: onde se armazena o metal líquido, mantendo-o na temperatura desejada para a injeção. Este item será melhor descrito posteriormente.
- Estrutura de base: serve de sustentação para todo o conjunto da máquina.
- Acumulador de óleo/gás: tem a função de transferir energia para o movimento cilindro de injeção. Acumula o óleo/gás para liberá-lo no momento da injeção.
- Painel de comando: a partir do qual o operador controla a máquina.



Figura 4. Joelhos de articulação

Devido à pressão de injeção (aplicada pelo êmbolo ao metal fundido) e à força de impacto do êmbolo de pressão (durante a frenagem no momento do preenchimento do molde), é possível se deslocar a placa do molde (principalmente a placa móvel). A força de fechamento é a força necessária para se manter as duas metades do molde juntas (fechadas) no momento da injeção, atuando contra as forças citadas. Como existe uma grande diversidade de tipos de peças (seja por geometria como por massa) e as pressões de injeção são extremamente elevadas, há uma grande variedade de tipos e tamanhos de máquina, dependendo da força de fechamento necessária. Já que as pressões de injeção são muito altas, a força de fechamento se torna uma propriedade fundamental das máquinas injetoras, sendo inclusive as máquinas classificadas por essa força (máquina de 60 toneladas, de 250 toneladas, de 450 toneladas e assim por diante). A força de fechamento pode ser calculada da seguinte forma :^[3]

$$F.F.M. = P.e. \times A.t.m.$$

sendo:

F.F.M. → a força de fechamento da máquina (kgf);

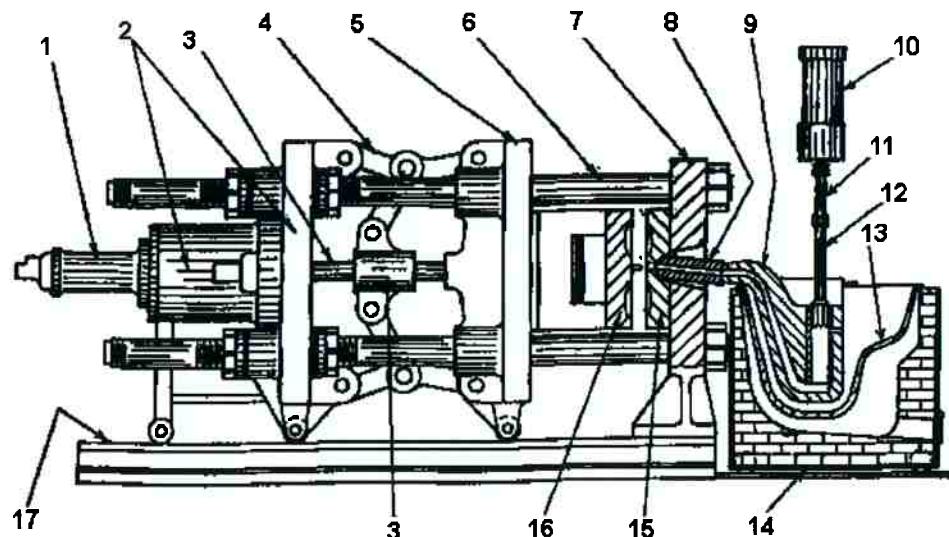
P.e. → pressão específica sobre o metal (kgf/cm^2). P.e. é igual a força de injeção da máquina dividido pelo diâmetro do pistão de injeção;

A.t.m. → área da projeção do conjunto peças + sistemas de canais (cm^2).

A diferença entre as máquinas de fundição sob pressão de câmara quente ou fria está no seu sistema de injeção e nos fornos. A seguir, estão detalhadas estas diferenças.

2.2) Máquinas de câmara quente (figura 5)

Nas máquinas de câmara quente, a maior parte do sistema de injeção (gooseneck) se encontra submerso no metal líquido. Assim, minimiza-se a exposição da liga fundida à oxidação, turbulência. Porém, há problemas de desgaste acentuado no "gooseneck", já que está em contato prolongado com o metal líquido. Para se amenizar tais problemas, utilizam-se ligas de metais com baixo ponto de fusão, por exemplo, ligas de zinco (zamac).



Legenda

- | | |
|--------------------------------------|---------------------------|
| 1- Cilindro hidráulico de fechamento | 10- Cilindro de injeção |
| 2- Placa traseira | 11- Haste de injeção |
| 3- Cilindro hidráulico de extração | 12- Pistão de injeção |
| 4- Joelhos articulados | 13- Cadinho |
| 5- Placa móvel | 14- Forno |
| 6- Colunas-guia | 15- Molde de recobrimento |
| 7- Placa fixa | 16- Molde ejetor |
| 8- Bico de injeção | 17- Estrutura base |
| 9- Gooseneck | |

Figura 5. Desenho esquemático da máquina de câmara quente^[1]

O sistema de injeção nas máquinas de câmara quente (figura 6) é composto por um cilindro de injeção, uma haste, um pistão de injeção e o gooseneck (parte que está submersa no banho de metal líquido, ver figura 5 item 9). No forno (com o cadiño), se armazena o metal líquido na temperatura desejada para a injeção. É sempre conveniente lembrar que o gooseneck está imerso no banho de metal líquido, ou seja, no interior do forno. Ao final do gooseneck, existe um bico de injeção que é responsável pela injeção de metal líquido no interior do molde. No momento da injeção, o acumulador de óleo/gás transfere uma energia ao cilindro de injeção. Este aciona o pistão de injeção (através da haste), transferindo o metal líquido para o gooseneck e, consequentemente, para o bico de injeção. Assim, o molde é preenchido pelo metal líquido. ^[3]

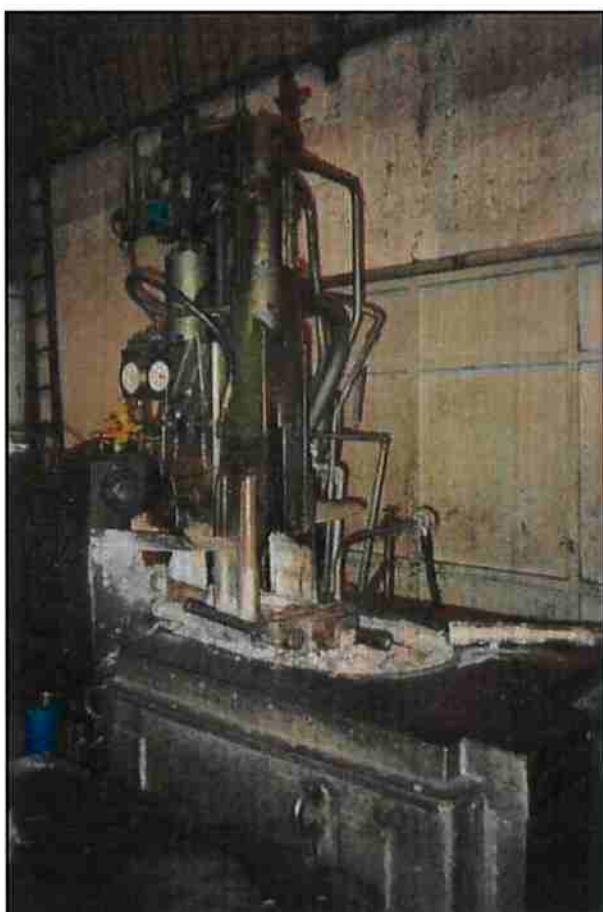
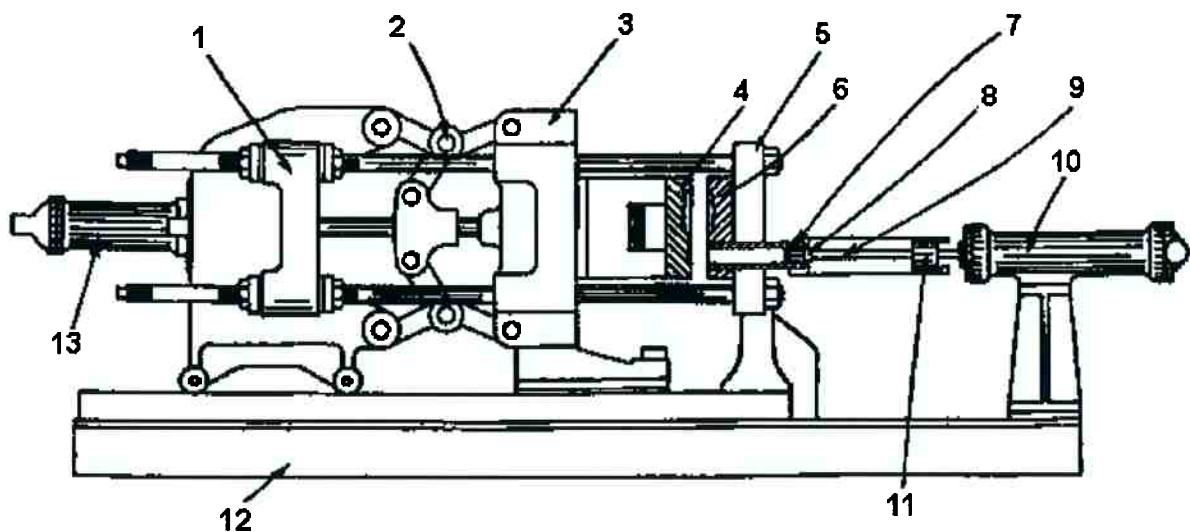


Figura 6. Sistema de injeção de uma máquina de câmara quente

2.3) Máquinas de câmara fria (figura 7)

A máquina de câmara fria foi desenvolvida visando solucionar o problema de desgaste acentuado do sistema de injeção das máquinas de câmara quente, devido à sua imersão do gooseneck no metal líquido. Assim, criou-se um forno de manutenção

(ou forno de espera) independente da máquina. O forno de manutenção (ver figura 8), contendo um cadiño (geralmente feito de carbeto de silício ou de grafita), serve para armazenar o metal líquido na temperatura desejada para a injeção. No momento da injeção, o metal líquido deve ser transportado (ver figura 8), do forno para o sistema de injeção (bucha de injeção – figura 9), por meio de um recipiente (seja manualmente ou automaticamente) com o volume adequado. Este tipo de máquina pode ser utilizado tanto para se injetar peças de zamac (menor ponto de fusão), como também para ligas de maior ponto de fusão (como alumínio, magnésio...). Isso porque, este tipo de fundição é feito com imediata injeção do metal líquido no molde, evitando o desgaste do equipamento. ^[1]



Legenda

- | | |
|--------------------------|---------------------------------------|
| 1- Placa traseira | 8- Pistão de injeção |
| 2- Joelhos articulados | 9- Haste de injeção |
| 3- Placa móvel | 10- Cilindro de injeção |
| 4- Molde ejetor | 11- Cilindro hidráulico de injeção |
| 5- Placa fixa | 12- Estrutura base |
| 6- Molde de recobrimento | 13- Cilindro hidráulico de fechamento |
| 7- Bucha de injeção | |

Figura 7. Desenho esquemático da máquina de câmara fria^[1]

O sistema de injeção das máquinas de câmara fria tem como principal constituinte a bucha de injeção (ver figura 9). Este elemento possui um orifício para se colocar a quantidade necessária de metal líquido para a injeção da peça a ser produzida. A quantidade de material colocada na bucha de injeção deve ser controlado, pois isto influí diretamente na formação de turbulências.

Um dos extremos da bucha de injeção é adaptada ao molde e o outro extremo é conectado à placa fixa do molde. Por este extremo, o pistão de injeção é guiado. O pistão de injeção se movimenta quando o cilindro hidráulico de injeção aplica uma pressão na haste (devido à energia transmitida pelo acumulador de óleo/gás para o cilindro). Com isso, o pistão transporta o metal líquido pela bucha de injeção, conduzindo-o até a outra extremidade da bucha (e assim para o molde). É também através do pistão de injeção que as pressões exercidas, durante as três fases da injeção (descritas no item 1.2), são transmitidas ao metal.



Figura 8. Exemplo de máquina de câmara fria

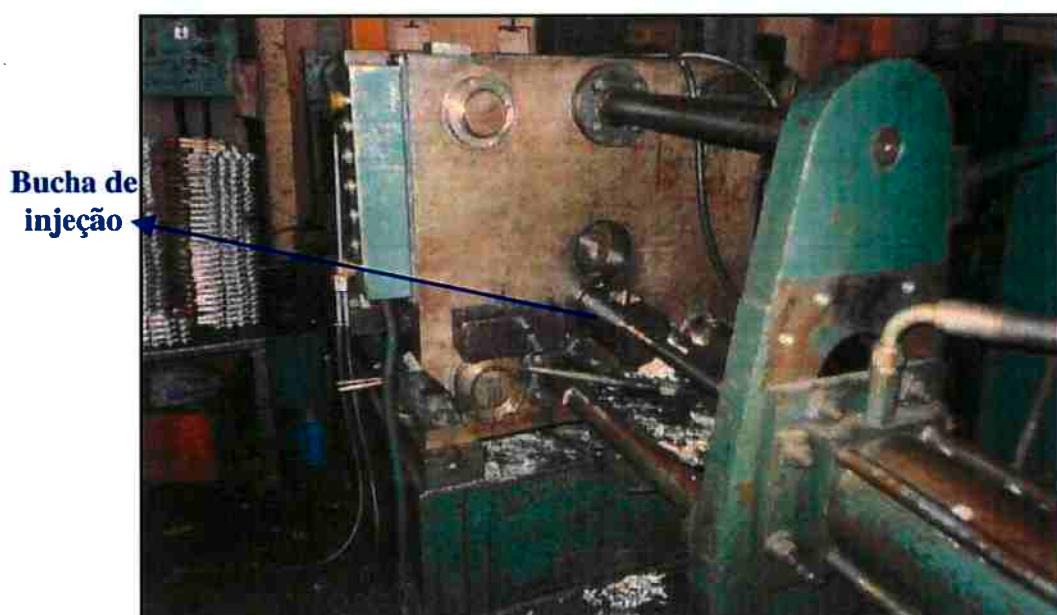


Figura 9. Detalhe da bucha de injeção

3) Moldes

O molde exerce a função de dar forma (geometria) à peça e extrair calor da peça. Na fundição sob pressão, são utilizados moldes metálicos que proporcionam uma excelente estabilidade dimensional e um bom acabamento superficial à peça, além de promover uma alta extração de calor (conferindo boas propriedades mecânicas, devido ao tamanho de grão da microestrutura). Além disso, as peças injetadas são próximas à forma final ("near-net shape").^[4]

Um molde típico (figura 10) consiste, basicamente de duas partes (ou metades) separadas, que contêm uma parte da cavidade: molde de recobrimento ("cover die"), que é montado na placa fixa da máquina injetora; e o molde ejetor ("ejector die"), que é colocado na placa móvel da injetora. A linha que separa as duas partes do molde é chamada de linha de partição. O molde também pode ter apenas uma cavidade, como várias cavidades (réplicas para se produzir a mesma peça), combinação de cavidades (cavidades de peças com formato diferente).^[4]

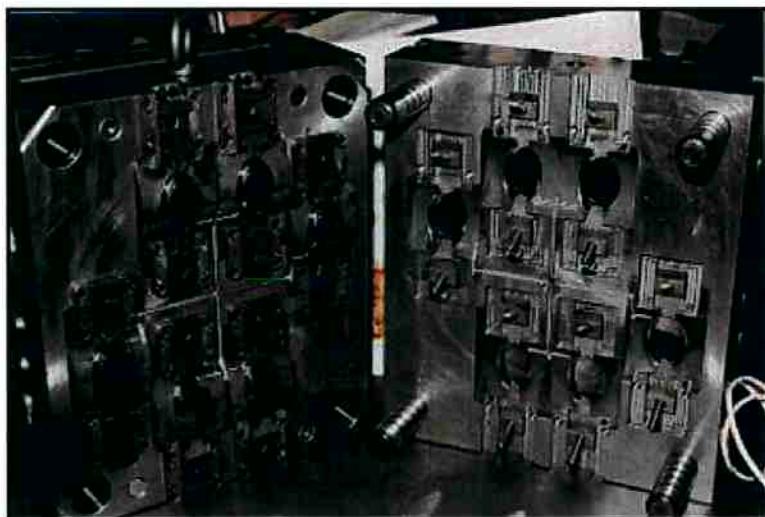


Figura 10. Exemplo de um tipo de molde com duas partes

Portanto, é perceptível que a qualidade da peça final está diretamente relacionada com o molde. Com isso, o projeto do molde (e sua posterior confecção) deve ser feito de forma cuidadosa, devendo se observar as seguintes precauções:

- Tornar o projeto do molde o mais simples possível;
- Construir um molde com resistência suficiente para resistir às elevadas pressões utilizadas durante a injeção;
- Prover melhorias no sistema de canais e de resfriamento;

- Facilitar o acesso às partes que sofrem maior desgaste, para posteriores reparos;
- O molde deve estar fechando corretamente, para se evitar vazamentos de metal líquido durante a injeção;
- O projeto do molde deve minimizar as operações secundárias, ou pelo menos facilitá-las.

Para um melhor desenvolvimento deste texto, este item (molde) será dividido em três partes: material do molde, os componentes do molde (incluindo seus acessórios) e o sistema de canais.

3.1) Material do Molde

Geralmente, os moldes são feitos de aços-ferramenta para trabalho a quente ("hot-work tool steels"), desenvolvido de forma a se ter uma injeção mais eficiente e econômica. Devido às características da fundição sob pressão, os aços utilizados para a confecção dos moldes devem possuir propriedades singulares, a saber: ^[4]

a) Resistência a falhas devido ao calor: Devido aos alternados ciclos de aquecimento e resfriamento, o molde para fundição sob pressão se torna suscetível ao choque térmico. Isto resulta numa trinca fina, cujo aparecimento é mais provável em casos de altos picos de temperatura e rápidos resfriamentos. A nucleação desta trinca ocorre após um certo número de ciclos de injeção, propagando-se rapidamente (fadiga térmica). Alguns fatores exercem influência para a ocorrência desta trinca, como:

- Temperatura de superfície do molde → que depende da temperatura de pré-aquecimento do molde e da temperatura do metal fundido. Se a temperatura da superfície do molde ultrapassar a faixa de 593°C, a probabilidade de surgimento da trinca aumenta;
- Taxa de resfriamento → rápidos resfriamentos da camada superficial do molde geram tensões, que favorecem a nucleação e propagação deste tipo de trinca;
- Microestrutura do aço → a pureza e homogeneidade da microestrutura (relativo à mínima presença de inclusões e de segregações) melhoram a tenacidade e resistência à altas temperaturas do aço. Estas duas propriedades reduzem a tendência de fadiga térmica do molde;

- Dureza → a probabilidade de ocorrência de trincas devido ao calor é diminuída com o aumento da dureza a quente. De modo semelhante, uma maior dureza também ajuda a prevenir este tipo de trinca. Porém, durezas muito superiores a 48HRC não são recomendadas para moldes de injeção de alumínio. O molde deve ser duro o suficiente para resistir à erosão, mas também tenaz de modo a resistir a trincas brutas.

b) Tenacidade dos aços-ferramenta: esta é uma propriedade importantíssima para a vida do molde. É obtida mantendo teores de C entre 0,30-0,40%.

c) Resistência ao amolecimento: para se ter tal propriedade, é necessário se adicionar elementos de liga, como: vanádio, cromo, molibdênio e tungstênio.

d) Boa usinabilidade.

Para se maximizar a vida útil do molde, é recomendável a execução de tratamentos térmicos. Com a escolha correta destes tratamentos, será reduzido o risco de trincar ou distorcer o molde. Alguns tratamentos devem ser feitos, no sentido de se melhorar as propriedades do molde: recozimento, normalização, têmpera, revenimento duplo. Feito isso é possível se fazer um polimento e nitretação.^[5]

Usualmente, para a fabricação de moldes de fundição sob pressão, os aços-ferramenta para trabalhos a quente são os preferidos (tabela 1). O aço H13 é o mais utilizado, inclusive para machos e pinos extratores.

Tabela 1. Composição química dos principais aços-ferramenta*^[4]

Aços	C (%)	Cr (%)	V (%)	Mo (%)	W (%)
H11	0,38	5,25	0,45	1,35	-----
H13	0,39	5,25	1,00	1,40	-----
H19	0,39	4,38	2,00	0,45	4,15

*para a confecção de moldes para fundição sob pressão

3.2) Componentes do Molde

Um molde é constituído, basicamente, pelos seguintes componentes^[3,4] (figura 11):

a) **Cavidade:** é uma reprodução da secção da peça a ser injetada neste molde, tendo a função de dar forma à peça;

- b) Bases do molde: a base superior do molde é responsável pela fixação da parte fixa do molde. Já a base inferior tem a função de fixar a parte móvel do molde;
- c) Pinos extratores: atuam logo após a abertura do molde, extraíndo a peça do molde. Neste momento, a placa extratora é empurrada (por meio de uma cremalheira e um pinhão, por exemplo) e os pinos extratores ejetam a peça (incluindo todo o sistema de canais) para fora da cavidade. Tais pinos devem ser dimensionados de modo a não quebrarem ou distorcerem a peça no momento da extração. No momento de fechamento do molde, estes pinos retornam à posição de origem (através da retração da placa extratora), iniciando um novo ciclo de fundição. Geralmente, os pinos extratores devem ser posicionados para agirem sobre regiões com resistência suficiente para receber tais pressões sem sofrer distorções. A pressão aplicada pelos pinos extratores causa marcas na peça. Deste modo, os pinos extratores devem ser posicionados em regiões que não são aparentes ou que não atrapalham o funcionamento da peça. Posicionando estes pinos nas bolsas de ar ou nos canais, não haverá nenhuma marca de extração na peça final (já que o sistema de canais e as bolsas serão retirados na etapa de rebarbação). Um dos pinos, chamado de extrator do canal de retenção, é posicionado para se aplicar pressão no canal de alimentação (ou de retenção) da peça;
- d) Placa extratora: nela estão posicionadas os pinos extratores (mais precisamente no porta-extratores), tendo a função de acioná-los e retraí-los (com auxílio de um pino de retorno), no momento de abertura e fechamento do molde;
- e) Coluna e bucha de guia: têm a função de guiar e centralizar as partes fixa e móvel do molde;
- f) Anel de centragem: centraliza o molde na máquina;
- g) Bico de injeção: é o responsável pela condução do metal líquido até a cavidade;
- h) Placas das cavidades: superior, onde se encontram as cavidades do molde fixo; e inferior, onde se encontram as cavidades do molde móvel;
- i) Bucha para o canal de retenção: serve para segurar todo o sistema de canais, junto com a peça, na parte móvel do molde;
- j) Pino "stop": é utilizado para se apoiar o conjunto extrator, diminuindo a área de apoio.

l) Machos: têm a função de reproduzir formas internas (cilíndricas, retangulares, etc.) nas peças injetadas. Utilizando esse acessório, é possível se ter uma economia de metal, diminuição de custos e produção de peças próximas da forma final (sem necessidade de operações secundárias). Os machos podem ser: fixos (usados quando o eixo do furo a ser feito é perpendicular à linha de partição) ou móveis (usados quando o eixo do furo é paralelo à linha de partição ou possui um ângulo qualquer). Machos móveis são sempre retirados da peça antes desta ser extraída do molde. Existem pinos para empurrar os machos antes da ejeção da peça e para mantê-los na posição correta durante o preenchimento do molde.

m) Saídas e bolsas de ar: tais saídas servem para o escape do ar da cavidade (prioritariamente da entrada do material). É extremamente perigoso qualquer escape de metal líquido por estas saídas de ar. Não existindo tais saídas, o ar pode se aprisionar na peça injetada, prejudicando a sanidade interna (bolhas de ar preso) e externa (falhas de preenchimento). Além disso, também é comum se fazer bolsas de ar, pequenas cavidades posicionadas ao redor da cavidade da peça para se ter mais áreas de escape de ar. Tais bolsas serão preenchidas por metal líquido, devendo estar localizadas na última região de preenchimento. As bolsas de ar servem também como pontos de aquecimentos de regiões frias do molde e como regiões para a ação dos pinos extratores.

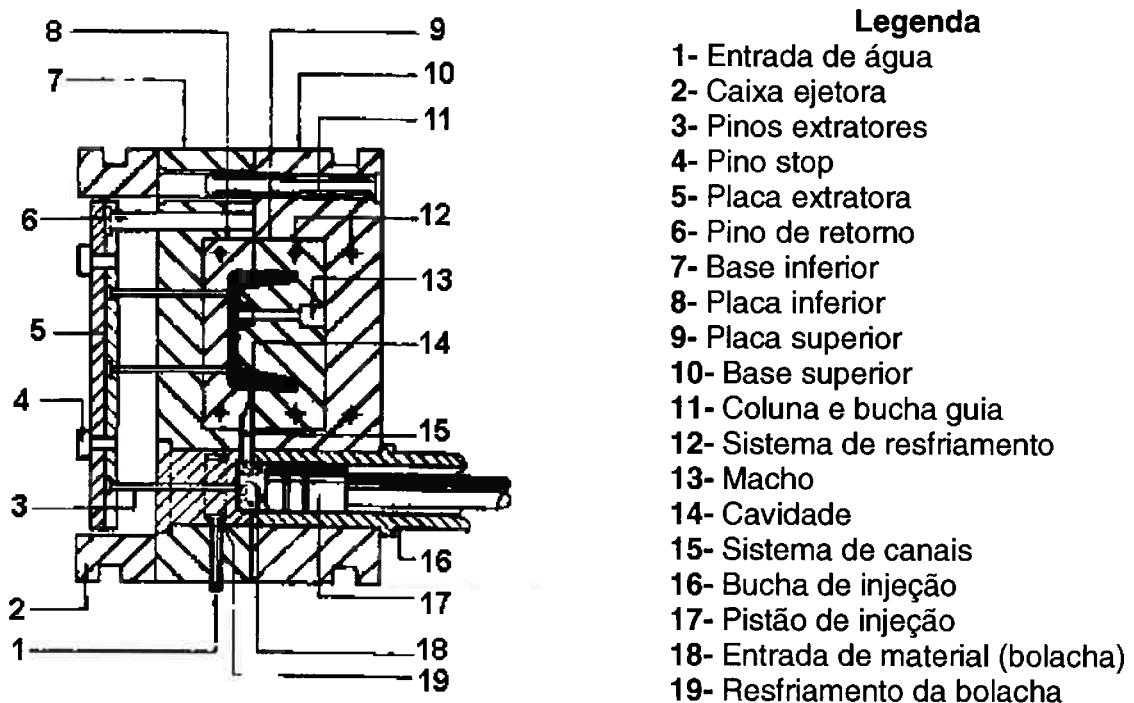


Figura 11. Desenho esquemático do molde (para máquina de câmara fria) ^[4]

Uma das características mais importante é a configuração do sistema de canais. Este projeto dos canais exerce uma influência direta na qualidade final da peça, na produtividade e no rendimento metálico. Por ser um item de grande importância, este será visto separadamente, a seguir.

3.2.1) Refrigeração do Molde

Devido às inúmeras injeções, o metal líquido transmite calor ao molde em grandes quantidades. Como o molde possui secções diferentes, algumas secções podem reter mais calor que outras, por exemplo secções mais espessas ou no ponto de entrada do material (onde as temperaturas são maiores). As diferenças de geometria no molde também acarreta a possibilidade de se ter amplas diferenças nos tempos de resfriamento da peça, podendo causar tensões (e até mesmo trincas) na mesma. Assim, a temperatura deve ser controlada através de uma refrigeração com água, óleo ou ar comprimido. O sistema de refrigeração é feito por tubos que carregam o meio de refrigeração por todo o molde ou apenas pelas áreas críticas do molde (sendo fundamental o correto posicionamento destes tubos no molde). Devido à refrigeração, a resistência à fadiga do aço (molde) se torna muito importante. Também é necessário se evitar a penetração da água no interior do molde. ^[5]

Às vezes, é necessário substituir a água de resfriamento por óleo quente, para oferecer uma taxa de calor ao molde. Tal calor pode ser necessário para regiões que sofram perdas excessivas de calor durante o preenchimento do molde por metal líquido, para regiões distantes da entrada de material ou para se pré-aquecer o molde antes de começar a produção. Existe também um sistema diferenciado de resfriamento na região da entrada do material (bolacha).

3.3) Sistema de Canais

O sistema de canais (figura 12) pode ser dividido, basicamente, em: bolacha (ou região de alimentação – “sprues”), canais de enchimento (primários e secundários – “runners”), canais de ataque (ou de entrada – “gating”) e a cavidade (uma ou várias). Outras partes, também importantes, são utilizadas dependendo da apicação, como as bolsas e saídas de ar.

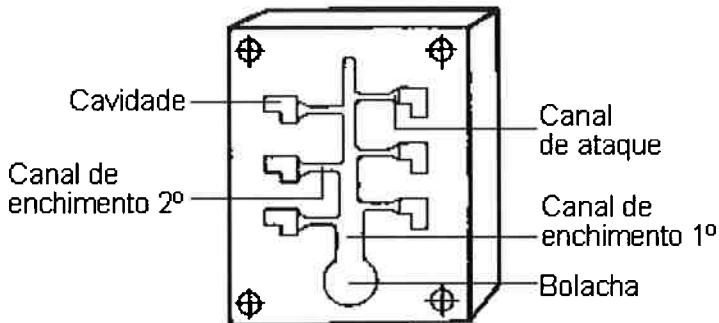


Figura 12. Partes do sistema de canais^[4]

A bolacha tem a função de fazer uma transição suave do metal líquido após a injeção até os canais de enchimento, devendo ser a última região a se solidificar. Geralmente é o local onde a pressão do metal líquido sobre o molde é maior. Já os canais de enchimento servem para transportar, de forma suave, o metal líquido para o canal de entrada. Dimensionando corretamente os canais de enchimento, pode-se diminuir a perda de calor, turbulência excessiva e a erosão do molde. Quando há mudanças na direção do fluxo do metal líquido, estas não devem ser bruscas (evitando ao máximo a utilização de ângulos retos, preferindo o uso de curvas para tais mudanças de direção) ^[6]. Geralmente, os canais de enchimento têm uma secção trapezoidal, para minimizar a perda de calor^[2,3]. O canal de ataque (ou de entrada) é o local por onde será preenchida a cavidade. Portanto, sua função é preencher a cavidade, evitando a criação de ondas (turbulência) ou aprisionamento de ar. Sempre que possível, o canal de entrada deve ser mais fino que o canal de enchimento, para facilitar a extração da peça na etapa de rebarbação. Também é preciso direcionar o fluxo de metal líquido de modo a não incidir diretamente nos machos, para não ocorrer problemas de colamento (adesão do metal com o molde ou macho).

Por fim, bolsas de ar podem ser necessárias. Como dito anteriormente, tais bolsas têm a função de área de escape do ar, pontos de aquecimentos de regiões frias do molde e como regiões para a ação dos pinos extratores. É conveniente se lembrar que tais bolsas serão extraídas na etapa de rebarbação.

3.3.1) Projeto do sistema de canais

O projeto do sistema de canais (ou projeto de fundição) é um fator importantíssimo na qualidade final da peça. Isso porque influí diretamente em todo o

fluxo do metal líquido: na injeção do metal, saída de ar e na alimentação das contrações de solidificação. A injeção do metal líquido é feita com altas velocidades (curtos tempos de preenchimento do molde), ocorrendo turbulência e geração de ondas. No momento da injeção, o metal líquido preenche o molde, ocupando o espaço que era preenchido pelo ar. A saída deste ar deve ocorrer para não prejudicar a sanidade interna da peça (preenchimento incompleto da cavidade pelo metal líquido e a presença de bolhas de ar aprisionado). Com a solidificação da peça, ocorre espontaneamente a contração de solidificação, que é indesejada pois gera defeitos (rechupes). O aumento final da pressão do pistão, terceira fase da injeção, tem a função de alimentar estas contrações. Na fundição sob pressão, o próprio sistema de canais age como massalotes. Por todas estas razões, deve-se ter um cuidado especial no momento do projeto do sistema de canais.

Tal projeto deve ser elaborado considerando um conjunto enorme de variáveis, como: a geometria da peça; qualidade superficial e interna; propriedades mecânicas, temperatura do molde e do metal, desgaste do molde, material do molde, saídas de ar, fluidez do metal. Caso seja feito um projeto de canais inadequado, podem ocorrer os seguintes problemas de fundição: inclusão de óxidos, bolhas de ar, rechupes, colamento (serão discutidos posteriormente). O projeto de canais deve favorecer um rápido preenchimento da cavidade (pequenos óxidos) e dar preferência ao preenchimento em uma única frente (evitando o aprisionamento de bolhas de ar).^[2]

Quando ocorrem os encontros de frentes de metal, ocorrerá inevitavelmente a formação de inclusões de óxidos e o aprisionamento de bolhas de ar. Tais defeitos diminuem a ductilidade da peça e impedem a utilização de tratamento térmicos posteriores. Após a definição do sentido de enchimento da peça, pode-se projetar bolsas de ar, que têm como função facilitar a saída de ar da cavidade, nas últimas regiões a serem preenchidas.

Só que na fundição sob pressão, os canais também servem como massalotes, visando suprir as contrações de solidificação da peça. Por isso, os canais devem ser os últimos a se solidificar.

Quando o projeto de canais visa facilitar apenas a etapa de rebarbação, através de canais de ataque finos, ocorre uma rápida solidificação destes ataques. Assim, impede-se a ação da pressão para a alimentação da contração de solidificação nas áreas mais grossas. Portanto, formarão rechupes nas regiões mais grossas, que podem se apresentar como microporosidades concentradas (ou semelhantes a trincas na estrutura).

a) Projeto de canais visando o preenchimento

Nesta parte, serão vistos alguns tipos de cálculos usados geralmente para se fazer o projeto de canais. Porém, estes cálculos visam apenas o preenchimento da cavidade do molde. Apesar das altas pressões aplicadas, os defeitos mais comuns são os rechupes (seja na forma de microrechupes ou de "trincas" concentradas nas regiões mais grossas). Para estes cálculos, o principal parâmetro usado é a menor espessura da peça, garantindo-se o preenchimento da cavidade, mas não garantindo a alimentação das contrações de solidificação da peça na terceira fase da injeção.

- Cálculo do canal de ataque (ou canal de corte) ^[2]

São utilizados dados experimentais que relacionam o tempo de enchimento das peças com a espessura. A relação é a seguinte:

$$T = 0,04 \times (E - 1) \pm 0,02$$

Onde: T = tempo de enchimento da peça
 E = espessura média da peça (mm), entre 1,5 e 6,4mm.

Com isso, é possível se calcular o fluxo de metal necessário a preenchimento e, depois, determina-se a área do canal de ataque.

$$Q = \frac{V}{T} = \frac{P}{\rho \times T}$$

Onde: Q = fluxo em todos os pontos do sistema de canais
 V = volume total (peça + canais + bolsas)
 T = tempo de enchimento da peça
 P = peso do conjunto (peça + canais + bolsas)
 ρ = densidade do alumínio líquido (2,5 g/cm³)

$$Q = A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2$$

Onde: Q = fluxo em todos os pontos do sistema de canais
 v = velocidade do fluxo
 A = área da secção transversal

$$E_{ataque} = \frac{2}{3} \times E_{peça}$$

Onde: E_{ataque} = espessura do canal de ataque
 $E_{peça}$ = espessura média da peça

- Cálculo do canal secundário e primário ^[2]

Geralmente, utilizam-se canais secundário e primário com secção trapezoidal, com a altura sendo igual à largura menor. A largura maior é 35% maior que a largura menor. A largura menor (L) é calculada pelas seguintes fórmulas:

$$L_s = 1,5 \times \left(\frac{N \times A_{ataque}}{1,1619} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Onde: L_s = largura menor do canal secundário
 N = número de ataques
 A_{ataque} = área do canal de ataque

$$L_p = \left(\frac{N \times A_{secundário}}{1,1619} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Onde: L_p = largura menor do canal primário
 N = número de canais
 $A_{secundário}$ = área do canal secundário

b) Projeto de canais visando o preenchimento e a alimentação das contrações de solidificação

O projeto de canais não deve só visar o preenchimento, mas também a alimentação das contrações de solidificação. Isso serve para garantir a isenção de defeitos de rechupes ou microporosidades, devido à solidificação dos canais antes da solidificação das peças. Tal tipo de solidificação impede a ação da pressão sobre a peça durante o terceiro estágio de injeção. Assim, a solidificação deve ser direcional, os canais devem solidificar depois das peças (funcionando como massalotes).

Utilizando o conceito da fundição por gravidade, o cálculo do tempo de solidificação é feito através do módulo de resfriamento: ^[2]

$$M = \frac{V}{A} \text{, ou simplificada, } M = \frac{A_{canal}}{P_{canal}}$$

Onde: M = módulo de resfriamento
 V = volume da região a ser alimentada
 A = área de resfriamento da região a ser alimentada
 P_{canal} = perímetro do canal
 A_{canal} = área do canal

Para se ter a solidificação direcional mencionada, a seqüência dos módulos de resfriamento deve ser a seguinte: ^[2]

$$M_{\text{canal primário}} > M_{\text{canal secundário}} > M_{\text{canal de ataque}} > M_{\text{peça}}$$

Com este tipo de cálculo, os canais de ataque terão suas dimensões aumentadas consideravelmente e isto é prejudicial às etapas de rebarbação e extração do canal. Para solucionar este tipo de problema, pode-se utilizar o conceito do entalhe. Com a criação de um entalhe, originam-se pontos quentes nos canais de ataque, na região junto à peça, reduzindo a secção de corte sem afetar o módulo de resfriamento. Porém, a máxima redução deve ser de aproximadamente 50% da área inicialmente projetada e a espessura da redução não pode ultrapassar 20% da espessura do canal original.

Existe uma relação fixa, sugerida por alguns autores, entre a espessura do canal de ataque (E_{ataque}) e a espessura da peça ($E_{\text{peça}}$): ^[2]

$$E_{\text{ataque}} = \frac{2}{3} E_{\text{peça}}$$

Porém, usando esta relação, deve-se observar dois aspectos para a alimentação adequada da peça: os ataques devem ser feitos nas regiões de maior espessura da peça e o projeto de estrangulamento do canal deve seguir os passos vistos anteriormente.

c) Recursos adicionais para permitir a alimentação de massas isoladas

Deve ser bastante cautelosa a alimentação de regiões de maior massa que ficam em regiões isoladas, ou seja, em regiões inacessíveis pelos canais. Tais regiões são chamadas de bossas. Para que esta alimentação seja feita adequadamente, é preciso utilizar alguns recursos adicionais, como:

- Resfriamento: deve ser preferencial das regiões de maior massa e direcionar tal resfriamento (o canal deve ser o último a solidificar);
- Aquecimento: no caso de peças onde as bossas são separadas por regiões de espessura fina, deve se aquecer a ferramenta nestas regiões mais finas, retardando sua solidificação. Pode-se obter tal aquecimento reduzindo a

- espessura da ferramenta, preenchendo a parte vazia com um isolante térmico;
- Recalques internos ou externos: adiciona-se pinos extras, separados do sistema hidráulico principal. Tal pino poderia agir diretamente na região da peça.

3.3.2) Funções do Sistema de Canais em Fundição sob Pressão

Resumindo o que foi mencionado, o projeto de canais na fundição sob pressão deve privilegiar principalmente três funções:

- i) Preencher rapidamente toda a cavidade. Para isso, utiliza-se a redução nas secções dos canais de ataque (que também facilita a quebra dos canais);
- ii) Impedir o encontro de frentes de metal na cavidade, que podem aprisionar bolhas de ar, privilegiando o preenchimento por frente única. Favorecer a saída do ar através do uso de bolsas de ar.
- iii) Possuir uma solidificação direcionada: os canais devem ser os últimos a se solidificarem, para alimentar as contrações de solidificação das peças, durante a terceira fase da injeção.

4) Ligas

A escolha de uma liga adequada também é um importante fator para a qualidade final de uma peça injetada. A escolha dessa liga depende das exigências da peça, máquina a ser utilizada e entre outros fatores. Conforme dito anteriormente, as máquinas de fundição sob pressão de câmara quente só injetam ligas com baixo ponto de fusão (como ligas de zinco – zamac e ligas de magnésio). Já para as máquinas de câmara fria, é possível se injetar ligas de maior ponto de fusão (como as ligas de alumínio). O enfoque deste trabalho está em peças feitas de ligas de alumínio (em máquinas de câmara fria), portanto será dada total prioridade. Os aspectos de outras ligas, que são usualmente injetadas, não serão mencionados neste texto.

4.1) Ligas de alumínio

As ligas mais utilizadas para a fundição sob pressão são as ligas de alumínio. O crescimento do uso desta liga é motivado principalmente pela constante procura de

peças com elevadas propriedades mecânicas e baixo peso. As principais características destas ligas são: excelente fluidez, elevada resistência à formação de trincas a quente, elevada estanqueidade às peças fundidas.

Porém, as ligas de alumínio para fundição sob pressão apresentam algumas propriedades físicas e químicas que devem merecer algumas observações:

- O alumínio fundido combina-se facilmente com o oxigênio, formando óxidos que podem se incorporar ao banho;
- A facilidade de absorção de hidrogênio pelo metal líquido, podendo formar microporosidades após a solidificação;
- O ataque do alumínio líquido no molde metálico (de aço ou ferro fundido), provocando o efeito do colamento (aderência da peça ao molde) e o desgaste intenso da ferramenta.

4.1.1) Composição química e propriedades mecânicas

As principais ligas de alumínio utilizadas para fundição sob pressão são as ligas de alumínio – silício (Al-Si). As mais utilizadas são as ligas SAE 306 (A380.0) e SAE 305 (A413.0). As ligas Al – Si apresentam um eutético para 11,7% de Si a 577°C (ver figura 13). Estas ligas também apresentam o cobre em quantidades consideráveis, além dos teores de ferro (que será explicado posteriormente).

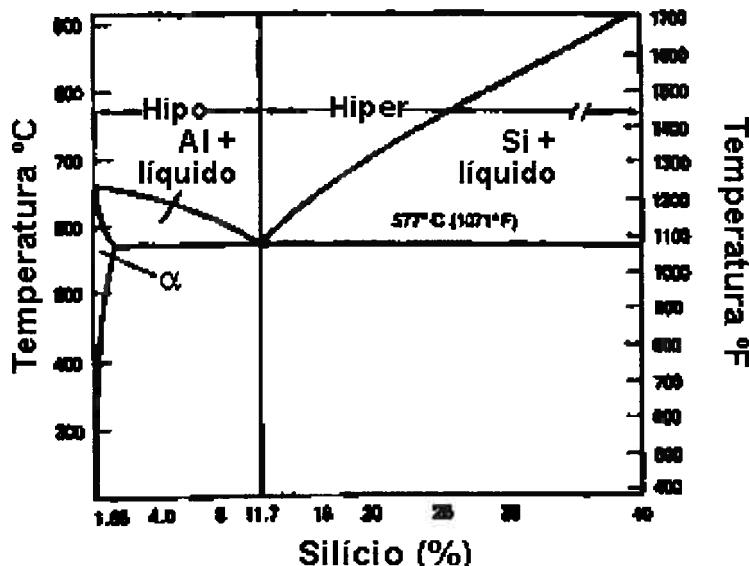


Figura 13. Diagrama de fases Al-Si ^[4]

Tabela 2. Composição química das principais ligas de alumínio – silício*

ELEMENTO QUÍMICO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS LIGAS	
	SAE 305	SAE 306
Silício (%)	11,00-13,00	7,50 – 9,50
Ferro (%)	Max. 1,30	Max. 1,30
Cobre (%)	Max. 1,00	3,00 – 4,00
Manganês (%)	Max. 0,35	Max. 0,50
Magnésio (%)	Max. 0,10	Max. 0,10
Níquel (%)	Max. 0,50	Max. 0,50
Zinco (%)	Max. 0,50	Max. 3,00
Estanho (%)	Max. 0,15	Max. 0,35

* dados retirados de "SAE HANDBOOK, 1981"^[1]

Tabela 3. Principais propriedades das ligas de alumínio – silício*

PROPRIEDADES	LIGAS	
	SAE 305	SAE 306
Densidade (g/cm³)	2,66	2,76
Resist. à ruptura (MPa)	290	324
Limite de escoamento (MPa)	131	159
Alongamento (%)	3,5	3,5
Módulo de Elasticidade (GPa)	#####	71
Resist. à fadiga (MPa)	130	138
Usinabilidade (%)	30	50
Módulo de Cisalhamento (GPa)	#####	26,5
Resist. ao Cisalhamento (MPa)	170	185

* dados retirados de "SAE HANDBOOK, 1981"^[1]

a) Liga SAE 306 (A380.0)

Esta liga hipoeutética é a mais utilizada para fundição sob pressão. Isso se deve ao fato de possuir algumas características importantes, como: ^[2]

- Elevada fluidez e resistência à trinca a quente;
- Boa usinabilidade;
- Razoável soldabilidade (brasagem não é empregada);
- Razoável resistência à corrosão (ao meio atmosférico);
- Possibilidade de se fazer acabamentos superficiais, tais como anodização e acabamentos mecânicos.

Utilizam-se elevados níveis de Cu para se obter uma extensão do intervalo de solidificação (para maior capacidade de compactação).

b) Liga SAE 305 (A413.0)

Esta liga hipereutética é bastante utilizada na fabricação de peças injetadas, com maiores massas. Suas principais características são: ^[2]

- Excelentes fluidez e resistência à trinca a quente;
- Boa usinabilidade (porém, é necessário o uso de ferramentas de carbeto de tungstênio);
- Razoável soldabilidade (brasagem não é recomendada);
- Boa resistência à corrosão (ao meio atmosférico);
- Possibilidade de se fazer acabamentos mecânicos, porém a anodização apresenta resultados ruins.

4.1.2) Efeito dos elementos de liga

Os principais elementos de liga são: o silício, o cobre e o manganês. O silício é o principal elemento de liga, tendo os efeitos de aumentar a fluidez, a resistência à trinca a quente e a resistência mecânica da liga. Outra vantagem é que diminui a contração decorrente da solidificação.

Já o cobre aumenta a dureza e a resistência mecânica da liga. Também eleva as propriedades mecânicas em temperaturas elevadas. Porém, a adição de cobre diminui a resistência à corrosão da liga e a ductilidade.

Com a adição de manganês, são amenizados os efeitos negativos do ferro (ver abaixo). Porém, exige um maior controle sobre a temperatura do metal no forno de espera (mínimo de 600°C), para não ocorrer a formação de cristais duros. ^[3,5]

4.1.3) Impurezas

Os elementos zinco, níquel e estanho são as principais impurezas nas ligas Al-Si. O zinco, apesar de melhorar a fluidez da liga, diminui a resistência à trinca a quente. A presença de níquel reduz a resistência à corrosão da liga, apesar de melhorar a resistência mecânica e a dureza. O estanho diminui a resistência à corrosão da liga. A altas temperaturas, o estanho ainda reduz a resistência à trinca a quente. ^[3]

4.1.4) Efeito da presença do ferro

A presença de ferro em ligas de alumínio é bastante prejudicial às propriedades mecânicas. Isso porque o ferro promove a formação de fases frágeis, reduzindo a ductilidade e a resistência ao impacto destas ligas.

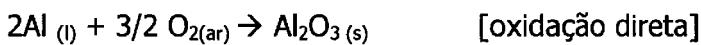
Porém, na fundição sob pressão, o alumínio líquido tem contato direto com o molde (sem a utilização de pinturas), o que causa um alto desgaste da matriz metálica (concentrado na região dos canais e juntos aos canais de ataque). Com a presença de ferro, o efeito de colamento (aderência) da peça ao molde e o ataque (erosão) provocado pelo alumínio líquido são minimizados. Assim, é necessário se usar um nível de ferro entre 0,80% a 1,20%, dependendo da temperatura de injeção, para reduzir os problemas citados. É conveniente lembrar que quanto maior a temperatura de vazamento, maior será o desgaste do molde.

Ultrapassando o limite máximo de ferro, ocorre a formação (já no forno de espera ou na bucha de injeção) de fases intermetálicas ricas em ferro: Al_5FeSi (com morfologia em plaquetas com efeito deletério sobre a ductilidade) e $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$ (com efeitos menores sobre a ductilidade) ^[2]. Estas fases possuem uma elevada dureza, aumentando o desgaste das ferramentas de usinagem.

4.1.5) Formação das inclusões de óxidos

A elevada energia livre para a formação de óxido de alumínio a partir do alumínio puro torna estas ligas muito instáveis. A incorporação destes óxidos nas peças é comum, devido à alta turbulência gerada nas etapas de carregamento dos fornos e nas altas velocidades do metal durante o enchimento do molde em fundição sob pressão.

O metal líquido forma uma camada de óxido instável que é facilmente removida da superfície por qualquer movimentação, resultando em novas oxidações. As principais reações de oxidação do alumínio líquido são as seguintes^[2]:



Normalmente, as reações citadas ocorrem devido ao contato do metal líquido com o ar atmosférico (desde os fornos de fusão). Assim, os filmes de óxidos ficam presos à superfície pela elevada tensão superficial do alumínio líquido. Com qualquer

agitação ou turbulência, comuns na fundição sob pressão, as camadas de óxidos da superfície se quebram, incorporando ao banho. Devido às densidades do Al_2O_3 ($3,97\text{g/cm}^3$) e do espinélio Al_2MgO_4 ($3,6\text{g/cm}^3$) serem maiores que do alumínio líquido ($2,7\text{g/cm}^3$), acontece uma lenta a decantação destes óxidos para o fundo dos fornos de espera. As inclusões de óxidos podem ser classificadas como:^[2]

- a) Filmes de alumina amorfa (ou óxidos "novos") → formados superficialmente, devido ao imediato contato do banho de alumínio líquido com o oxigênio. Possuem uma estrutura cristalina instável, formam filmes e se associam com bolhas de ar.
- b) Filmes de alumina gama (óxidos "velhos") → são formados a partir da cristalização da alumina amorfa, possuindo maior espessura. Estes filmes são extremamente críticos no aspecto de falta de estanqueidade.
- c) Alumina alfa (ou pontos duros) → formada a partir da transformação da alumina gama, devido a sua longa exposição a altas temperaturas. A alumina alfa possui elevada dureza (córidum), e se for incorporado às peças, estas apresentarão pontos duros. Tais pontos duros podem ocasionar quebras nas ferramentas de usinagem.

Qualquer quebra na camada superficial de óxidos, devido à manipulação do banho de alumínio, ocasionará a incorporação de óxidos no banho e a formação de novos superficialmente. Assim, etapas de limpeza da superfície do banho, tratamentos do banho e transferências entre panelas e fornos gerarão um alto grau de incorporação de filmes no banho de alumínio líquido. As operações que causam maior turbulência e, portanto, são mais críticas para esta incorporação são: transferências de fornos de fusão para panelas, de panelas para fornos de espera e os vazamentos nos moldes.

Além da turbulência nestas etapas, também há turbulência nos canais de ataque durante o enchimento do molde. Deste modo, também se formarão óxidos e se aprisionarão bolhas de ar. Este fato confere uma baixa ductilidade nas peças fundidas sobre pressão.

4.1.6) Velocidade crítica de fluxo e turbulência

Para não ocorrer a incorporação de inclusões de óxidos no banho, calculou-se que a velocidade de fluxo do alumínio líquido deve ser de 0,5 m/s. Tal velocidade é

atingida para alturas superiores a 1,25cm.^[2] Ou seja, qualquer transferência por gravidade (ver figura 14) que seja feita, promoverá a inclusão de óxidos no banho (já que tal altura é muito pequena em termos industriais). As soluções previstas para estes casos seriam a construção de calhas levemente inclinadas ou um tratamento de limpeza dos banhos posterior às etapas de transferência.

Como são usadas altas velocidades de vazamento (em torno de 40m/s), é inevitável a geração de turbulência durante o processo de injeção das peças (ver figura 15). Com isso, irá ocorrer a formação de óxidos e possibilidades de encontros de frentes de metal com formação e retenção de bolhas de ar.

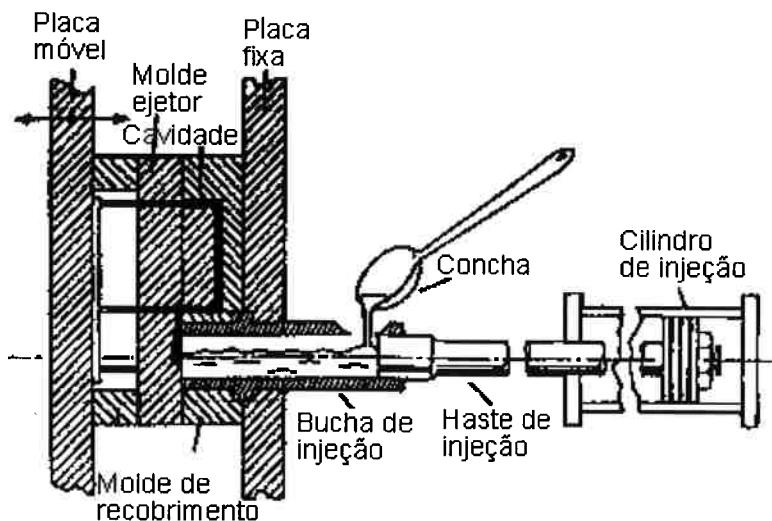


Figura 14. Turbulência na transferência do metal líquido por gravidade^[4]

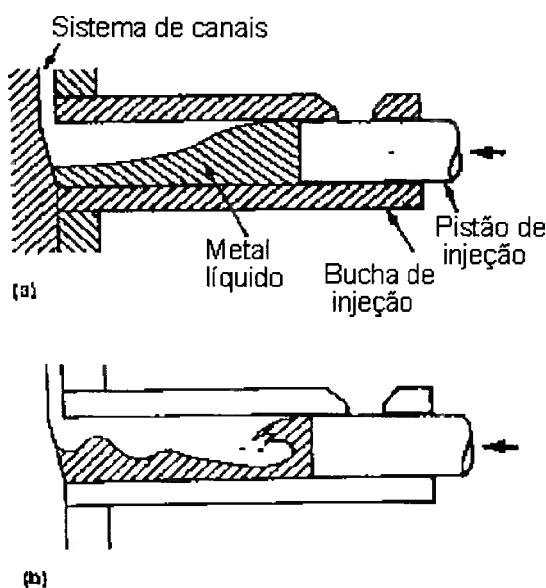


Figura 15. Turbulência no metal líquido pelo movimento do pistão de injeção^[2]

- a) Sem turbulência (correto)
- b) Com turbulência (errado)

4.1.7) Tratamentos do metal líquido

O tratamento do alumínio líquido em fundição sob pressão mais importante é a limpeza das inclusões de óxidos. Garantindo a alimentação do forno de espera com um metal limpo de inclusões, é possível se atingir uma melhor qualidade final das peças. Os tipos de limpeza de banhos seriam:^[2]

- a) Decantação: possível após longos tempos de repouso. As desvantagens deste processo são: o tempo de processamento, baixo rendimento e possibilidade de se gerar alumina alfa.
- b) Flotação: tal operação deve ser feita diretamente no forno de espera. Esse tratamento pode ser feito com o auxílio de um rotor desgaseificador. Este tipo de rotor produz uma nuvem de pequenas bolhas de gás neutro que varre todo o banho, arrastando as inclusões em suspensão no banho para a superfície (sem a criação de correntes de convecção). Assim, as inclusões podem ser escorificadas.
- c) Filtragem: deve ser feita no momento de transferência do metal líquido da panela para os fornos de espera. Neste método, as inclusões aderem às paredes dos filtros por efeito da tensão superficial.

O processo de flotação, com rotor desgaseificador, serve também para se eliminar o hidrogênio do banho de metal líquido. A presença de hidrogênio no banho pode ser responsável pela formação de porosidades na peça solidificada.

Tratamentos como refino de grão de ligas hipereutéticas com a adição de titânio (ou titânio + boro), modificação do eutético com adições de sódio ou estrôncio não são utilizados em ligas fundidas sob pressão.

No caso de ligas Al-Si hipereutéticas, utiliza-se o refino dos cristais primários de silício. Tal tratamento é feito pela adição de fósforo, que forma partículas de fosfeto de alumínio AlP, sendo núcleos para as células eutéticas.^[2]

5) Etapas complementares

Após a remoção da peça já solidificada do molde, é necessário se preparar o molde para um novo ciclo. Essa preparação é feita utilizando ar comprimido, para eliminar eventuais resíduos da superfície do molde.

Em seguida, é preciso se aplicar lubrificantes (substâncias que reduzem o atrito entre duas superfícies de contato), aplicação geralmente feita por "spray". Este lubrificante, quando aplicado corretamente, forma um filme fino entre o molde e o metal líquido. Geralmente os lubrificantes são à base de água. O lubrificante tem a função de facilitar a extração da peça, prevenir o desgaste, ser um agente de resfriamento da superfície interna do molde, inibir o efeito de soldagem da peça ao molde e proteger a superfície do molde contra a erosão. Além das cavidades do molde, as partes móveis (machos, pinos extratores, pistão de injeção...) também devem ser lubrificadas.

Existem lubrificantes apropriados para cada tipo de material. É conveniente destacar que a aplicação destes irá solucionar todos os problemas. Irregularidades e equívocos no sistema de canais, parâmetros de injeção e temperatura da liga devem ser corrigidos de outra maneira. Além disso, o uso inadequado destes lubrificantes é um grande potencial de defeitos na peça. Feita esta preparação do molde, já é possível se iniciar um novo ciclo.

A peça produzida deve sofrer algumas etapas de rebarbação e usinagem. Isso porque, a peça é extraída do molde com o sistema de canais acoplado, sendo necessário retirá-lo. Por isso, o sistema de canais deve ser elaborado no sentido de facilitar também as etapas de rebarbação. Etapas posteriores de usinagem podem ser necessárias, no sentido de se fazer roscas, detalhes e furos (que não podem ser feitos pelos machos).

6) Principais defeitos

O potencial de surgimento de defeitos na fundição sob pressão é bastante elevado. Os principais motivos são: as altas velocidades de preenchimento do molde, a produção de peças de geometria complexa (com secções muito finas), altas taxas de transferência de calor, entre outros.

As causas primárias para a ocorrência de defeitos na fundição sob pressão são: o fluxo de calor e o fluxo de metal líquido.^[6] Uma má interação desses dois fatores pode provocar a produção de peças com baixa qualidade. O projeto do molde (incluindo sistema de canais, saídas e bolsas de ar, sistema de refrigeração...) é um dos grandes responsáveis por esta interação. Assim, quando há o aparecimento de defeitos, é conveniente se analisar todas as variáveis do molde, inclusive a sua temperatura. Outros fatores de extrema importância para a produção de peças

injetadas com alta qualidade são: as variáveis da liga utilizada (composição química, temperatura, limpeza...) e da máquina (pressão de injeção, fechamento do molde, velocidade de injeção...).

O principal enfoque deste trabalho são os defeitos ocorridos na fundição sob pressão de ligas de alumínio. Os principais motivos para a rejeição das peças injetadas são os defeitos visuais e/ou metalúrgicos, tais como: rechups, inclusões de óxidos, bolhas de ar preso, soldagem. Os problemas dimensionais (existência de dimensões fora da tolerância) são menos freqüentes, na fundição sob pressão, que os defeitos visuais e/ou metalúrgicos.

6.1) *Rechups*

Geralmente devido a falhas no projeto de canais, ocorre quando a solidificação não é direcional para os canais ou quando as dimensões dos canais são menores que o necessário. Isto pode provocar a solidificação prematura dos canais, impedindo a ação da pressão para alimentação das contrações de solidificação da peça.

Este tipo de defeito se caracteriza por ser semelhante a uma trinca na estrutura ou a um aglomerado de microporosidades. Freqüentemente, tais defeitos ocorrem nas regiões mais grossas da peça. Podem aparecer associadas a bolhas de ar preso. Em peças injetadas, a falta de estanqueidade está relacionada com defeitos de rechups, que podem permitir a ligação entre a superfície interna e externa da peça.

Causas Geradoras:

- Trechos superaquecidos do molde (resfriamento inadequado do molde);
- Pressão de injeção insuficiente (principalmente a do terceiro estágio);
- Design mal feito do sistema de canais;
- Quantidade de material insuficiente.

6.2) *Inclusões de óxidos (tipo pontos duros)*

Como visto anteriormente (no item “formação das inclusões de óxidos”), o contato do alumínio líquido com o ar acarreta, inicialmente, na formação de filmes de alumina amorfa. Em seguida, acontece a cristalização da alumina amorfa em alumina gama (que é facilmente incorporada ao banho devido à sua densidade). Se o banho permanecer em repouso, como nos fornos de espera, a alumina gama pode formar o círindum (alumina alfa), de alta dureza.

Com a turbulência, característica intrínseca da fundição sob pressão, a incorporação destes óxidos é mais favorecida. Assim, se estes óxidos incorporarem à peça, serão formados os pontos duros (que resulta em quebras das ferramentas de usinagem).

Causas Geradoras:

- Práticas inadequadas na limpeza do forno e do metal líquido;
- Excesso de turbulência.

6.3) Bolhas de ar preso

Como a turbulência é bastante comum nos processos de fundição sob pressão (principalmente durante o preenchimento da cavidade do molde), a presença de bolhas de ar preso nas peças injetadas é muito freqüente.

A formação destas bolhas pode ter as seguintes origens:

- Encontro de frentes de metal durante o preenchimento da cavidade.
- Aprisionamento de ar nas bossas, já que o fluxo de metal (em alta velocidade) penetra nestas bossas, "contornando-as";
- Mudanças de direção do fluxo de metal líquido;
- Lubrificação excessiva;
- Temperatura alta do metal líquido;
- Turbulência devido à transferência do metal líquido e à injeção.

6.4) Soldagem (ou colamento)

A soldagem, ou colamento, é a aderência do metal na superfície do molde. O alumínio fundido apresenta uma enorme afinidade com o ferro fundido ou o aço (materiais comumente utilizados na construção dos moldes). Para se diminuir esta afinidade, é comum se adicionar teores elevados de ferro nas ligas de alumínio.

Além do colamento, é muito comum acontecer a erosão do molde. Este desgaste excessivo é provocado pela incidência do metal líquido a altas temperaturas e velocidades, principalmente na região da bolacha, primeiro local de incidência do metal líquido no molde após deixar a bucha de injeção.

Causas Geradoras:

- Trechos superaquecidos do molde (resfriamento inadequado do molde);
- Baixo teor de ferro na liga;
- Velocidade da segunda fase muito alta;

- Design mal feito do sistema de canais (desde a entrada de material);
- Mau polimento da superfície do molde;
- Variações na lubrificação do molde.

6.5) Possíveis soluções

Para os principais defeitos citados acima é possível se alterar algumas variáveis para se eliminar ou amenizar as suas causas (tabela 4). Porém, é necessário bastante cuidado no momento de se modificar o processo, pois uma alteração pode solucionar um defeito mas gerar outros.

Tabela 4. Ações sugeridas para eliminar ou amenizar os principais defeitos. [2,3,4,6,8,9]

Defeitos	Ações Sugeridas
Rechupes	<ul style="list-style-type: none"> - Revisar o sistema de refrigeração do molde (com a solidificação sendo direcional); - Aumentar a pressão de injeção; - Verificar problemas de pressão (pressão do multiplicador, problemas no pistão...); - Revisar o sistema de alimentação das regiões mais espessas da peça (se necessário, aumentar as secções dos canais); - Aumentar a espessura da bolacha.
Inclusões de óxidos	<ul style="list-style-type: none"> - Tratamento de limpeza do metal líquido - Tratamento de limpeza dos banhos posterior às etapas de transferência do metal líquido - Diminuir as turbulências no momento da transferência do metal líquido.
Bolhas de ar preso	<ul style="list-style-type: none"> - Privilegiar o preenchimento da cavidade em uma única frente de metal. Caso não seja possível, deve-se usar bolsas de ar nas regiões de encontro; - Direcionar o fluxo de metal para áreas onde não haja bossas; - Minimizar (ou tornar menos bruscas) as mudanças de direção do fluxo de metal; - Verificar a lubrificação; - Controlar a temperatura do metal líquido; - Diminuir a velocidade de injeção.
Soldagem (ou colamento)	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzir as temperaturas nas zonas de soldagem (ajustando o sistema de resfriamento do molde); - Verificar a composição da liga, se necessário, aumentar o teor de ferro; - Diminuir a velocidade de injeção, aumentando o tempo de ciclo; - Verificar a entrada de material no sistema de canais; - Verificar o polimento da superfície do molde; - Aumentar a lubrificação nas zonas de colamento.

III) Parte Prática

7) Materiais e Métodos

Para satisfazer os objetivos propostos (descritos no início do texto) para este trabalho, juntamente com a pesquisa bibliográfica, seguiu-se um roteiro de atividades:

- Seleção e estudo das peças, cujos defeitos serão analisados;
- Estatística dos defeitos ocorridos nas peças selecionadas;
- Análise dos defeitos;
- Estudo do sistema de canais das referidas peças;
- Sugestões de alterações dos sistemas de canais.

7.1) Seleção e estudo das peças

Para iniciar o roteiro de atividades acima proposto, foi necessário selecionar quais peças seriam os alvos do estudo deste trabalho. As peças escolhidas foram:

a) *Modelo "α"* (figura16) → Esta foi a primeira a ser escolhida devido ao seu alto índice de refugo, à sua importância comercial, sendo uma indicação da empresa produtora desta peça, como candidata. O índice de refugo desta peça estava em torno de 6,10% (situação até maio de 2001), só por defeitos de fundição. Isto, somado ao fato de que tal peça possuir um mercado de mais de 100.000 peças por mês, torna bastante importante a redução dos defeitos de fundição. Esta peça é utilizada em fogões (linha branca, eletrodomésticos), tendo a função de prender a mangueira de gás ao fogão, assim o gás passa internamente por esta peça para entrar no fogão.

Esta peça é fundida sob pressão, a partir da liga alumínio-silício SAE-306 (7,50 a 9,50% de Si). Esta peça é fundida em máquinas de câmara fria, com as etapas de fabricação semelhantes às citadas na parte teórica. As máquinas que produzem esta peça possuem força de fechamento de 250ton, sendo as ligas injetadas com uma temperatura entre 680 a 720°C.

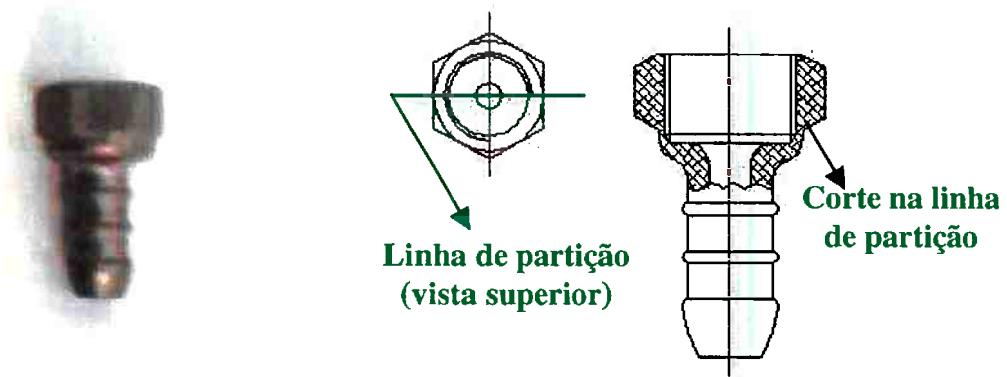


Figura 16. Modelo “ α ”: a) Foto da peça (vista frontal); b) Croqui da peça (vistas superior e frontal com corte na linha de partição)

O molde para a produção desta peça possui 8 cavidades, ou seja, são produzidas 8 peças por ciclo. Assim, logo que esta peça foi selecionada, foi separada uma amostra do canal (figura 17) para já se poder analisar como são preenchidas as cavidades pelo metal líquido. Mais detalhes do molde e do sistema de canais será descrito posteriormente.

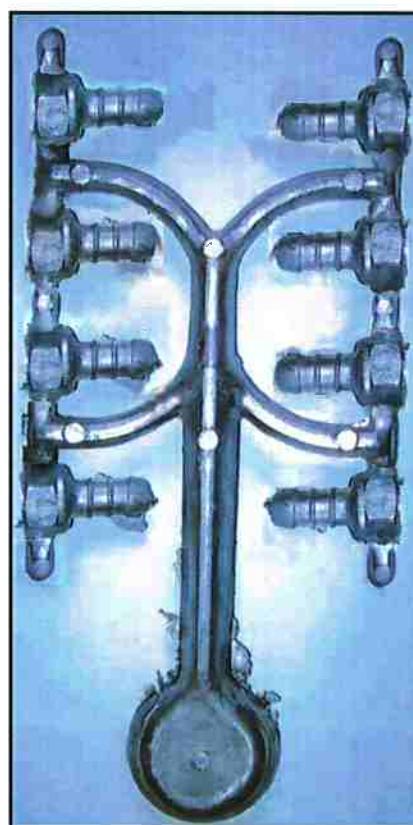


Figura 17. Amostra do canal de 8 cavidades da modelo “ α ”

b) *Modelo "β"* (figura 18) → esta peça foi escolhida devido ao seu alto índice de refugo e por ser um modelo novo (iniciou a produção em março de 2001), sendo necessário um maior estudo desta peça. Até julho de 2001, o índice de refugo desta peça estava em torno de 9,40% (do total produzido), só por defeitos de fundição. Um índice de ocorrência de defeitos desta magnitude não pode ser aceito, principalmente se for considerada a simplicidade desta peça. Esta peça também é utilizada na área de eletrodomésticos, mais especificamente em fogões, servindo de um condutor do gás do interior do fogão para o queimador ("boca" do fogão). Neste caso, assim como o modelo "α", o gás passa internamente à peça.

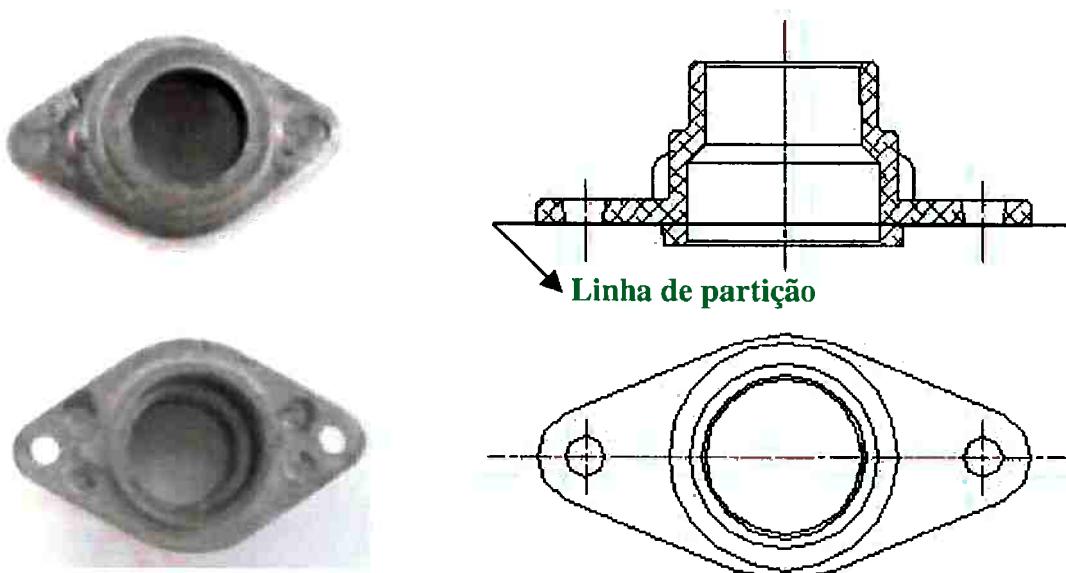


Figura 18. Modelo "β": a) Foto da peça (vistas superior e inferior); b) Desenho da peça (vistas frontal com corte e inferior)

O modelo "β" é injetado, a partir da liga alumínio-silício SAE-306 (7,50 a 9,50% de Si), semelhante ao modelo "α". Esta peça, também é fundida em máquinas de câmara fria. As máquinas que produzem esta peça possuem força de fechamento de 250ton, sendo as ligas injetadas com uma temperatura na faixa de 660 a 720°C.

O projeto de canais para a fundição do modelo "β" possui 12 cavidades, ou seja, injetando 12 peças por ciclo de produção. Adotando o mesmo procedimento feito para a primeira peça, foi selecionada uma amostra do canal (figura 19). Esta amostra do sistema de canais servirá de padrão para se fazer o estudo inicial para a compreensão do modo de preenchimento das cavidades pelo metal líquido. Mais detalhes deste molde e do sistema de canais será descrito posteriormente.

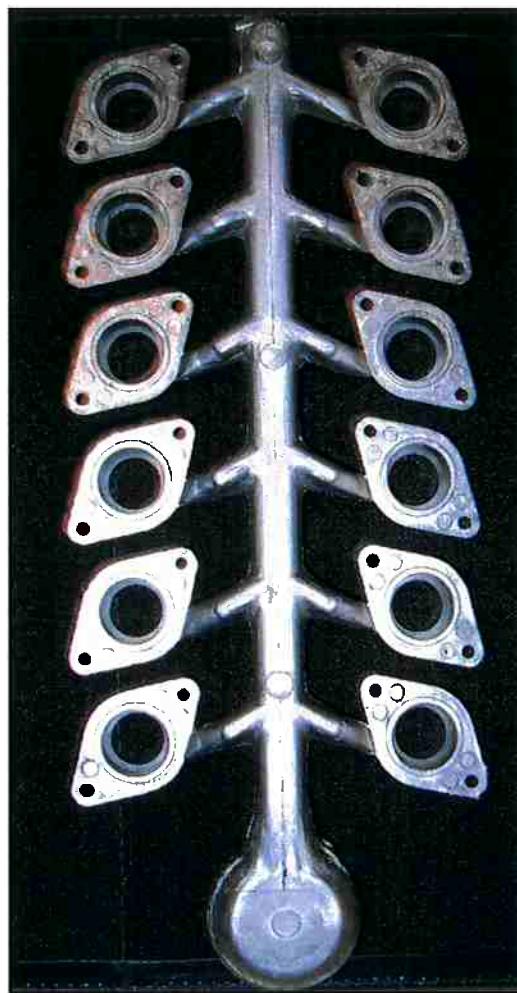


Figura 19. Amostra do canal de 12 cavidades da modelo “ β ”

7.2) Estatística dos defeitos

Após a escolha das peças a serem estudadas e o levantamento do índice de refugo de ambas, iniciou-se um trabalho de estatística com relação à ocorrência de defeitos nas peças. Ou seja, coletou-se uma amostragem de peças com defeitos de fundição (em diversos lotes e diferentes períodos), e contabilizou-se os defeitos por cavidade. Nesta etapa, observava-se o aspecto visual do defeito e se separava por cavidades (região do sistema de canais) e por local geométrico na peça.

Com esse estudo estatístico, foi possível analisar se o defeito é generalizado ou localizado (num número restrito de cavidades). Assim, é possível se detectar quais cavidades apresentam uma maior incidência de defeitos (já que as cavidades são identificadas).

Além das cavidades de maior incidência, também se analisou em quais regiões da peça o índice do defeito é mais crítico. Com isso, também é possível se analisar se o defeito está relacionado à posição ou ângulos do canal de entrada.

7.3) Análise dos defeitos

Esta fase consiste, basicamente, das seguintes etapas: observação macroscópica dos defeitos, observação microscópica dos defeitos, definição do defeito. A primeira etapa ocorreu juntamente com o procedimento de estudo estatístico dos defeitos. Foi possível distinguir que todos os defeitos de fundição das peças coletadas possuíam aspectos semelhantes (tanto na peça “ β ” como no “ α ”). Portanto, a análise estatística feita no item “b”, diz respeito ao mesmo tipo de defeito. Porém, é necessário se caracterizar o aspecto do defeito, para então se descobrir o tipo de defeito (conforme descrito na parte teórica).

Para se avaliar exatamente o tipo de defeito que está ocorrendo (e assim, a sua causa direta), foram selecionadas algumas peças com defeitos mais evidentes. Analisou-se o aspecto dos defeitos com o auxílio de uma lupa. Em seguida, foram separadas duas peças de cada modelo, das cavidades mais críticas (de acordo com o estudo estatístico).

As peças foram embutidas em baquelite, e em seguida lixadas e polidas. Foi observado o aspecto do defeito (com uma vista superior, a ser explicada posteriormente) com o auxílio de uma lupa e do microscópio óptico. Foram obtidas algumas fotos dos defeitos, no sentido de se estudar o mecanismo de formação dos mesmos.

Com a análise da forma dos defeitos, é possível classificá-los quanto ao seu tipo. Sabendo-se o tipo de defeito é possível se definir quais as principais causas geradoras.

7.4) Estudo do sistema de canais

Na etapa anterior, foi detectado o tipo de defeito mais freqüente, a região de maior ocorrência e as suas possíveis causas geradoras. A partir disso, é necessário se verificar quais são os pontos falhos do sistema de canais (pontos que podem ser responsáveis pelos defeitos). Para tanto, foram estudados os canais adquiridos

inicialmente (ou seja, os canais “modelos”, totalmente perfeitos). Analisou-se todas as características do projeto do sistema de canais.

Em seguida, foram injetados alguns canais destas peças com quantidades menores de metal líquido de modo a se obter conjuntos incompletos de canais + peças. Com esse procedimento é possível se analisar como o metal líquido está preenchendo o sistema de canais e as cavidades dos moldes. Neste processo, um ponto crítico e importante é se preservar a integridade destes canais injetados com menos material, conservando grande parte das rebarbas e locais de “pior” preenchimento.

Além disso, uma das ações tomadas foi a verificação dos valores dos canais de ataque dos sistemas de canais de ambas as peças. Para cada modelo, houve um propósito diferente para tal medição, que será explicado adiante.

7.5) Sugestões de alterações dos sistemas de canais

Com o estudo feito dos sistemas de canais, incluindo a análise dos pontos falhos, a próxima fase é se sugerir alterações que possam resolver ou minimizar a ocorrência dos defeitos. As sugestões de modificação do sistema de canais devem ser feitas visando as causas geradoras dos defeitos.

Apesar de não constar nos objetivos propostos por este trabalho, seria interessante a execução destas alterações nos moldes, analisando se ocorreria um decréscimo no índice de refugo das peças estudadas. Infelizmente, conforme previsto no plano de trabalho, a alteração dos moldes e a posterior avaliação dos resultados finais (ou seja, se as soluções propostas surtiram efeito) não foram feitas. Isso porque tais modificações dependem das condições de produção da peça e prioridades da empresa, sendo temerário incluir este ponto no plano de trabalho.

A partir deste ponto do trabalho, cada peça será tratada separadamente. Isso porque, até esta parte, os procedimentos para a análise dos defeitos das peças são similares para os dois modelos. Porém, os resultados são diferentes e, assim, as discussões dos mesmos serão distintas. Portanto, para se manter uma seqüência mais lógica com um encadeamento do raciocínio, optou-se por mostrar os resultados obtidos (estatística e análise dos defeitos) e suas discussões (análise e sugestões de alterações dos canais), de forma personalizada para cada modelo. Primeiramente, para o Modelo “ α ”. Concluído todo o estudo para esta peça, será feito o mesmo para o Modelo “ β ”.

Modelo “ α ”

8) Resultados Obtidos

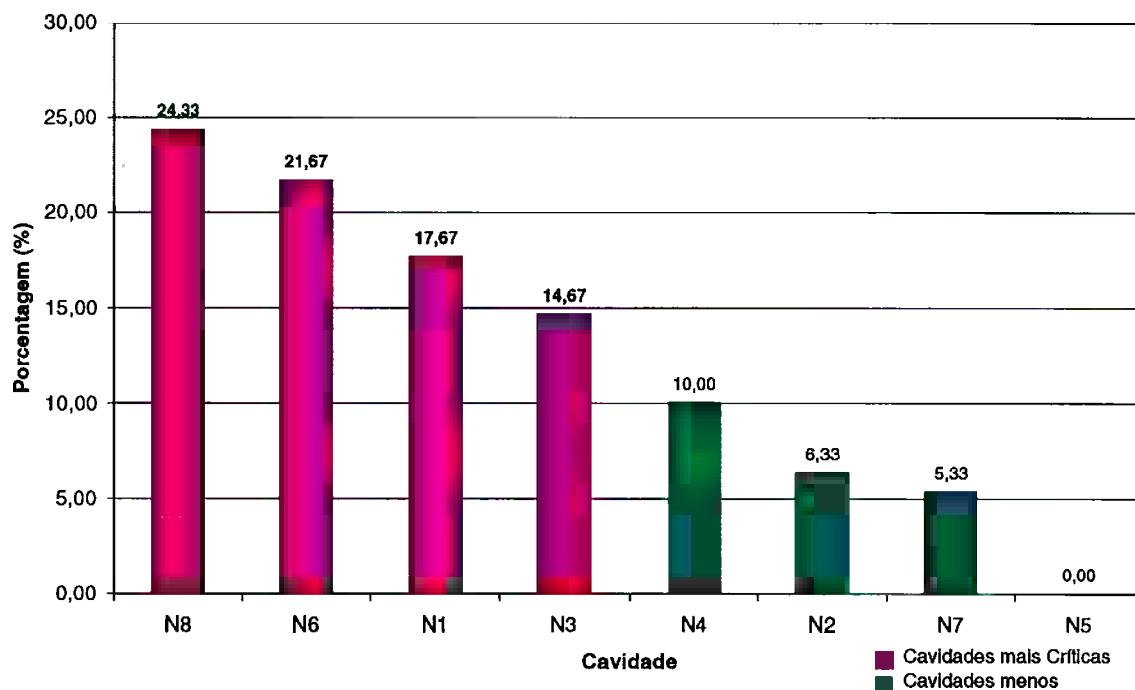
8.1) Estatística dos defeitos

Para o modelo “ α ”, conforme descrito em Materiais e Métodos, fez-se uma estatística dos defeitos de acordo com a cavidade. A população total foi de 300 peças defeituosas, escolhidas ao acaso e em meio de vários lotes diferentes (de diversos dias de produção) e se obteve os dados constados na tabela 5.

Tabela 5. Dados da ocorrência de defeitos de acordo com a posição da cavidade

Cavidade	Parte móvel	Parte fixa	Total	Porcentagem
N1	31	22	53	17,67%
N2	17	2	19	6,33%
N3	33	11	44	14,67%
N4	27	3	30	10,00%
N5	0	0	0	0,00%
N6	38	27	65	21,67%
N7	5	11	16	5,33%
N8	37	36	73	24,33%
TOTAL	188	112	300	100,00%

Gráfico 1 - Ocorrência dos Defeitos por Cavidade - Modelo “ α ”



8.2) Análise dos defeitos

Os defeitos de fundição ocorridos possuíam o aspecto visual mostrado na figura 20. Para uma maior precisão e melhor análise, serrou-se transversalmente a peça do modelo “ α ”, aproximadamente na região da linha preta mostrada na figura 20. Então, embutiu-se a peça em baquelite. Lixou-se duas amostras embutidas, até se chegar na região do defeito. Feito isso, poliu-se as peças e foi observado o aspecto dos defeitos (no sentido A-A), primeiramente, numa lupa de menor aumento e depois num microscópio óptico. A observação no microscópio óptico não foi de grande valia já que os aumentos são grandes para os tipos de defeitos encontrados nas peças. Tirou-se fotos nos aumentos menores para se analisar a forma do defeito (figuras 21 e 22).

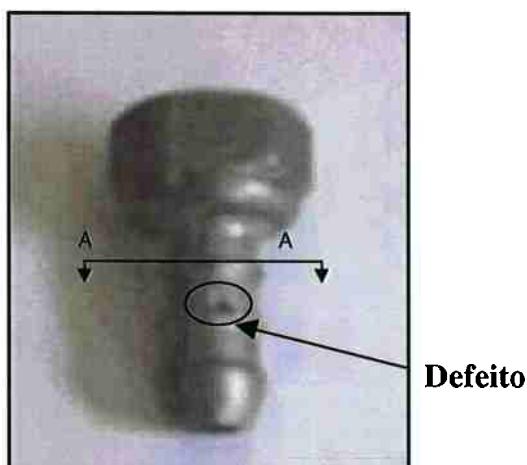


Figura 20. Aspecto visual do defeito (modelo “ α ”)

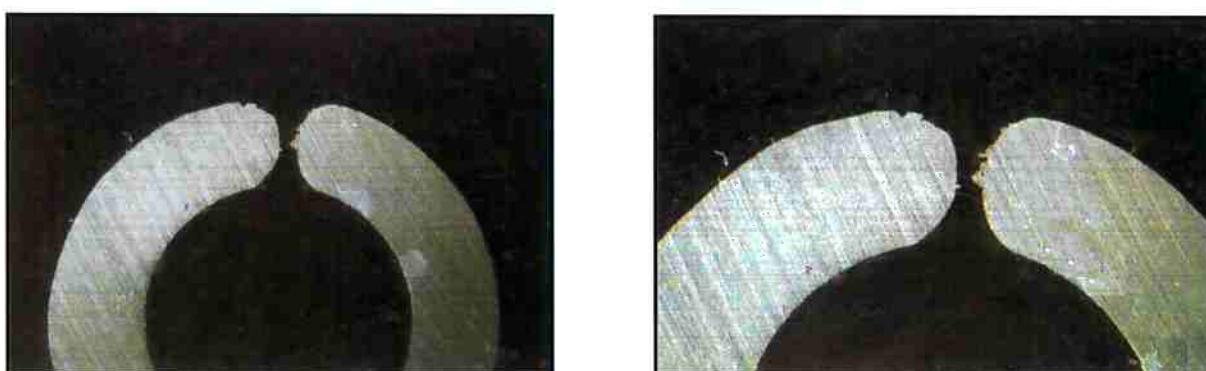


Figura 21. Análise dos defeitos (“ α ” cavidade N8), com auxílio de uma lupa
a) Vista do defeito do modelo “ α ” (aumento:10x)
b) Vista do defeito do modelo “ α ” (aumento:16x)

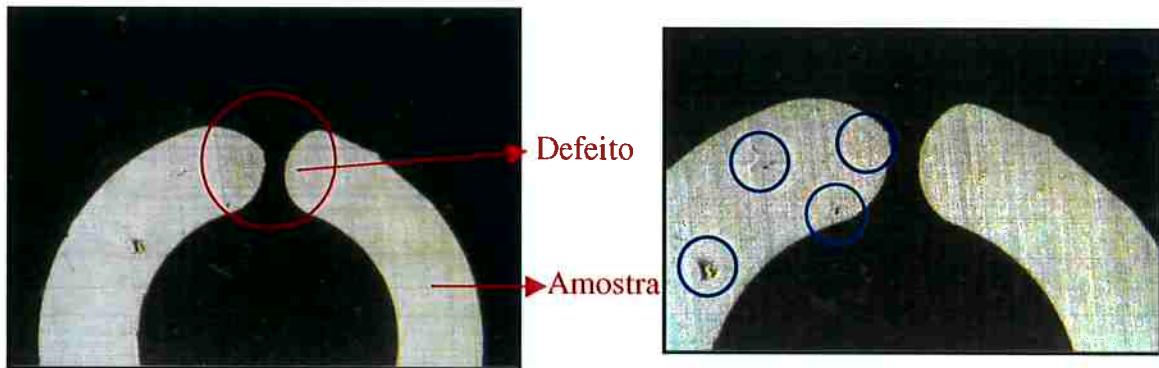


Figura 22. Análise dos defeitos (" α " cavidade N6), com auxílio de uma lupa

- a) Vista do defeito do modelo " α " (aumento:10)
- b) Vista do defeito do modelo " α " (aumento:16x)

8.3) Estudo do sistema de canais

A partir da foto do sistema de canais (figura 17) e do estudo estatístico feito anteriormente, é conveniente se analisar a ocorrência dos defeitos de acordo com a região do molde. Para tanto, tem-se o croqui abaixo representando o sistema de canais. Alguns elementos estão em destaque, como: bolacha ou entrada de material (A); canal de enchimento ou alimentação primário (B); canal de enchimento ou alimentação secundário (C); canal de ataque ou de entrada (D); peça ou cavidade (E); bolsas de ar (F); saídas de ar (G); posição dos pinos extractores (H).

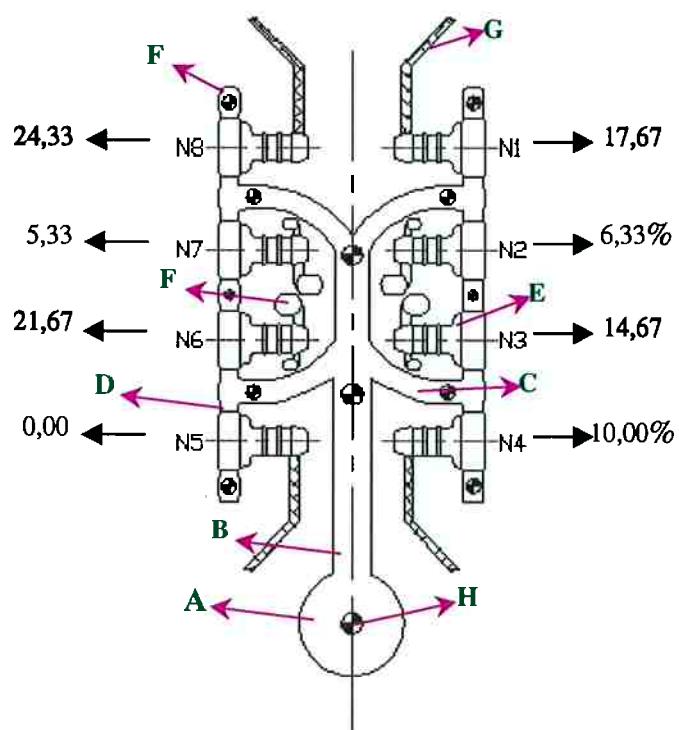


Figura 23. Croqui do Sistema de Canais, com os resultados do estudo estatístico e elementos principais (modelo " α ")

Após a análise do projeto do sistema de canais, foram injetados alguns canais com menores quantidades de material (do que o necessário para se preencher completamente o molde). Assim, é possível se observar o comportamento das frentes de metal líquido, durante o preenchimento do molde (já que o molde não vai ser preenchido por completo). As figuras abaixo mostram os resultados deste tipo de experimento:

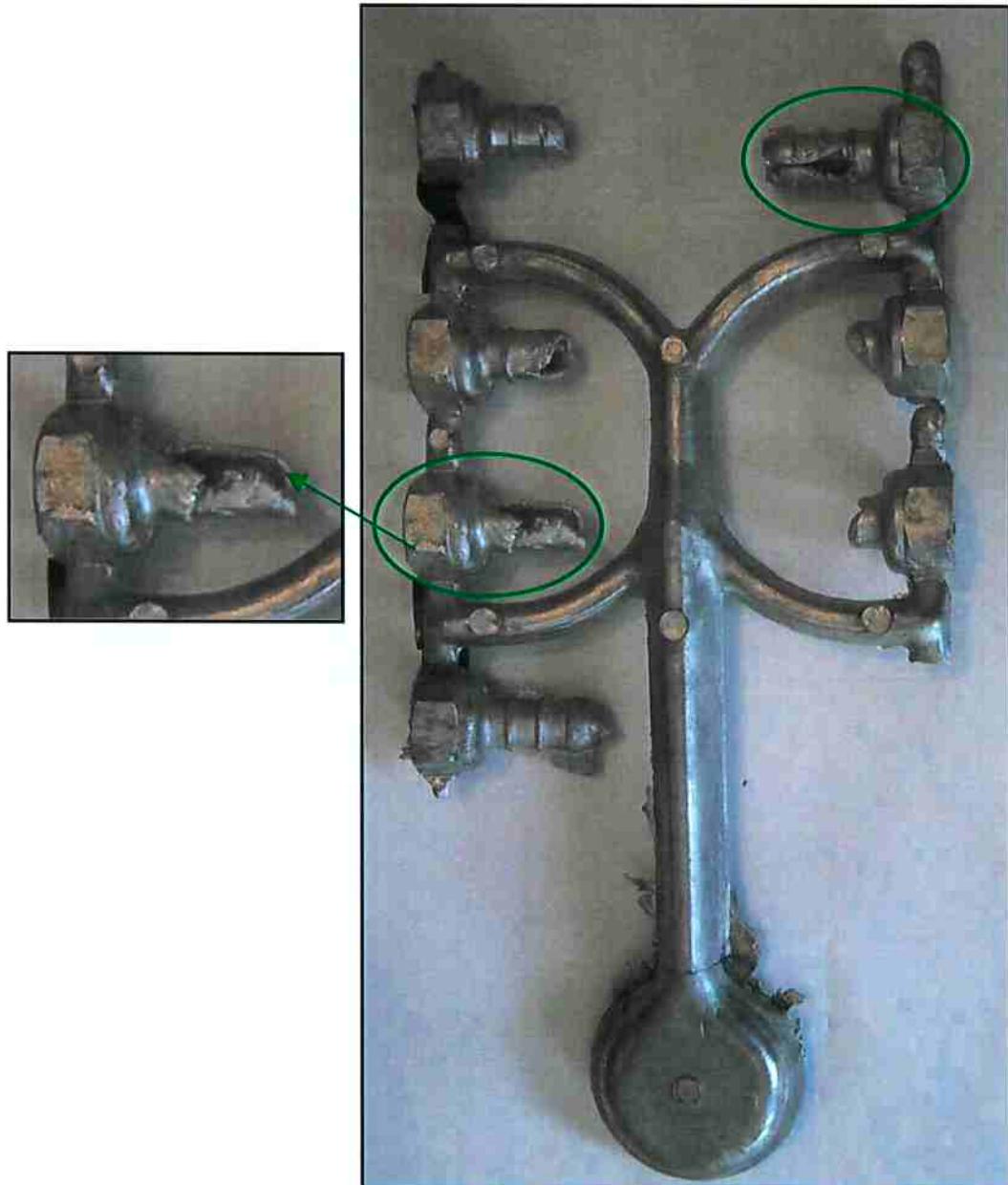


Figura 24. 1º canal do modelo "α" injetado com uma quantidade menor de material



Figura 25. 2º canal do modelo “ α ” injetado com uma quantidade menor de material

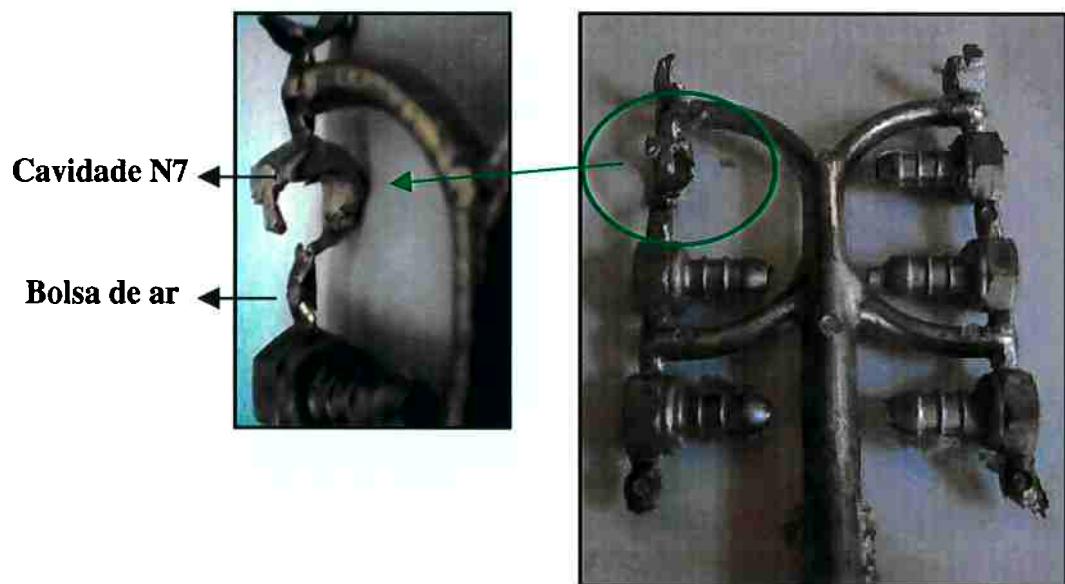


Figura 26. 3º canal do modelo “ α ” injetado com uma quantidade menor de material

9) Discussão dos Resultados

9.1) Estatística dos defeitos

De acordo com o levantamento estatístico, feito no item 8.1, o índice de ocorrência de defeitos foi maior nas cavidades N8, N6, N1, e N3. Baseando-se nos conceitos do gráfico de Pareto ou curva ABC (gráfico 1), a atenção deve ser priorizada no sentido de se verificar os problemas na alimentação destas cavidades. Porém, as outras cavidades (exceto N5) também apresentaram um certo índice de ocorrência de defeitos.

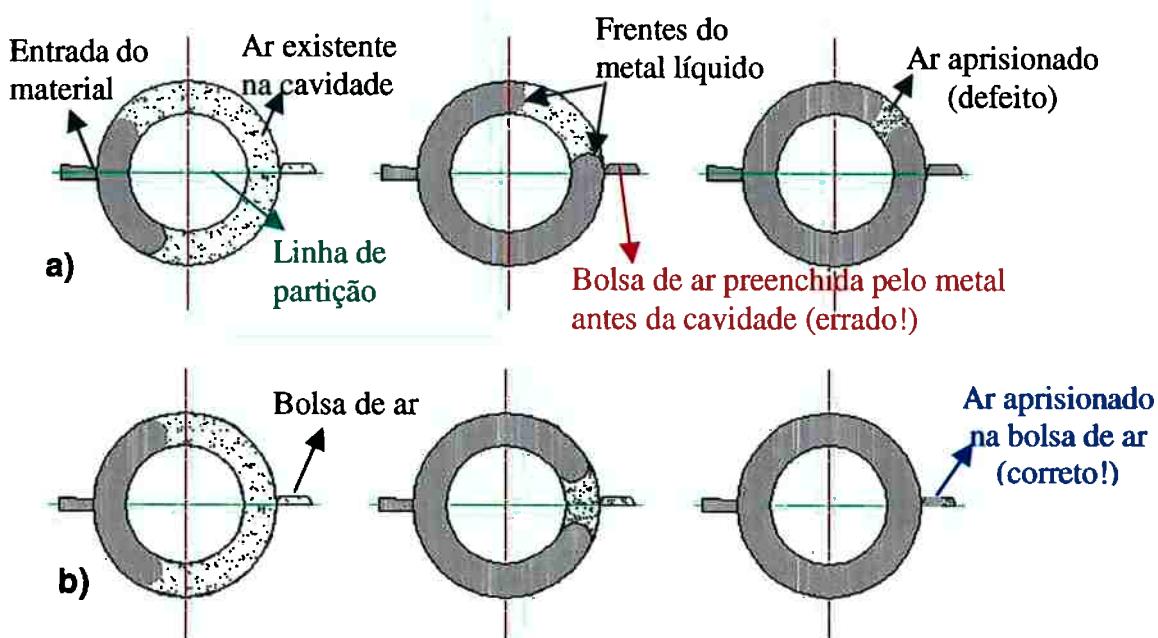
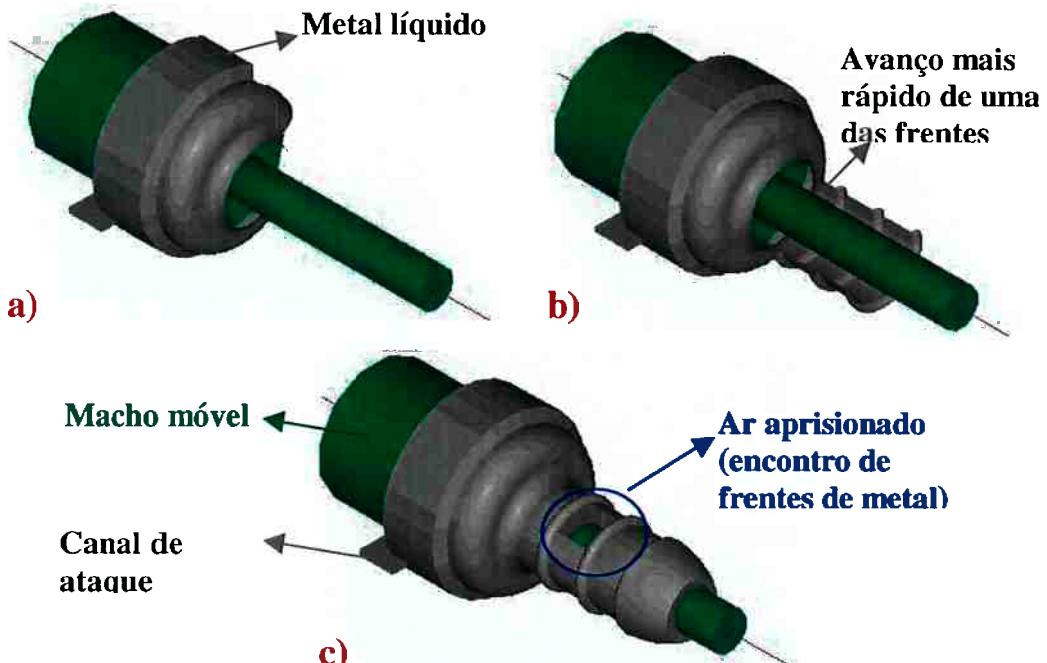
A análise da posição do defeito em relação ao lado do molde mostra que, na maioria das cavidades, a região da peça do lado móvel do molde tem um maior índice de ocorrência de defeitos (em torno de 63%). Porém, esse tipo de dado (neste caso) não permite se tirar um conclusão precisa.

9.2) Análise dos defeitos

Primeiramente, a partir da observação visual dos defeitos ocorridos nas peças do modelo “ α ”, houve duas principais suspeitas do tipo de defeito: bolhas de ar preso ou rechupe (menos provável). Assim, foi necessário se confirmar exatamente qual a classificação do defeito.

Então, para se especificar com maior precisão o tipo de defeito encontrado (e por consequência a sua causa), fez-se a análise com auxílio da lupa. Após se serrar e lixar as peças, para se conferir a forma do defeito, foi possível se determinar que o defeito é de aprisionamento de bolhas de ar (ou gases). Isso porque este tipo de defeito apresenta uma forma mais arredondada. Isto é visto nas duas amostras analisadas na lupa (figuras 21 e 22). Esta característica acontece devido ao encontro das frentes de metal líquido que estavam preenchendo o molde (ver figura 27). No início do preenchimento do molde pelo metal líquido, os canais e as cavidades estão preenchidas por ar. Quando se injeta o metal líquido, todo o ar presente no interior do molde deve ser expulso pela própria pressão do metal líquido. Porém, para o ar sair, deve existir local para a saída de todo o ar. E no caso da criação de frentes de metal, no momento do preenchimento, esta saída do ar fica prejudicada. Um exemplo é o caso das peças do modelo “ α ” com defeito. Na região de encontro destas frentes (a mesma onde posteriormente se originou o defeito), existiam bolhas de ar aprisionadas,

que não foram expulsas da cavidade. Este ar impediu que o encontro das frentes do metal líquido acontecesse, não permitindo o total preenchimento da cavidade (ver figura 28). Com a solidificação, há o surgimento do defeito. É também possível se ver que há a presença de ar no interior da peça (ver círculo azul na figura 22).



Caso fosse rechupe, o defeito apresentaria uma forma semelhante a uma trinca. Este não é o caso do modelo “ α ”, cujos defeitos ocorridos possuem um aspecto mais arredondado.

9.3) Estudo do sistema de canais

É interessante observar que os defeitos de aprisionamento de bolhas de ar estão ocorrendo em cavidades que possuem bolsas ou saídas de ar. As cavidades N8 e N1, apesar da presença de saídas de ar, apresentam um elevado índice de ocorrência de defeitos. As cavidades N6 e N3, mesmo possuindo bolsas de ar, demonstram índices semelhantes de refugo. Vale ressaltar que a saída de ar funciona como escape do ar que está dentro do molde fechado, no momento da injeção. Já a bolsa de ar tem a função de conter o ar no seu interior, evitando que o mesmo se aprisione na peça. Daí pode verificar que tais elementos não estão exercendo suas funções como o esperado. É conveniente ressaltar que tanto as bolsas como as saídas de ar estão posicionadas na linha de partição (ou seja, na linha de fechamento do molde).

Assim, as bolsas e saídas de ar só servem como armazenamento ou escape do ar, quando este for expulso pela linha de partição (ver figura 28). Porém, as figuras 24 e 25 (ver detalhes circulados em verde) mostram que as frentes de metal estão se encontrando fora da linha de partição. No caso de encontro de frentes, o ar só não ficará aprisionado se a bolsa de ar estiver localizada exatamente na região de encontro das frentes de metal líquido. Portanto, como as bolsas de ar estão posicionadas na linha de partição e o encontro de frentes nem sempre ocorre nesta região, os defeitos de aprisionamento de ar ocorrem constantemente.

Outro fator a ser comentado é o detalhe observado na figura 26 (circulado em verde). Este detalhe mostra a formação de duas frentes de metal, criando condições propícias para a geração do defeito de aprisionamento do ar. Além disso, a bolsa de ar situada entre as cavidades N6 e N7 está servindo como uma “alimentação secundária” destas cavidades. No caso da figura 26, é possível se verificar que a bolsa de ar citada já está totalmente preenchida, enquanto a cavidade N7 está no início do preenchimento. Ou seja, o metal líquido começaria a entrar na cavidade N7 a partir da bolsa de ar, transferindo também qualquer possível ar que estivesse no seu interior. É conveniente lembrar que a bolsa de ar deve estar posicionada na última região a ser preenchida pelo metal líquido. Desta maneira é garantido que o ar existente no molde seja transferido para bolsa de ar, com ajuda do metal líquido.

9.4) Sugestões de alterações do sistema de canais

Em vista de todos os resultados obtidos, e suas discussões, é possível apontar uma deficiência principal na configuração do sistema de canais: "*o preenchimento das cavidades acontece com a formação de duas frentes de metal líquido e o encontro destas ocorre fora da linha de partição (e, consequentemente, das bolsas e saídas de ar)*". Solucionando este problema, o índice de defeitos nesta peça provavelmente diminuirá. Outros pontos observados foram: as bolsas e saídas de ar estão posicionadas na linha de partição; as bolsas de ar, situadas entre as cavidades N6 e N7 e entre N2 e N3, estão servindo como "canais de ataque secundários" (e não como bolsas).

É extremamente difícil e impreciso controlar o preenchimento das cavidades por metal líquido, de forma a se prever onde será o encontro das frentes do metal líquido (ver figura 28). Isso porque, são utilizadas altas velocidades, e qualquer alteração no processo (pequenas variações de temperatura do metal e/ou do molde, sujeiras no molde, mudanças nos parâmetros da injetora...) pode desviar as frentes de metal. Portanto, com a criação de duas frentes de metal, durante a alimentação das cavidades, é inviável tentar encontrar uma maneira de se direcionar as duas frentes de modo a estas se encontrarem na linha de partição (para o ar poder ser expulsos através das saídas e bolsas de ar).

O mais seguro e coerente é evitar a formação destas frentes de metal líquido. Preenchendo-se as cavidades em uma única frente, diminuirá a possibilidade de aprisionamento de ar. Para se alocar o ar (existente no interior do molde) fora da peça, deve-se colocar bolsas ou saídas de ar na última região que o metal irá preencher. Com a alimentação por uma única frente de metal, é mais fácil se prever onde será esta região.

Assim, as sugestões de alterações do sistema de canais do modelo " α " seriam as seguintes:

- Mudar a posição dos canais de ataque: alimentando-se a cavidade pela região inferior, ou seja, não radialmente como no sistema atual, mas na direção do eixo central da peça. Esta região apresenta uma secção transversal circular (com um orifício central). Assim, é conveniente se confeccionar uma anel antes do novo canal de ataque (conforme figuras 29 e 30).

- Alterar a posição das bolsas de ar: com a primeira mudança, é preciso se inserir bolsas de ar na região oposta ao canal de entrada. Ou seja, na última região a ser preenchida pelo metal líquido. Tais bolsas teriam um formato de anel, acompanhando a geometria da peça. Os pinos extratores situados nas bolsas serão repositionados. Se estes pinos forem colocados na superfície da peça, serão adotados pinos extratores de baixo relevo. Estas bolsas de ar foram posicionadas de modo a não interferirem no preenchimento das cavidades.
- Retirar as bolsas de ar entre as cavidades: são as bolsas entre as cavidades N2 e N3 e entre N6 e N7. Tais bolsas devem ser retiradas para não servirem de interligação secundária entre as cavidades e para se tornar coerente à nova configuração adotada (duas primeiras alterações sugeridas).

A intenção destas alterações é se privilegiar o preenchimento por uma única frente de metal ou pelo menos tornar menos crítico o encontro das frentes de metal líquido. Porém, para não se afetar outras características da alimentação, decidiu-se manter a área do canal de ataque. Assim, mediu-se as áreas do canal de ataque (tabela 6), para se calcular qual a área média das cavidades. Tal área será mantida nas novas configurações.

Tabela 6. Dados para o cálculo da área do canal de ataque

Cavidade	Altura (mm)				Largura (mm)				Área** (mm ²)
	h1	h2	h3	hm*	L1	L2	L3	Lm*	
N1	1,12	1,14	1,14	1,13	7,34	7,24	7,28	7,29	8,26 ± 0,05
N2	1,16	1,08	1,14	1,13	7,38	7,32	7,32	7,34	8,27 ± 0,05
N3	1,14	1,14	1,16	1,15	7,26	7,14	7,12	7,17	8,23 ± 0,08
N4	1,18	1,16	1,16	1,17	7,24	7,22	7,18	7,21	8,42 ± 0,03
N5	1,12	1,16	1,18	1,15	6,78	6,66	6,70	6,71	7,74 ± 0,07
N6	1,18	1,16	1,12	1,15	6,74	6,78	6,72	6,75	7,78 ± 0,04
N7	1,14	1,18	1,16	1,16	7,22	7,10	7,14	7,15	8,30 ± 0,06
N8	1,12	1,14	1,18	1,15	7,26	7,20	7,18	7,21	8,27 ± 0,05

* valores médios

** considerando um secção retangular

Calculando-se a média das áreas medidas, têm-se que a área do canal de ataque atual (e que será a área do canal de ataque da nova configuração) é de **8,16mm²**.

Com as alterações sugeridas, o croqui do sistema de canais do modelo “α” poderia ter duas configurações (mostradas nas figura 29 e 30).

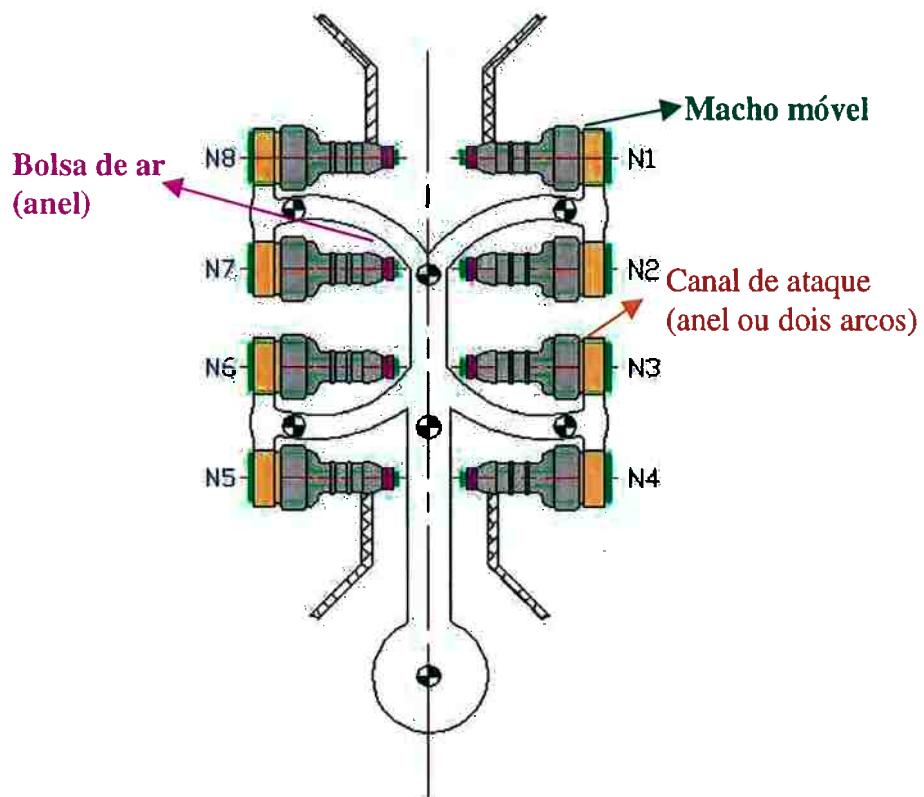


Figura 29. Croqui da nova configuração(config.1) do sistema de canais para o modelo “ α ”,priorizando o preenchimento das cavidades por uma única frente

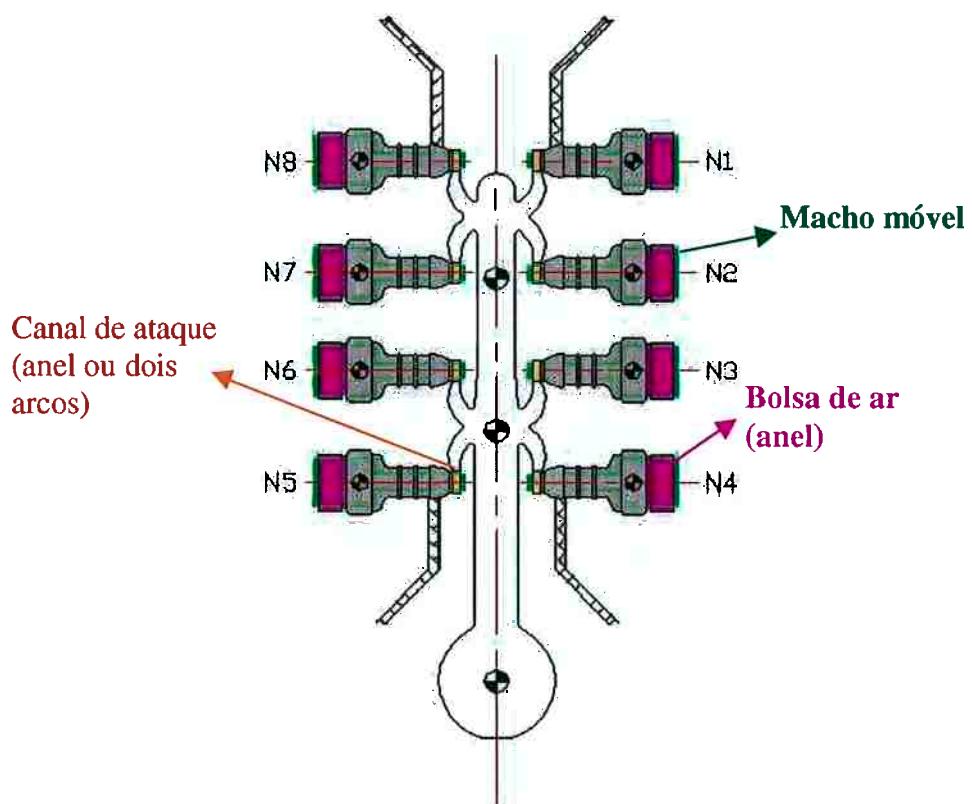


Figura 30. Croqui da nova configuração(config.2) do sistema de canais para o modelo “ α ”,priorizando o preenchimento das cavidades por uma única frente

A alteração mais significativa (para as duas configurações) seria a mudança da geometria e posição do canal de ataque. A geometria do novo canal de ataque seria um anel, ou dois arcos (ver figura 31), ao invés da secção retangular (ou levemente trapezoidal). Além disso, há duas possibilidades: o ataque pela região maior da peça (config1) ou pela região menor (config2).

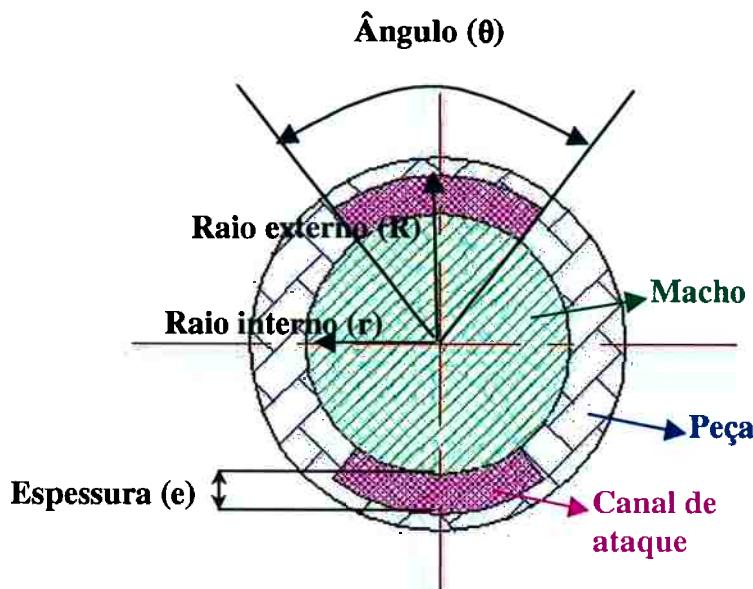


Figura 31. Detalhe do novo canal de ataque

Para se adequar o novo tipo de canal de ataque à área atual ($8,16\text{mm}^2$), foi necessário se fazer alguns cálculos:

$$\text{Área do canal de ataque} \rightarrow A_{\text{ataque}} = 8,16\text{mm}^2.$$

Geometria do canal de ataque:

$$\text{Anel} \rightarrow A'_{\text{ataque}} = \pi \times (R^2 - r^2)$$

$$\text{Dois arcos} \rightarrow A'_{\text{ataque}} = 2 \times [(\theta/360^\circ) \times \pi \times (R^2 - r^2)]$$

$$\text{Espessura do canal de ataque} \rightarrow e = R - r$$

$$\text{Raio interno para a config1} \rightarrow r_1 = 9,0\text{mm} \text{ (raio externo do macho maior)}$$

$$\text{Raio interno para a config2} \rightarrow r_2 = 3,0\text{mm} \text{ (raio externo do macho menor)}$$

Igualando-se $A_{\text{ataque}} = A'_{\text{ataque}}$ e variando θ , é possível se encontrar vários valores de R (e, consequentemente de "e") para as duas configurações. Assim, obteve os valores constados na tabela 7. Adotou-se que, no mínimo, 1/3 da circunferência (ou seja, $\theta = 54^\circ$) deve ser ocupada pelo canal de ataque, para não se ter uma criação crítica de frentes de metal.

Tabela 7. Cálculo da espessura do canal de ataque

θ ($^{\circ}$)	Configuração 1		Configuração 2	
	R1 (mm)	e1 (mm)	R2 (mm)	e2 (mm)
180 (anel)	9,07	0,07	3,41	0,41
120	9,21	0,21	3,59	0,59
90	9,28	0,28	3,77	0,77
75	9,34	0,34	3,90	0,90
60	9,42	0,42	4,10	1,10
54	9,47	0,47	4,20	1,20

A primeira nova configuração do sistema de canais (config1) seria com a alimentação da peça pelo lado maior e colocando uma bolsa de ar pelo lado menor. Esta configuração seria ideal. Porém, para se manter a área do canal de ataque igual à atual, a espessura deste canal seria pequena (ver tabela 7). Isso porque, com valores de espessura desta grandeza, a peça não ficaria presa ao galho, no momento da extração, podendo ser refugada dentro da máquina. Além disso, canais com valores baixos de espessura podem não preencher adequadamente a peça, e muito menos se alimentar as contrações de solidificação. Com isso, tal configuração está descartada.

A segunda alternativa (config2) teria uma alimentação pela região menor, ao contrário da primeira, colocando-se uma bolsa de ar em forma de anel na parte maior (ver figura 32). Isto é, o princípio é o mesmo acima. A vantagem deste modo é que a espessura do canal de ataque é maior que na primeira (ver tabela 7). Deve-se perceber que canais de ataque com altos valores de espessura conferem problemas no momento de rebarbação. Além disso, o canal de ataque deve ocupar o máximo possível do ângulo da circunferência (θ), para se minimizar o encontro de frentes de metal. Por outro lado, não pode ser muito pequena esta espessura pelos motivos acima citados. Assim, decidiu-se utilizar um canal de entrada com a geometria de dois arcos, com $\theta = 75^{\circ}$ e espessura de 0,90mm. As figuras 30, 31 e 32 ilustram, resumidamente, quais são as alterações sugeridas para o sistema de canais do modelo "α". Primeiramente, há um anel (tipo canal secundário) que promoverá um encontro de frentes que fora da cavidade. Em seguida, existe os dois arcos que funcionarão como canal de ataque, favorecendo um preenchimento por uma única frente, ou pelo menos, minimizando o encontro de frentes de metal líquido (que é bastante crítico na configuração atual). Ou seja, durante a injeção, o metal líquido irá vir do canal primário entrando no "canal secundário" (primeiro anel). Neste momento, o metal líquido criará duas frentes de metal líquido, porém fora da peça. Quando se preencher

completamente este anel, começará a alimentação da peça (cavidade) propriamente dita, através dos dois arcos (canais de ataque).

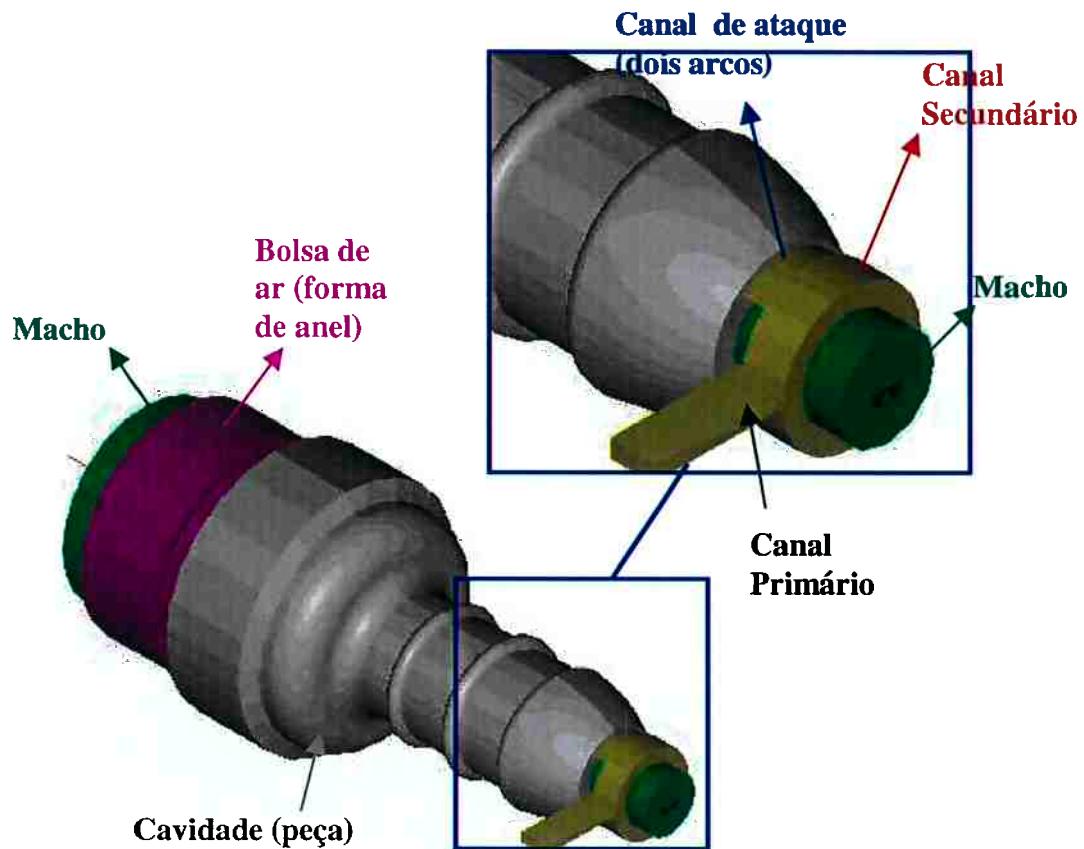


Figura 32. Detalhe esquemático da configuração do canal de entrada

A quantificação desta redução e, por consequência, a comprovação da eficácia destas sugestões de mudanças da configuração do sistema de canais só poderiam ser obtidas caso fosse alterado o molde. O ideal seria se executar tais alterações e se quantificar o índice de refugo (por defeitos de fundição) das próximas produções, para se verificar se houve redução deste valor. Porém, como já mencionado anteriormente, estas ações não foram inseridas no escopo do trabalho. Isso devido à complexidade das alterações aqui propostas e também por razões internas da empresa que produz tais peças. É conveniente lembrar que as alterações propostas requerem um certo tempo e custo de execução do trabalho, assim como disponibilidade de se parar a produção desta peça durante o período de reforma do molde. Mesmo assim, mediante os estudos feitos e conceitos teóricos, acredita-se que, com tais alterações, o índice de ocorrência de defeitos de fundição por aprisionamento de bolhas de ar (o mais crítico) sofra um redução considerável.

Modelo “β”

8') Resultados Obtidos

8.1') Estatística dos defeitos

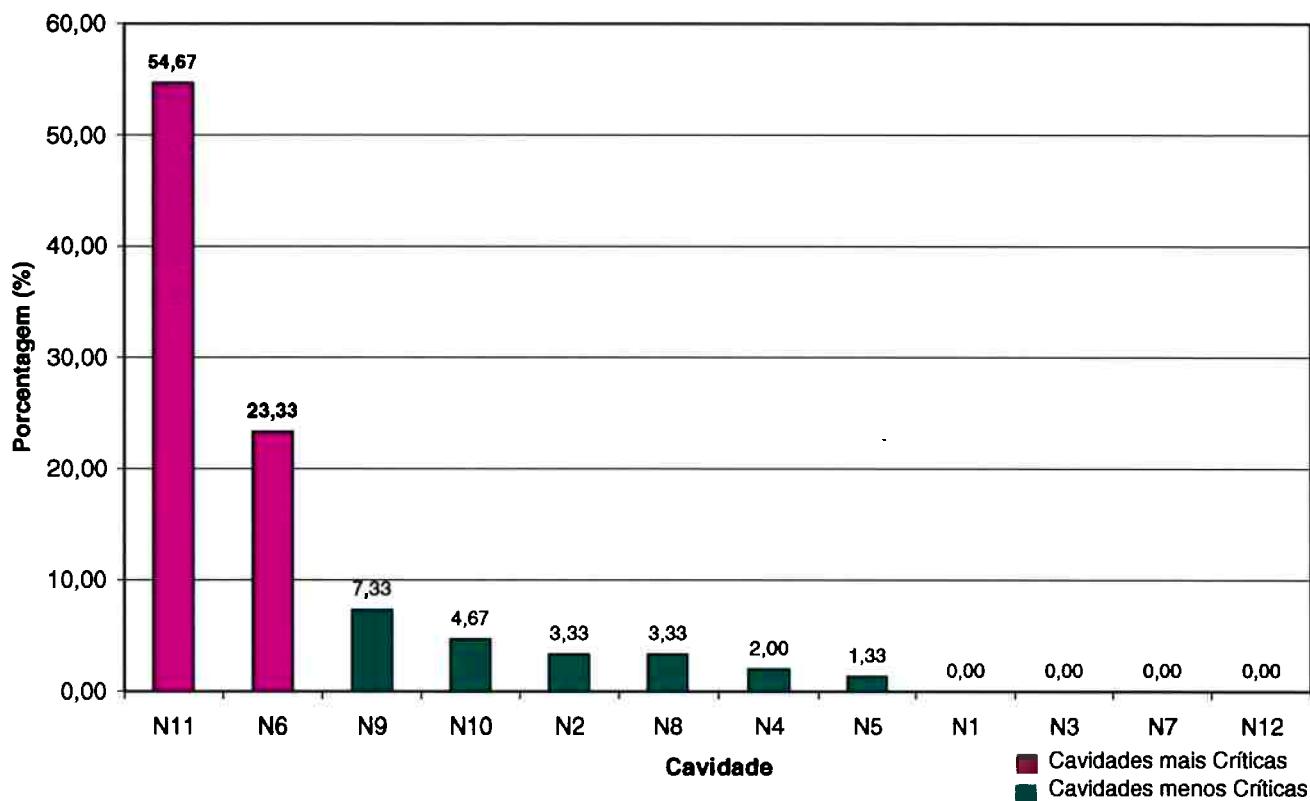
Conforme descrito em Materiais e Métodos, fez-se uma estatística dos defeitos ocorridos no modelo “β” de acordo com a cavidade. A população total foi de 150 peças defeituosas, escolhidas ao acaso e em meio de vários lotes diferentes (de diversos dias de produção). Além da cavidade, este levantamento estatístico considerou a posição da peça onde há a incidência da peça, dividindo em quatro regiões, de acordo com a localização em relação ao canal de ataque. Assim, como ilustrado na figura 36 (mostrada posteriormente), as regiões consideradas são: I(na adjacência esquerda), II(na entrada do canal), III(no lado oposto ao canal) e IV(na adjacência direita). Com isso, obteve-se os dados constados na tabela 8.

Tabela 8. Dados da ocorrência de defeitos para cada cavidade

Cavidade	Posição em relação ao canal de ataque*				Total	Porcentagem
	I	II	III	IV		
N1					0	0,00
N2			5		5	3,33
N3					0	0,00
N4	1		1	1	3	2,00
N5			2		2	1,33
N6			19	16	35	23,33
N7					0	0,00
N8	2		1	2	5	3,33
N9			5	6	11	7,33
N10			4	3	7	4,67
N11	5		62	15	82	54,67
N12					0	0,00
TOTAL	8	0	99	43	150	

*As regiões I, II, III e IV serão mostradas, posteriormente, na figura 36

Gráfico 2 - Ocorrência dos Defeitos por Cavidade - Modelo "β"



8.2') Análise dos defeitos

Os defeitos de fundição ocorridos possuíam o aspecto visual mostrado na figura 33. Para se analisar o defeito (que já está localizado numa superfície plana), embutiu-se duas peças em baquelite. Lixou-se e poliu-se as duas amostras embutidas (preparação). Observou-se o aspecto dos defeitos das peças, primeiramente, numa lupa de menor aumento e depois num microscópio óptico. Tirou-se fotos nos aumentos menores para se analisar a forma do defeito figuras 34 e 35.



Figura 33. Aspecto visual do defeito

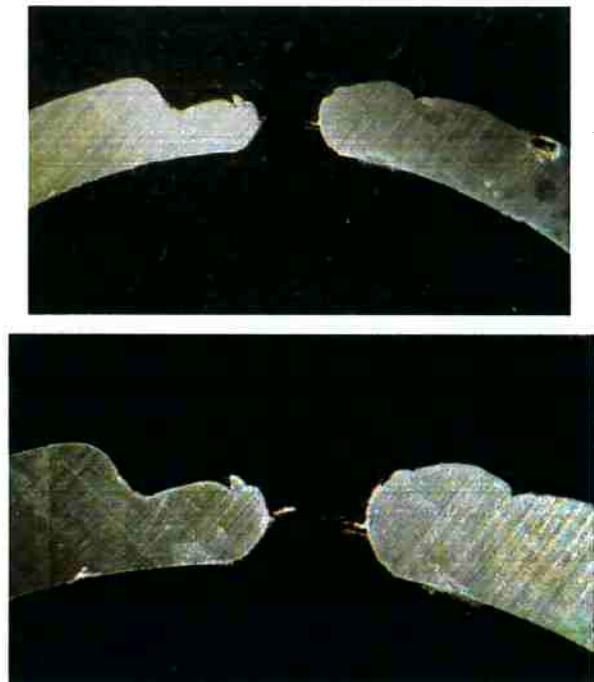


Figura 34. Análise dos defeitos ("β" cavidade N11), com auxílio de uma lupa
a) Vista do defeito do modelo "β", cavidade N11 (aumento:10x)
b) Vista do defeito do modelo "β", cavidade N11 (aumento:16x)

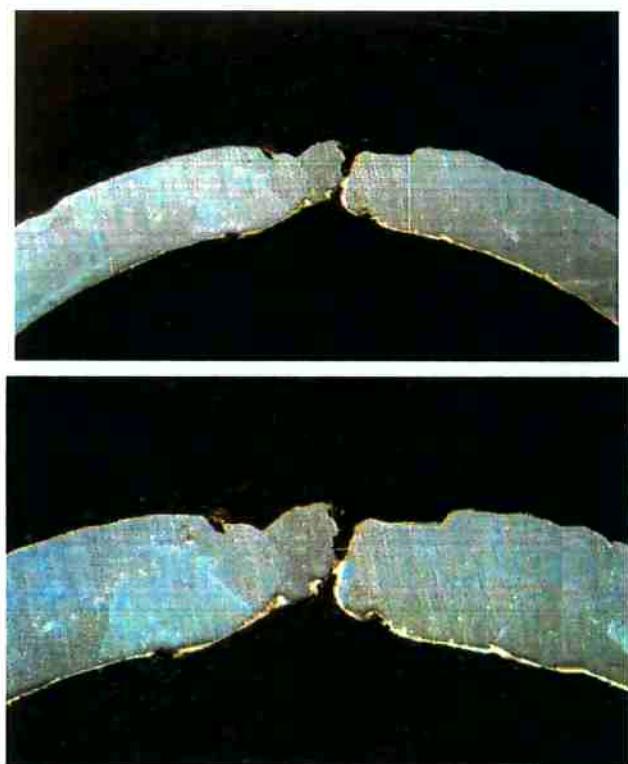


Figura 35. Análise dos defeitos ("β" cavidade N6), com auxílio de uma lupa
a) Vista do defeito do modelo "β", cavidade N6 (aumento:10x)
b) Vista do defeito do modelo "β", cavidade N6 (aumento:16x)

8.3') Estudo do sistema de canais

A partir da foto do sistema de canais (figura 19) e do estudo estatístico feito anteriormente, é conveniente se analisar a ocorrência dos defeitos de acordo com a região do molde. Para tanto, tem-se o croqui abaixo representando o sistema de canais com as regiões analisadas e os índices encontrados no levantamento estatístico. Alguns elementos estão em destaque, como: bolacha ou entrada de material (A); canal de enchimento ou alimentação primário (B); canal de enchimento ou alimentação secundário (C); canal de ataque ou de entrada (D); peça ou cavidade (E); saídas de ar (F); posição dos pinos extractores (G).

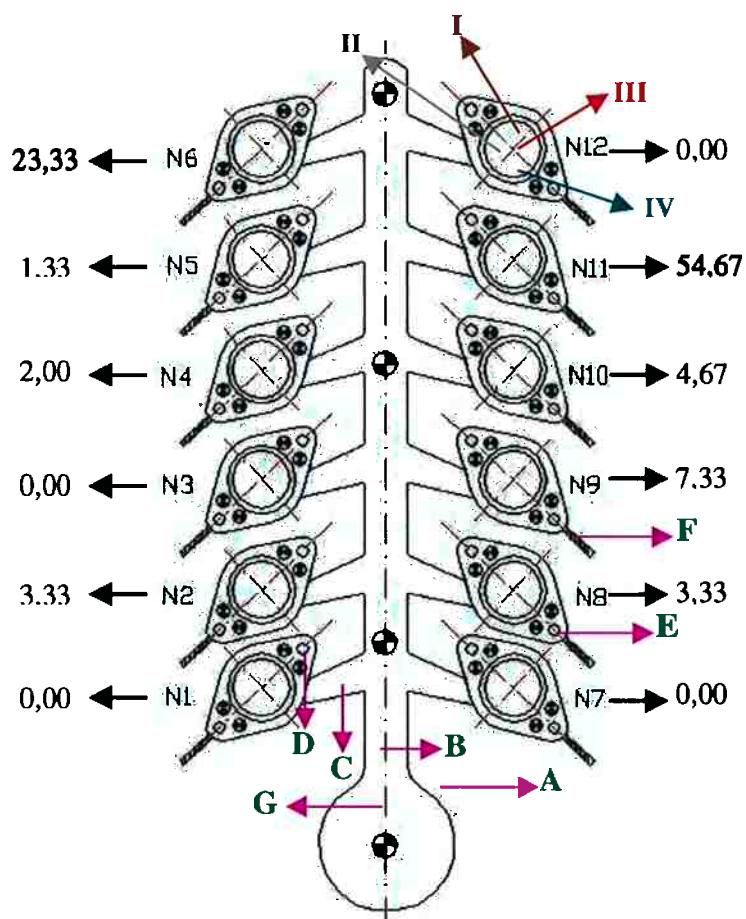


Figura 36. Croqui do sistema de Canais, com os resultados do estudo estatístico (modelo "β")

Após a análise do projeto do sistema de canais, foram injetados alguns canais com menores quantidades de material (do que o necessário para se preencher completamente

o molde). Assim, é possível se observar o comportamento das frentes de metal líquido, durante o preenchimento do molde. As figuras abaixo mostram os resultados deste tipo de experimento:

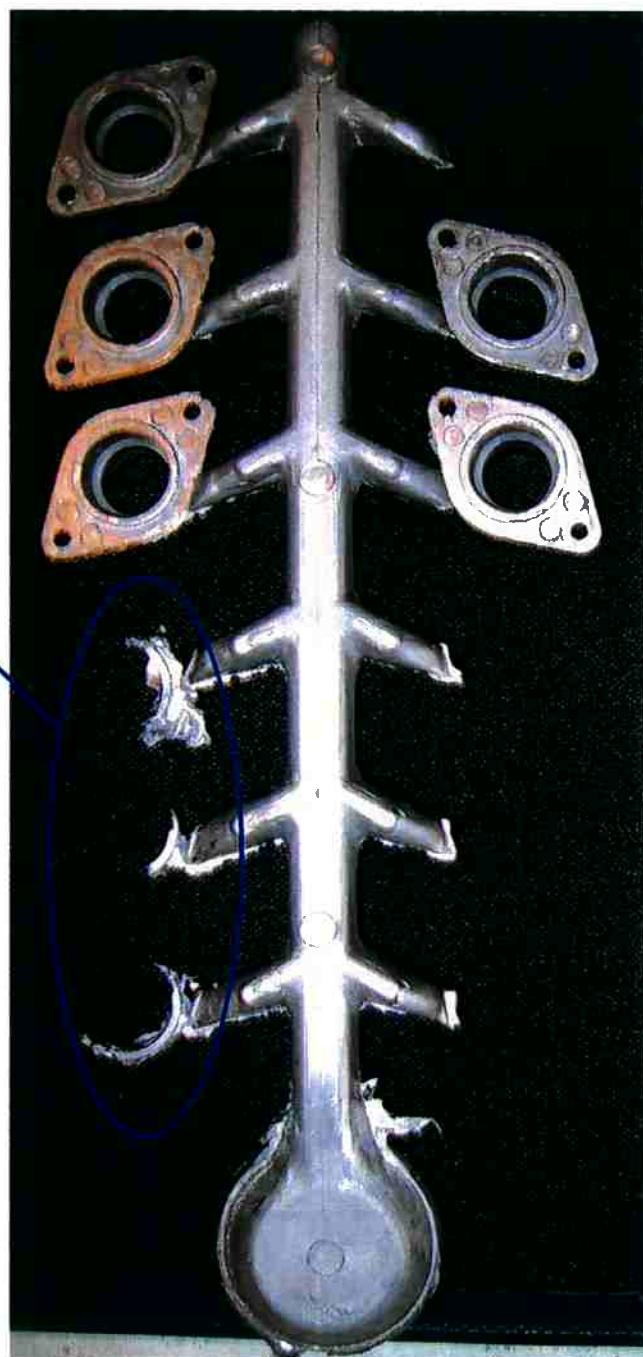


Figura 37. 1º canal injetado com menos metal líquido (modelo "β")

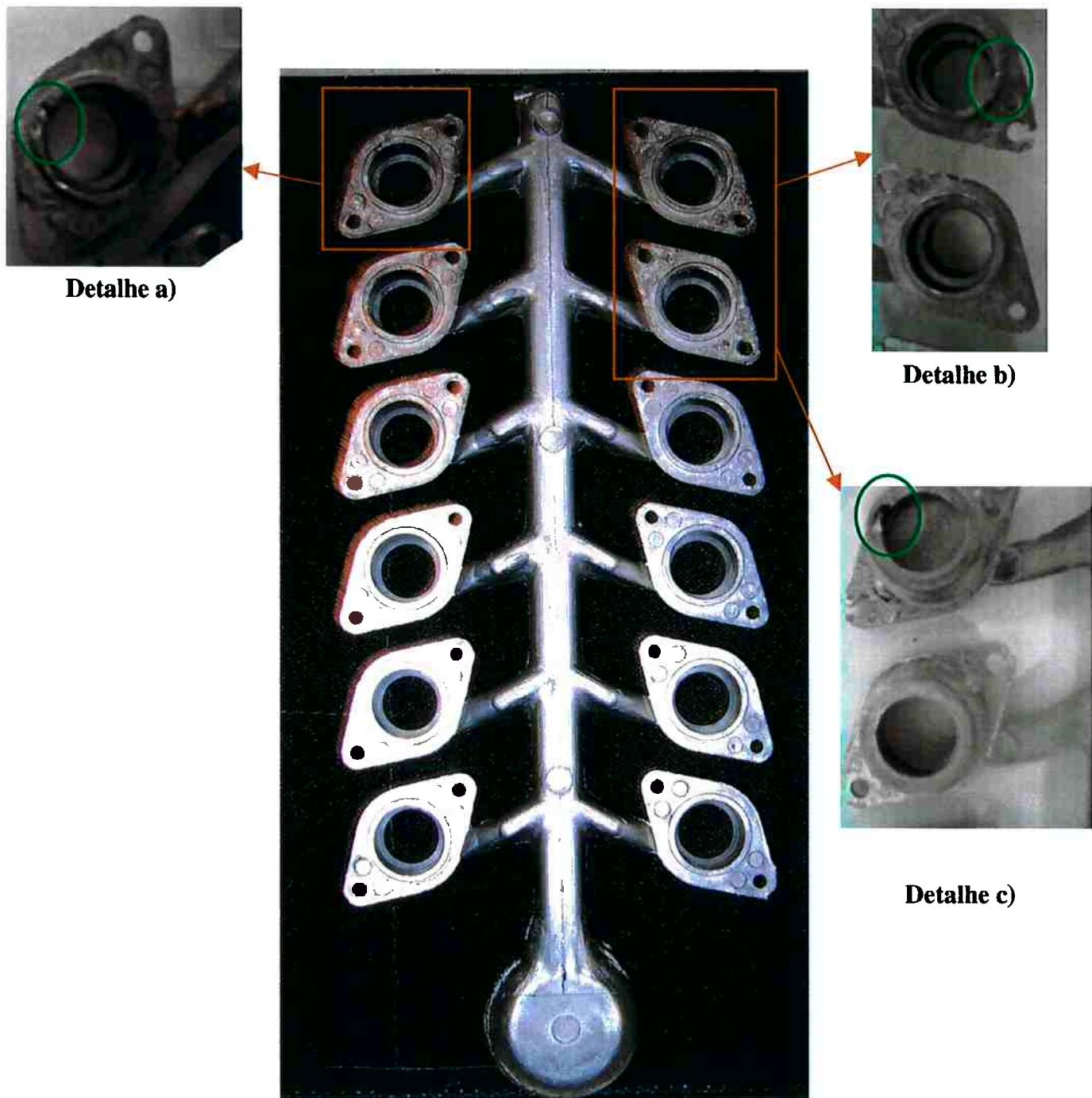


Figura 38. 2º canal injetado com menos metal líquido (modelo "β")

- Detalhes:
- Vista frontal da cavidade N6
 - Vista frontal das cavidades N12 e N11
 - Vista oposta das cavidades N12 e N11

Ao se observar visualmente o sistema de canais, pôde-se constatar um certo desvio quanto às medidas dos canais secundários e de ataque em relação a cada cavidade. Por esse motivo, resolveu-se medir as áreas dos mesmos.

Tabela 9. Medidas da área do canal de entrada, de acordo com a cavidade

Cavidade	Altura (mm)				Base (mm)				Área* (mm ²)
	h1	h2	h3	hm	I1	I2	I3	Im	
N1	1,03	1,05	1,03	1,04	8,37	8,33	8,45	8,38	8,69 ± 0,06
N2	0,9	0,98	0,97	0,95	9,25	9,30	9,17	9,24	8,78 ± 0,08
N3	0,92	1,02	0,96	0,97	8,53	8,61	8,51	8,55	8,27 ± 0,07
N4	1,03	0,93	0,95	0,97	8,65	8,62	8,63	8,63	8,37 ± 0,06
N5	0,86	0,87	0,86	0,86	8,50	8,44	8,58	8,51	7,34 ± 0,07
N6	0,84	0,85	0,81	0,83	8,36	8,41	8,36	8,38	6,98 ± 0,04
N7	0,99	0,92	0,98	0,96	8,36	8,34	8,37	8,36	8,05 ± 0,04
N8	0,90	0,89	0,91	0,90	8,35	8,32	8,39	8,35	7,52 ± 0,04
N9	0,92	0,95	0,94	0,94	8,32	8,35	8,34	8,34	7,81 ± 0,02
N10	0,90	1,01	0,91	0,94	8,42	8,53	8,37	8,44	7,93 ± 0,10
N11	0,88	0,86	0,88	0,87	8,31	8,21	8,35	8,29	7,24 ± 0,07
N12	0,92	0,86	0,88	0,89	8,25	8,36	8,34	8,32	7,37 ± 0,07

*Considerando a secção como um retângulo

Tabela 10. Medidas da área do canal secundário, de acordo com a cavidade*

Cavidade	Altura (mm)				Base maior(mm)				Base menor(mm)				Área** (mm ²)
	h1	h2	h3	hm	B1	B2	B3	Bm	b1	b2	b3	bm	
N1	8,32	8,23	8,11	8,22	10,89	11,07	10,89	10,95	7,77	7,91	7,83	7,84	77,21 ± 0,16
N2	8,20	8,17	8,06	8,14	11,11	11,09	11,07	11,09	7,82	7,83	7,85	7,83	77,05 ± 0,08
N3	7,81	7,70	7,71	7,74	11,20	11,11	11,09	11,13	7,93	7,88	7,83	7,88	73,58 ± 0,10
N4	7,30	7,35	7,30	7,32	10,58	10,47	10,55	10,53	7,47	7,50	7,69	7,55	66,17 ± 0,14
N5	7,33	7,29	7,27	7,30	10,42	10,46	10,57	10,48	7,26	7,80	7,84	7,63	66,10 ± 0,33
N6	7,39	7,21	7,25	7,28	10,61	10,54	10,65	10,60	7,51	7,79	7,42	7,57	66,18 ± 0,22
N7	7,99	7,98	7,98	7,98	10,86	10,63	10,71	10,73	7,75	7,69	7,74	7,73	73,69 ± 0,12
N8	8,04	7,80	7,81	7,88	11,42	11,38	11,32	11,37	7,79	7,82	7,76	7,79	75,54 ± 0,15
N9	7,56	7,54	7,55	7,55	11,08	10,89	10,92	10,96	7,56	7,75	7,66	7,66	70,29 ± 0,14
N10	7,49	7,48	7,44	7,47	10,82	10,89	10,92	10,88	7,37	7,23	7,35	7,32	67,95 ± 0,10
N11	7,24	7,20	7,24	7,23	10,86	10,95	11,00	10,94	6,89	6,94	6,80	6,88	64,37 ± 0,10
N12	7,03	7,21	7,08	7,11	11,02	10,83	11,09	10,98	6,92	6,95	6,98	6,95	63,71 ± 0,17

* Medido a 15mm da linha de centro do canal primário.

** Considerando a secção como um trapézio isósceles

Nas tabelas 9 e 10, as linhas sombreadas em cinza correspondem às cavidades N6 e N11 (com maiores índices de ocorrência de defeitos). Já os números destacados em azul representam os cinco menores valores de área encontrados.

9') Discussão dos Resultados

9.1') Estatística dos defeitos

De acordo com o levantamento estatístico feito, o índice de ocorrência de defeitos foi maior nas cavidades N11 e N6. A partir da tabela 8, foi possível se construir o gráfico 2 (seguindo o conceito do gráfico de Pareto), ressaltando a necessidade de se priorizar as cavidades N11 e N6 (só estas duas cavidades representam 78% dos defeitos ocorridos). As outras cavidades apresentaram índices de ocorrência de defeitos bem menores, podendo considerar, para este estudo, desprezíveis. Um fato a ser ressaltado é que, ao contrário do modelo “ α ”, os defeitos estão estritamente localizados e sem coincidência de posição (em relação ao sistema de canais). Esta evidência sugere que o maior problema não está na configuração dos canais (em geral), mas sim em pontos exclusivos destas duas cavidades.

A análise da posição do defeito em relação ao canal mostra que, na maioria das cavidades, a região III (oposta ao canal de ataque) tem o maior índice de ocorrência de defeitos (66%). A região IV (adjacência direita ao canal de ataque) também deve ser considerada já que apresenta um índice de defeitos em torno de 29%.

9.2') Análise dos defeitos

Com os conhecimentos adquiridos com a análise do modelo “ α ” e a partir da observação visual dos defeitos ocorridos nas peças do modelo “ β ”, foi possível definir que o defeito que está ocorrendo nestas peças são bolhas de ar preso. Apenas no sentido de se confirmar tal afirmação, fez-se a análise com auxílio da lupa. Com os aumentos utilizados, verifica-se realmente o aprisionamento de bolhas de ar (ou gases). Isso porque este os defeitos apresentam a forma arredondada (conforme explicado no caso do modelo “ α ”), caracterizando o encontro das frentes de metal líquido.

Outro ponto a ser ressaltado é que os defeitos ocorrem preferencialmente nas regiões opostas ao canal de entrada (ou de ataque). Isso reforça a hipótese de que o aprisionamento de ar está ocorrendo na região de encontro das frentes de metal líquido. Quando o metal entra na cavidade, o fluxo de metal se divide em duas frentes, que irão

se encontrar, preferencialmente, na parte da cavidade oposta (regiões III e IV) ao canal de ataque (ver figura 39). Isso porque é o maior caminho para as duas frentes de metal percorrerem até o respectivo encontro.

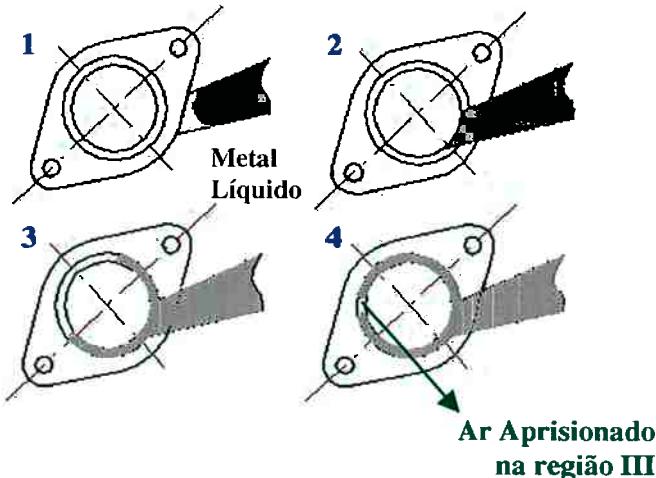


Figura 39. Simulação do preenchimento da cavidade pelo metal líquido (considerando apenas o anel que ocorre o defeito).

9.3') Estudo do sistema de canais

É interessante observar que os defeitos de aprisionamento de bolhas de ar estão ocorrendo em cavidades de posições distintas (N11 é a segunda de cima para baixo e a N6 é a primeira). A presença de saídas de ar não está impedindo a formação de tais defeitos. Outra observação a ser feita é que os furos principais da peças não são feitas por machos móveis (que poderia auxiliar como saída de ar) mas sim fixos na matriz. Além disso, as regiões da peça onde ocorre esse tipo de defeito está fora da linha de partição, impossibilitando a confecção de bolsas de ar em tais regiões e justificando a ineficiência das saídas de ar.

Na figura 37, é possível se evidenciar a criação de duas frentes de metal (observar cavidades N1, N2 e N3). Assim, pode-se verificar que o mecanismo de origem do defeito de aprisionamento de bolhas de ar se inicia com esta criação das frentes, que depois irão se encontrar.

Com o segundo canal injetado com menos material, ficam evidenciados o encontro das duas frentes de metal formadas. Os círculos em verde (dispostos nos detalhes) indicam as regiões onde estão ocorrendo o encontro de frentes de metal. Novamente,

verifica-se o acontecimento do mecanismo de formação do defeito de aprisionamento de bolhas de ar (encontro das frentes de metal).

Foi visto que os maiores índices de ocorrência de defeitos pertenciam a cavidades de posições diferentes e estritamente localizadas (cerca de 78% dos defeitos ocorrem nas cavidades N6 e N11). Além disso, é perceptível, visualmente, as diferenças de áreas dos canais secundários e de ataque. Então, resolveu-se medir as áreas para se verificar possíveis desvios (tabelas 9 e 10).

Em relação às diferenças de valores de área para os canais de ataque e secundário, constatou-se que realmente há algumas discrepâncias neste sentido. E estas diferenças apresentam relações com o índice de ocorrência de defeitos. Medindo-se as áreas dos canais de ataque, percebeu-se que as cavidades N6 (com $6,98 \text{ mm}^2$) e N11 (com $7,24 \text{ mm}^2$) apresentaram os menores valores de área. No caso dos canais secundários, as cavidades N11 (com $64,37 \text{ mm}^2$) e N6 (com $66,18 \text{ mm}^2$) estão entre as cinco menores medidas de área, comparando-se com as outras cavidades. E as diferenças são consideráveis. Por exemplo, para as áreas dos canais de ataque:

Cavidade N2 → $8,78 \text{ mm}^2$ (Maior área de canal de ataque encontrada);

Cavidade N11 → área do canal de ataque: $7,24 \text{ mm}^2$ (redução de 18%*)

Cavidade N6 → área do canal de ataque: $6,98 \text{ mm}^2$ (redução de 20%*)

*em relação à área do canal de ataque da cavidade N2

É importante lembrar que as cavidades N6 e N11 são as que apresentam os maiores índices de ocorrência de defeitos (destacadas em cinza nas tabelas 9 e 10). Além disso, apenas para efeitos de análises, é perceptível que o canal de alimentação primário possui a área de secção transversal constante. Neste caso sim deveria se ter uma redução gradual da área. Isso porque, na configuração atual, as cavidades N6, N12, N5 e N11 (as situadas acima) são preenchidas totalmente, antes que as outras sejam preenchidas. O ideal é que todas as cavidades devem ser preenchidas ao mesmo tempo.

9.4') Sugestões de alterações do sistema de canais

A partir das análises feitas, é possível se definir que o maior problema do sistema de canais do modelo “β” é: “*principalmente nas cavidades N6 e N11, onde as áreas dos*

canais de ataque são menores, a criação de duas frentes de metal (e seu posterior encontro) está ocasionando o grande índice de ocorrência de defeitos". A relação entre as diferenças nas áreas e os índices de ocorrência dos defeitos está evidenciada nos valores das tabelas 9 e 10, além da argumentação do item 9.3'. Deve-se ressaltar que o processo de fundição sob pressão confere velocidades altíssimas ao metal líquido. Com isso, qualquer alteração (mesmo que milimétrica) das dimensões do sistema de canais pode causar resultados como os vistos para este modelo.

Assim, verifica-se a tendência de que os defeitos de aprisionamento de ar só estão ocorrendo nas cavidades onde se tem uma área de canal de ataque (e também secundário) menor. Já que as outras cavidades não apresentam índices de ocorrência de defeitos relevantes, pode-se ver que a área de canal de ataque utilizada para estas cavidades está satisfatoriamente dimensionada. Portanto, a única alteração sugerida para o sistema de canais do modelo "β" é:

- Modificar todas as áreas de ataque: isto no sentido de uniformizar estes valores para as cavidades. O valor adotado seria o da cavidade N2 (a maior área) já que apresenta um baixo índice de ocorrência de defeitos associado ao fato da viabilidade da alteração. Isso porque é mais fácil se usinar as áreas das outras cavidades (aumentando-as) do que se soldar para se diminuir o valor destas áreas (no caso de se querer atingir um valor médio entre as cavidades).

Seria conveniente também a uniformização de todas as áreas dos canais secundários, no sentido de aumentar todos os valores até a área deste canal na cavidade N1 (a maior de todas). Isso também pelos fatos apresentados nas tabelas 9 e 10, apesar de que o mais importante é a área do canal de ataque.

É conveniente se destacar que a simplicidade das alterações está relacionada ao intuito de se querer manter a configuração básica do molde. O ideal seria se ter um projeto de canais que se promovesse o preenchimento das cavidades numa única frente de metal líquido; o canal de alimentação primário sofrer uma redução gradual de espessura (para se preencher todas as cavidades ao mesmo tempo); entre outros. Porém, tais alterações (mais profundas) irão requerer a troca do molde, o que não é o objetivo do trabalho, mas sim propor alternativas a partir do molde já existente.

IV) Conclusão

Em frente ao discutido neste trabalho, é possível concluir sobre os seguintes aspectos:

- ✓ O encontro das frentes de metal é um fator crítico na formação de defeitos de bolhas de ar preso;
- ✓ O ar contido no interior do molde só pode sair do mesmo através das bolsas e saídas de ar. Caso haja a criação de frentes de metal líquido, torna-se impraticável o controle para que o encontro destas frentes ocorra nas regiões das bolsas e saídas de ar;
- ✓ Para minimizar este aprisionamento de bolhas de ar (um dos principais defeitos da fundição sob pressão), é necessário o preenchimento da cavidade por uma única frente de metal líquido;
- ✓ Um projeto do sistema de canais bem elaborado exerce forte influência no sentido de diminuir a ocorrência de defeitos de fundição. Não só o projeto, como a confecção do molde e seu sistema de canais, devem ser feitos com o máximo de precisão, pois diferenças nas dimensões dos canais de ataque interferem na forma de preenchimento das cavidades.

A partir deste trabalho, outras propostas de estudo podem ser feitas, no sentido de se aperfeiçoar as constatações descritas. Primeiramente, seria interessante se efetuar as modificações sugeridas nos respectivos moldes. Assim, poderia se verificar a eficácia das alterações propostas. Além do projeto do sistema de canais, outros elementos poderiam ser analisados como forma de se diminuir o índice de refugo (para qualquer tipo de peça injetada). Por exemplo, o estudo dos parâmetros de máquina utilizados ou da composição química e temperatura da liga utilizada.

V) **Bibliografia**

- 1- DOEHLER, H.H.; **Die Casting**; McGraw-Hill; 1951.
- 2- FUOCO, R.; Apostila **Fundição sob pressão de ligas de alumínio**; Nov. 1998.
- 3- Apostila do SENAI; **Tecnologia de fundição sob pressão de alumínio suas ligas e zamac**.
- 4- American Foundrymen's Society, Inc. (AFS); **Aluminum Casting Technology**; 2nd edition; 1993.
- 5- Associação Brasileira de Metais (ABM); **Fundição sob pressão**; 2^a edição; 1978.
- 6- ASM International; **Metals Handbook**; vol. 15 – Casting; 9th edition; pag. 286-295 e 589-597.
- 7- Society of Automotive Engineers (SAE); **SAE Handbook**; part 1; 1981; pag. 11.08-11.11.
- 8- Fonseca, M.T.; **Defeitos em peças de alumínio fabricadas pelo processo de fundição sob pressão**; SENAI/CETEF-JICA, Itaúna, 2000.
- 9- Apostila da Bühler; Seminário de 2001.
- 10- Tai, C.C., Lin, J.C.; "A runner-optimization design study of a die-casting die"; **Journal of Materials Processing Technology**; n. 84; pag. 1-12; 1998.
- 11- Tai, C.C., Lin, J.C.; "The optimal position for the injection gate of a die-casting die"; **Journal of Materials Processing Technology**; n. 86; pag. 87-100; 1999.