



---

**Marina Orfali**

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

**Fundição de Pistões**

Trabalho de Formatura para  
Graduação na Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

Orientador: Hélio Goldenstein

**São Paulo**  
1998

## **Agradecimentos**

Aos meus pais que sempre me incentivaram e estiveram ao meu lado desde o início.

Aos professores da EPUSP que cooperaram na orientação do trabalho e superação dos diversos obstáculos ao longo de toda minha vida acadêmica.

Aos amigos da Mahle-Metal Leve que me incentivaram e estiveram ao meu lado durante a execução deste trabalho, em especial a Laurent Michel Rondet e Omar Ulisses Olmoz Muñoz.

# ÍNDICE

<b>RESUMO</b>	<b>2</b>
<b>1. IMPORTÂNCIA INDUSTRIAL</b>	<b>3</b>
<b>2. INTRODUÇÃO</b>	<b>6</b>
2.1. COMPOSIÇÃO DA LIGA	8
2.2. METALURGIA DO METAL LÍQUIDO - REFINO	9
2.2.1. Refino da Fase $\alpha$	10
2.2.2. Refino do Silício	10
2.3. METALURGIA DO METAL LÍQUIDO - ESCORIFICAÇÃO	13
2.4. METALURGIA DO METAL LÍQUIDO - DESGASEIFICAÇÃO	15
2.4.1. O Hidrogênio em Ligas de Alumínio	16
2.4.1.1. Fluxos Sólidos <sup>[7]</sup>	18
2.4.1.2. Fluxos Gasosos <sup>[7][12]</sup>	19
2.5. VAZAMENTO - FORMAÇÃO/INCLUSÃO DE ÓXIDOS	21
2.6. SOLIDIFICAÇÃO	23
2.6.1. A Zona Acoplada	23
2.6.2. Nucleação na Solidificação Eutética	25
2.6.3. Características de Crescimento	26
2.6.4. Sequência de Solidificação das Ligas Eutéticas	27
2.7. PREOCUPAÇÃO COM DEFEITOS	29
2.8. SIMULAÇÃO DE SOLIDIFICAÇÃO - SOFTWARES PARA FUNDIÇÃO	31
<b>3. ESCOPO DO TRABALHO</b>	<b>34</b>
3.1. DESCRIÇÃO DA PEÇA ESCOLHIDA	35

<b>4. METODOLOGIA UTILIZADA</b>	<b>38</b>
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS DEFEITOS	38
4.2. LIGA UTILIZADA	43
4.3. FUSÃO E MOLDAGEM	43
4.4. MICROSCOPIA ÓPTICA	44
4.5. PREPARAÇÃO DE MACROGRAFIAS	44
4.6. ANÁLISE QUÍMICA	44
4.7. SIMULAÇÃO	45
4.8. AÇÕES TOMADAS PARA SOLUÇÃO PARTICULAR DE CADA DEFEITO	45
4.8.1. Defeito A	45
4.8.2. Defeito B	46
4.8.3. Defeito C	47
4.8.4. Defeito D	47
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>50</b>
5.1. RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA	50
5.2. RESULTADOS DAS AÇÕES TOMADAS PARA O ATAQUE AOS DEFEITOS	51
5.2.1. Defeito A	51
5.2.2. Defeito B	52
5.2.3. Defeito C	53
5.2.4. Defeito D	54
5.2.4.1. Processo 1	55
5.2.4.2. Processo 2	57
5.2.4.3. Processo 3	59
5.2.4.4. Processo 4	61
5.2.4.5. Visão Geral Sobre os Processos Testados	63
5.3. SIMULAÇÃO	67
5.3.1. Processo de Produção	68
5.3.2. Processo Sugerido	74
5.4. O PROCESSO SUGERIDO E RESULTADOS DO SEU TESTE	80

5.5. DEMONSTRAÇÃO DE RESULTADOS OBTIDOS NA LINHA DE PRODUÇÃO DA INDÚSTRIA ATRAVÉS DE ACOMPANHAMENTO DE REFUGO PARA AS MUDANÇAS QUE SE TORNARAM EFETIVAS-----	81
<b>6. CONCLUSÕES-----</b>	<b>84</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS-----</b>	<b>86</b>

## **Resumo**

Este trabalho inicia-se com revisão bibliográfica para compreensão da causa e do mecanismo de formação de alguns defeitos, provenientes da etapa de fundição de peças em alumínio.

Esse embasamento teórico e o uso de técnicas metalográficas serão aliados a um instrumento de simulação de solidificação de peças fundidas, o MagmaSoft.

O objetivo principal deste trabalho é o estudo de todo o processo de fundição de uma peça de alta produção, desde a preparação da liga, até a peça solidificada a fim de que ações para redução de refugo de peças provenientes do processo possam ser tomadas.

O produto escolhido, um pistão automotivo, foi em função da sua dificuldade de fabricação e ao alto grau de refugo da peça, que exige um estudo profundo de todo o processo de maneira a reduzir as perdas na indústria.



## 1. Importância Industrial

O crescimento da indústria automobilística nos últimos anos, foi responsável pela retomada da produção de peças fundidas no país, que pode ser observada na figura 1.

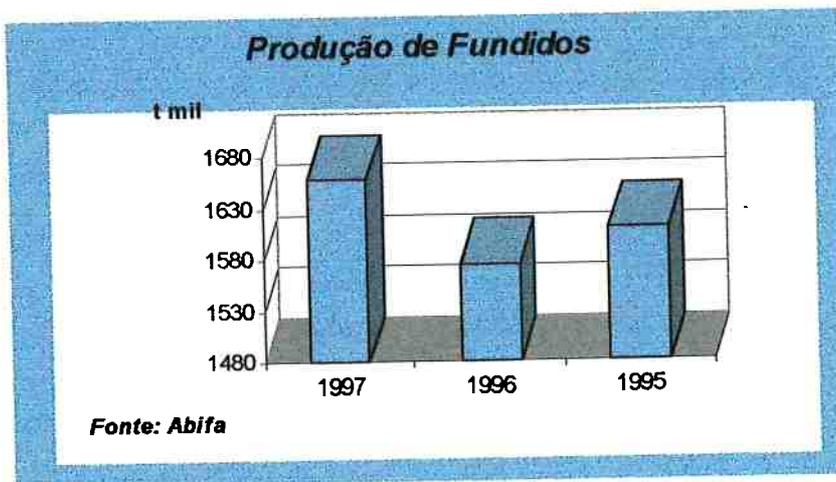


Figura 1: Produção de Fundidos no Brasil<sup>[26]</sup>

A utilização das ligas de alumínio neste ramo tem crescido bastante nos últimos tempos, sendo a indústria automobilística a responsável pelo



consumo de mais de 60% da produção nacional de peças fundidas em alumínio<sup>[1]</sup> como pode ser observado na figura 2.

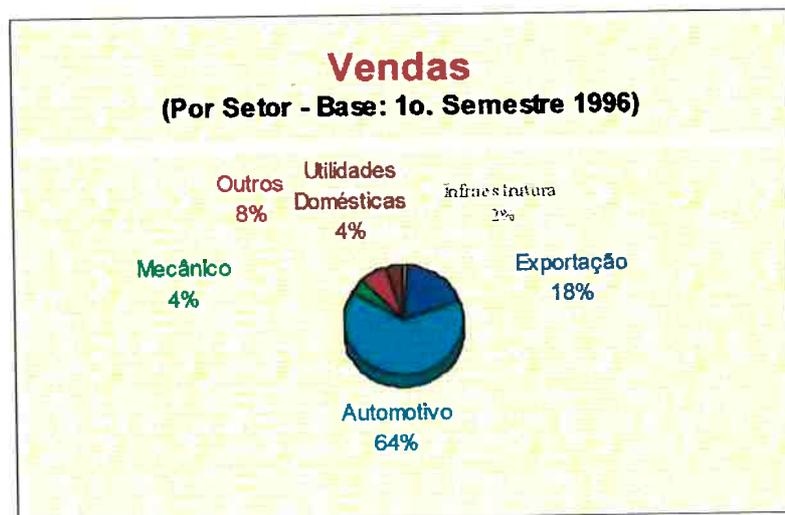


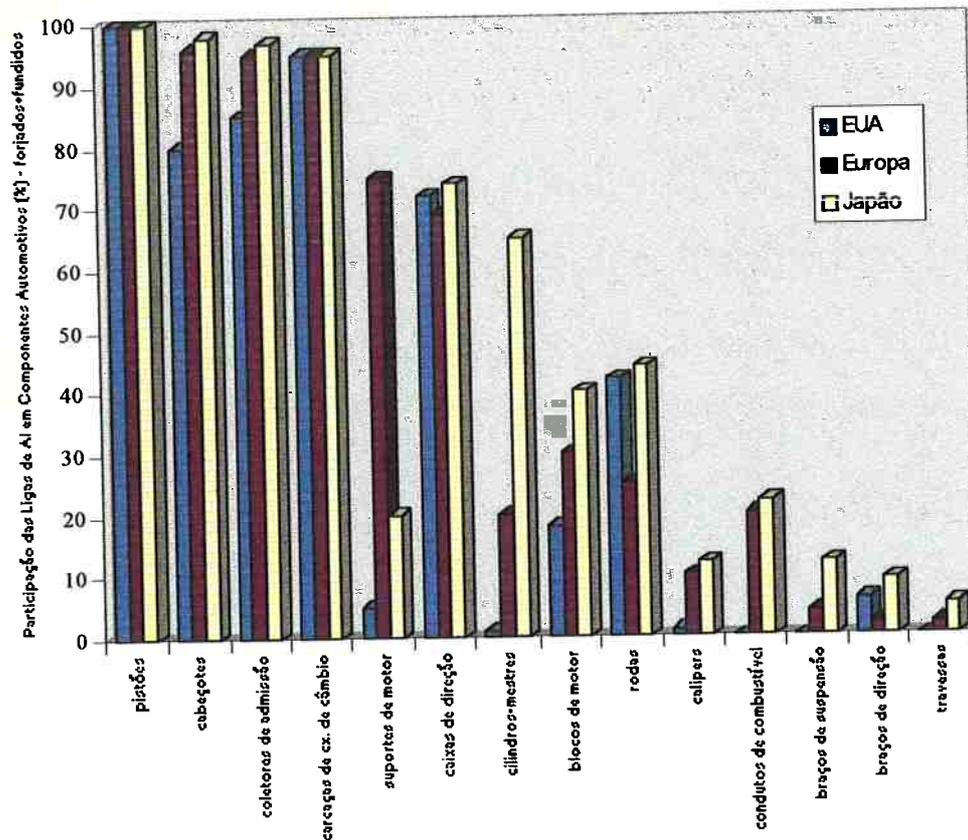
Figura 2: Mercado de Fundidos<sup>[1]</sup>

No ano de 1997 a produção de peças fundidas em alumínio cresceu 11,3% em relação ao ano anterior.<sup>[2]</sup>

O objeto de estudo deste trabalho, os pistões, enquadram-se nesta categoria: peças voltadas ao atendimento da indústria automobilística, fundidas em liga de alumínio, utilizando moldes metálicos.

Das peças fundidas em alumínio, os pistões são destaque na indústria de auto-peças. A figura 3 mostra a participação percentual das ligas de alumínio fundidas em alguns componentes automotivos.





**Figura 3: Penetração de Ligas de Alumínio em Alguns Componentes Automotivos<sup>[3]</sup>**

Os pistões são fundidos em ligas de alumínio devido a estas ligas reunirem um conjunto de propriedades que atendem tanto às necessidades de produção, como de aplicação. Uma propriedade da liga utilizada para produção de pistões (ligas alumínio-silício) é a sua alta fluidez. A alta condutibilidade térmica dessas ligas, sua boa resistência à corrosão e ao desgaste e principalmente sua alta relação resistência mecânica/peso são importantes propriedades para um bom atendimento das necessidades de um pistão.

Além disso, a facilidade de coquilhamento das ligas de alumínio torna possível a fundição de muitos componentes em moldes metálicos.



O processo industrial que apresenta melhor combinação entre qualidade metalúrgica, custo de produção e investimento inicial é a fundição em moldes metálicos vazados por gravidade.<sup>[4]</sup>

O processo de fundição em molde permanente apresenta a vantagem de produzir uma estrutura mais refinada, devido a maior velocidade de resfriamento, por isso, melhora as propriedades mecânicas; reduz o custo de produção por dispensar moldagem e permite excelente acabamento superficial e boa precisão dimensional.<sup>[19]</sup>

Para a garantia da qualidade metalúrgica, deve-se ter o máximo de cuidado durante o vazamento do metal, a fim de evitar formação e incorporação de óxidos, problema bastante comum em fundição por gravidade.<sup>[5]</sup>

Sendo o pistão uma peça sujeita à alta solicitação mecânica, o tipo de microestrutura obtida é principal responsável por seu desempenho. O preparo da liga, o refino da mesma, seu processo de desgaseificação, o modo de vazamento e principalmente o modo de solidificação dessa liga tem influência direta na microestrutura obtida.



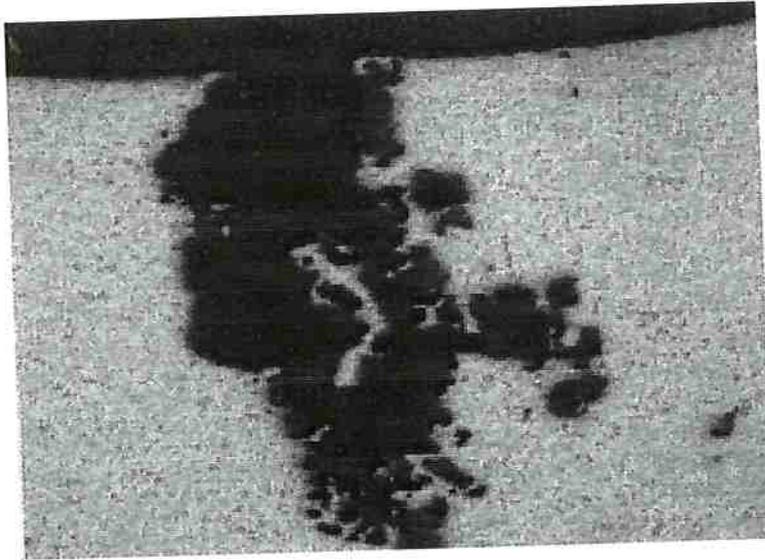
## 2. Introdução

Para uma boa qualidade metalúrgica e um bom desempenho em uso de peças fundidas em alumínio solicitadas mecanicamente, alguns aspectos durante sua fabricação devem ser cuidadosamente observados:

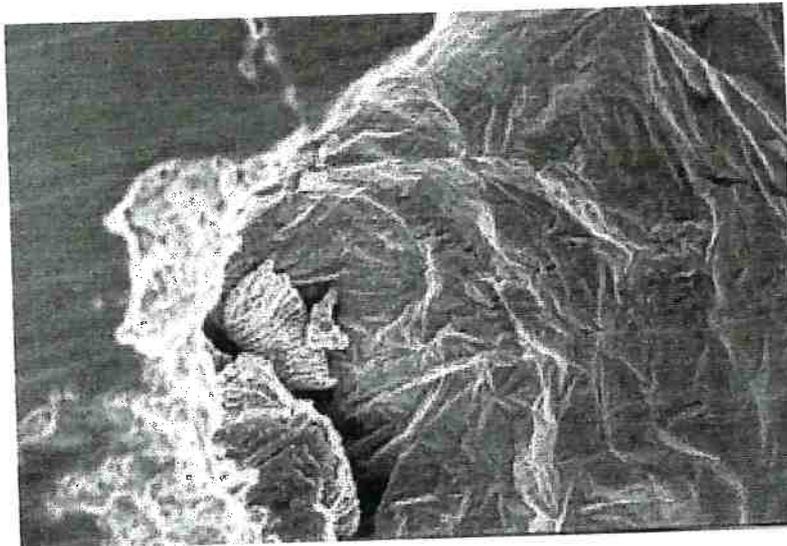
- \* composição da liga<sup>[6]</sup>
- \* tratamento do metal líquido<sup>[7]</sup>
  - ⇒ refino de grão
  - ⇒ escorificação
  - ⇒ desgaseificação
- \* vazamento<sup>[3][6]</sup>
  - ⇒ formação/inclusão de óxidos
- \* solidificação<sup>[8]</sup>
  - ⇒ porosidades/rechupes
  - ⇒ bolhas de gases

As figuras 4 e 5 mostram presença de porosidades e inclusão de óxido em um pistão fundido por gravidade em molde permanente:





**Figura 4: Porosidade em Pistão. Foto Tirada no Laboratório da Metal Leve, Sem Ataque. Microscopia Óptica. Aumento: 50X**



**Figura 5: Óxido em Pistão. Foto Tirada no Laboratório da Metal Leve, Sem Ataque. Microscopia Eletrônica de Varredura. Aumento: 95X**



## 2.1. Composição da Liga

O alumínio puro é um metal bastante mole, devendo, por isso, apresentar-se em forma de liga para a aplicação aqui discutida. A composição química da liga é fundamental para a obtenção dos resultados desejados.

A necessidade de um maior limite de escoamento, resistência e dureza exige a presença de determinados elementos de liga. Os principais elementos utilizados são relacionados a seguir, bem como sua função principal na liga.<sup>[7][9][10][16]</sup>

- \* **Silício:** é responsável pelo aumento de fluidez da liga até o teor eutético e pela redução da contração de solidificação da peça de 6,6% do alumínio puro para 3,5% em uma liga contendo 12% de silício. O silício ainda reduz a densidade da liga, quando comparada com alumínio puro. A fase  $\beta$  (ver figura 6), é bastante dura, melhorando a resistência ao desgaste da liga.

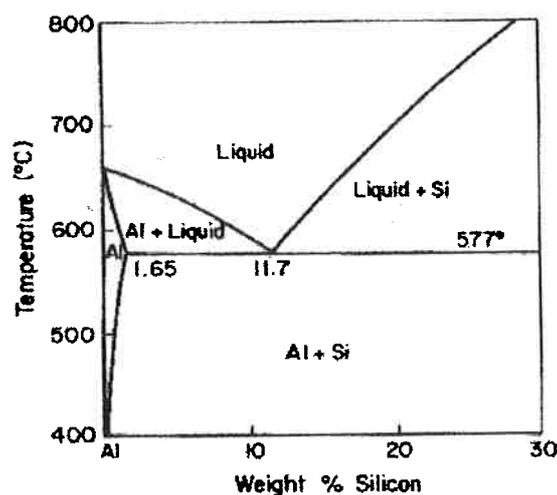


Figura 6: Diagrama de Fase Al-Si<sup>[20]</sup>



- \* **Cobre:** é responsável pelo aumento de dureza e resistência da liga. Essa propriedade pode ser explicada por dois diferentes motivos: o primeiro é o fato da grande solubilidade do cobre no alumínio e de seu efeito endurecedor por solução sólida; o segundo é o fato de o cobre tornar a liga envelhecível por fases metaestáveis.
- \* **Magnésio:** O magnésio também contribui para o aumento de dureza da liga, por precipitação incoerente das fases  $Mg_2Si$  ou  $Cu_2Mg_8Al_5$ . O magnésio também é capaz de endurecer a liga por envelhecimento.
- \* **Fósforo:** O fósforo, mesmo em quantidades reduzidas, forma a fase fosfeto de alumínio, que serve como núcleo de cristalização de silício; sua presença, portanto, tem o intuito de favorecer a formação de cristais de silício mesmo em ligas eutéticas, servindo assim como refinador de estrutura.

## 2.2. Metalurgia do Metal Líquido - Refino

O refino visa a obtenção de estrutura mais homogênea e de grãos finos.<sup>[10]</sup>

O refino de grão consiste em duas etapas: nucleação de novos grãos provenientes do metal líquido (heterogênea) e subsequente crescimento dos novos cristais até um tamanho limitado. Ambos os processos são supridos pelo superresfriamento ( $\Delta T$ ) em relação às condições de equilíbrio do sistema.<sup>[8]</sup>



Existem duas possibilidades de refino para as ligas Al-Si de composição muito próximas do eutético: o refino da fase  $\alpha$  e o refino dos cristais de silício. Para cada uma das fases é tomada uma medida diferente para a obtenção dos resultados.

Para o caso das ligas alumínio-silício eutéticas procura-se controlar tanto a fase  $\alpha$  quanto os cristais de silício.

### 2.2.1. Refino da Fase $\alpha$

Uma das maneiras de se refinar a fase  $\alpha$  é através de superresfriamento.

Durante a solidificação de uma peça vazada em molde metálico em escala industrial, é comum encontrar-se uma estrutura de grãos colunares seguida por uma estrutura equiaxial. O tamanho desses grãos é função da temperatura de vazamento do metal, do pré-aquecimento do molde e da troca de calor que ocorre entre o metal e o molde, e das alterações de composição química do líquido.<sup>[7][10]</sup>

É desejável que a estrutura obtida possua o menor tamanho de grão possível. A obtenção de estrutura equiaxial é bastante desejável, de maneira a otimizar as propriedades mecânicas da peça fundida, resistência a trincas a quente, melhor facilidade de fluxo de massa (melhora a alimentação local) e melhor acabamento superficial. Além disso, a redução de porosidade atribuída à contração de solidificação é inegável.<sup>[8][11]</sup>

### 2.2.2. Refino do Silício

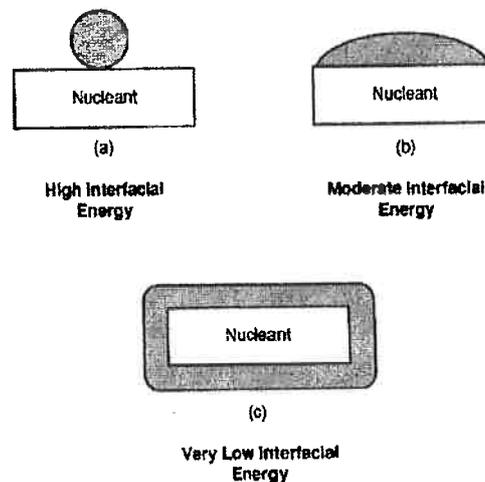
Para uma boa resistência ao desgaste e boa usinabilidade, é preciso obter-se uma fina e uniforme distribuição dos cristais de silício.



A redução do tamanho de cristal está diretamente ligada à nucleação heterogênea do silício.<sup>[11]</sup>

É comum o tratamento de refino das ligas de alumínio-silício com fósforo, que representa um dos melhores substratos para o silício.<sup>[13][17]</sup>

Para que isso ocorra, não é qualquer partícula sólida no banho metálico que servirá como substrato para os cristais de Si. Para que haja a nucleação heterogênea, a energia de interface entre o nucleante e o núcleo deve ser baixa para que o núcleo envolva todo o nucleante, como pode ser visto na figura 7c.<sup>[20]</sup>



**Figura 7: Molhamento do Nucleante pelo Núcleo<sup>[20]</sup>**

Em ligas eutéticas para pistões costuma-se adicionar fósforo com o intuito do refino da estrutura. As razões do refino das ligas eutéticas não são bem conhecidas.<sup>[20]</sup> Acredita-se que o mecanismo de refino das ligas eutéticas seja semelhante ao das ligas hipereutéticas.

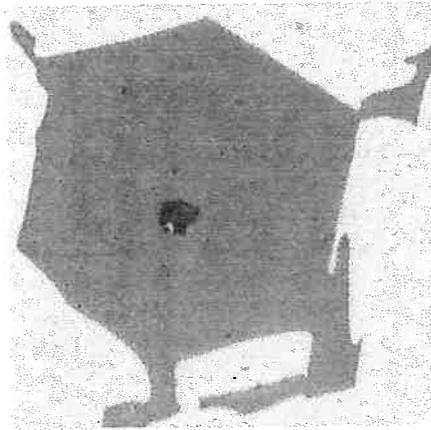
O intuito da tratamento não é só obter um tamanho de grão controlado, mas também influir para que haja co-precipitação das duas fases,  $\alpha$  e Si.<sup>[8]</sup>



Geralmente esse fósforo é adicionado em compostos de cobre. O fósforo reage com o alumínio formando uma fase bastante fina e dispersa,  $\text{AlP}$  ou  $\text{AlP}_3$ , que é bastante eficiente para a nucleação heterogênea do silício.<sup>[7][12]</sup>

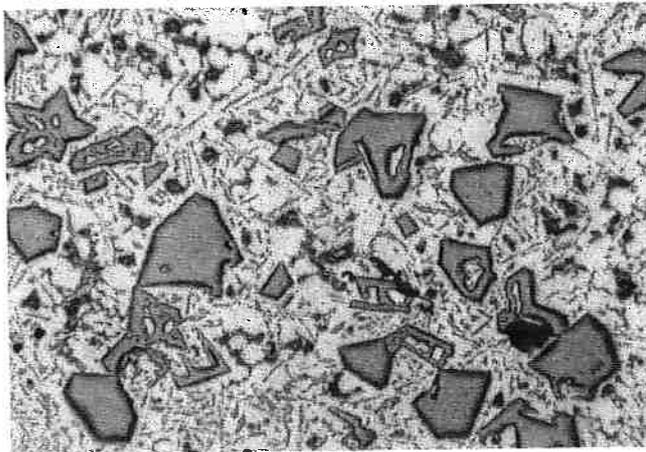
O mecanismo do refino de silício feito com fósforo é um fenômeno de nucleação que influencia o tamanho e a forma do cristal de silício.

A figura 10 mostra uma partícula primária de silício nucleada sobre uma partícula de  $\text{AlP}_3$ .



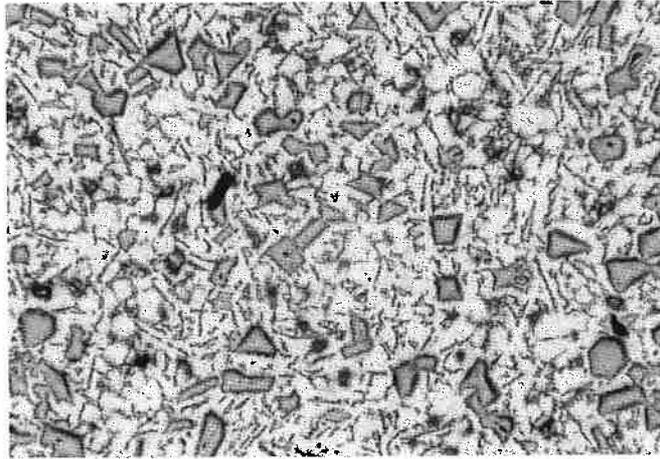
**Figura 10: Partícula Primária de Silício Nucleada sobre  $\text{AlP}_3$ <sup>[12]</sup>**

As figuras 11 e 12 mostram a diferença entre duas ligas alumínio-silício: uma sem refino e outra refinada com fósforo.



**Figura 11: Microestrutura de Liga Al-Si, sem Refino. Sem Ataque. Aumento 56X<sup>[8]</sup>**





**Figura 12: Microestrutura de Liga Al-Si, Refinada com 0,03% de P. Sem Ataque.  
Aumento 56X<sup>[8]</sup>**

Para que o refino feito com fósforo seja eficiente, o banho metálico deve conter a menor quantidade de sódio e cálcio pois esses dois elementos são bastante prejudiciais a essa prática, principalmente o sódio que fixa o fósforo em um composto quaternário contendo Al, Si, P e Na, eliminando os núcleos de fosfeto de alumínio.<sup>[12]</sup>

### *2.3. Metalurgia do Metal Líquido - Escorificação*

O alumínio possui certas características que causam reações indesejáveis que podem comprometer a qualidade do produto final. A elevadas temperaturas o alumínio se combina rapidamente com o oxigênio formando óxidos. A quantidade de óxidos formada cresce com o aumento da temperatura.<sup>[12]</sup>

Outro problema na fundição de alumínio é o fato de o mesmo absorver gases com facilidade, em especial o hidrogênio.<sup>[12]</sup>

Existem diversos tipos de fluxos a serem usados, sendo de grande interesse os que desempenham as seguintes funções:<sup>[12]</sup>



- \* fluxos de cobertura: reduzem a absorção de gás, reduzem a formação de borra por oxidação e conseqüentemente a perda de metal. [7]
- \* fluxos para limpeza: são usados para a remoção de inclusões não metálicas presentes no banho.
- \* fluxos desgaseificantes: reduzem a quantidade de gás (principalmente hidrogênio) presente no banho.

Misturas de cloretos são geralmente usadas como fluxos de cobertura pois protegem o mesmo de oxidação e absorção de gases. Podem promover certo grau de limpeza do metal ocasionalmente mas, não são eficientes para molhamento e coalescimento das impurezas não metálicas presentes no banho.

O tratamento de escorificação para limpeza utiliza-se de um fluxo escorificante, que reage com óxidos e outras impurezas, aglomerando-os através de uma reação exotérmica. [7][12]

É bastante comum a presença de fluoretos nesse tipo de fluxo. Os fluoretos molham as partículas de óxido suspensas no banho e as arrasta para a superfície.

É necessário que nesse processo haja a menor perda possível de alumínio do banho metálico para essa escória. O aspecto do produto obtido é seco e pulverulento. Deve-se tomar o cuidado de remover muito bem o produto dessa reação, a fim de evitar possíveis inclusões na peça fundida.

Os principais constituintes da escória do alumínio são:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , Al, MgO, Mg, Si,  $\text{SiO}_2$ , CuO e  $\text{Cu}_2\text{O}$ . [7]

O fluxo desgaseificante será discutido mais a frente.

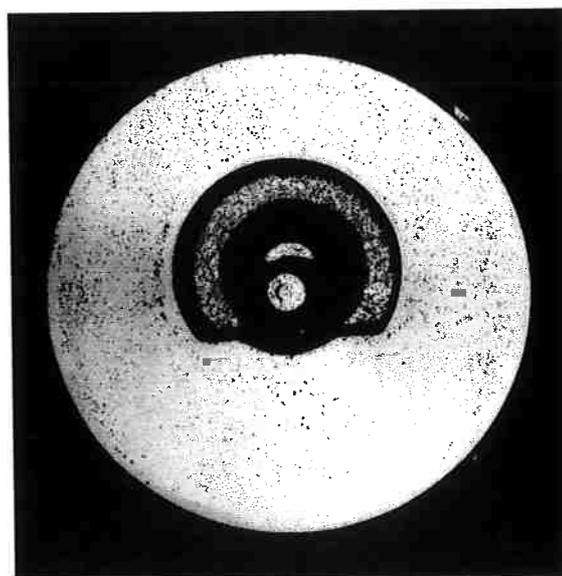


O tipo de fluxo a ser usado é, em geral, escolhido pela aplicação final da peça. No caso de ligas próprias para fundição de pistões a liga deve ser livre de qualquer tipo de inclusão. Por isso é bastante comum o uso de fluxos de limpeza contendo fluoretos.<sup>[12]</sup>

#### 2.4. Metalurgia do Metal Líquido - Desgaseificação

O metal líquido é capaz de absorver grande quantidade de gás sob certas condições. Durante a fusão o metal entra em contato com gases e, no caso do alumínio, o hidrogênio é capaz de se dissolver facilmente e com grande rapidez, ficando em solução no banho metálico. Além do hidrogênio, pode-se encontrar também problemas de porosidade devido a gases como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$  e  $\text{O}_2$ .<sup>[7]</sup>

Quando o metal líquido é vazado no molde, resfria rapidamente. O gás, que antes estava em solução, devido a diferença de solubilidade entre sólido e líquido, precipita e fica aprisionado na peça solidificada em forma de bolhas. A figura 13 mostra uma peça usinada, apresentando problemas de precipitação gasosa numa peça fundida.



**Figura 13: Pistão Recusado Devido a Presença de Gases.**



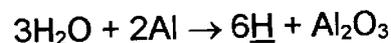
### 2.4.1. O Hidrogênio em Ligas de Alumínio

A grande causa de porosidades devida a gases em peças fundidas em alumínio é a grande diferença de solubilidade do hidrogênio existente entre o metal líquido e sólido (ver figuras 14 e 15, que mostram a solubilidade do hidrogênio no alumínio, em função da temperatura).

É sabido que somente os gases no estado atômico são dissolvidos no metal líquido.<sup>[12]</sup>

Quando dois átomos de hidrogênio se combinam, formam uma molécula e tendem a escapar. Porém, esse gás pode ficar retido na peça sólida na forma de bolhas.

O principal mecanismo de absorção de hidrogênio pelo alumínio é na forma de vapor. O vapor d'água é o mecanismo mais comum e contém 9% de hidrogênio em peso. O hidrogênio se decompõe segundo a reação:



## Solubilidade do $H_2$ no Alumínio

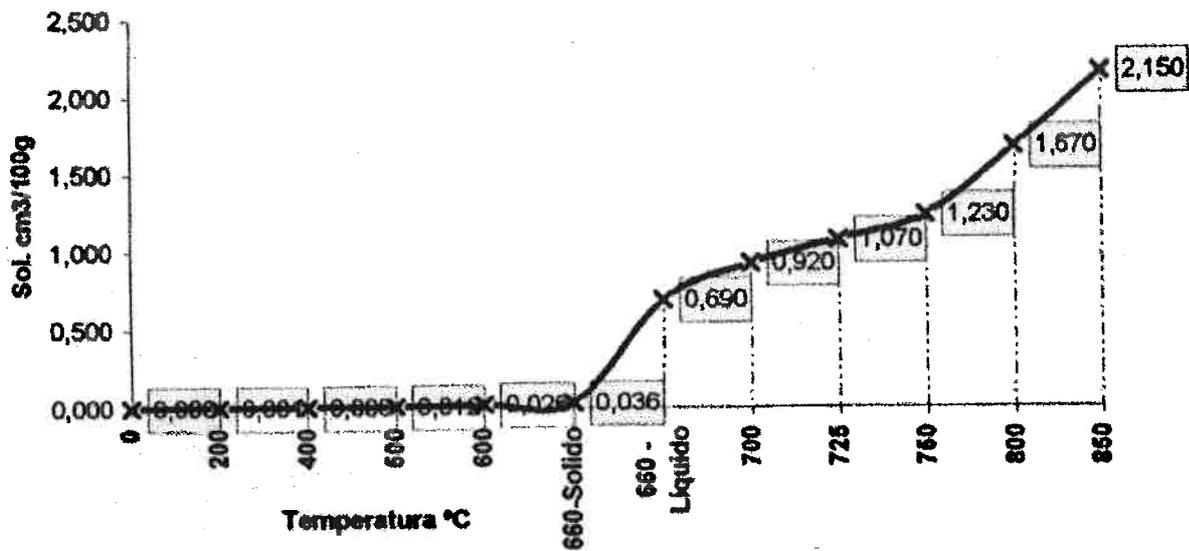


Figura 14: Solubilidade do Hidrogênio no Alumínio<sup>[7]</sup>

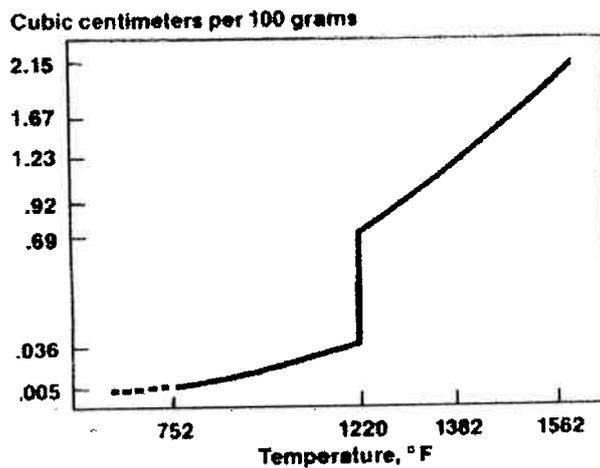


Figura 15: Diagrama Esquemático da Solubilidade do Hidrogênio do Alumínio<sup>[12]</sup>

A temperatura de fusão e o tempo de permanência em determinadas temperaturas estão diretamente ligados a quantidade de hidrogênio absorvida pelo alumínio.<sup>[7][12]</sup>

A presença de cálcio e sódio promovem um aumento da porosidade devida a gás, especialmente em ligas para pistões.<sup>[16]</sup>



Uma camada de óxido de alumínio se forma na superfície do banho metálico em contato com o ar. O hidrogênio retido nessa camada produzirá porosidade nas peças fundidas, durante um vazamento turbulento.<sup>[12]</sup>

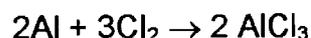
Para reduzir o problema de porosidade em peças fundidas devido ao hidrogênio, é comum o tratamento da liga com fluxos desgaseificantes que podem aparecer tanto na forma sólida quanto na forma de gases. Esses fluxos tem como objetivo remover gases da massa metálica, promovendo simultaneamente a flutuação de óxidos e inclusões, facilitando sua posterior remoção por escumagem.

Na forma sólida é bastante comum o uso de sais que são introduzidos no metal líquido com a ajuda de um sino. Esses sais são a base de compostos com cloro, sendo muito usado o hexacloretano ( $C_2Cl_6$ ). Também pode-se encontrar sais a base de nitrogênio com o mesmo fim.

Os fluxos gasosos são diversos: gases inertes ou misturas injetadas através de lança com plug poroso; injeção de cloro através de lança; injeção de cloro ou gases inertes com um rotor.

#### 2.4.1.1. Fluxos Sólidos<sup>[7]</sup>

O principal fluxo sólido para remoção de hidrogênio é o hexacloretano,  $C_2Cl_6$ , um sólido cristalino que sublima a  $183^\circ C$ . Ele atua segundo as reações:





A eliminação de hidrogênio no caso acima, se dá através de uma reação química gerando HCl gasoso, que arrasta em direção à superfície do banho, óxidos e inclusões que estejam em suspensão. A formação de  $\text{AlCl}_3$ , uma fumaça branca, também elimina óxidos e hidrogênio por arraste mecânico.

#### 2.4.1.2. Fluxos Gasosos<sup>[7][12]</sup>

A adição de fluxos gasosos no banho é responsável pela formação de bolhas que promovem o arraste do hidrogênio para fora do banho metálico.

As bolhas de gás formadas no banho vão subindo e, durante esse processo o hidrogênio vai se difundindo nas mesmas devido a diferença entre sua pressão parcial no banho e nas bolhas.<sup>[12]</sup>

Os principais fluxos gasosos são:

- \* Cloro.
- \* Nitrogênio.
- \* Argônio.
- \* Mistura de Gases.

Cloro: O gás cloro é introduzido no banho através de um tubo de grafite ou aço protegido com tinta refratária, ou ainda combinado com argônio através de rotor. O cloro possui duas vantagens e relação aos demais fluxos - produz bolhas de baixa pressão que carregam hidrogênio e outras



impurezas. Quimicamente falando, o cloro reage com alumínio formando cloreto de alumínio que molha as partículas não metálicas e as arrasta para a superfície do banho. Deve-se tomar o cuidado de que a ação dos gases não seja muito violenta de forma a evitar turbulência no metal. Além disso, sendo o cloro bastante tóxico e corrosivo, deve-se tomar o máximo de cuidado com o seu manuseio.

Nitrogênio, Argônio e Mistura de Gases: A forma de introdução desses gases pode ser a mesma do cloro, diferenciando-se apenas a diferença do tratamento. O uso desses gases atua apenas com o mecanismo de arraste mecânico, o que faz do uso do cloro, um desgaseificante mais eficiente. O nitrogênio e o argônio não apresentam a mesma capacidade de molhamento de partículas não metálicas que o cloro.

A adição de fluxos com rotor de grafite é a que apresenta maior eficácia no tratamento do banho metálico. O rotor promove a geração de um grande número de microbolhas, o que promove maior eficiência na remoção dos gases e óxidos. A figura 16 mostra a comparação entre os três métodos de desgaseificação mais utilizados.

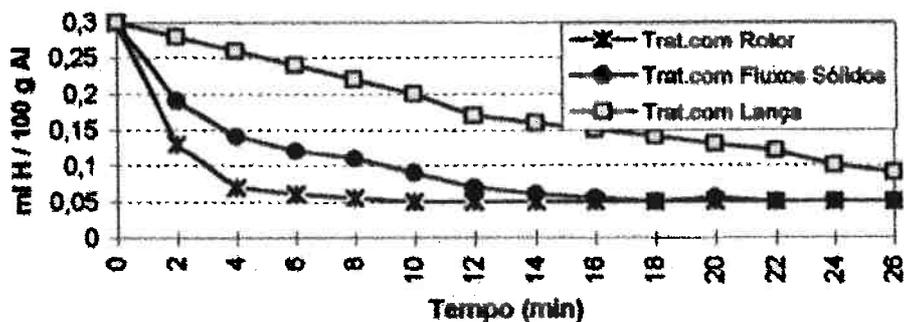
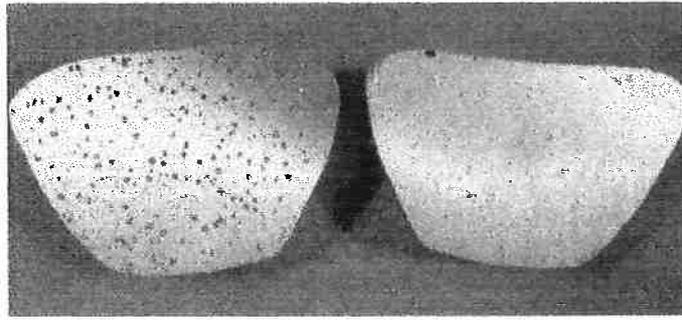


Figura 16: Eficiência dos Métodos de Desgaseificação<sup>[7]</sup>

A figura 17 apresenta amostras solidificadas com desgaseificação e sem desgaseificação.





**Figura 17: Diferença entre Duas Amostras Sem e Com Tratamento de Desgaseificação Respectivamente<sup>[12]</sup>**

Sabe-se que existe relação entre a quantidade de gás presente no alumínio e a quantidade de inclusões de partículas de óxido.<sup>[12]</sup>

### *2.5. Vazamento - Formação/Inclusão de Óxidos*

Quando o alumínio líquido ou suas ligas em contato com a atmosfera reagem com a mesma, formam uma camada de óxidos e nitretos na superfície do banho.<sup>[18]</sup>

O aumento de escória formada pode ser relacionado com alguns fatores, dos quais se pode destacar:<sup>[3][12]</sup>

- \* presença de magnésio na liga.
- \* turbulência, o que pode causar a quebra do filme de óxido protetor na superfície do banho
- \* alta temperatura dos gases em contato com o banho metálico.

A quebra do filme superficial de óxido pode causar incorporação de óxido ao banho. Devido a pequena diferença de densidade entre o metal e o



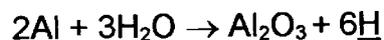
óxido, o mesmo fica suspenso no banho, podendo ser levado para a peça fundida durante o vazamento e ficar na mesma sob forma de inclusão. Essa quebra pode ocorrer tanto durante transporte e transferência da liga de um local para outro, quanto durante tratamento da liga e vazamento da mesma.

As ligas de alumínio são facilmente oxidáveis, formando comumente  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . O óxido formado é bastante estável, pois possui elevada energia livre de formação.<sup>[14]</sup>

Em ligas de alumínio contendo magnésio, pode-se encontrar também a formação de  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ .<sup>[15]</sup>

Para ambos os casos, o óxido presente aparece em forma de filme na superfície do banho, podendo ser quebrado sob as condições descritas anteriormente.

São duas as principais reações que levam à formação do óxido de alumínio, uma delas já discutida na seção 2.4.1. , com outro enfoque:



Para a solução desse problema, procura-se produzir banhos metálicos o mais livre possível de partículas de óxido em suspensão, tratar o banho evitando agitação, e fazer um vazamento cuidadoso de forma a evitar um regime turbulento do metal líquido dentro do molde.

Outro método comum, é o uso de filtros que podem ser de fibra de vidro ou materiais cerâmicos. O filtro é colocado em geral no canal de alimentação, antes da entrada do alumínio na peça. Dessa forma, procura-se filtrar o óxido presente, que pode ser proveniente tanto da quebra do filme de óxido presente na superfície do banho, como pode ter sido formado durante o vazamento.<sup>[20]</sup>



## 2.6. Solidificação

As ligas utilizadas na fundição de pistões são ligas de alumínio-silício eutéticas ou hipereutéticas. Ambas diferem no modo de solidificação devido à composição química que cada uma apresenta.

As ligas eutéticas Al-Si possuem solidificação do tipo anômala, com morfologia de flocos.<sup>[13]</sup> Possuem um arranjo estrutural irregular e a fase em menor proporção domina cristalograficamente; grãos não podem ser discernidos e não há uma relação preferencial de orientação (figura 18):

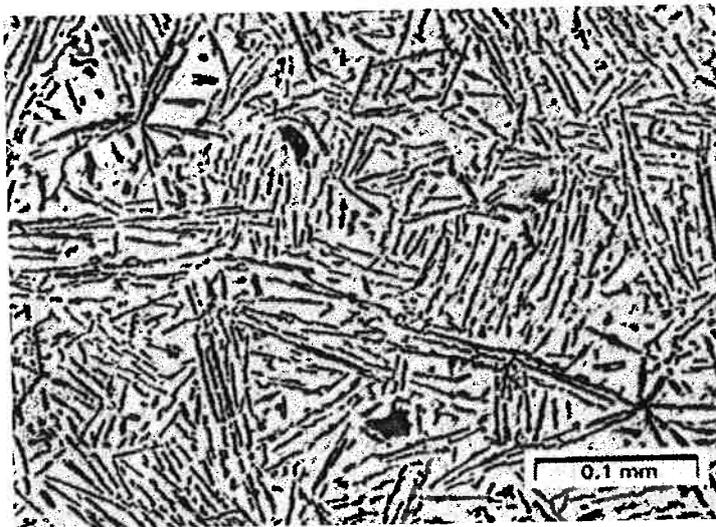


Figura 18: Microestrutura de uma liga eutética de solidificação Anômala<sup>[13]</sup>

### 2.6.1. A Zona Acoplada<sup>[13][17]</sup>

Os primeiros trabalhos distinguiam os tipos de eutético de acordo com um conceito introduzido por Kofler<sup>[13]</sup>: a zona acoplada. A zona acoplada é



uma área do diagrama de fases, de temperatura e composição definidas, onde as duas fases eutéticas podem crescer com velocidades similares, como pode ser visto na figura 19a.

Para o caso das ligas anômalas, a composição do líquido ficaria fora da zona acoplada. A solidificação da liga alumínio-silício teria início com a nucleação da fase  $\alpha$  e, depois, de cristais de silício. Neste caso, a nucleação do silício na liga eutética alumínio-silício, moveria a composição do líquido para longe da zona acoplada (figura 19b). O alumínio nuclearia sobre o cristal de silício ou no interior do líquido, e cresceria envolvendo as partículas de silício. Isso faria com que a composição do líquido voltasse à composição eutética, e o ciclo reiniciasse. Assim, as duas fases não poderiam crescer com a mesma velocidade e a seqüência de solidificação seria uma alternância entre nucleação e crescimento das fases eutéticas.

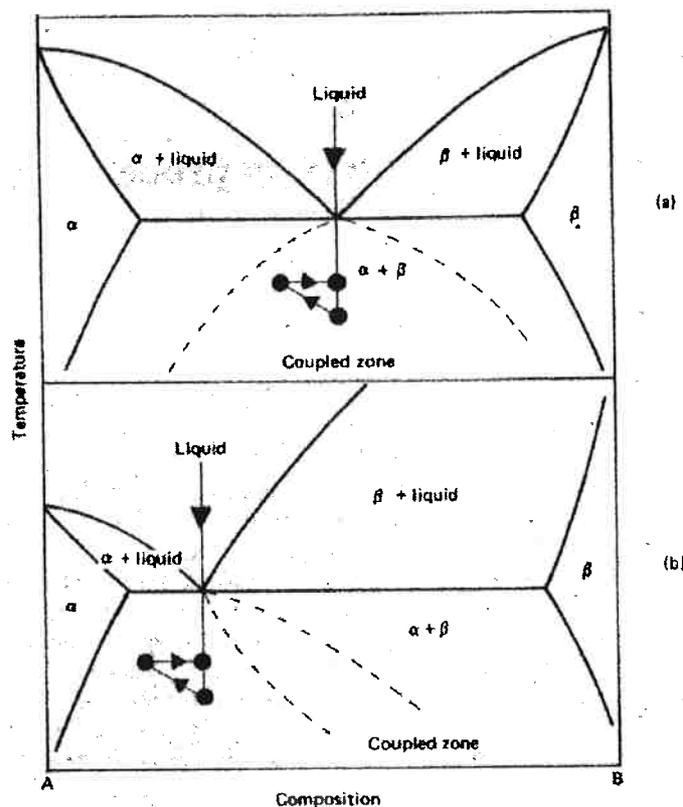


Figura 19: Evolução de solidificação de uma liga normal(a) e anômala (b) <sup>[13]</sup>



Essa teoria não está totalmente esclarecida uma vez que se verificou que o silício forma uma fase contínua durante a solidificação eutética. Assim, a solidificação anômala ou normal é analisada em termos do crescimento independente ou não das duas fases.

A zona acoplada fica sendo a região do diagrama onde a condição de solidificação das duas fases é tal que, ambas podem crescer com uma interface comum, a uma velocidade maior do que seria no caso das duas fases crescerem separadamente.

### **2.6.2. Nucleação na Solidificação Eutética**

A reação eutética ocorre por dois mecanismos simultâneos: nucleação e crescimento, durante todo o processo de solidificação.<sup>[13]</sup>

A nucleação tem início a uma temperatura inferior a temperatura de reação eutética de equilíbrio, de maneira heterogênea, de uma das fases eutéticas sobre os nucleantes presentes no líquido. Em seguida, ocorre a nucleação, também heterogênea, da segunda fase do eutético sobre a primeira.

O crescimento da primeira fase a nuclear depende da facilidade que a segunda fase tem de nuclear sobre a primeira.<sup>[17]</sup>

A temperatura de nucleação terá influência no tamanho de grão eutético ou no tamanho das células.

O tamanho de grão é inversamente proporcional ao número de núcleos ativos presentes no líquido durante a solidificação.<sup>[20]</sup>



### 2.6.3. Características de Crescimento

As ligas eutéticas (ou ligas que apresentam composição próximas ao eutético –12-13% de Si, aproximadamente), apresentam uma solidificação plana, dita "solidificação em casca" devido à pequena fração volumétrica de dendritas formadas.<sup>[3]</sup>

Para altas velocidades de resfriamento, como no caso de fundição em moldes metálicos, grande parte da solidificação se dá em casca e a fração de dendritas é inferior à encontrada em ligas hipoeutéticas. Por isso apresentam rechupes concentrados.<sup>[3]</sup>

Para este caso, se faz necessário o uso de massalotes para compensação de contração de solidificação nas peças fundidas. Isso ocorre em contra posição às ligas hipoeutéticas, que devido ao grande intervalo de solidificação, possuem uma solidificação dendrítica (pastosa), o que promove a formação de microporosidades distribuídas e dispensam, na maior parte dos casos o uso de massalotes.

O uso de massalotes nas ligas de solidificação plana é primordial para se evitar a formação de porosidades e de defeitos superficiais. A alimentação insuficiente é uma das causas mais sérias de formação de defeitos em ligas de alumínio fundidas.<sup>[21]</sup>

A estrutura dessas ligas é de células individuais no interior das quais as partículas de silício são facetadas e parecem estar conectadas. A matriz é composta de fase  $\alpha$  e quanto maior o superresfriamento (como no caso de moldes metálicos), maior o refino da estrutura.<sup>[10]</sup>

Morfologias facetadas ocorrem em fase de alta entropia e são consequência de um crescimento anisotrópico.



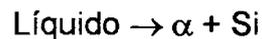
A interface sólido/líquido de uma fase de alta entropia é plana (em escala atômica).

O silício é um caso enquadrado nesta categoria, com interfaces (111) e, as vezes, (100).

Essas características de crescimento do silício são evidentes em uma frente de solidificação eutética.<sup>[11]</sup>

#### 2.6.4. Seqüência de Solidificação das Ligas Eutéticas

A primeira reação que ocorre é a reação eutética principal:



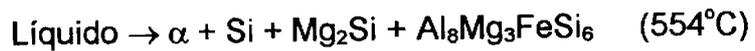
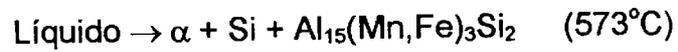
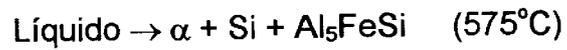
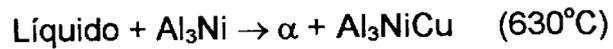
Além dessa reação, fases contendo ferro e manganês precipitarão após o eutético principal. As fases mais comumente encontradas numa peça fundida são  $\text{Al}_5\text{FeSi}$  e  $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$ . Ao final do processo de solidificação, as fases  $\text{Mg}_2\text{Si}$  e  $\text{CuAl}_2$ , e outras fases mais complexas, precipitam do líquido remanescente.<sup>[8]</sup>

A fase  $\text{Al}_5\text{FeSi}$  precipita em forma de plaquetas dispersas entre os cristais de silício.<sup>[16]</sup>

Algumas das fases complexas que podem estar presentes na matriz são:  $\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6\text{Al}_5$  e  $\text{FeMg}_3\text{Si}_6\text{Al}_8$ .<sup>[16]</sup>

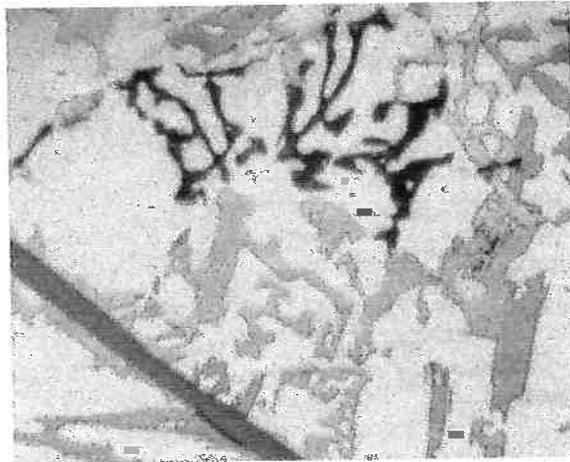
A liga 339.1, com composição bastante semelhante à liga de interesse neste trabalho, tem suas reações durante a solidificação descritas por Bäckerud<sup>[8]</sup>, com as temperaturas de reação sugeridas:





Reação eutética complexa formando  $\text{CuAl}_2$  e outras fases (530°C)

As figuras 20 e 21 mostram micrografias com algumas das fases formadas na solidificação da liga 339.1, presentes.



**Figura 20: Microestrutura de uma liga 339.1 mostrando  $\text{Al}_5\text{FeSi}$  em forma de uma grande agulha,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  (preto),  $\text{Al}_3\text{Ni}$  (cinza). Aumento: 560X.<sup>[8]</sup>**





**Figura 21: Micrografia de uma Liga 339.1 Mostrando Precipitado Eutético  $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ . Aumento: 560X.<sup>[8]</sup>**

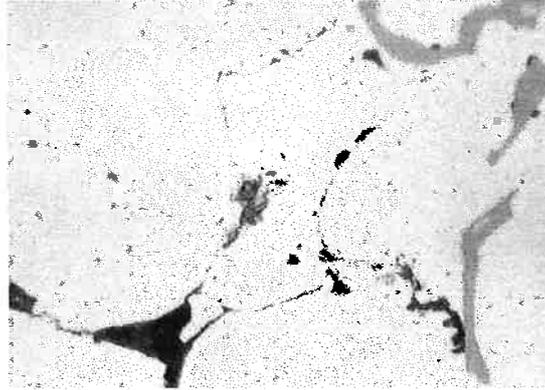
### *2.7. Preocupação com Defeitos*

Os pistões são peças extremamente solicitadas, tanto mecanicamente quanto termicamente. A fadiga térmica desses componentes é uma preocupação bastante comum.

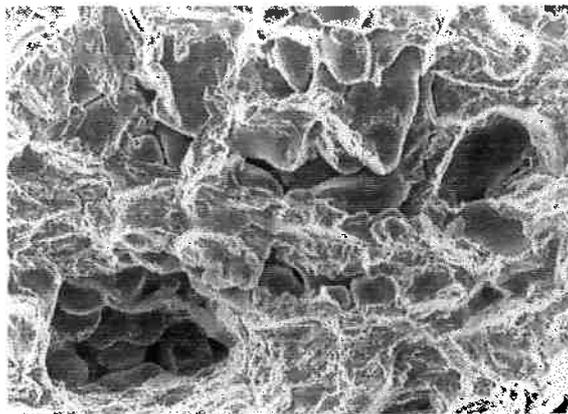
Diversos estudos foram feitos a esse respeito e foi verificado que as trincas de fadiga na grande parte das vezes tem início em descontinuidades da matriz.

Segundo Sarabanda<sup>[22]</sup> em peças testadas em laboratório, muitas delas trincaram na câmara, sendo que o início da trinca estava sempre associado a microporosidades (ver figuras 22 e 23).





**Figura 22: Detalhe de Trincas Junto à Microporosidade. Microscópio Óptico. Aumento: 1000X. [22]**



**Figura 23: Detalhe de Microporosidade na Superfície da Fratura. MEV. Aumento: 150X. [22]**

Outro fator que pode levar à nucleação de trincas é a presença de fases com diferença de dureza em relação à matriz (inclusão de óxido ou fases intermetálicas compostas com Fe, por exemplo), que quando solicitadas mecânica ou termicamente, sofrem um descolamento da matriz podendo dar início a uma trinca. [22]



## 2.8. Simulação de Solidificação - Softwares para Fundição

Devido a grande competitividade do mercado, a indústria de fundição requer, hoje em dia, qualidade de produtos e rapidez na execução de seus projetos.

Os métodos tradicionais são considerados lentos em muitos casos, e, para suprir essas necessidades, softwares de solidificação são utilizados para auxiliar na execução de projetos e na correção dos mesmos.

Este tipo de software simula o vazamento do metal líquido no molde e o subsequente resfriamento e solidificação. Através disto o computador pode prever a presença ou ausência de áreas com defeitos dentro da peça.<sup>[23]</sup>

O software pode criar uma fotografia da peça final, que pode ser girada ou cortada pelo engenheiro de fundição como lhe convier. Pode-se assim, encontrar regiões com possível defeito e utilizar estas informações para redesenhar o sistema de alimentação e massalotes.

Uma área bastante beneficiada com a aplicação da simulação de solidificação é a produção. Muitas peças são produzidas com defeitos em áreas conhecidas mas, com a pressão dos programas de entrega é difícil executar e avaliar as modificações que possam ser feitas para eliminar o problema. Com a simulação o engenheiro pode fazer experiências fora da linha de produção.

Em geral, esses softwares utilizam elementos finitos como ferramenta de trabalho e apresentam a facilidade de comunicação com sistemas CAD.<sup>[24]</sup>

Diversos pontos devem ser considerados para a escolha de um software de simulação de solidificação para uma aplicação específica.<sup>[25]</sup>



- \* **Pré-Processador:** Para o desenho tridimensional do conjunto peça-canais-massalotes é muito útil um módulo que permita a execução desses desenhos, sem grandes dificuldades para o usuário;
- \* **Geração da Malha:** Nem todos os softwares são capazes de dividir o sistema desenhado em elementos através da geração de uma malha. Em muitos casos se faz necessário a compra de um software especialmente para essa finalidade.
- \* **Simulação do Preenchimento:** Este fator é bastante útil para cálculos de fluxo de metal durante vazamento, o que ajuda muito no entendimento de complexos fenômenos físicos, incluindo turbulência durante o preenchimento do molde. Com esta ferramenta consegue-se uma otimização do sistema de canais e ainda, para o caso de fundição em moldes permanentes, pode-se prever diferenças de temperatura entre o metal líquido e o molde, que estão muito longe de apresentarem a mesma temperatura, conforme hipótese bastante utilizada quando não se tem mãos uma ferramenta como esta;
- \* **Simulação da Solidificação:** O uso de modelos que se baseiam apenas em transferência de calor é um recurso um pouco limitado, pois fornece ao usuário apenas distribuição de temperatura ao longo da peça. Fluxos adicionais de alimentação devido à contração conseqüente da queda de temperatura do líquido e da zona pastosa permitem estimativas mais reais do comportamento do metal durante o resfriamento. Com isso uma melhor adequação de massalotes pode ser desenvolvida.
- \* **Elementos Finitos ou Diferenças Finitas:** Modelos baseados em elementos finitos resultam em uma malha geometricamente mais precisa. Em contra partida o sistema não permite o uso de



geradores de malha automático, o que aumenta bastante o tempo gasto durante essa fase.

- \* Pós-Processador: Para facilitar a interpretação de resultados o sistema de visualização deve ser simples e objetivo;
- \* Banco de Dados: Dados de transferência de calor, densidade, condutividade térmica entre elementos do conjunto (molde, liga machos, etc.) devem estar disponíveis no software.

Dos principais softwares adotados pelas fundições, pode-se destacar o Mavis, ProCast e o MagmaSoft.<sup>[26]</sup>

No caso do MagmaSoft, utilizado no desenvolvimento desse trabalho, o módulo de processamento se baseia em algoritmos que utilizam equações diferenciais de massa, momento e entalpia que são resolvidas através de volumes finitos (variação do método de diferenças finitas).

É muito importante ressaltar que os softwares para simulação são ferramentas bastante poderosas, mas, que devem estar sempre aliadas ao conhecimento técnico e ao bom senso do engenheiro de fundição. O computador serve como auxiliar na solução dos problemas, indicando uma tendência; o equacionamento e as medidas a serem tomadas devem ser realizadas de maneira consciente e responsável.



### **3. Escopo do Trabalho**

Aliar a compreensão da causa e do mecanismo de formação de alguns defeitos, provenientes da etapa de fundição de pistões em alumínio a uma poderosa ferramenta de estudo de solidificação: o MagmaSoft. Ele ajudará no objetivo principal deste trabalho: o estudo de todo o processo de fundição de uma peça de alta produção, desde a preparação da liga, até a peça solidificada, afim de reduzir as perdas na indústria.

O produto escolhido, um pistão automotivo, foi em função da sua dificuldade de fabricação, por não apresentar uma geometria favorável ao processo de fundição. Além disso, a peça é produzida em grande escala, o que permite uma boa avaliação de resultados.

A liga utilizada no processo, para a qual é voltado o estudo feito neste trabalho, trata-se da liga 124R, que possui composição próxima à composição eutética.

Os experimentos terão um caráter mais prático, já que serão feitos paralelamente à produção industrial, porém, serão sempre apoiados nos conhecimentos teóricos provenientes da literatura.

As análises de resultados e simulações também serão embasadas em toda a revisão bibliográfica feita, utilizando-se sempre o bom senso, uma vez que o software de solidificação é um instrumento de ajuda e não uma solução certa.



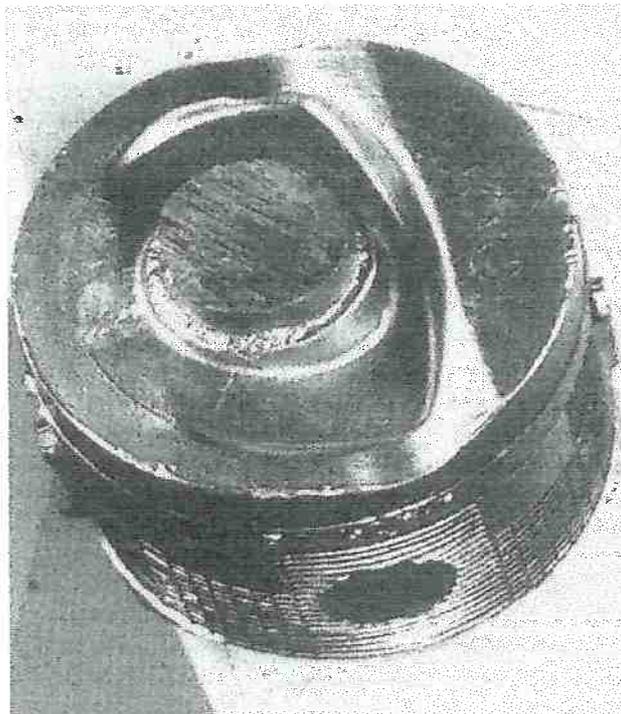
### 3.1. Descrição da Peça Escolhida

A peça escolhida, trata-se de um pistão fundido em molde permanente, por gravidade.

Seu processo de fundição é executado por robot, que alimenta de uma só vez duas coquilhas, por um único canal.

O fluxo de metal desce por um canal, passa por um filtro de fibra de vidro (a fim de reduzir turbulência e filtrar partículas de óxido do banho), e por fim, se divide em duas frentes, uma para cada coquilha.

A figura 24a mostra o pistão em estudo e a figura 24b, um esquema de molde explodido para facilitar a compreensão do sistema onde esse pistão é moldado.



**Figura 24a: Pistão em estudo, na sua forma Bruta de Fundição**



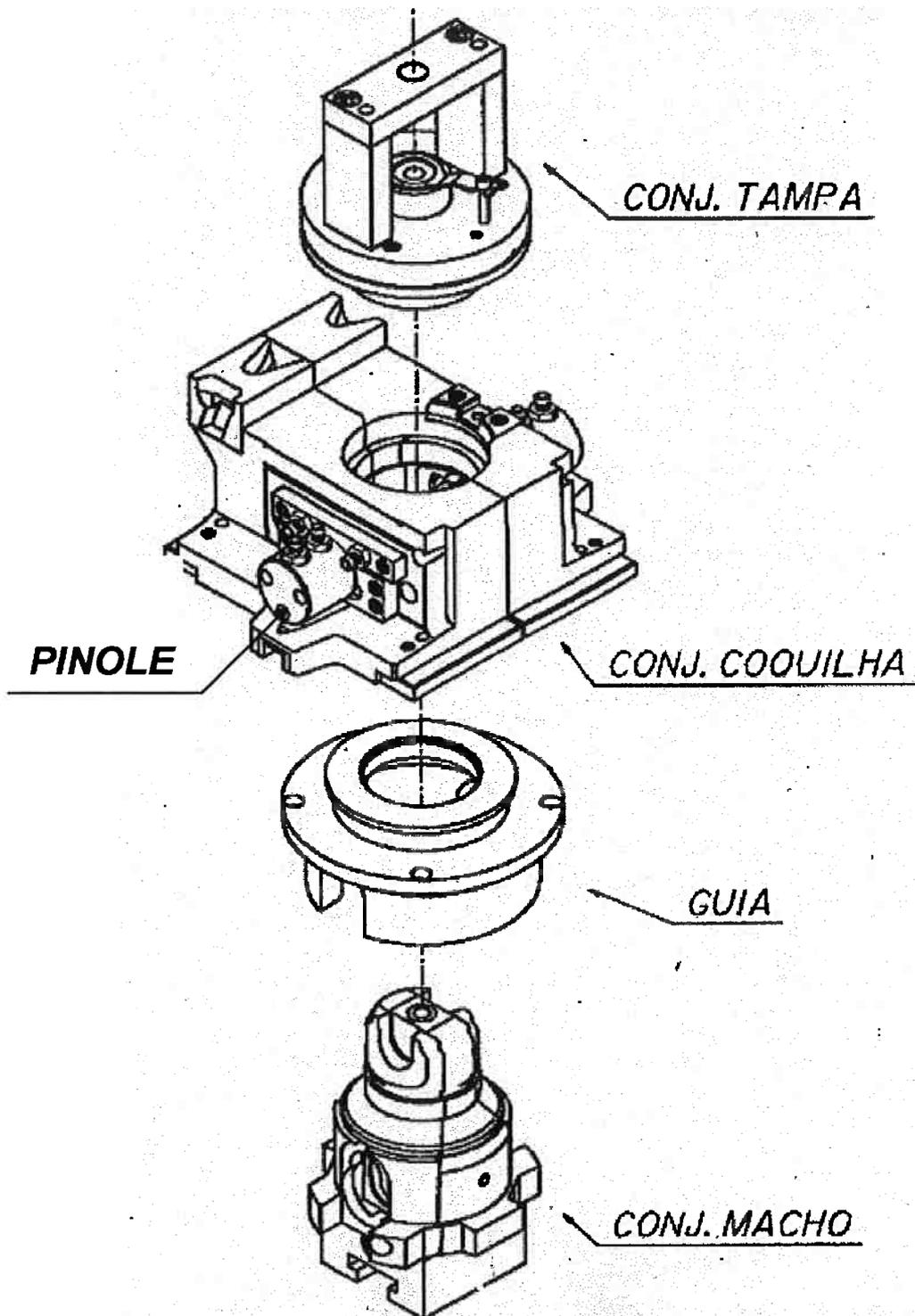


Figura 24b: Esquema do Conjunto de Moldagem Explodido



O pistão trata-se de uma peça de difícil geometria para o processo de fundição, uma vez que apresenta uma câmara inclinada que faz com que a espessura de topo não seja constante. Além disso, essa câmara é bruta de fundição, não sofrendo posterior usinagem.



## 4. Metodologia Utilizada

Primeiramente foi realizada uma seleção dos principais pontos de incidência de defeitos na peça e quais os tipos de defeitos encontrados. Detectados os tipos de defeitos e seus locais de ocorrência, os quatro defeitos que mais representavam perdas para a indústria passaram a ser o foco do estudo. A figura 25 mostra um esquema das regiões do pistão que apresentavam maior quantidade de defeitos .



**Figura 25: Regiões do Pistão com Maior Incidência de Defeitos**

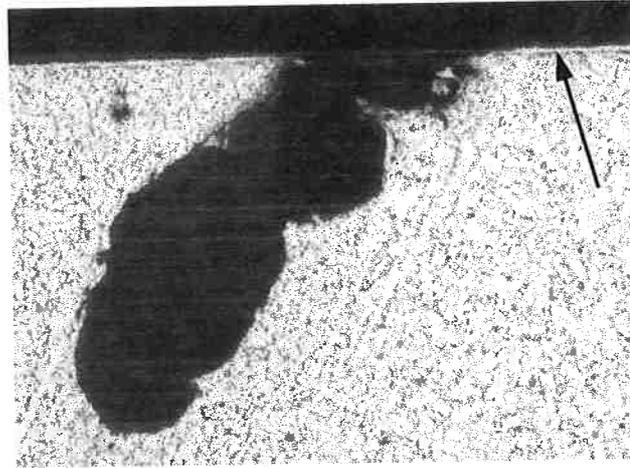
Para cada um dos defeitos encontrados, diferentes ações foram tomadas. A lista dos defeitos escolhidos e sua caracterização vem a seguir.

### 4.1. Caracterização dos Principais Defeitos

**Defeito A** - Presença de inclusões de óxido, detectadas após usinagem em regiões diversas da peça.



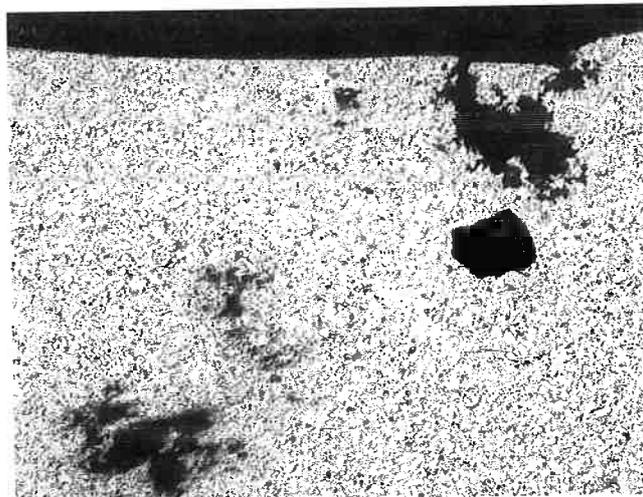
A figura 26, abaixo mostra a existência de defeito devido a dois mecanismos simultâneos de atuação: um filme de óxido que envolve toda a superfície de um defeito (causado pela presença de gás) e parte da peça. A seta indica o fino filme de óxido formado:



**Figura 26: Filme de Óxido na Região da Câmara do Pistão - Sem Ataque.  
Aumento: 50X**

**Defeito B** - Porosidade na saia próxima à região inferior da bolsa, detectada após usinagem.

A figura 27 mostra defeito aflorado após a usinagem e a existência de defeitos subsuperficiais.

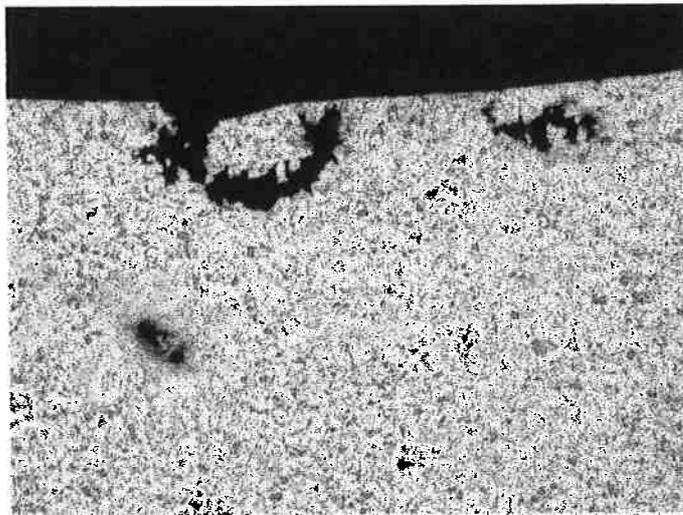


**Figura 27: Porosidade na Região da Saia do Pistão - Sem Ataque. Aumento: 25X**



**Defeito C** - Porosidade na região do furo para pino, detectada após usinagem.

A figura 28 mostra a presença de porosidades no furo para pino. Pode-se notar tanto porosidades que não afloraram após a usinagem e ficaram subsuperficiais, como também porosidade revelada superficialmente após usinagem.



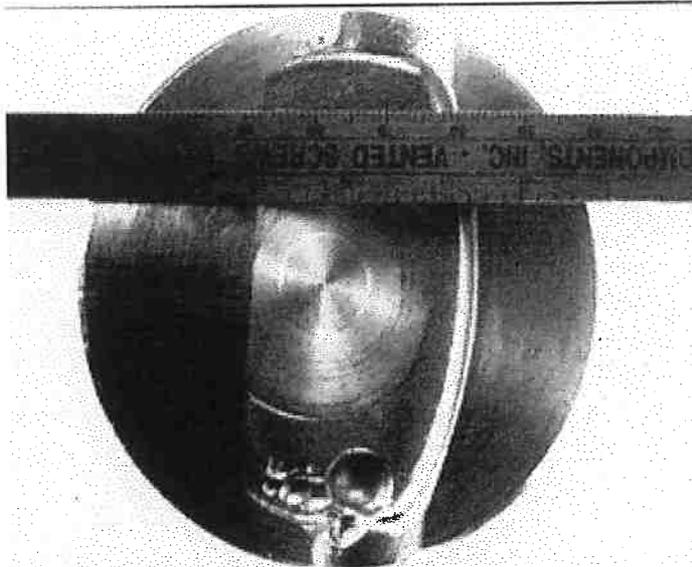
**Figura 28: Porosidades na região do Furo para Pino - Sem Ataque.**

**Aumento: 50X**

**Defeito D** - Vazios no topo do pistão, detectados antes ou após a usinagem.

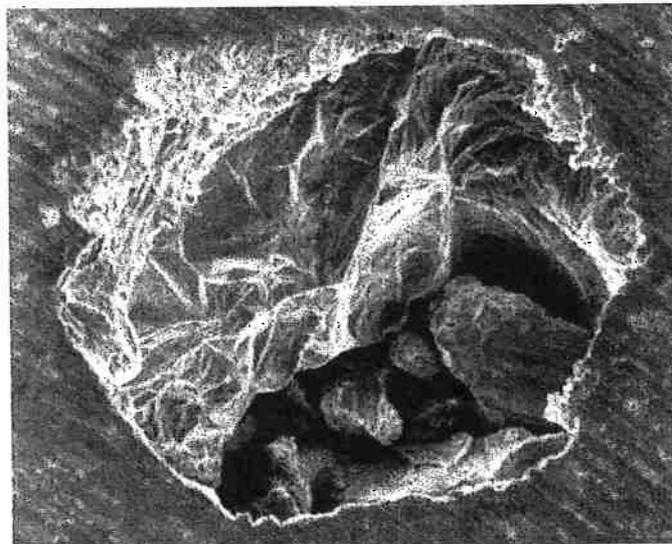
A figura 29 mostra a presença de bolhas na câmara do pistão, por provável ineficiência das saídas de ar.





**Figura 30: Presença de Bolhas na Câmara do Pistão**

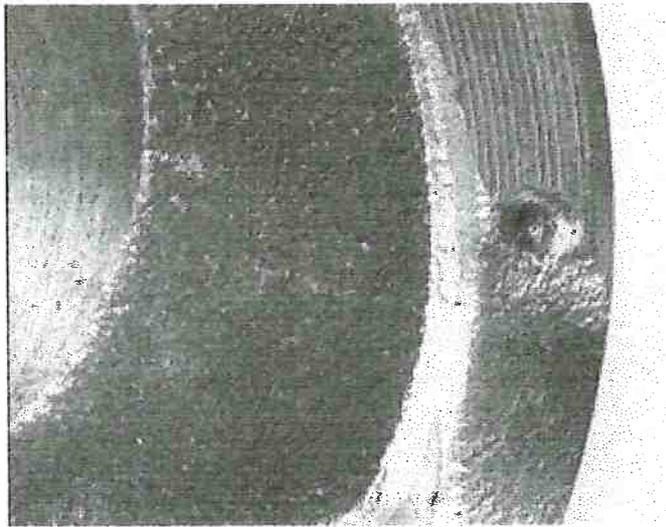
Na figura a seguir é mostra-se inclusão de óxido no topo do pistão, revelado após usinagem:



**Figura 31: Inclusão de Óxido na Região do Topo. Microscópio Eletrônico de Varredura. Aumento: 95X**

A seguir, mostra-se uma bolha causada por hidrogênio, localizada no topo do pistão.





**Figura 32: Bolha de Hidrogênio no Topo da Peça**

Após a caracterização dos principais defeitos, fez-se simulações de processos no MagmaSoft e realizaram-se testes de variações de processo.

Paralelamente à execução de simulação de solidificação e interpretação dos resultados obtidos, diversos processos de refrigeração, mudança de ferramental e tratamentos da liga foram sendo experimentados e analisados. Após interpretação de resultados da simulação foi feito um teste em produção para o processo que apresentou, segundo as simulações, o melhor resultado.

Um estudo experimental (descritos detalhadamente mais a frente) foi realizado para o caso de testes de novos processos de refrigeração, através de estudos metalográficos e interpretação dos mesmos. Além disso, para as mudanças que se tornaram efetivas no processo de fabricação, realizou-se uma análise de refugo após usinagem.

Abaixo seguem as técnicas de análise das amostras e, em seguida são descritos os diferentes processos empregados e as mudanças de ferramental executadas.



#### 4.2. Liga Utilizada

A liga utilizada para fabricação da peça escolhida neste estudo, trata-se de uma liga 124R de composição mostrada na tabela a seguir:

%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	Outros		Al	
										Cada	Total		
Si	Cu	Ni	Mg	Fe	Mn	Cr	Zn	Ti	Ca	0,025	0,05	0,15	resto
11,0	0,80	0,80	0,80	0,70	0,20	-	0,20	0,20	0,025	0,05	0,15	resto	
13,0	1,50	1,30	1,30	máx	máx	-	máx	máx	máx	máx	máx		

**Tabela 1: Composição da Liga Utilizada**

#### 4.3. Fusão e Moldagem

A liga utilizada neste trabalho é produzida em forno elétrico de indução, na linha de produção de pistões da Metal Leve. Após preparo e adição de nucleantes na liga, a mesma é levada em painéis para fornos de manutenção, onde sofre uma etapa de tratamentos de desgaseificação e escorificação.

A princípio as etapas de tratamentos de desgaseificação eram feitas com sal a base de hexacloretano. Por fim, passaram a ser executadas com FDU marca Foseco, carregado com mistura de gases argônio e cloro. A moldagem de todas as peças utilizadas neste trabalho foi feita em Robot Fata Aluminum Modelo Uno, também na linha de produção de pistões da Metal Leve. Tanto o vazamento da liga para o molde metálico quanto a desmoldagem da peça são executados pelo robot. O resfriamento da peça é



feito em calha de resfriamento a meia água (com água até a metade da altura do pistão).

#### *4.4. Microscopia Óptica*

O microscópio utilizado foi do laboratório da Metal Leve marca Reichert modelo MEF - 3. A preparação das amostras foi feita por corte de peças brutas de fundição e em seguida aplicou-se lixamento e polimento convencionais, sem posterior ataque.

#### *4.5. Preparação de Macrografias*

As macrografias foram preparadas utilizando-se corte, lixamento e polimento convencionais. As amostras foram atacadas com Keller diluído. Todas as peças eram brutas de fundição.

#### *4.6. Análise Química*

A análise química realizada nas amostras também foram feitas em laboratório da Metal Leve e a máquina utilizada foi Espectrômetro Óptico modelo Spectrolab da marca Spectro.



#### 4.7. Simulação

O simulador utilizado neste trabalho é o MagmaSoft, versão 3.2.2. A máquina utilizada para a execução do software é uma Silicon Graphics - Indigo 2 com as seguintes características: R - 4000, 100MHz, 64MB RAM. Sistema Operacional IRIS 6.2 (UNIX).

#### 4.8. Ações Tomadas para Solução Particular de cada Defeito

##### 4.8.1. Defeito A

Para solução deste defeito três medidas foram tomadas: o tratamento da liga foi modificado, a distância de vazamento de metal para o molde foi reduzida e a temperatura dos fornos de manutenção foi severamente controlada.

O tratamento da liga que antes era feito no forno de manutenção usando-se sal para realização de duas desgaseificações e apenas uma escorificação foi modificado da seguinte maneira:

A princípio, modificou-se a série de tratamentos, mantendo-se os mesmos fluxos sólidos:

- \* Escorificação do banho em panela
- \* Primeira escorificação do banho no forno de manutenção
- \* Primeira desgaseificação do banho no forno de manutenção
- \* Segunda escorificação do banho no forno de manutenção



- \* Segunda desgaseificação do banho no forno de manutenção
- \* Terceira escorificação do banho no forno de manutenção

Por fim, o fluxo sólido desgaseificante foi substituído por fluxo gasoso, mantendo-se ainda o fluxo escorificante:

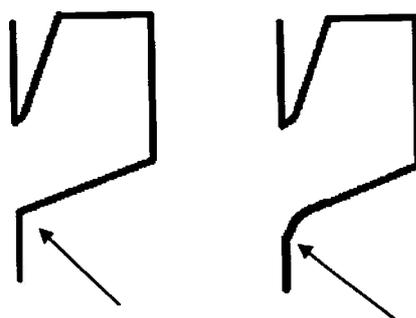
- \* Escorificação do banho em panela
- \* Primeira escorificação do banho no forno de manutenção
- \* Desgaseificação com FDU carregado com mistura de gases (cloro e argônio)
- \* Segunda escorificação do banho no forno de manutenção

O controle de temperatura e a distância de vazamento do metal para o molde passaram a ser controlados rigidamente através de treinamento de funcionários e auditorias internas de processo freqüentes. .

#### **4.8.2. Defeito B**

A região do ferramental correspondente à região de defeito apresentada pela peça foi cuidadosamente analisada e a parte inferior da bolsa, na coquilha sofreu um aumento de raio, conforme mostra a figura :





**Figura 33: Esquema Ilustrativo de Aumento de Raio na Coquilha**

#### **4.8.3. Defeito C**

A refrigeração da pinole (macho para fabricação do furo para pino), que antes era feita com água passou a ser feita com ar.

#### **4.8.4. Defeito D**

Primeiramente um novo projeto de saída de gases pela tampa foi implementado. Numa segunda etapa a desgaseificação com FDU foi aplicada.

Além disso quatro processos diferentes de refrigeração foram testados, a fim de se estudar o caminho seguido pela solidificação na peça. A descrição de cada um dos processos é feita a seguir:

##### *Processo 1:*

Somente água no macho e ar nas pinoles foram usados. Os demais pontos de refrigeração não foram requeridos.



*Processo 2:*

Foi utilizada água no macho, água nas pinóles e ar na zona dos anéis.  
A Tampa não foi refrigerada.

*Processo 3:*

A tampa não foi refrigerada. Aplicou-se água no macho e na zona dos anéis. As pinóles foram utilizadas com ar.

*Processo 4:*

Este processo utilizou todos os pontos de refrigeração possíveis da seguinte maneira: água no macho, pinóles e zona dos anéis. Ar na tampa.

O quadro a seguir resume os quatro processos realizados, para entendimento do caminho da solidificação da peça no molde:

<b>Processo</b>	<b>Macho</b>	<b>Pinóles</b>	<b>Zona dos Anéis</b>	<b>Tampa</b>
<b>1</b>	água	ar	-	-
<b>2</b>	água	água	ar	-
<b>3</b>	água	ar	água	-
<b>4</b>	água	água	água	ar

**Tabela 2: Resumo de Processos de Solidificação Testados para Estudo do Caminho de Solidificação da Peça**



Os quatro processos testados usaram para todas as refrigerações o mesmo tempo de atuação.

O processo utilizado em produção também apresenta os mesmos tempos de solidificação da seguinte forma: água no macho, zona dos anéis e tampa e ar nas pinóles.

Foi executada simulação de solidificação no MagmaSoft, que serviu não só para solução do Defeito D, mas também para ajudar no entendimento geral do processo. Após resultados de simulação, que serão apresentados e discutidos mais a frente, realizou-se teste de um processo sugerido para redução de refugo da peça. Esse processo utiliza o mesmo tempo de atuação de refrigeração dos demais processos testados e é distribuído da seguinte forma: água no macho e na zona dos anéis; ar na tampa e nas pinóles.



## 5. Resultados e Discussão

### 5.1. Resultados da Análise Química

Todos os pistões utilizados para análise dos processos, através de micrografias e macrografias, foram retirados da mesma corrida de forno para que os resultados obtidos pudessem ser comparados sem preocupação com a variável composição química.

Assim, somente a refrigeração imposta aos processos foi responsável pela diferença entre resultados encontrados entre as diversas peças.

A tabela abaixo traz a composição química encontrada nas peças:

Si	Cu	Ni	Mg	Fe	Mn	Cr	Zn	Ti
12.25	1.00	0.905	0,952	0.507	0.0264	0.1111	0.0257	.00599
Ca	Sn	Na	P	Sb	Sr	B	V	Zr
.00098	<.00210	<.00012	.00834	.00598	<.0005	.00069	.00361	.00484

**Tabela 3: Composição Química dos Pistões Utilizados em Análise Metalográfica**



## 5.2. Resultados das Ações Tomadas para o Ataque aos Defeitos

### 5.2.1. Defeito A

A velocidade atingida pelo metal vazado no molde, depende da distância percorrida pelo mesmo, conforme indica a equação a seguir:

$$v = \sqrt{2g\Delta h}$$

onde: v=velocidade do líquido;

g=gravidade;

$\Delta h$ =distância de vazamento.

Desta maneira, ao reduzir-se a altura de vazamento da liga para o molde, o que pode ser controlado pela programação do robot, reduz-se a velocidade com que o metal líquido chega ao molde. Assim, procura-se evitar, ou pelo menos reduzir, o turbilhonamento do metal durante o vazamento.

Com a redução do turbilhonamento, evita-se a quebra e incorporação de partes do filme de óxido que está sempre presente na superfície do banho líquido, uma vez que o alumínio apresenta grande afinidade com o oxigênio.

Conforme discutido na seção 2.3., a temperatura deve ser rigidamente controlada. Procurou-se reduzir o intervalo de temperatura usado nos fornos de manutenção, de  $770 \pm 15^\circ\text{C}$ , para  $770 \pm 10^\circ\text{C}$ . Os funcionários foram orientados a trabalharem o mais próximo possível da temperatura nominal da liga. Porém o controle de temperatura não é preciso uma vez que os pirômetros utilizados são de lança e dependem do homem para fazer seu uso. Além disso, a temperatura do forno também é controlada pelos



operadores no painel de controle dos fornos, que são bastante imprecisos. Uma solução sugerida para o assunto foi a utilização de pirômetros imersos no banho associados a tiristores, o que conseguiria manter a temperatura do banho em  $770 \pm 3^\circ\text{C}$ , conforme testado na própria linha de produção da fábrica para outros pistões, com obtenção de bons resultados. Os pirômetros imersos não dependeriam da ação humana para serem usados, já que ficam constantemente no banho, e, além disso, o controle de temperatura não seria feito pelo operador no painel, mas sim automaticamente pelos tiristores.

O tratamento da liga favoreceu a retirada de óxidos formados durante todo o carregamento da mesma.

Na transferência de metal do forno de indução para a panela, a agitação do banho causa a formação e incorporação de óxidos. Como a diferença de densidade entre o banho e o óxido formado é pequena, há uma dificuldade muito grande de flotação dessas partículas indesejadas. O molhamento do óxido de alumínio pelo banho também dificulta a flotação destas partículas. Por isso, faz-se necessário um tratamento antes de o metal sair da panela e ser carregado para o forno de manutenção. Se o tratamento na panela não fosse feito, a escorificação realizada no forno de manutenção não seria suficiente para a retirada do óxido incorporado no vazamento do forno de indução para a panela e da panela para o forno de manutenção, a menos que o tempo de espera fosse bastante estendido.

### **5.2.2. Defeito B**

A existência de um raio de tamanho muito pequeno no local indicado causava principalmente a formação de um “ponto quente” no molde.

A geometria da região na coquilha chegava a formar quase uma quina na ferramenta o que acarretava em uma geometria que desfavorecia a



condução de calor local. Assim, a dissipação de calor, pela coquilha, da região apresentada na peça, não era suficiente. Havia então a formação do chamado “ponto quente”, que fazia com que o região descrita da saia demorasse para solidificar além do esperado. Sendo o último ponto da região a se solidificar, era nele o local onde aparecia a contração de solidificação. Assim, o problema existente associado à geometria da bolsa fazia com que houvesse formação de porosidade no local.

O aumento do raio favoreceu a dissipação de calor do local referido da peça e ainda facilitou o escoamento do metal da bolsa para a saia.

### **5.2.3. Defeito C**

A refrigeração feita com água era extremamente severa. Este fato fazia com que o gradiente de temperatura entre o molde e a liga na região fosse muito alto e a solidificação local ocorresse muito rapidamente. Sendo as paredes próximas à região do local de defeito muito finas, havia um corte de alimentação local. Devido à refrigeração, o módulo calculado para que não houvesse o fechamento das paredes da peça antes de sua alimentação não foi eficiente.

Usando como refrigeração nas pinos o ar, já que sua condutividade térmica é bastante inferior à da água, a região em torno do furo para pino ficava líquida por mais tempo. Assim, o local pôde ser alimentado, evitando os vazios por contração de solidificação. As figuras 35 e 38 mostram a diferença entre as microestruturas obtidas com refrigeração feita por água e ar.



#### 5.2.4. Defeito D

Os vazios podiam estar sendo causados por três motivos que podiam estar acontecendo simultaneamente: existência de gás na fase líquida, precipitando no sólido por diferença de solubilidade (discutido na seção 2.4.), saída de ar insuficiente (o ar contido dentro do molde não saia com a entrada de metal) ou porosidade por contração de solidificação (ou seja, o local de defeito era a última região do topo a solidificar).

As seguintes ações foram tomadas: primeiramente uma desgaseificação mais eficiente, de forma a retirar maior quantidade de hidrogênio dissolvido no líquido. Numa segunda etapa implementou-se mais três saídas de ar pela tampa; por fim, tentou-se mudar o caminho da evolução de solidificação. Para isso, houve um experimento de diversos processos de refrigeração que influenciassem a forma de solidificação da peça.

A desgaseificação passou a ser feita não mais por sal mas sim por rotor, método mais eficiente, conforme discutido na seção 2.4.1.2. Adotou-se o uso de FDU com mistura de gases (cloro + argônio). Houve certa diminuição do refugo de peças após a usinagem mas não o suficiente para trazer a quantidade de defeitos aos níveis desejados.

As saídas de ar foram feitas de forma a proporcionar escape de gás existente dentro do molde antes do vazamento, que ficava aprisionado após a entrada do metal líquido. Três pinos sextavados foram acoplados à tampa e um comparativo entre um molda com novo projeto e um molde sem alterações foi traçado: as peças feitas em molde com projeto antigo apresentaram 30% a mais de defeitos no topo do que as peças feitas em molde modificado.

Como terceira ação, diversos tipos de processo de refrigeração foram testados. A seguir, apresentam-se resultados obtidos e análises sobre o assunto. Nestes processos também foram utilizadas diferentes refrigerações na pinole para ilustrar o defeito C e acompanhar a evolução da



microestrutura e macroestrutura conforme as alterações de solidificação provocadas pelos diferentes processos de refrigeração. As micrografias a seguir foram feitas sempre no mesmo local da peça, independente do processo utilizado, para que os resultados pudessem ser comparados.

#### 5.2.4.1. Processo 1

Este processo foi feito a título de entendimento do caminho de solidificação, microestrutura e macroestrutura, quando há pouca influência de refrigeração. É um processo que não é válido industrialmente uma vez que elevaria muito o tempo de solidificação da peça e conseqüentemente, um grande aumento de ciclo e queda de produtividade. Além disso, como pode ser visto na figura (topo pressão), apresentaria uma microestrutura bastante grosseira, o que comprometeria as propriedades mecânicas do produto.

Dois cortes diferentes da peça foram feitos (análise de cubos e seção de pressão) e toda a superfície de corte foi varrida. A atenção maior ficou voltada para os dois principais pontos de defeito: furo para pino e topo.

Como pode ser observado na figura 34, nota-se a existência de microestrutura grosseira, com presença de poucas dendritas de fase  $\alpha$ , porém bastante grandes. Este fato pode ser explicado devido ao baixo superresfriamento imposto pela refrigeração. Com baixo superresfriamento não há favorecimento da formação de núcleos, por isso a quantidade de dendritas encontradas é pequena. Em compensação, as mesmas crescem mais pois a temperatura favorece o fato e não há limitação de crescimento causado por uma dendrita vizinha, uma vez que a quantidade de núcleos formados é baixa.

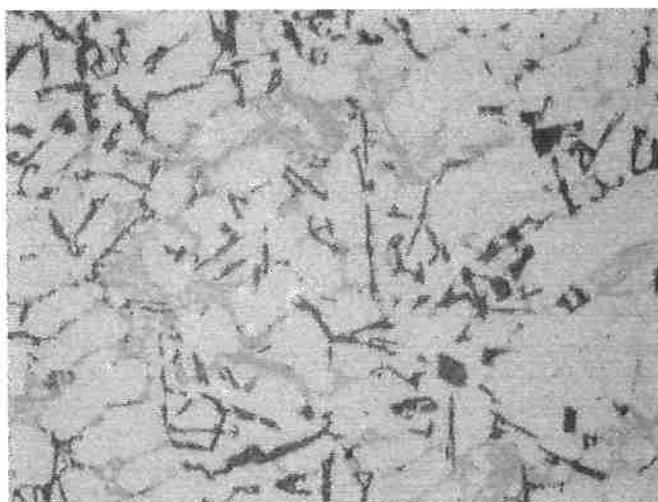




**Figura 34: Corte da Seção de Pressão da Peça - Topo. Sem Ataque. Aumento 160X**

Não se encontraram vazios ou microporosidades na região do topo o que mostra que a solidificação seguiu como esperado, sendo o massalote a última região a se solidificar.

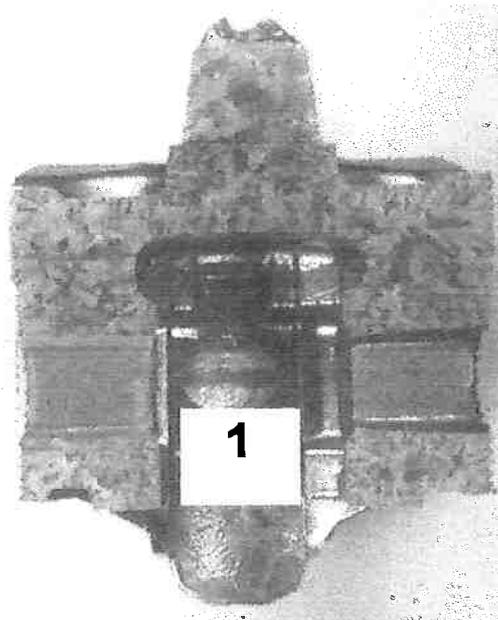
A figura 35 mostra a influência da refrigeração da pinole feita por ar. Nota-se que mesmo com a presença de dendritas de fase  $\alpha$  primária não existe microporosidades. Pode-se concluir que a alimentação do metal foi suficiente para evitar vazios de contração interdendríticos. As dendritas não chegam a formar uma rede fechada que impeça a alimentação interdendrítica.



**Figura 35: Corte da Seção do Cubo - Fura para Pino. Sem Ataque. Aumento: 400X**



A figura 36 mostra a macrografia da seção do cubo. Pode-se notar a presença de estrutura grosseira principalmente no topo, que não sofreu influência de refrigeração nem da tampa e nem lateral da zona dos anéis.



**Figura 36: Macrografia da Seção de Cubo da Peça. Ataque: Keller Diluído**

#### 5.2.4.2. Processo 2

Este processo ilustra bem a influência de refrigeração lateral do topo, feita na região da zona dos anéis por ar.

Pode-se notar a presença de mais dendritas neste processo quando se compara o mesmo com o processo 1. Apesar da maior quantidade de dendritas seu tamanho é menor que o encontrado no processo 1 de refrigeração. A explicação para isso foi dada anteriormente e está ligada à



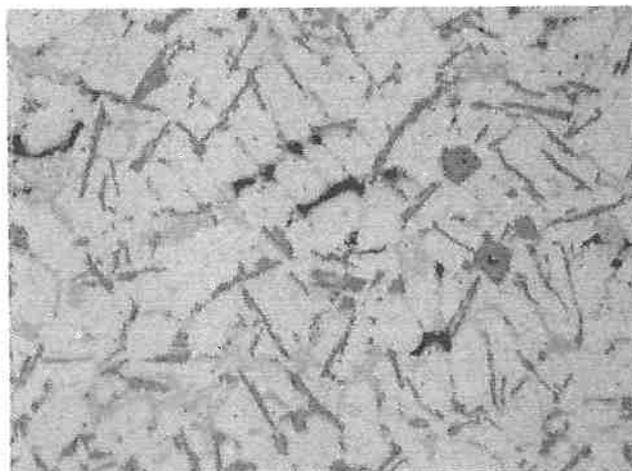
formação de núcleos associados ao superresfriamento do metal e crescimento dos cristais de  $\alpha$ .

A figura 37 mostra a microestrutura encontrada na região do topo, que ilustra os comentários acima.



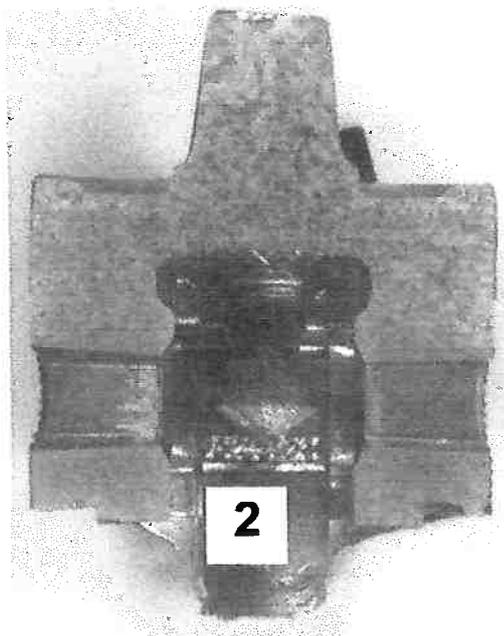
**Figura 37: Seção de Pressão da Peça - Topo. Sem Ataque. Aumento: 160X**

A região das pinóles foi refrigerada com água e pode-se notar que houve corte de alimentação na peça. A figura 38 mostra a presença de porosidade interdendrítica e a macrografia da figura 39 mostra a presença de porosidade na mesma região.



**Figura 38: Seção do Cubo da Peça - Furo para Pino. Sem Ataque. Aumento: 400X**





**Figura 39: Macrografia da Seção do Cubo da Peça. Ataque: Keller Diluído**

A macrografia representativa do processo mostra um maior refino do topo em relação ao processo 1.

Além das micrografias e da macrografia feita, 18 peças foram usinadas e analisadas.

Dentre as peças usinadas os resultados obtidos foram: 3 peças apresentaram defeito no topo, 5 peças apresentaram defeito no furo para pino e apenas 10 peças estavam isentas de defeitos.

#### 5.2.4.3. Processo 3

A figura 40 mostra uma microestrutura no topo, como esperado dos resultados dos processos 1 e 2, que apresenta maior quantidade de dendritas

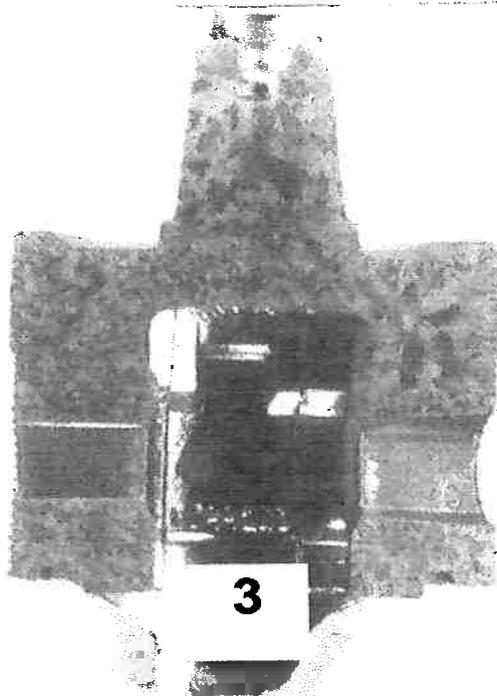


de  $\alpha$  em menor tamanho. Nota-se uma microestrutura mais refinada, inclusive refletida nos cristais de silício, que aparecem bastante refinados.

A macrografia do processo mostra com clareza a influência da água na zona dos anéis. A estrutura é bastante refinada no topo, em relação aos processos 1 e 2 e em um dos lados da peça ainda aparece uma clara zona colunar.



**Figura 40: Micrografia da Seção de Pressão da Peça. Sem Ataque. Aumento: 160X**

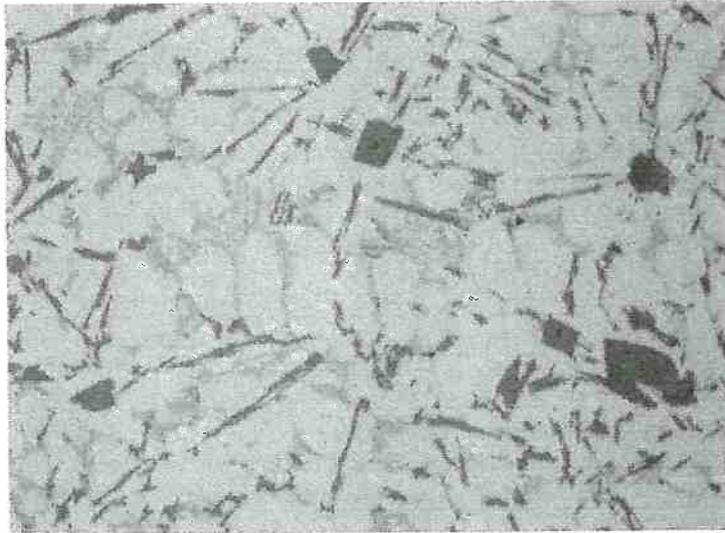


**Figura 41: Macrografia da Seção de Cubo da Peça. Ataque: Keller Diluído**



Mais uma vez também pode-se notar a influência da refrigeração da pinole com ar. Não há corte de alimentação mesmo entre as dendritas. A região não apresenta microporosidades nem porosidades. A macroestrutura resultante do processo pode ser vista na figura 41.

A figura 42 mostra a microestrutura encontrada na região do furo para pino.



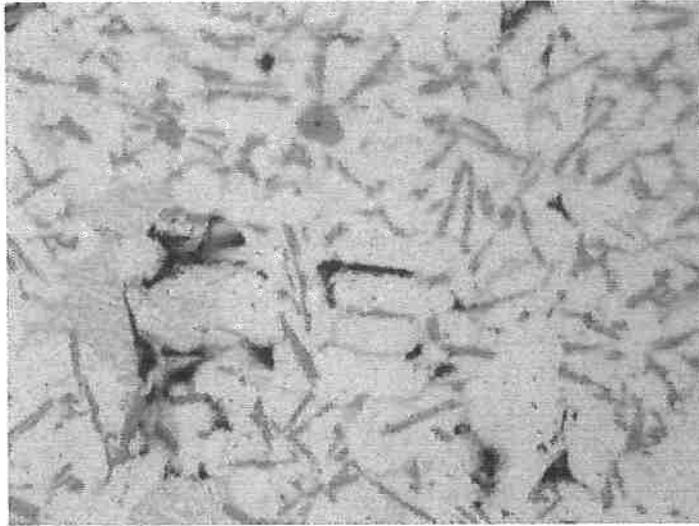
**Figura 42: Seção de Cubo da Peça - Furo para Pino. Sem Ataque: Aumento: 400X**

Também para este processo 18 peças foram usinadas. Os resultados encontrados foram: 3 peças com defeito no topo e 15 pistões bons.

#### 5.2.4.4. Processo 4

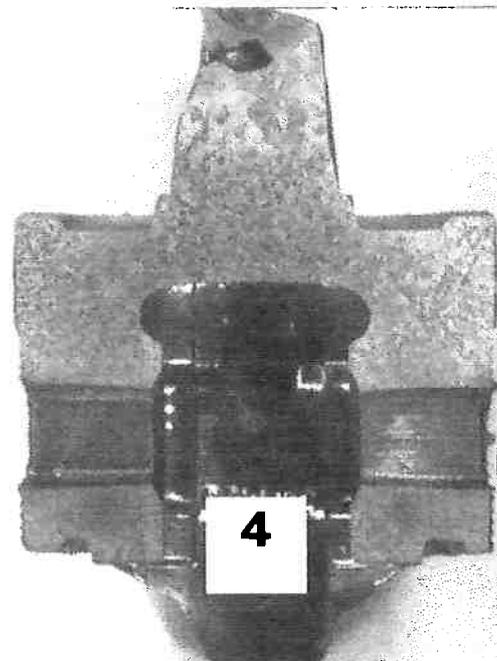
Este processo também apresentou problemas com o furo para pino. A macrografia e a micrografia comprovam o fato. Pode-se notar na 43 a presença de microporosidades interdendríticas, comprometendo a microestrutura da peça.





**Figura 43: Seção do Cubo da Peça - Furo para Pino. Sem Ataque. Aumento: 400X**

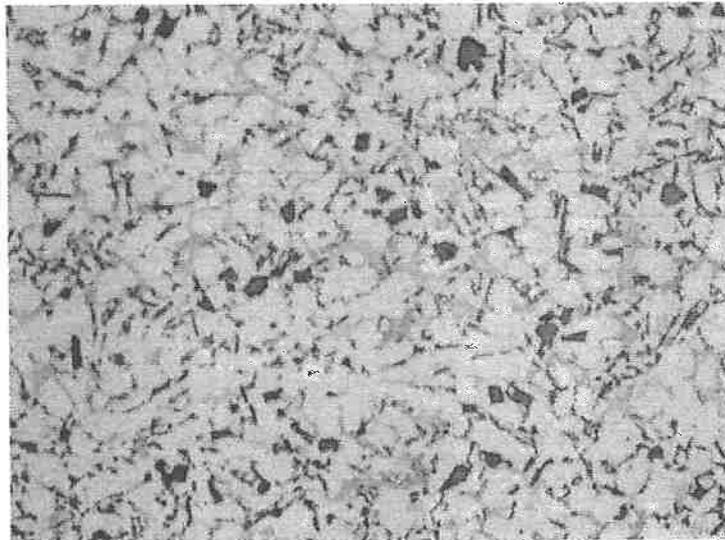
Quanto a severidade da refrigeração a macrografia da figura 44 mostra uma estrutura bastante refinada quando comparado com as macrografias dos demais processos. A zona colunar quase não existe, conseqüência da forte refrigeração aplicada.



**Figura 44: Macrografia da Seção do Cubo da Peça. Ataque: Keller Diluído**



A micrografia do topo da seção de pressão da peça na figura 45 também mostra a severidade de refrigeração. A presença de dendritas finas e pequenas refletem o superresfriamento imposto, como discutido anteriormente.



**Figura 45: Seção de Pressão da Peça - Topo. Sem Ataque. Aumento: 400X**

O resultados das 18 peças usinadas se deu com a seguinte distribuição: 2 peças com defeito no topo, 2 peças com defeito no furo para pino e 14 peças isentas de defeitos.

#### 5.2.4.5. Visão Geral Sobre os Processos Testados

Ficou bastante claro que o mais indicado para este pistão é o uso de uma refrigeração mais amena na região das pinos a fim de evitar defeitos no furo para pino.

Além disso, ao se usar água para refrigerar a parte lateral do topo e ar em sua parte superior (tampa do molde), a solidificação segue gradualmente em direção ao massalote (solidificação direcional), o que reduziu o aparecimento de defeitos no topo.



O processo mais indicado para produção seria o uso de água para refrigerar o macho e a zona dos anéis; ar nos pinos e na tampa.

Comparando-se todas as macrografias pode-se perceber que o aumento de severidade da refrigeração torna a estrutura da peça mais refinada, importante fator para as propriedades mecânicas da peça.

Além disso, a microestrutura encontrada não é característica de uma liga eutética, apesar da composição da liga. Este fato pode ser explicado com o conceito de superresfriamento e zona acoplada.

A zona acoplada do diagrama de fases de uma liga Al-Si não é simétrica. Assim, com o superresfriamento imposto devido ao molde ser metálico e devido às refrigerações usadas, é possível que a solidificação se dê abaixo da zona acoplada, promovendo nucleação e crescimento das duas fases independentemente uma da outra, possibilitando a formação de dendritas de fase  $\alpha$ .

Deve-se manter um compromisso entre ausência de defeitos e microestrutura obtida, dois fatos que caminham em sentido contrário quando se aumenta ou diminui a severidade de refrigeração.

Um ponto bastante preocupante em relação a este compromisso é a região superior do furo para pino, segundo local mais solicitado mecanicamente do pistão. Observando-se as macrografias dos processos estudados nota-se bem a diferença de refino de estrutura quando se varia a refrigeração.

Existe uma nítida diferença de temperaturas de um lado para outro do pistão, que pode ser verificada em todas as macroestruturas: de um lado os grãos são bem mais refinados que do outro.

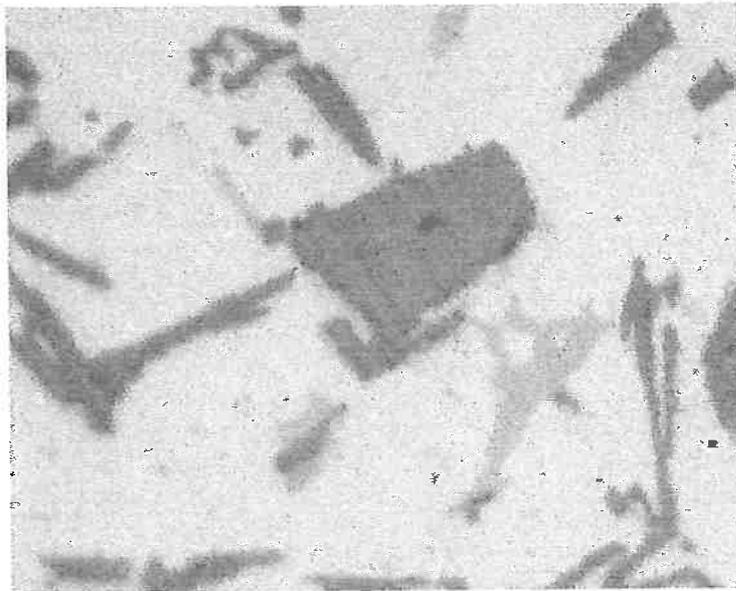
Este fato se deve a duas causas: o lado de estrutura mais grosseira é o lado do canal de ataque da peça, região naturalmente mais quente. No



caso do corte apresentado, a 90° do canal de ataque, o fator responsável por este resultado é o direcionamento da entrada de metal pelo canal de ataque para um dos lados da peça.

Foi exatamente do lado de estrutura mais grosseira que quase 70% dos defeitos das peças usinadas foram encontrados.

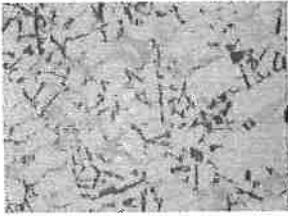
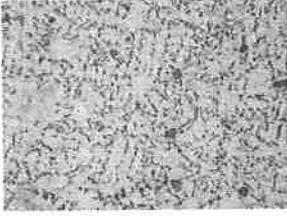
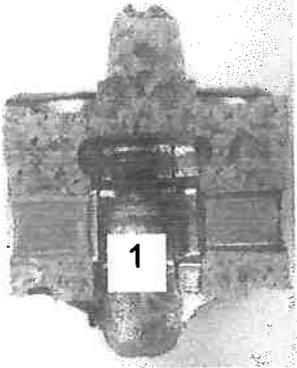
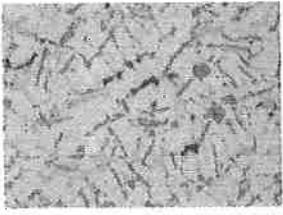
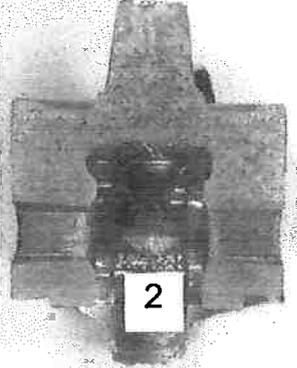
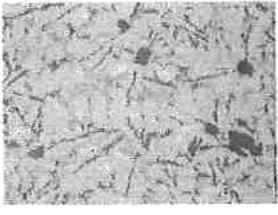
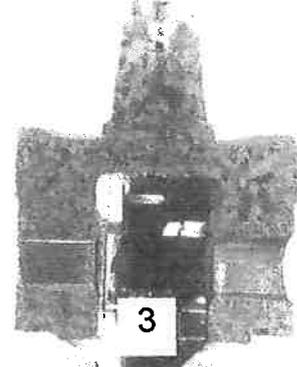
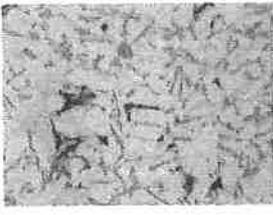
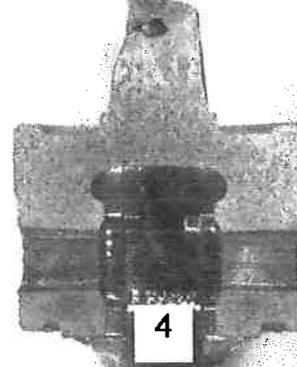
Observando-se a microestrutura obtida nos quatro processos pode-se notar que apesar de a liga ser de composição eutética, encontra-se na mesma peça diversas regiões dendríticas (características hipoeutéticas) e regiões de nucleação primária de silício sobre AIP ou AIP<sub>3</sub>. A figura 46 mostra um núcleo para o cristal de silício em detalhe:



**Figura 46: Detalhe de Núcleo para Formação de Cristal de Silício. Sem Ataque.  
Aumento: 800X**

A seguir, apresentam-se juntas todas as micrografias e macrografias dos processos descritos já mostradas anteriormente, apenas para facilidade de comparação entre resultados obtidos.



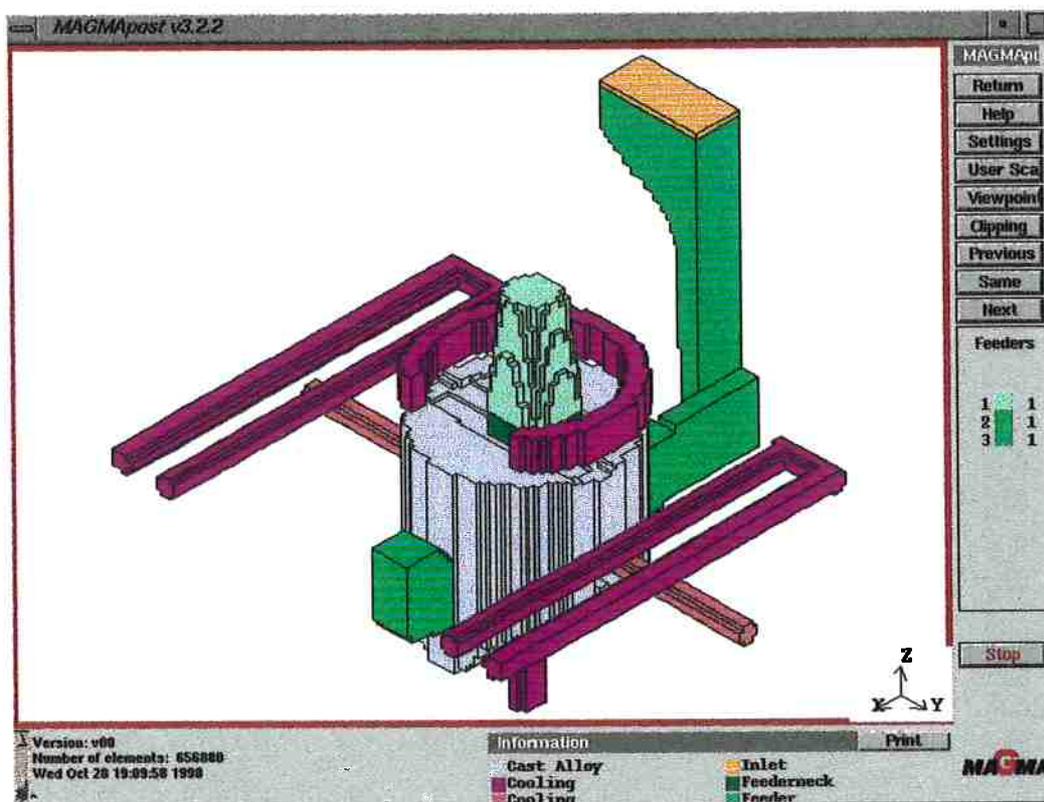
<b>Processos</b>	<b>Seção do Cubo</b>	<b>Seção de Pressão</b>	<b>Macrografias</b>
<b>1</b>			
<b>2</b>			
<b>3</b>			
<b>4</b>			



### 5.3. Simulação

O resultado da simulação do MagmaSoft utilizando dois diferentes processos, foi analisado sob diferentes aspectos quanto a tempo de solidificação, temperatura de metal líquido e gradiente de temperatura ao longo da peça. Os dois processos analisados são o processo de produção (água no macho, zona dos anéis e tampa e ar nas pinóles) e o processo sugerido para minimização de defeitos (água no macho e zona dos anéis e ar nas pinóles e na tampa).

A primeira etapa da simulação foi a execução do desenho de ferramental, peça e refrigeração para a geração de uma malha. A figura 47 mostra a malha gerada pelo software:



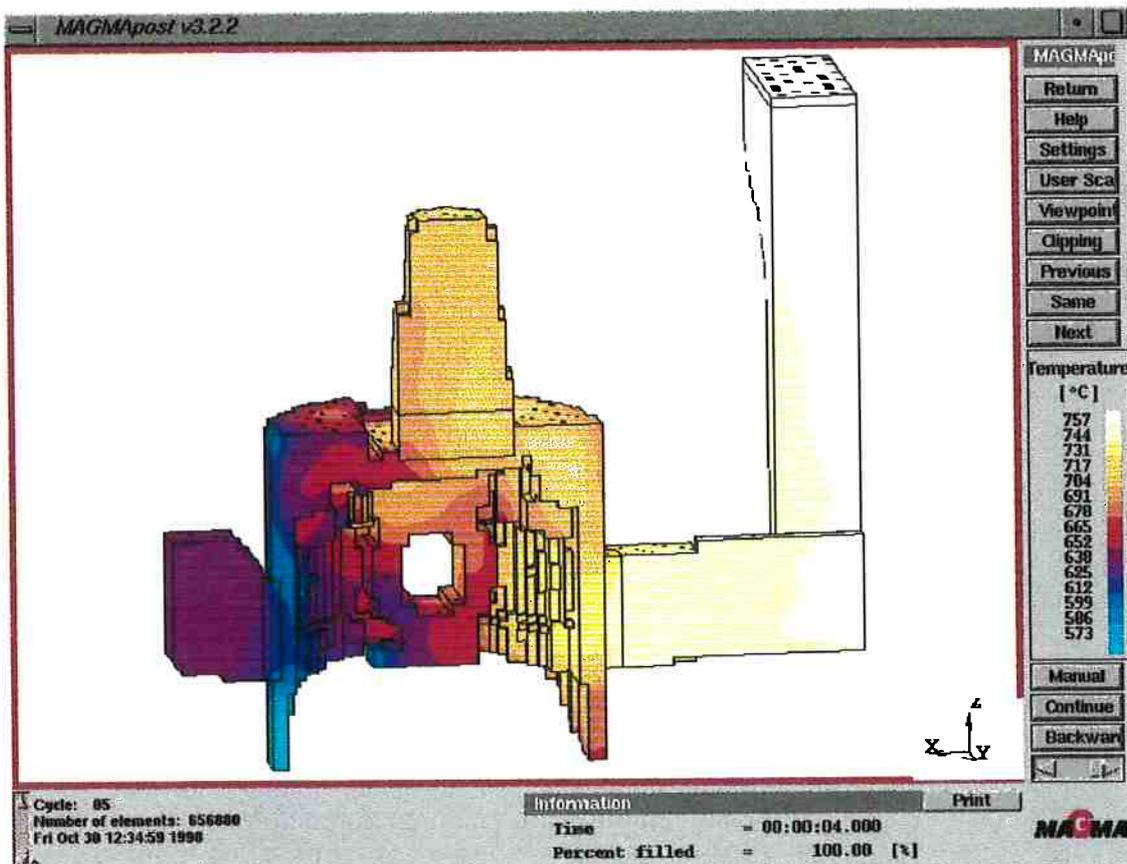
**Figura 47: Malha Gerada pelo Magma para Execução de Cálculos sobre a Peça em Estudo**



As figuras a seguir mostram os resultados encontrados e a discussão em torno da validade dos mesmos.

### 5.3.1. Processo de Produção

A figura 48 a seguir, mostra a distribuição de temperaturas da liga, ainda líquida, logo após o término do preenchimento completo do molde, calculado pelo simulador.

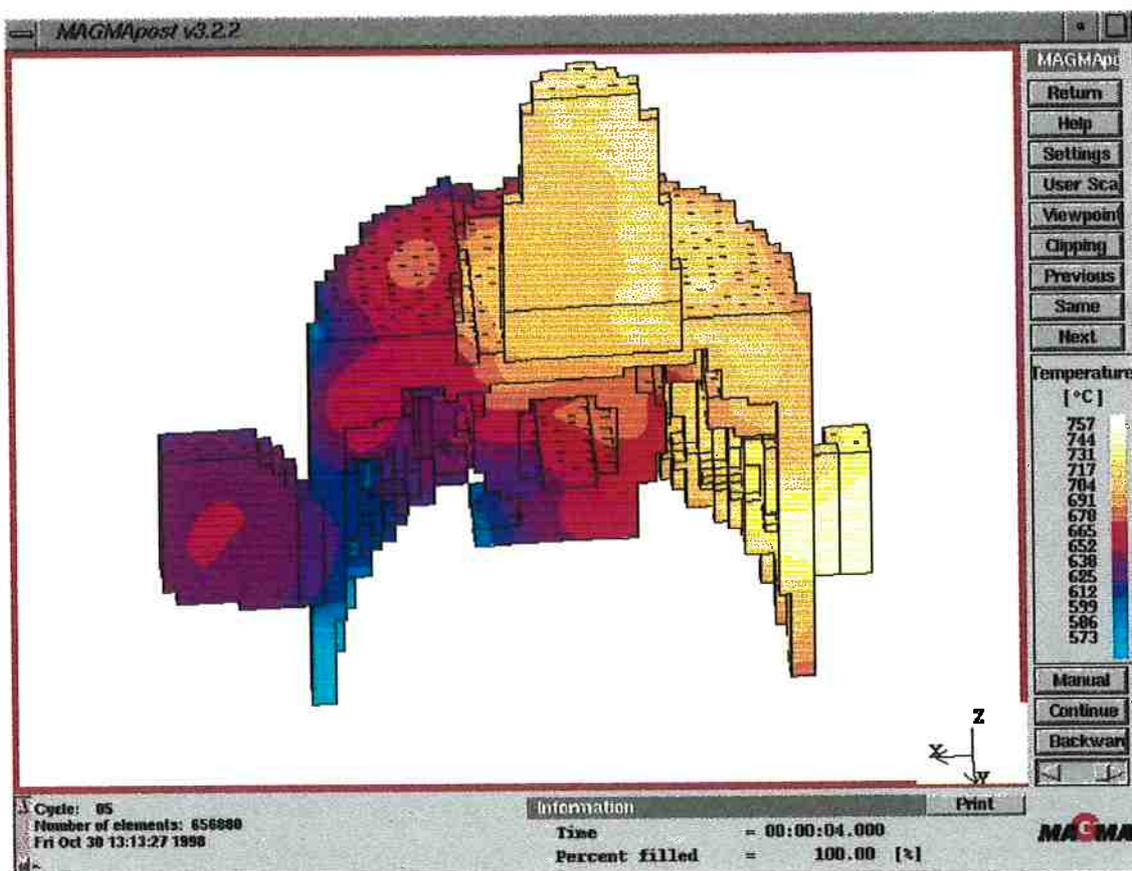


**Figura 48: Distribuição de Temperatura da Liga, ainda Líquida, logo após Preenchimento do Molde - Seção de Pressão - Presença do Canal**



Pode-se notar a diferença de temperatura entre o lado do canal de alimentação e a bolsa, que apresenta temperaturas bem inferiores às do canal. O fato pode indicar defeitos por corte de alimentação ou por problemas de “junta fria” causado pelo encontro de duas frentes de metal líquido que não estão quentes o suficiente. É um ponto que deve ser melhorado através de mudanças de processo para minimizar a possibilidade de ocorrência de defeitos.

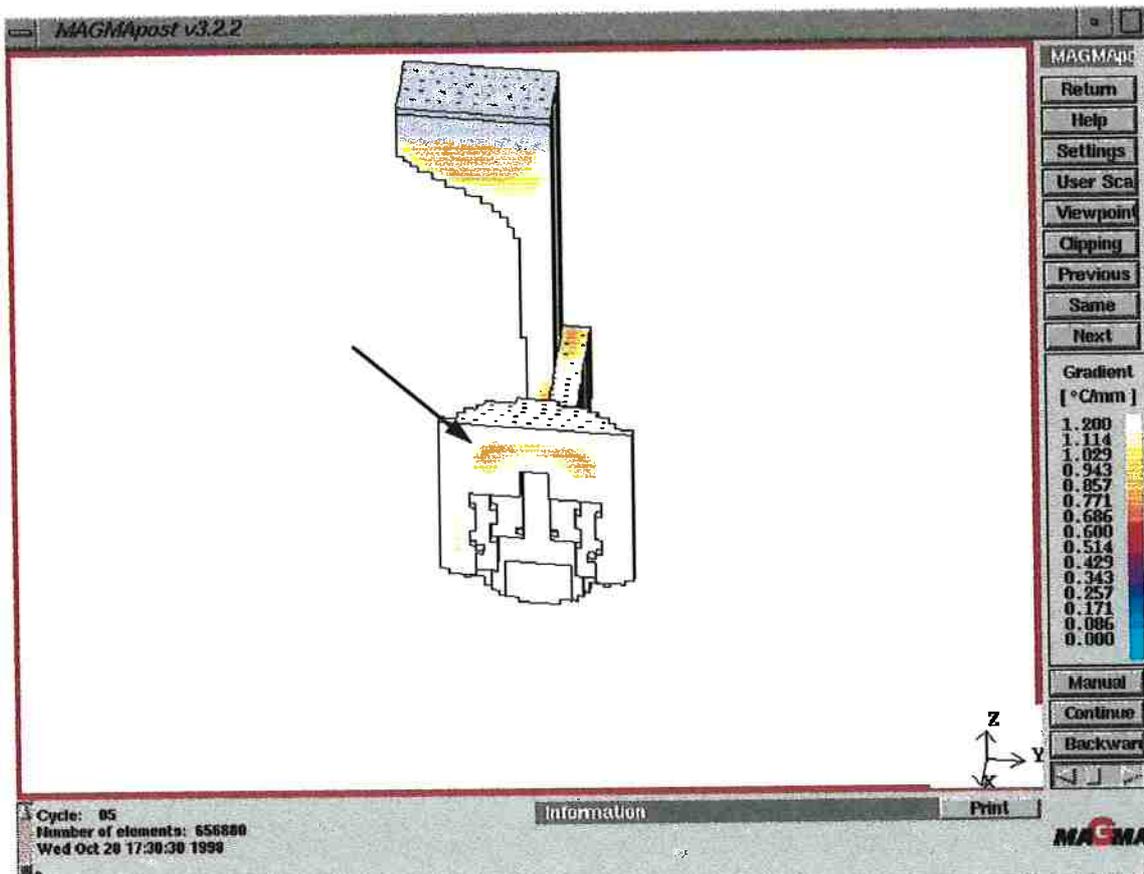
A figura 49 mostra o mesmo corte da anterior, sem a presença do canal, a fim de mostrar em maiores detalhes a distribuição de temperatura na peça. Além disso a vista foi inclinada em relação ao eixo x da peça, mostrando a distribuição de temperaturas no topo, onde também pode ser observada a influência de temperaturas devida ao canal.



**Figura 49: Distribuição de Temperatura da Liga, ainda Líquida, logo após Preenchimento do Molde - Seção de Pressão - Ausência do Canal**



A figura 50 mostra uma seção do pistão a 90° do canal de alimentação, com um corte feito antes do massalote central. O que está representado na figura é o gradiente de temperaturas onde o software calcula, para cada um dos elementos da malha gerada, no instante em que o mesmo apresenta-se 2°C acima da linha líquidos da liga.



**Figura 50: Gradiente de Temperatura ao longo da Peça - Seção do Cubo**

Pode-se perceber o gradiente mais baixo na região sob a câmara. Este fato mostra a probabilidade de incidência de defeitos no local, como de fato, é comprovado na prática, através de análise de refugo oriundo da linha de produção das peças. O fato indica um problema de direcionamento de solidificação da peça, que deve ser revisto num novo processo. A falta de



gradiente suficiente no local indica a probabilidade de última região a se solidificar.

Pode-se notar ainda uma região da saia, anterior ao furo para pino de baixo gradiente. Por não ser um local de grandes solicitações mecânicas, não há grandes preocupações quanto ao resultado.

Fazendo-se um novo corte, após o massalote, percebe-se o mesmo tipo de problema, porém acentuado. O problema pode ser observado na figura 51. O fator de criticidade na região se deve ao fato da bolsa ser mais fria em relação ao massalote, o que dá um gradiente de temperaturas menor na região observada.

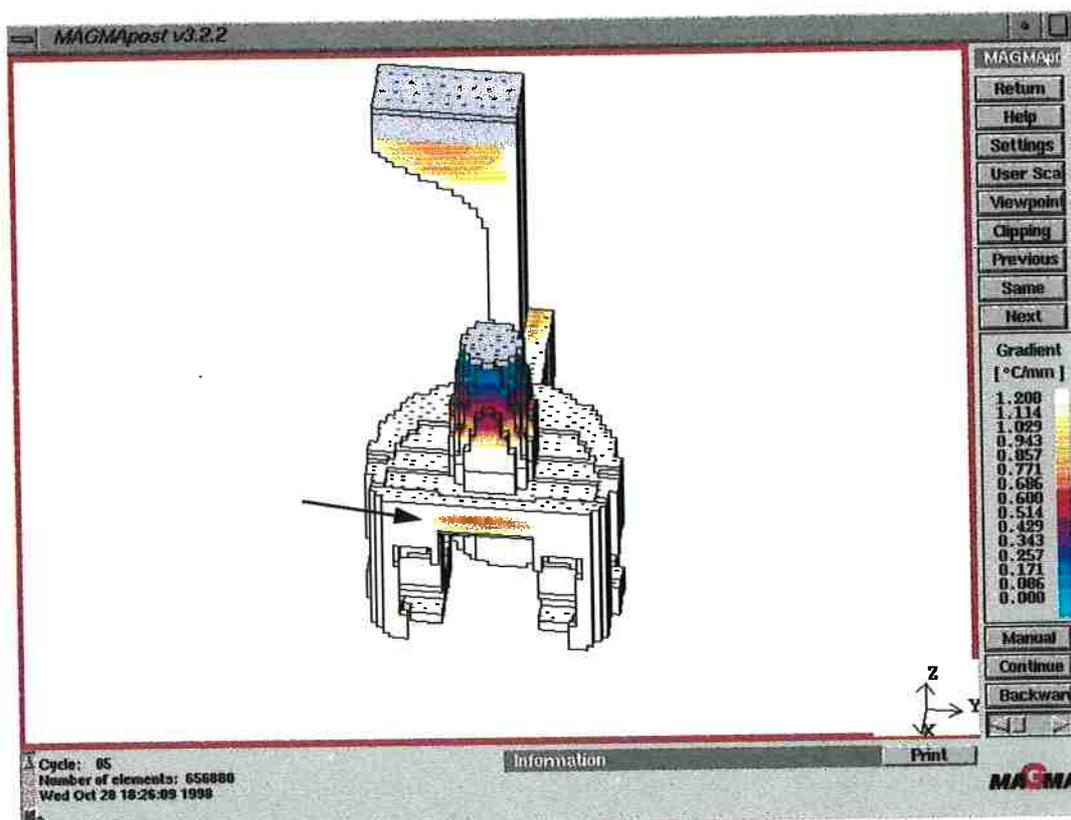
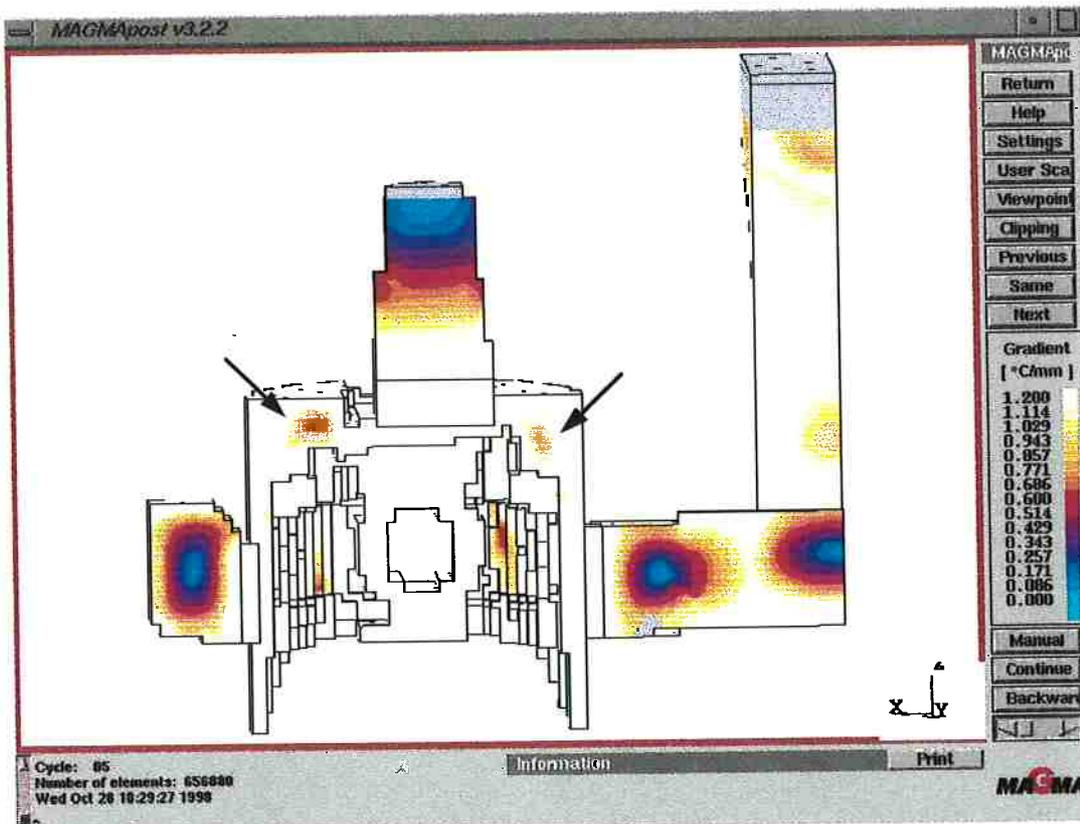


Figura 51: Gradiente de Temperatura ao longo da Peça - Seção do Cubo

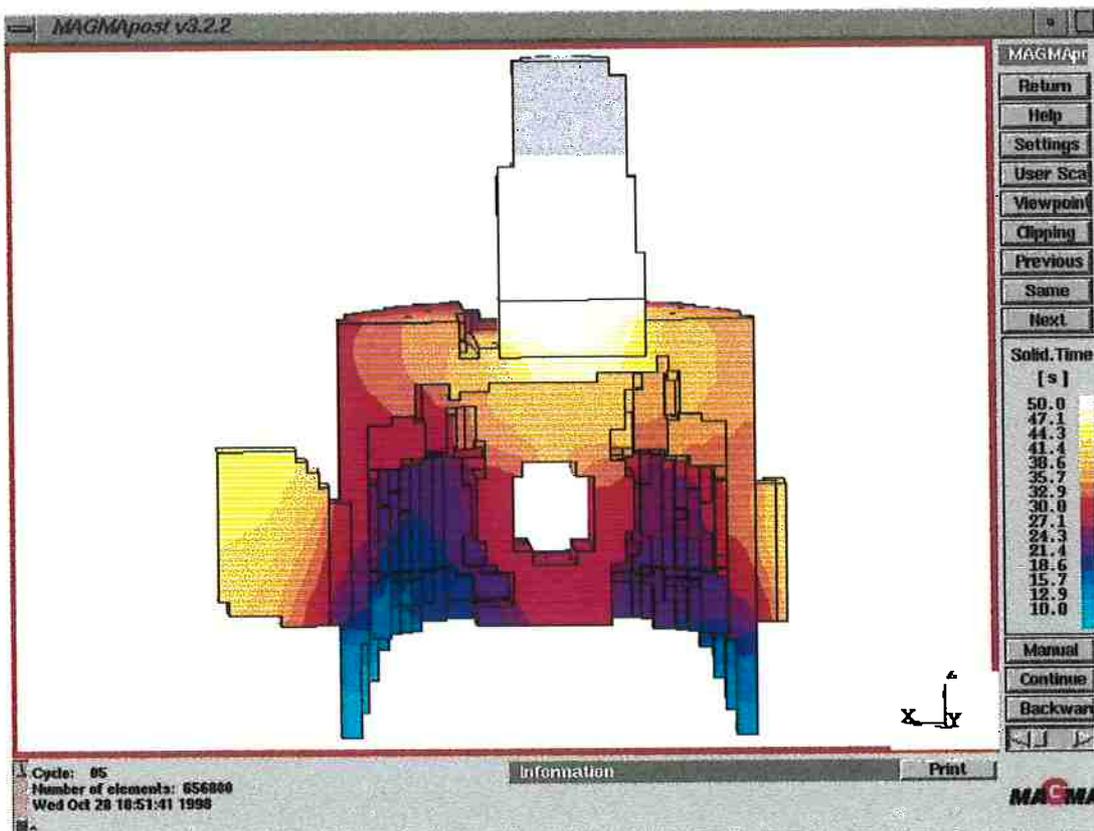




**Figura 52: Gradiente de Temperatura ao longo da Peça - Seção de Pressão**

A figura 52 acima, mostra duas regiões de possível existência de defeitos como pode ser observado também na prática. O fato curioso é a criticidade menor do lado do canal do que do lado da bolsa. Na prática, a observação do refugo de produção mostra resultados inversos: há defeitos dos dois lados mostrados pelas setas, porém a região de maior incidência se dá no local de menor problema apresentada pela simulação. O fato pode estar ligado à limitações de uma simulação matemática, à variações de processo não previstas durante a simulação, a profundidade do defeito ou, o mais provável, ao tempo em que o gradiente ocorreu. Por isso pode-se confrontar a figura anterior com os tempos de solidificação encontrados na simulação e mostrados na figura a seguir.





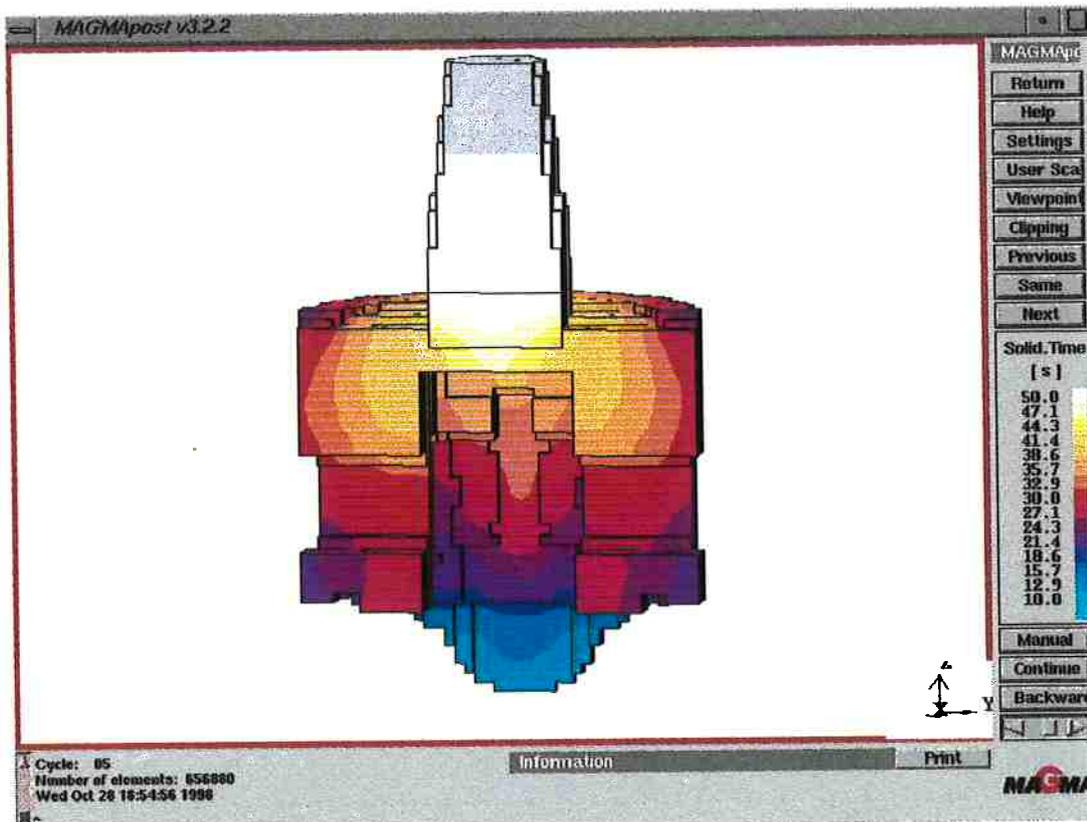
**Figura 53: Tempo de Solidificação ao longo da Peça - Seção de Pressão**

Pode-se verificar pela figura 53, acima, na região de defeitos indicada pelo gradiente de temperatura, que o tempo de solidificação observado do lado da bolsa (entre 30 e 32.9 segundos) é bastante inferior ao tempo observado para o lado do canal (entre 38.6 e 41.4 segundos). Isto significa que para o lado da bolsa, apesar do gradiente ser mais crítico, ainda havia pressão metalostática do massalote (ainda líquido) suficiente para alimentar a região e tempo suficiente para escoamento do material (17.1 segundos). No caso do lado do canal, no instante próximo à solidificação, a diferença entre tempo de solidificação da região de defeitos e o massalote é bem menor (5.7 segundos) o que reduz significativamente a possibilidade de alimentação da região defeituosa devido ao curto intervalo de tempo.

A seguir é mostrada na figura 54 a distribuição de tempos para o caso da seção do cubo. Nesse corte a distribuição em relação aos dois lados do



pistão é bem mais homogênea, mostrando uma solidificação mais direcionada para o massalote, o que vem a confirmar os dados reais observados no refugio de produção. Praticamente não há defeitos presentes nessa região da peça.



**Figura 54: Tempo de Solidificação ao longo da Peça - Seção do Cubo**

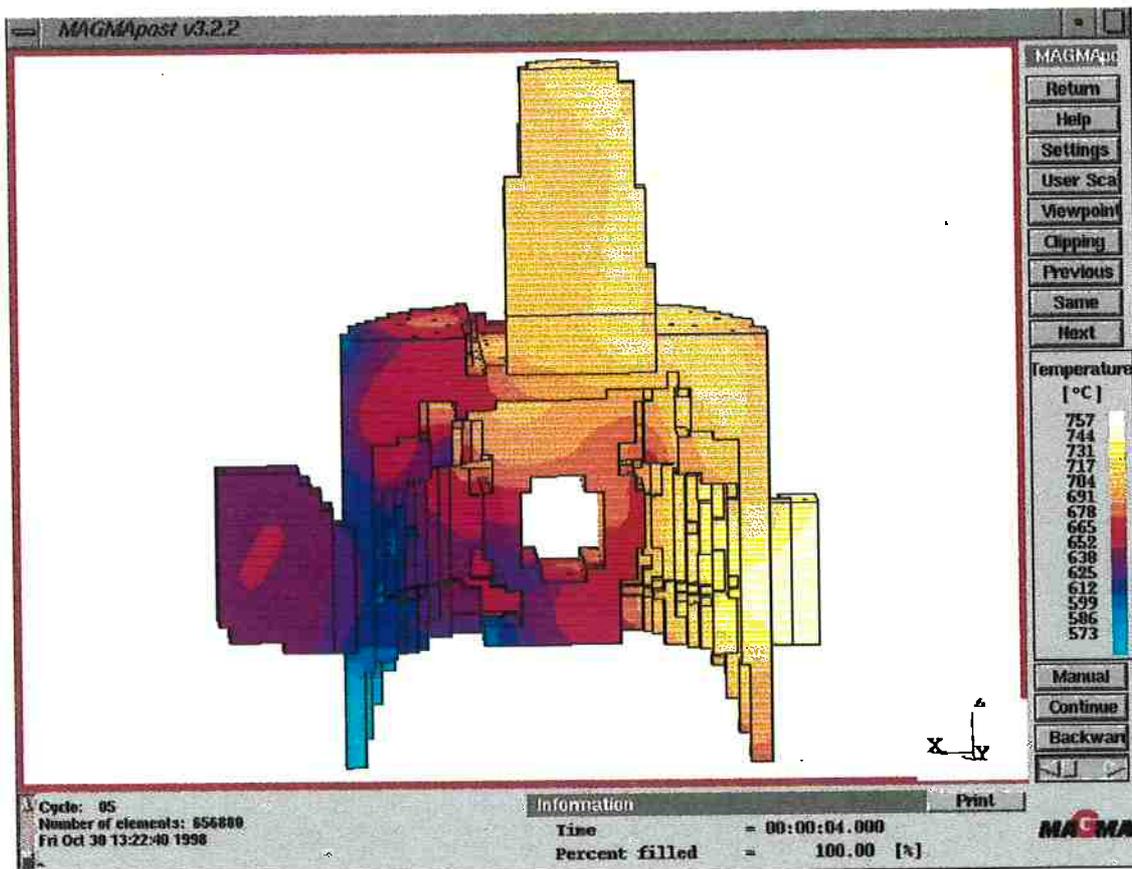
### 5.3.2. Processo Sugerido

Para o processo sugerido a fim de minimizar ocorrência de defeitos fez-se uma nova simulação com a mesma malha criada anteriormente. A única variação realizada foi a refrigeração aplicada na tampa, que passou a ser ar ao invés de água. Os resultados obtidos estão mostrados abaixo:

A figura 55 mostra a distribuição de temperaturas ao longo da peça logo após o preenchimento completo do molde. Quanto a distribuição de



temperaturas quando se compara o processo sugerido com o utilizado na produção, pode-se notar que a liga chega mais quente em alguns dos pontos da peça. Esse fato pode trazer uma redução de defeitos como junta fria e ainda manter o massalote líquido por mais tempo, o que favoreceria o escoamento de material para alimentação de outras regiões da peça.



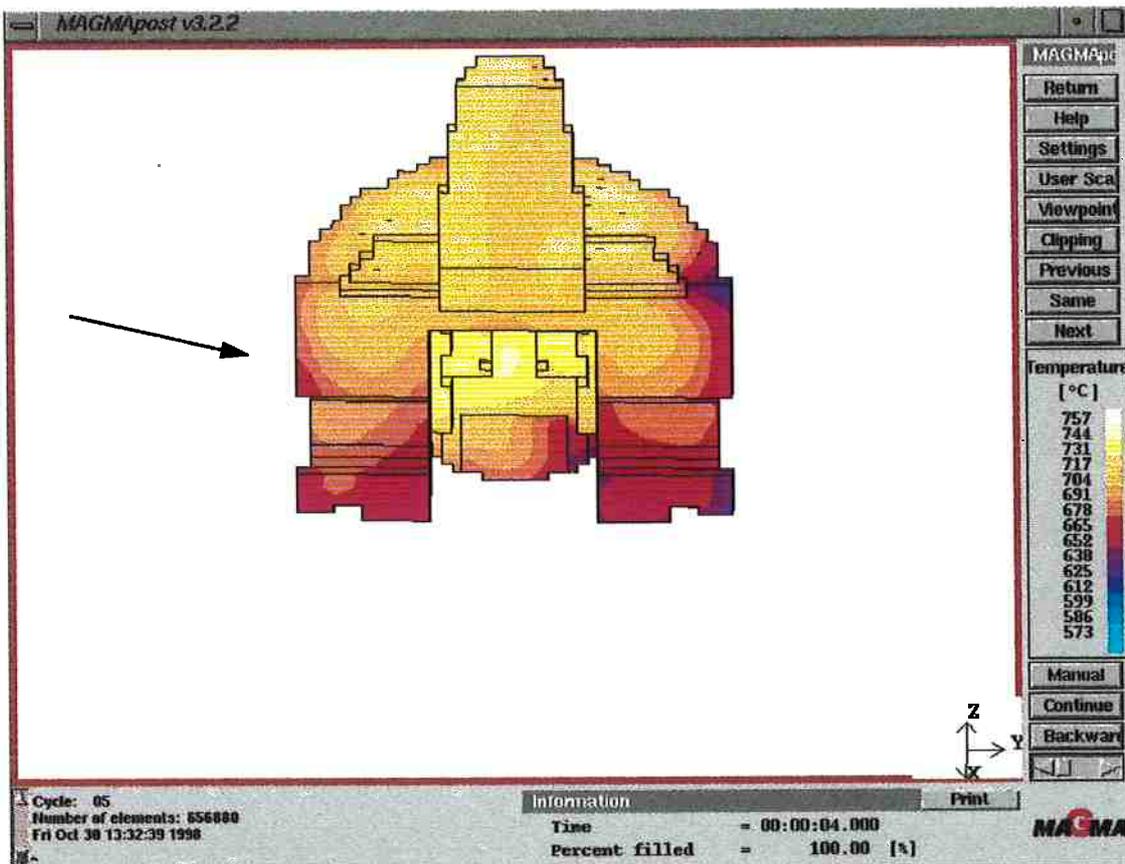
**Figura 55: Distribuição de Temperatura da Liga, ainda Líquida, logo após Preenchimento do Molde - Seção de Pressão - Ausência do Canal**

A figura 56 também mostra a distribuição de temperaturas da liga logo após o preenchimento do molde. Pode-se notar que o lado indicado pela seta apresenta temperaturas de metal maiores que o outro lado.

Pode-se concluir que o jato de metal é proposadamente direcionado para um dos lados na entrada do canal, evitando-se a erosão do macho



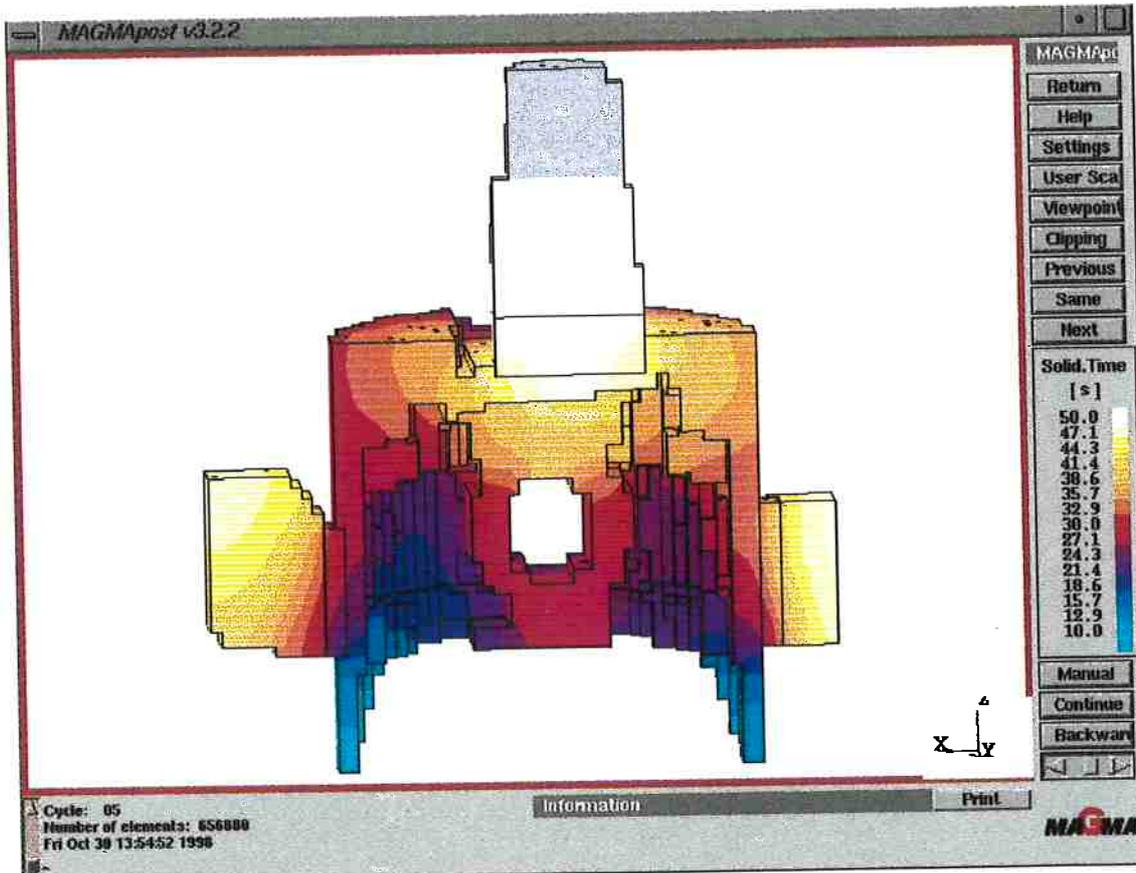
central e o encontro e “splash” de metal com o macho, ocasionando turbilhonamento do mesmo. As micrografias apresentadas anteriormente indicam, na região mais quente mostrada pelo magma, uma estrutura mais grosseira. Esta característica de diferença entre um lado e o outro da seção de cubo da peça é conseguida pela geometria da ferramenta e não pelos parâmetros de processo.



**Figura 56: Distribuição de Temperatura da Liga, ainda Líquida, logo após Preenchimento do Molde - Seção do Cubo - Ausência do Canal**

Em relação ao tempo de solidificação da peça, visto na figura 57, o novo processo sugerido mostra uma melhoria quando comparado ao processo usado em produção: a base do massalote leva mais tempo para solidificar o que promove mais tempo para alimentação das áreas com risco

de defeitos. O metal do massalote tem mais tempo para escoar até as áreas carentes de material, devido a contração.

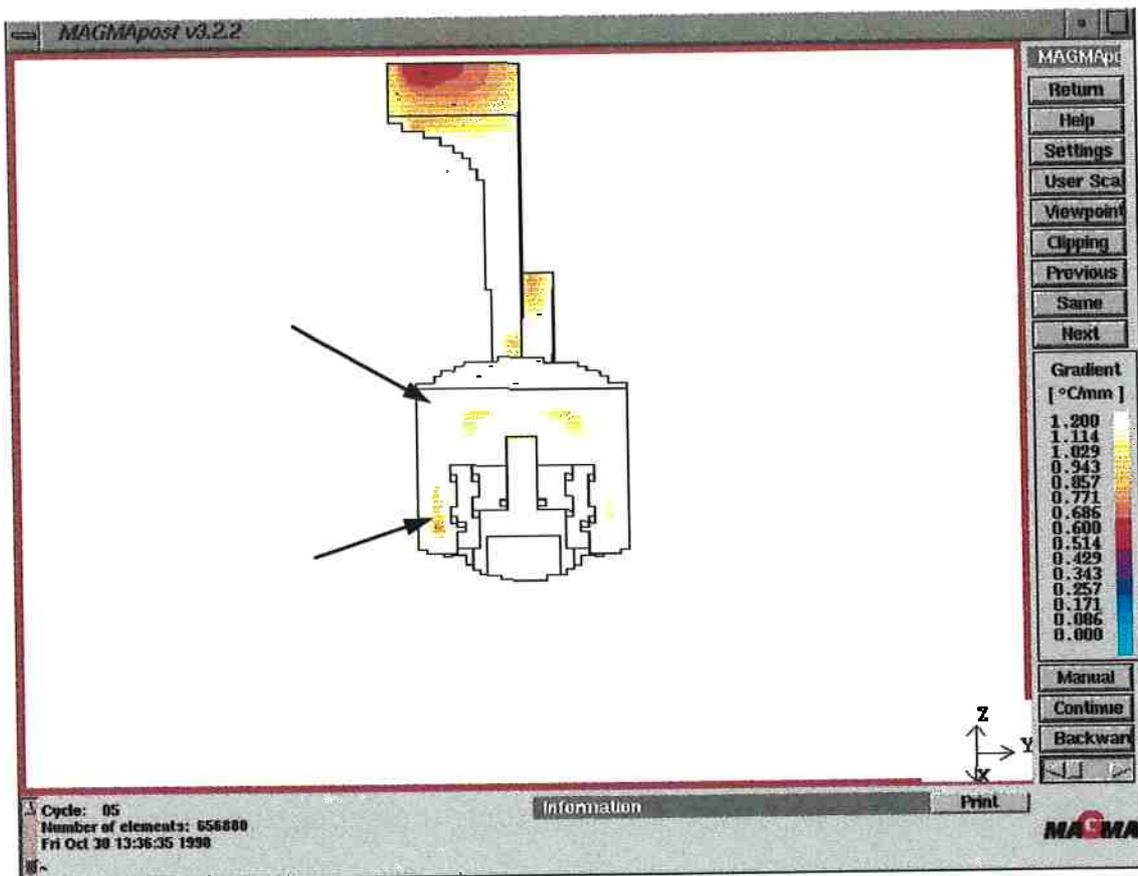


**Figura 57: Tempo de Solidificação ao longo da Peça - Seção de Pressão**

Quanto as regiões sob a câmara do pistão, a simulação mostra uma melhoria efetiva do gradiente de temperaturas, o que mostra uma maior direcionalidade da solidificação.

Em compensação há uma piora em um dos lados da saia próximo ao furo para pino. Sendo esta uma região mecanicamente quase não solicitada, a transferência do defeito é aceitável. Isto pode ser observado na figura 58.

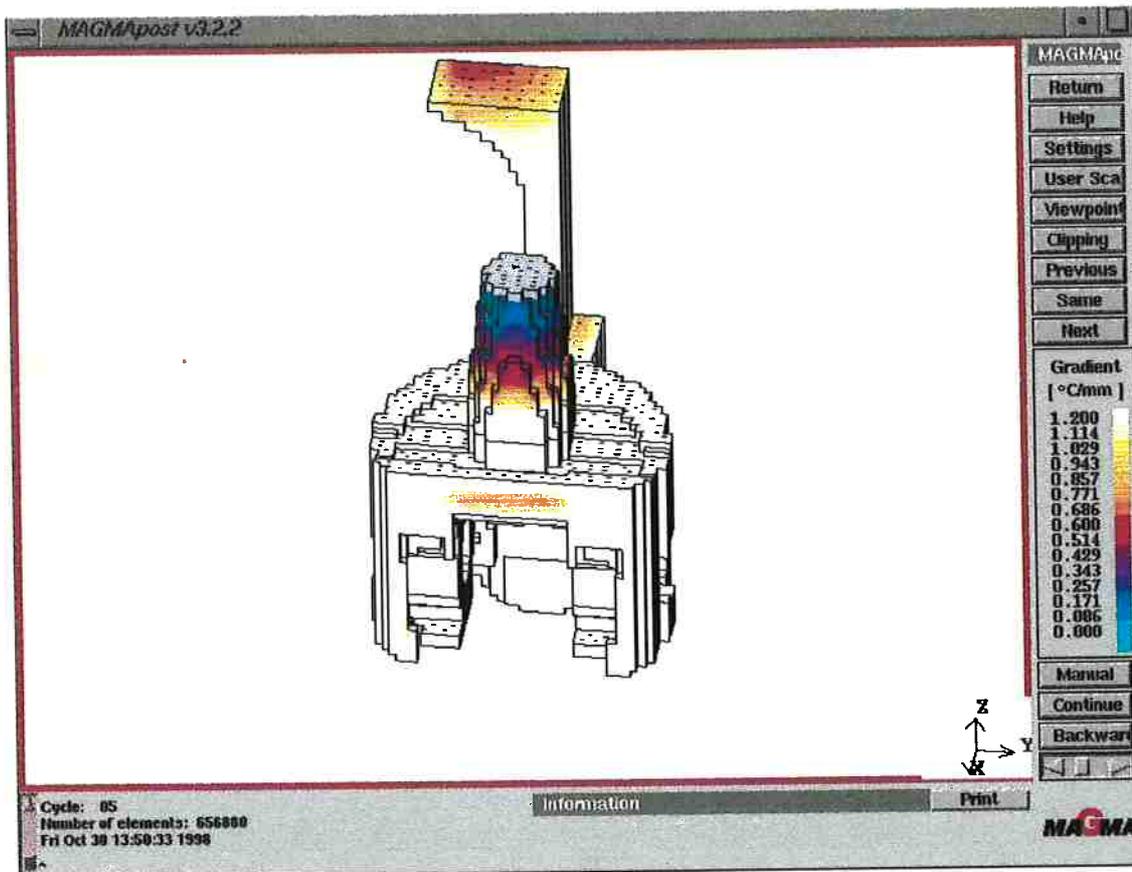




**Figura 58: Gradiente de Temperatura ao longo da Peça - Seção do Cubo**

Num corte após o massalote, visto na figura 59, nota-se ainda a existência indesejada de um gradiente baixo. Este fato tem a mesma explicação do processo utilizado em produção discutido anteriormente: pouca diferença de temperatura entre a região e a bolsa. Mesmo assim, já se nota uma melhoria quando se compara os dois processos. Isto porque, conforme mostra a distribuição de temperaturas, logo após o vazamento, na seção de pressão, percebe-se um aumento da temperatura de metal na bolsa em relação ao caso do processo realizado na produção.



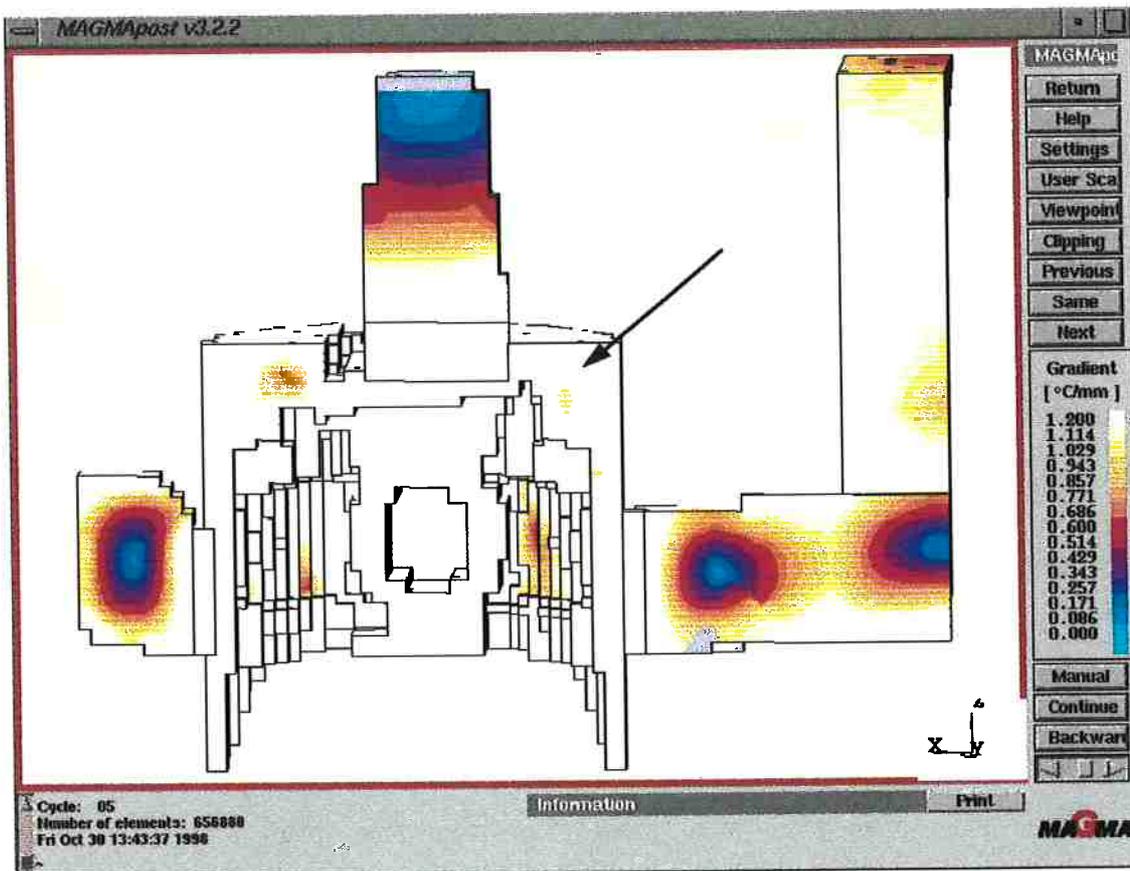


**Figura 59: Gradiente de Temperatura ao longo da Peça - Seção do Cubo**

A figura 60 que segue indica uma melhoria sensível na região de maior incidência de defeitos indicada pela seta.

Cabe lembrar que apesar do gradiente de temperaturas se mostrar mais crítico do lado contrário à seta, este resultado deve ser confrontado com os tempos de solidificação das regiões. Como explicado anteriormente, a diferença de tempo de solidificação entre a região e o massalote, permite alimentação de material do massalote para o local, por escoamento de metal.





**Figura 60: Gradiente de Temperatura ao longo da Peça - Seção de Pressão**

#### *5.4. O Processo Sugerido e Resultados do seu Teste*

Pode-se verificar pela simulação que houve uma melhoria sensível, principalmente do topo do pistão, com a utilização do processo sugerido. Por isso resolveu-se testar o mesmo, produzindo-se uma maior quantidade de peças que nos processos testados para entendimento do caminho de solidificação.



De 132 peças usinadas, apenas uma delas apresentou o Defeito D. No mais, encontrou-se duas peças defeituosas: ambas apresentando porosidade na região do furo para pino (Defeito C).

Apesar de a quantidade de peças não ser significativa para a análise em uma produção, pode-se animar com os resultados encontrados no sentido de resolver o defeito D, que é o mais significativo em termos de quantidade de peças refugadas.

Quanto aos Defeitos do tipo C, encontrados em duas peças após usinagem, são menos críticos para o desempenho da peça, quando comparados com o Defeito D. De qualquer forma, pode-se ainda tentar diferenciar a refrigeração utilizada entre os dois lados da pinole, impondo um gradiente de temperaturas maior do lado crítico do furo para pino, mostrado na simulação.

O refugo encontrado com o teste para o processo sugerido com as 132 peças foi de 2,2%. Esse resultado mostra uma possibilidade de redução de refugo e deve ser testado em grande quantidade, na linha de produção, a fim de se obter resultados significativos.

#### *5.5. Demonstração de Resultados Obtidos na Linha de Produção da Indústria através de Acompanhamento de Refugo para as Mudanças que se Tornaram Efetivas*

Durante todo o período de desenvolvimento deste trabalho foi feito um acompanhamento de defeitos encontrados após usinagem das peças, analisando-se 100% da produção.



As figuras a seguir mostram a redução de defeitos alcançada pelas mudanças que se tornaram efetivas no processo de fabricação da peça. A figura 61 mostra a evolução de cada um dos defeitos estudados neste trabalho e a figura 62 traz a evolução de descarte de peças, levando-se em conta todos os defeitos gerados durante o processo de fundição, incluindo-se aqueles não estudados neste trabalho. O mês zero, apresentado nos gráficos mostra a situação dos defeitos antes que qualquer mudança tivesse sido realizada. Para facilitar o acompanhamento da evolução do processo com as mudanças realizadas, seguem os meses respectivos a cada uma das mudanças, uma vez que não foram todas executadas de uma vez:

**Defeito A (presença de inclusão de óxidos):**

*Mês 1:* Alteração do tratamento de liga (com fluxos sólidos) e controle de temperatura

*Mês 4:* Alteração da distância de vazamento do metal

*Mês 7:* Alteração do tratamento de liga (com fluxos gasosos)

**Defeito B (porosidade na saia):**

*Mês 1:* Mudança no raio da coquilha

**Defeito C (porosidade na região do furo para pino):**

*Mês 5:* Mudança da refrigeração da pinole, que passou a ser feita com ar

**Defeito D (Vazios no topo do pistão):**

*Mês 2:* Mudança de tratamento de liga, com mais etapas de escorificação



Mês 4: Alteração da distância de vazamento de liga e novo projeto de saída de gases na tampa do pistão

Mês 7: Alteração do tratamento de liga (com fluxos gasosos)

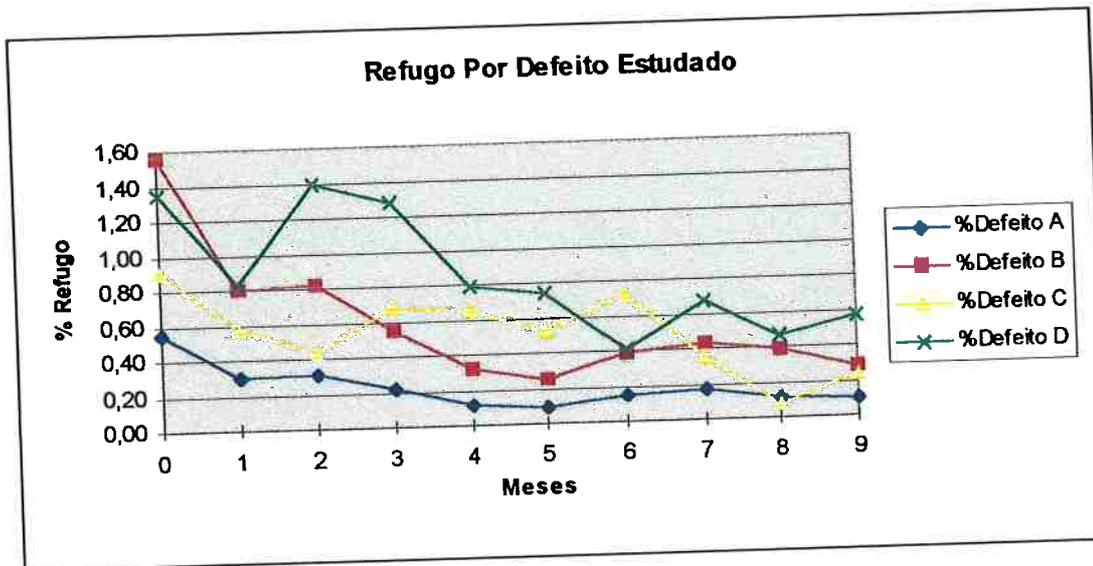


Figura 61: Descarte Descritivo por Defeito Estudado e por Mês

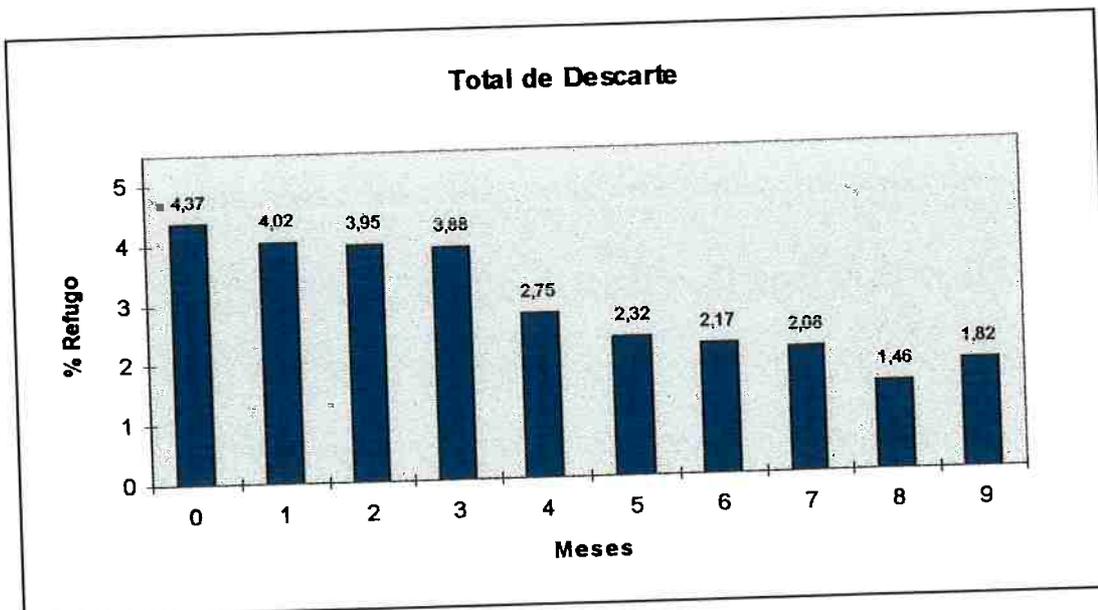


Figura 62: Descarte Total por Mês



## 6. Conclusões

O efeito de diferentes refrigerações altera a solidificação das peças, quanto a direcionalidade, microestrutura, macroestrutura e existência ou não de defeitos.

A direcionalidade de solidificação pode ser melhorada quando utiliza-se ar na tampa da ferramenta para resfriamento no topo da peça.

A microestrutura sofre efeitos decorrentes de maior facilidade de nucleação ou não dos grãos. Quanto maior o superresfriamento imposto (água na tampa), maior a quantidade de dendritas de fase  $\alpha$  formadas e menor o seu tamanho. Pode-se encontrar na mesma peça microestruturas típicas das três regiões do diagrama de equilíbrio: regiões dendríticas, regiões típicas de eutético e regiões de precipitação primária de cristais de fase  $\beta$ , mesmo sendo a liga de composição eutética

A macroestrutura pode tornar-se menos grosseira com o uso de água para aumentar a severidade do resfriamento, o que não implica em melhores resultados para a peça, que pode sofrer com corte de alimentação em regiões de paredes mais finas e apresentar descontinuidades críticas para seu desempenho.

A redução de refugo em um processo de fabricação deve levar em conta os ganhos financeiros com esta redução e os gastos representados nos



investimentos para esta redução. Em determinados casos, é mais rentável conviver com um defeito do que investir para sua exclusão. Deve-se cuidar para que os defeitos restantes não influam sobre o desempenho do produto.

O software de simulação foi bastante útil na previsão de efeitos causados por alterações do processo, indicando o caminho a ser tomado para a fabricação das peças na linha de produção.



## **Referências Bibliográficas**

- [1] Fundição & matérias-primas, Anoll , nº 15 - setembro-outubro 1996; p. 6-8
- [2] Fundição & matérias-primas, Ano III, nº 23 - janeiro-fevereiro 1998; p.12-14
- [3] Fuoco, R.; "Efeito dos Tratamentos de Modificação sobre a Formação de Microporosidades em Liga de Alumínio A356". São Paulo, Universidade de São Paulo, 1996; 300p. (Tese de Doutorado) p.1-24
- [4] Chiesa, F.; Fuoco, R. & Santarini, M. - "Fundição de Ligas de Alumínio Usadas em Componentes para a Indústria Automobilística" - Fundição e Serviços, no 32, junho, 1996.
- [5] Campbell, J. ; "Future Casting Process for High Quantity and High Quality". 60th World Foundry Congress - The Hague - September, 1993.
- [6] Rooy, E. L.; "Aluminum and Aluminum Alloys"; Metals HandBook, American Society for Metals, v.15, Casting, 1988; p.743-770
- [7] Miglincky, M.; "Noções de Tratamentos do Alumínio e suas Ligas. Não Publicado, 1997
- [8] Backerud, L.; Chai, G. and Tamminen, J.; "Solidification Characteristics of Aluminum Alloys"; v.2, Foundry Alloys, AFS/Skanaluminum, 1991; p.13-31
- [9] Finardi, J.; "Estudo das Ligas de Alumínio". Não Publicado.



- [10] Robert, Maria Helena, Curso "Solidificação do Alumínio e suas Ligas" 26 e 27 de março de 1998, ABAL.
- [11] Granger, A. D.; Elliott, R.; "Solidification of Eutetic Alloys"; Metals HandBook, American Society for Metals, v.15, Casting, 1988; p.159-168
- [12] American Foundrymen's Society, "Aluminum Casting Technology", 2ª edição, 1993; p19-43.
- [13] Elliot R.; "Eutetic Solidification Processing - Crystalline and Glassy Alloys"; 1983; p.55-91.
- [14] Rosenqvist, T.; "Principles of Extractive Metallurgy"; MacGraw-Hill, 546p., 1974.
- [15] Tenório, J. A. S., Delgado, F. & Barros, A. M.; "Efeito das Variáveis Metalúrgicas no Processo de Reciclagem de Latas de Alumínio" - V Seminário de Tecnologia da Indústria do Alumínio - ABAL - São Paulo, maio 1995
- [16] Mondolfo, L. F.; "Aluminum Alloys Structure & Properties"; Butterworths, London, 971p., 1986.
- [17] Chadwick, G. A.; "Metallography of Phase Transformations"; Butterworths, London, 1972; p.126-147
- [18] Kaiser Aluminum, "Casting"; 376p.; p.67-74.
- [19] American Foundrymen's Society; "Design of Aluminum Castings"; 56p.; p.7.
- [20] Gruzleski, J. E. & Closset, B. M.; "The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys"; 1990; 256p.



[21] Arnberg, L., Dahle, A. K., Paradies, C. J. & Syversten, F.; Feeding Mechanisms in Aluminum Foundry Alloys ;American Foundrymen's Society 99° Casting Congress, Abril 1995. Versão não publicada.

[22] Sarabanda, J. V. L.; "Estudo de Fadiga sob Controle de Deformação de Duas Ligas de Alumínio Empregadas em Pistões de Motores Diesel"; São Paulo, Universidade de São Paulo, 1991. 215p. (Tese de Mestrado)

[23] Smiley, L.; "Simulação de Solidificação - Uma Ferramenta para as Fundições no Mercado Global"; Fundição & Matérias-Primas, ano III, nº 21 , outubro-novembro, 1997.

[24] Fuoco, T. H.; Fundição e Serviços, Ano IV, nº 26, junho-julho, 1994.

[25] Mendes, J. A. C., Visconti, C. E. C., Rondet, L. M. & Ferran, G.; "Otimização do Processo de Fundição através de Simulação Matemática da Solidificação". CONAF 93 - Congresso Nacional de Fundição, ABIFA, 1993.

[26] Fundição e Serviços, Ano VII, nº 53, Maio, 1997; p.54-56.

