



FEUP Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

**Optimização do processo de Fundição Injectada
através da minimização do aprisionamento de ar
na primeira fase do ciclo de injeção**

Projecto de Fim de Curso - 2006

Paulo Jorge Santos Ferreira

Financiamento FCT/POCI



União Europeia
FEDER



Governo da República Portuguesa

Gência.Inovação
2010

621(047.3)/
LEM
2006/FERRp

156



FEUP Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

**Optimização do processo de Fundição Injectada
através da minimização do aprisionamento de ar
na primeira fase do ciclo de injeção**

Projecto de Fim de Curso - 2006

Paulo Jorge Santos Ferreira

Financiamento FCT/POCI



União Europeia
FEDER



Governo da República Portuguesa

Ciência, Inovação
2010

Índice

Introdução	3
1 - O CINFU	4
2 - A Fundição Injectada	6
3 - História	8
4 - Máquina de Fundição Injectada	9
5 - Tecnologia de fundição injectada de câmara fria	13
6 - Porosidade	14
6.1 - Como reconhecer a porosidade por gás	14
6.2 - Aprisionamento de ar na camisa de injeção	16
7 - Procedimento para estudo de minimização do aprisionamento de ar na primeira fase da injeção	21
8 - Dimensionamento do canal de alimentação	22
9 - Leis de movimento do pistão	24
9.1 - Dinâmica da onda formada na camisa de injeção durante a fase lenta da moldação por fundição injectada	24
9.2 - Lei de movimentação exponencial e otimizada	26
9.3 - Lei de aceleração da NADCA	29
9.4 - Aplicação e comparação de resultados	29
10 - Propriedades da liga de alumínio	31
11 - Cálculo dos perfis de velocidade de injeção	32
11.1 - Velocidade/deslocamento segundo a lei da aceleração otimizada	33
11.2 - Velocidade/deslocamento segundo a lei de aceleração exponencial	35
11.3 - Velocidade/deslocamento do pistão segundo NADCA	37
12 - Simulação por computador aplicada à fundição injectada	39
12.2 - Capacidades e limitações dos sistemas comerciais	40
12.3 - Quais são os dados necessários para a simulação?	42
13 - Simulação em Flow 3D	46
13.1 - Simulações de enchimento na primeira fase do ciclo de injeção	48
13.2 - Simulação segundo perfil de velocidade Convencional	49
13.3 - Simulação segundo lei de aceleração otimizada	50
13.4 - Simulação segundo lei de aceleração exponencial	52
13.5 - Simulação segundo lei indicada pela NADCA	54
13.6 - Simulação segundo aproximação da lei exponencial sem patamar de velocidade constante	55
14 - Testes experimentais da primeira fase de fundição injectada	56
14.1 - Procedimento de testes experimentais	58
14.2 - Curvas testadas na máquina	58
14.3 - Determinação do deslocamento do pistão na altura de camisa cheia (fim da primeira fase de enchimento)	60
14.4 - Determinação do deslocamento do pistão na altura em que o metal chega à secção de ataque	61
14.5 - Injeção interrompida no final da primeira fase para os perfis de velocidade estudados e análise destrutiva das provas	62
14.6 - Termografia	65
14.6.1 - Classificação dos sistemas de termografia por infravermelhos	66
14.6.3 - Análise termográfica do molde antes e após lubrificação	66
14.7 - Raio X	68
14.7.1 - Ciclo de injeção sem fase de compactação para os perfis de velocidade estudados e análise não destrutiva por raio X das provas	70
15 - Ferramenta de ajuste dos parâmetros de movimentação do pistão para a primeira fase do ciclo de injeção	71
15.1 - Otimização	76
15.2 - Otimização da primeira fase da injeção	77
Conclusão	80
Agradecimentos	82

105270
CDU 621(647.3) / Len 206 / 11627
24 02 10

Introdução

No âmbito da cadeira de Projecto de Fim de Curso relativa à Opção de Tecnologia de Moldação por Injecção, da Licenciatura de Engenharia Mecânica, está integrada uma componente de projecto desenvolvido em parceria com uma empresa do ramo de 6 meses. A finalidade do projecto está no desenvolvimento de uma análise do processo de enchimento de um molde para Fundição Injectada, para desenvolver uma ferramenta que permita uma fácil sistematização dos parâmetros referentes ao seu enchimento. Nesta análise devem ser estudadas as diferentes etapas de enchimento de um molde, com especial ênfase na primeira fase do processo, recorrendo à utilização de software de simulação e a testes de enchimento na célula de Fundição Injectada, com a finalidade de otimizar o processo.

O projecto englobará as seguintes etapas:

- Contacto com o processo;
- Estudo de um molde, utilizando-o como elemento de referência;
- Análise do software de simulação existente no mercado;
- Realização da modelação e simulação do enchimento do molde em estudo, com especial ênfase na análise do comportamento do metal no interior da camisa de injecção durante a primeira fase do ciclo de injecção;
- Verificação prática dos resultados experimentais.

A ferramenta de ajuste dos parâmetros de entrada deverá ser criada de forma que, a partir do molde em estudo, possa ser utilizada para os mais diversos moldes e condições de injecção.

1 – O CINFU

O CINFU – Centro de Formação Profissional da Indústria da Fundição – foi criado em 24 de Abril de 1981 por protocolo assinado entre o IEFP e a Associação Portuguesa de Fundição (APF), tendo-se tornado um Centro de Gestão Participada a 27 de Maio de 1987.



Fig. 1 – Cinfu - Centro de Formação Profissional da Indústria da Fundição

O CINFU tem como objectivo máximo valorizar o sector da fundição, nomeadamente através da formação profissional, actuando ao nível da qualificação profissional de jovens e adultos, bem como promovendo a reciclagem formativa, a especialização e o aperfeiçoamento de trabalhadores activos ou desempregados de curta ou longa duração.

O CINFU oferece também serviços de apoio às empresas do sector da Fundição Injectada.

Serviço de apoio às empresas

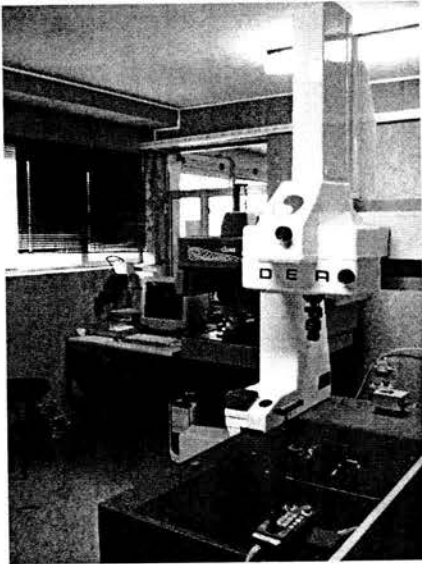


Fig. 1.1 – Laboratório de metrologia

Tecnologias Convencionais – serviços prestados em sectores tão diversos como a fundição, a indústria do vidro, a cerâmica, os plásticos ou a ourivesaria. As principais áreas de actuação são a criação de protótipos, o apoio técnico e tecnológico, a execução de pequenas séries ou de moldes e modelos, bem como a execução de equipamentos de fundição em materiais compósitos.

Área Laboratorial - os serviços fornecidos aplicam-se a todos os sectores da indústria que necessitem do controlo de qualidade de materiais (execução de ensaios mecânicos, análises químicas clássicas, espectrometria de absorção atómica ou espectrometria de emissão automática, ensaios metalográficos) e das condições de higiene e segurança industrial.

Novas Tecnologias - neste campo, o CINFU tem exercido a sua actividade em praticamente todos os domínios do Projecto e Fabrico Integrado por computador, nomeadamente na área da Investigação e Desenvolvimento, tendo participado em inúmeros projectos em colaboração com empresas e organismos de I&D, nacionais e estrangeiros. De realçar que o CINFU foi pioneiro em Portugal a dar formação em CAD/CAM.

2 – A Fundição Injectada

A Fundição Injectada é um processo para produção de peças de ligas metálicas não ferrosas de alumínio, zinco, magnésio e cobre, de dimensões precisas, formas perfeitamente definidas e com acabamento superficial liso ou texturizado.

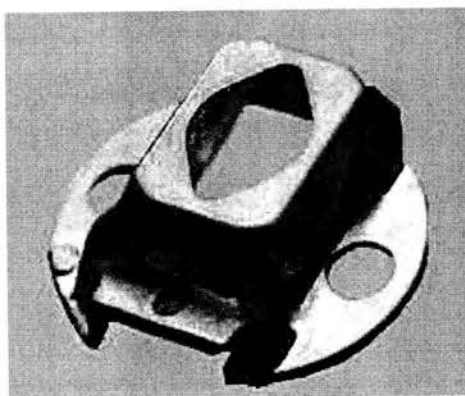


Fig. 2.1 – Peça de Fundição Injectada

Este processo permite grande versatilidade na produção de peças com formas complexas, bem como flexibilidade no seu desenvolvimento.

A Fundição Injectada pode ser descrita como sendo um processo “com a mais curta distância entre a matéria-prima e o produto final”.

As peças obtidas na Fundição Injectada representam, quantitativa e qualitativamente, o produto de um dos mais volumosos processos de produção de peças metálicas. Estas peças são componentes de milhares de consumíveis, produtos comerciais e industriais, principalmente nos sectores da indústria automóvel, aplicações domésticas, produtos recreativos e de lazer, equipamentos de jardinagem, equipamento eléctrico, informático, ferramentas, brinquedos, ferragens, etc.

As paredes finas são uma característica comum das peças obtidas por fundição injectada. Normalmente, são observados tempos de solidificação relativamente curtos. As regiões mais finas solidificam mais rapidamente, em algumas centésimas de segundo.

A imagem seguinte ilustra como se processa o ciclo de fundição injectada:

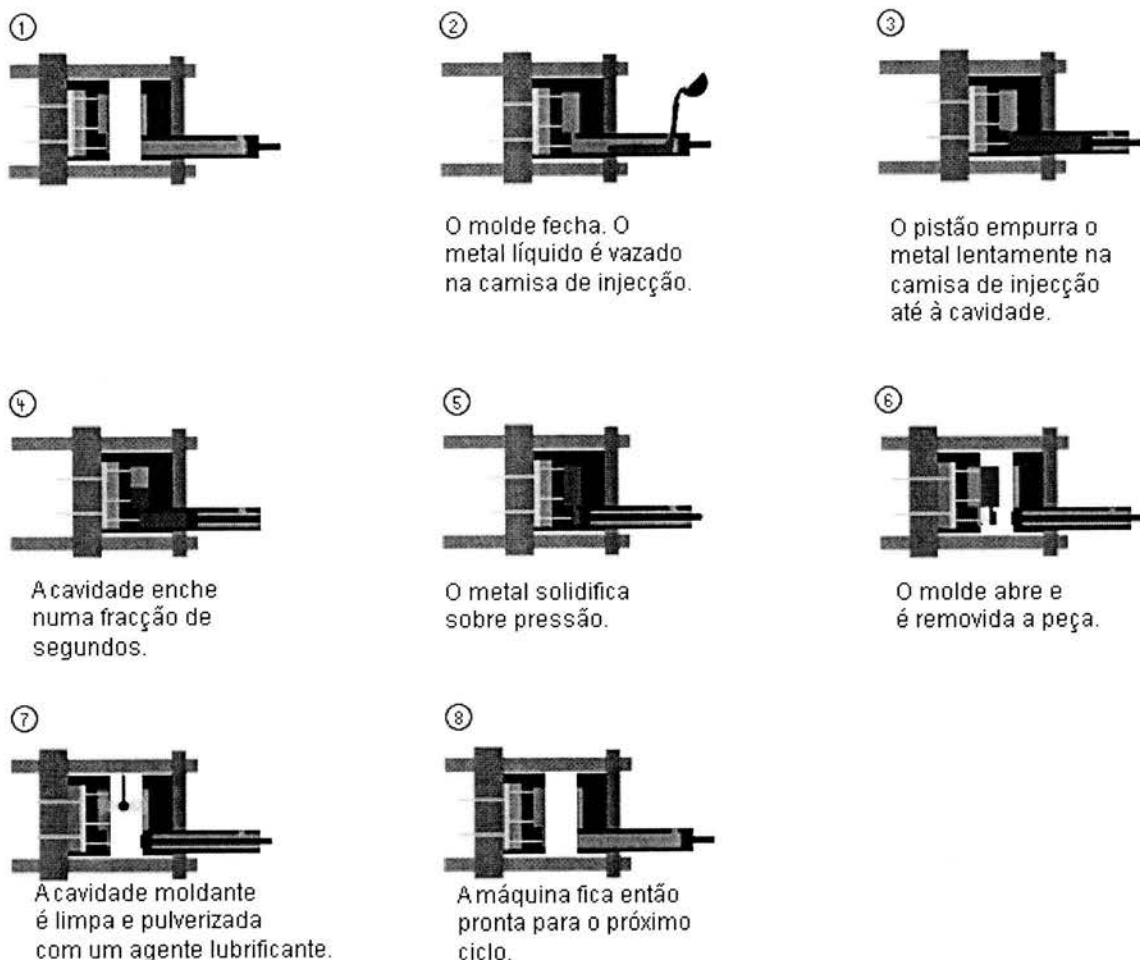


Fig. 2.2 – Ciclo de Fundição Injectada

Para minimizar as consequências da solidificação, são necessários tempos de enchimento muito baixos, normalmente de algumas centenas de segundo. Nestas condições, os regimes de fluxo no canal de alimentação são turbulentos.

As pressões elevadas, na ordem dos 70MPa, são também comuns neste processo. Tais pressões são necessárias não só para garantir que o fluxo de metal chega às mais ínfimas zonas da cavidade, mas também para forçar o

metal a ocupar os vazios gerados no processo de solidificação. Devido às funções executadas por este tipo de peças, a porosidade causada quer pela contracção na solidificação, quer pela retenção de gás durante o enchimento é um factor determinante na qualidade final de uma peça.

Os moldes constituem o próprio núcleo de uma operação de fundição injectada. São concebidos e construídos para trabalhar num ambiente hostil onde estão continuamente sujeitos a cargas termo-mecânicas extremas. Devido aos custos elevados e aos prazos necessários associados à sua fabricação, os moldes são usados para muitos ciclos de injeção. Durante a vida útil de um molde, podem ser produzidas 500 000 ou mais peças.

3 - História

Os primeiros exemplos de moldação por fundição injectada – por oposição à fundição por gravidade – ocorreram em meados de 1800. A patente da primeira máquina manual do tipo moldação por impressão foi registada por Sturges, em 1849. O processo esteve limitado ao tipo de impressão durante os 20 anos subsequentes, mas o desenvolvimento de outros formatos aumentou progressivamente até ao final do século XIX. Em 1892, começaram a ser produzidas aplicações comerciais, incluindo partes de fonógrafos e caixas registadoras, tendo igualmente sido iniciada a produção em massa de vários tipos de peças.

As primeiras ligas usadas foram vários compostos de chumbo e estanho, que foram caindo em desuso com a introdução das ligas de zinco e alumínio, efectuada em 1914. Seguiram-se o magnésio e as ligas de cobre e, nos anos 30, as várias ligas modernas que são usadas ainda na actualidade.

O processo de fundição injectada tinha então evoluído do método original de baixa pressão para as tecnologias que incluem a fundição injectada por alta pressão – com forças que ultrapassavam os $316,4 \text{ kgf/cm}^2$ – *squeeze casting* e *semi-solid die casting*. Estes processos modernos são capazes de produzir peças de grande integridade, moldações na forma de produto semi-acabado

com excelente acabamento superficial.

4 - Máquina de Fundição Injectada

Devido às diferentes temperaturas de fusão das várias ligas usadas na Fundição Injectada, existem dois tipos de máquinas:

- Máquina de câmara quente
- Máquina de câmara fria

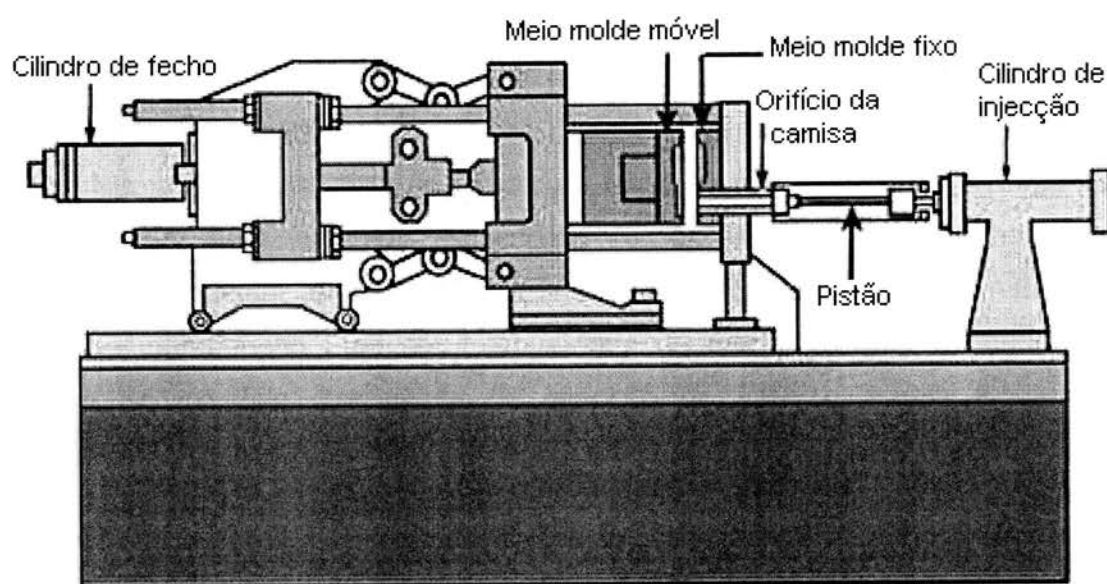


Fig. 4.1 – Esquema de uma máquina de Fundição Injectada

As máquinas de câmara quente, por serem indicadas principalmente para ligas de zinco e de latão, não interessam para o caso de fundição injectada com ligas de alumínio.

As máquinas de câmara fria diferem das anteriores num ponto essencial: o pistão e o cilindro não se encontram submersos no metal fundido. Por este facto, o conjunto de injeção encontra-se menos sujeito ao ataque, por erosão, do calor gerado pelo forno e são usadas para injeção ligas de alto ponto de fusão.

O metal fundido é vazado numa câmara chamada camisa de injeção,

através de uma abertura, forçando o metal a entrar no molde sob pressões muito elevadas.

Neste processo é preciso maior quantidade de metal que o necessário para encher a cavidade do molde, o que permite manter a pressão sobre o metal que se encontra no seu interior. O metal em excesso é extraído juntamente com a peça fundida constituindo assim o gito.

O processo neste tipo de máquina é mais lento que na de câmara quente devido ao mecanismo de vazamento do metal fundido. As pressões de injeção usadas neste tipo de máquinas são superiores às usadas em câmara quente, pelo que necessitam de uma construção mais robusta e resistente para o mesmo tipo de peças.

Numa célula de injeção existe um forno de manutenção com a liga de alumínio que será injectada posteriormente, à temperatura aproximada de 680°C. Para efectuar uma injeção, uma colher refractária começa por retirar do forno de manutenção uma certa quantidade de liga e vaza-a no interior da camisa de injeção. Na célula de injeção do CINFU, a liga é vazada directamente do forno de manutenção (forno doseador), através de uma calha até ao orifício da camisa de injeção.

O ciclo de injeção começa quando o molde fecha e o metal é transportado para o interior da camisa de injeção. O metal é vazado do forno de manutenção e transferido para a camisa de injeção o mais rapidamente possível, para minimizar perdas de calor, e de forma a causar o menor distúrbio possível. Neste momento aos problemas de agitação adicionam-se os de oxidação. A liga é então transportada rapidamente para o interior da camisa de injeção com o mínimo de agitação. Um fenómeno que se pode observar no momento em que a liga é vazada para o interior da camisa de injeção é a formação da onda quando a liga é introduzida na camisa antes da movimentação do pistão. A liga rapidamente flui até à parede do molde e reflecte para trás até ao orifício da camisa de injeção. O tempo ideal para se iniciar a injeção é quando a onda atinge a superfície do pistão e é novamente reflectida em direcção ao molde. Uma alternativa será a introdução do metal e tentar não

formar uma onda. A injeção inicia-se e a formação da onda no interior da camisa de injeção, durante a fase lenta de injeção, é muito importante.

O mecanismo de injeção divide-se em três fases.

Na primeira fase o êmbolo, actuado pela pressão fornecida pelo sistema hidráulico, começa por se deslocar a baixa velocidade, empurrando o metal à sua frente.

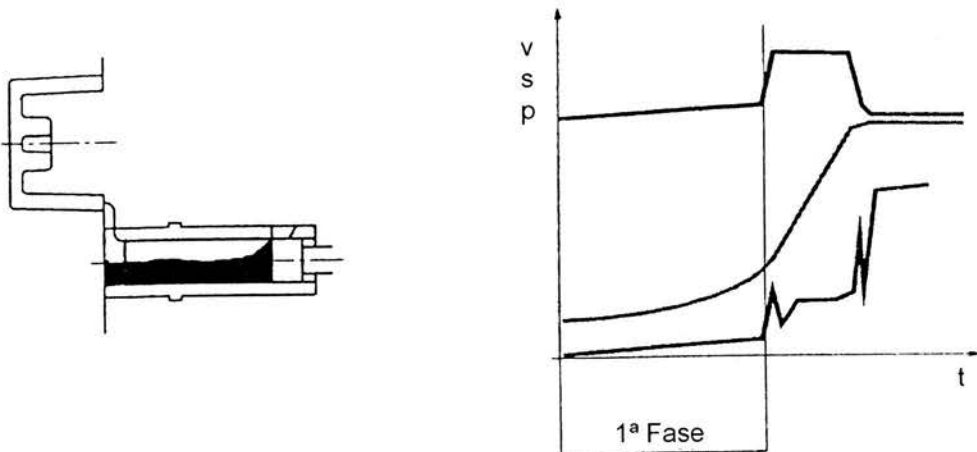


Fig. 4.2 – Primeira fase do ciclo de injeção (fase lenta)

Esta fase é denominada fase de aproximação. Nesta fase, pretende-se que o alumínio líquido seja levado aproximadamente até à secção de ataque tão rápido quanto possível, de modo a evitar o arrefecimento da liga, mas em regime de fluxo laminar, para evitar a incorporação de ar no metal líquido.

Na segunda fase, quando a liga atinge a entrada do molde, o pistão comuta para a velocidade rápida, provocando rapidamente o enchimento das cavidades do molde e originando assim a fase de enchimento.

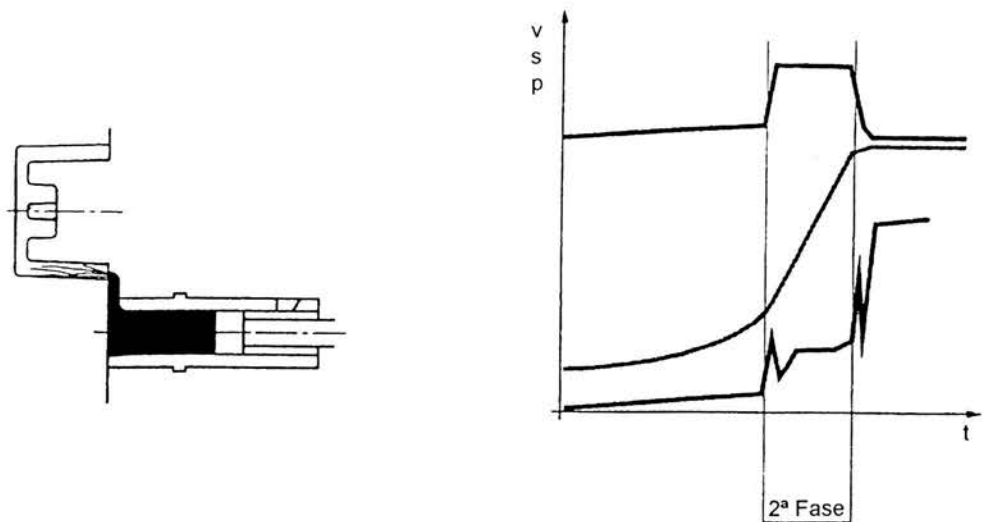


Fig. 4.2 – Segunda fase do ciclo de injeção

O enchimento do molde, que se encontra aproximadamente a 200 °C (ou a uma temperatura inferior, dependendo das condições do processo), deve ser efectuado o mais rapidamente possível, de forma a evitar o arrefecimento prematuro da liga e o mau enchimento da cavidade, mas permitindo a evacuação do ar da cavidade através das aberturas de ventilação.

A terceira fase inicia-se quando o molde se encontra cheio e a liga vai arrefecendo até níveis próximos da sua temperatura de solidificação.

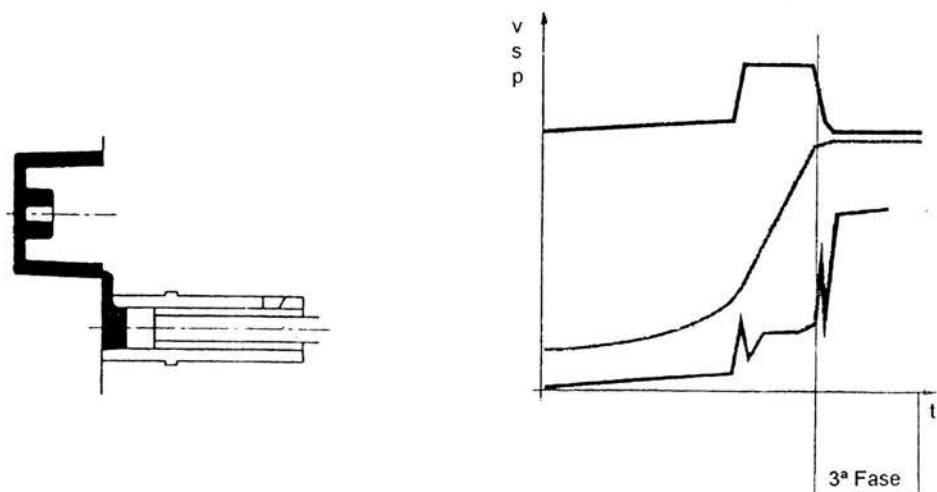


Fig. 4.3 – Terceira fase do ciclo de injeção

É aplicado um súbito aumento de pressão ao pistão com o propósito de compactar a liga, que solidifica sujeita a essa pressão. Esta fase é designada fase de compactação e culmina no momento em que as secções de ataque das peças solidificam por completo

5 - Tecnologia de fundição injectada de câmara fria

As primeiras máquinas de fundição injectada - normalmente designadas convencionais - eram limitadas no seu sistema de controlo de movimento do pistão de injeção. Por este motivo, a primeira fase era executada com uma aceleração rápida até atingir uma velocidade que se mantinha constante até ao final desta fase.

Mais tarde, com o aparecimento do controlo numérico, foi possível atribuir o movimento mais adequado ao pistão de injeção. Estudos revelaram que o aprisionamento de ar na primeira fase era minimizado com a aceleração constante do pistão. A este tipo de movimento, atribuiu-se o nome de movimento *Parashot*.

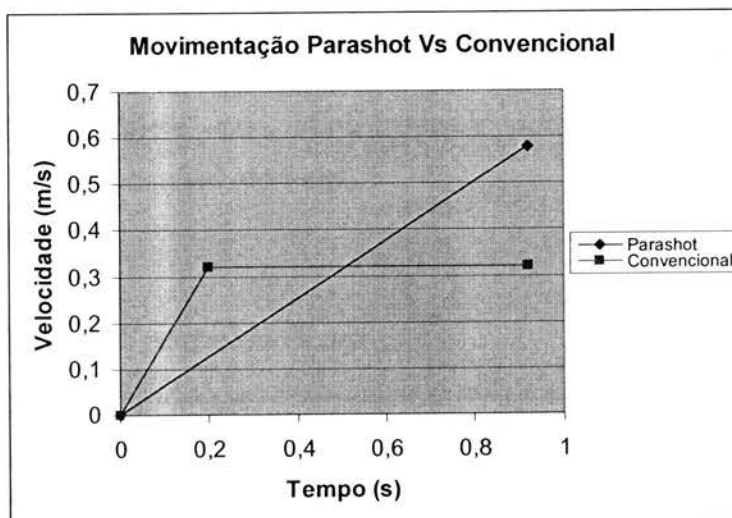


Gráfico 5.1 – Perfil de movimento Parashot e Convencional do pistão

6 - Porosidade

Este estudo foca particularmente o problema da porosidade causada pelo aprisionamento de ar na primeira fase do ciclo de injeção. Neste caso, referir-nos-emos então à porosidade por gás.

A porosidade é um dos grandes problemas na fundição injectada. A produção em série de componentes de elevada reprodutibilidade torna este processo bastante atractivo, mas a reputação que tem em termos de porosidade torna o seu uso mais restrito. A pressão exercida pelos clientes para que a qualidade fosse superior provocou um aumento do uso da engenharia e tecnologia, que levou à redução dos problemas tradicionais relacionados com a porosidade.

Na fundição injectada, as porosidades por contracção e por gás são os tipos mais comuns de porosidades internas. Existe ainda outro tipo de porosidade, designada porosidade de fluxo.

O exame por raio X é um bom método para analisar a existência de porosidades. O corte e a fractura são os métodos mais característicos; no entanto, têm as suas limitações, especialmente notórias na identificação de porosidade de pequenas dimensões.

A porosidade por gás é o maior problema da fundição injectada. Seria ideal que a fundição por injeção utilizasse métodos de enchimento que minimizassem a turbulência, que iriam resultar numa redução de gases aprisionados; tal não foi possível até hoje.

6.1 - Como reconhecer a porosidade por gás

A porosidade por gás aparece quase sempre sob a forma de bolhas aprisionadas, que normalmente se apresentam numa série de buracos circulares na peça de fundição. As figuras 6.1 e 6.2 ilustram o defeito.

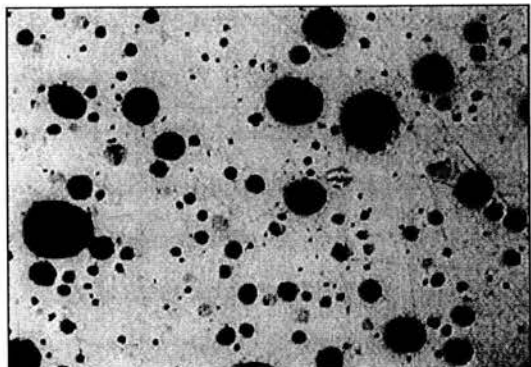


Fig. 6.1 – Porosidade por gás

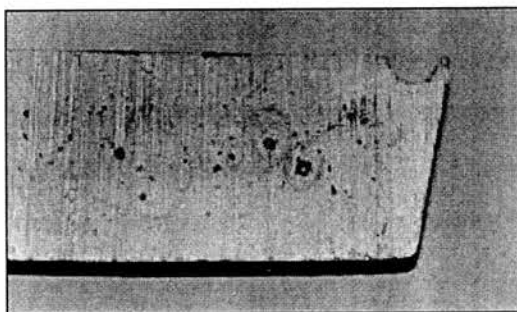


Fig. 6.2 – Porosidade por gás

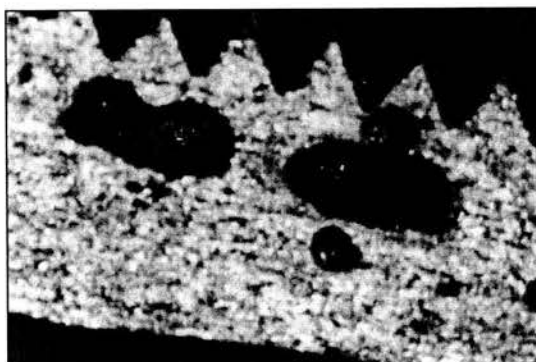


Fig. 6.3 – Porosidade causada por excesso de lubrificação

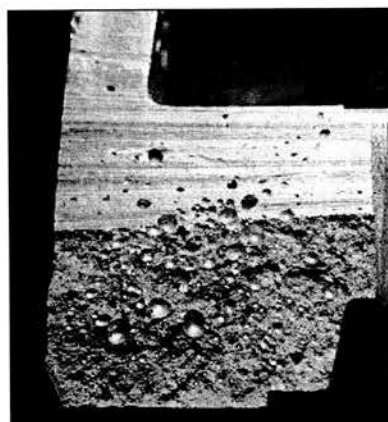


Fig. 6.4 – Porosidade por gás

Estas bolhas podem ter um aspecto achatado, como é visível na fig. 6.4. Isto pode acontecer se a bolha for comprimida na direcção imposta pelo pistão de injeção aquando da fase de compressão do ciclo de injeção.

A característica que melhor identifica a porosidade por gás é a parede lisa. O aspecto da parede pode ser de alumínio limpo; pode ter também um aspecto mais escuro, causado pelo lubrificante queimado quando usado em excesso (fig. 6.3).

O aprisionamento de gás pode estar associado à porosidade por contracção, mesmo quando a porosidade aparenta ser predominantemente por contracção. Uma peça de fundição injectada que não possui bolhas visíveis de porosidade por gás pode conter uma quantidade substancial de gás aprisionado,

no espaço da porosidade por contracção.

Causas

A origem da porosidade por gás reside nos três seguintes factores:

- Aprisionamento de ar
- Vaporização
- Lubrificante queimado

O hidrogénio pode também constituir um problema na fundição injectada. Contudo, não irá ser mencionado em detalhe, por ser pequena a sua percentagem de ocorrência na porosidade por gás.

Este estudo centra-se sobretudo na primeira fase do ciclo de injeção, nos fenómenos que ocorrem na camisa de injeção e no modo como estes contribuem para a porosidade por gás. Por este facto, iremos analisar o fenómeno de aprisionamento de ar com maior detalhe.

6.2 - Aprisionamento de ar na camisa de injeção

O ar é o gás mais frequentemente aprisionado nas peças de fundição injectada. Em alguns casos, o ar é aprisionado devido à característica do fluxo atomizado, mas muito do ar pode ser aprisionado no fluxo do metal quando este se desloca desde a camisa de injeção até ao canal. Uma vez que, normalmente, não é possível mudar o padrão de fluxo turbulento necessário para o enchimento da cavidade, existe a possibilidade de reduzir a quantidade de ar aprisionado no sistema de alimentação de metal durante a sua passagem pelo canal.

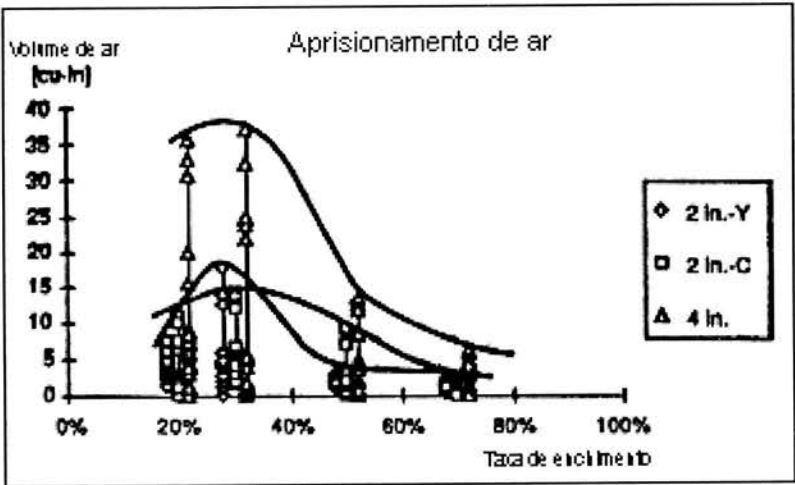


Fig. 6.5 – Relação entre volume de ar aprisionado e taxa de enchimento

A primeira consideração deve ser a taxa de enchimento na camisa de injeção. Algumas pesquisas demonstram que a taxa de enchimento deve ser de pelo menos 50% para minimizar o aprisionamento de ar (fig. 6.5). No entanto, o tempo de enchimento, a velocidade no ataque e os requisitos de pressão impossibilitam frequentemente os 50% de taxa de enchimento. É importante que se façam estas considerações com os cálculos PQ^2 antes da selecção do tamanho da camisa de injeção e da taxa de enchimento.

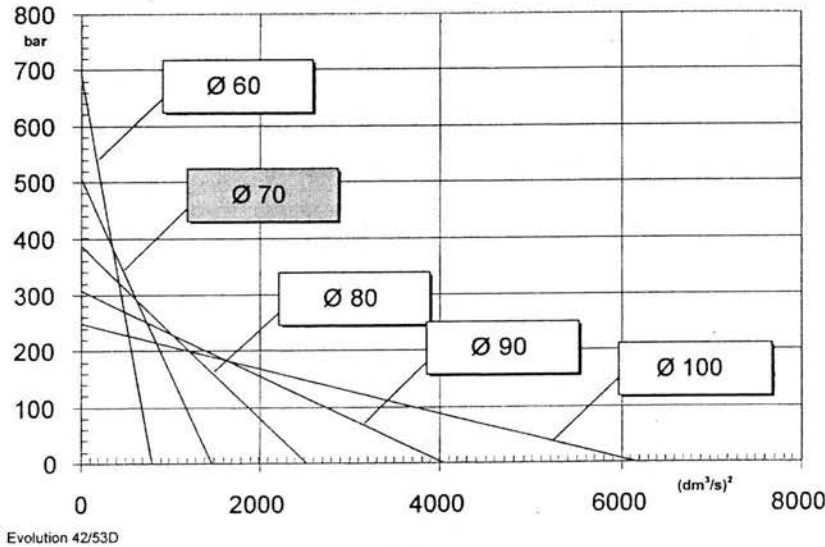


Fig 6.6 - Diagrama PQ^2 da máquina de injeção Bühler Evolution 42D

Logo após seleccionado o tamanho da camisa, o próximo ponto a considerar deve ser a taxa de enchimento da camisa de injeção. Se a taxa de enchimento for inferior a 50%, o metal terá tendência a formar uma onda no sentido da injeção e, com a reflexão da onda no fim da camisa, terá tendência a formar a onda no sentido inverso. Quando o pistão de injeção inicia o seu movimento, é gerada uma onda na superfície de contacto com o metal; a onda então formada pode encontrar a onda reflectida, gerando a turbulência e o aprisionamento de ar (fig. 6.7).

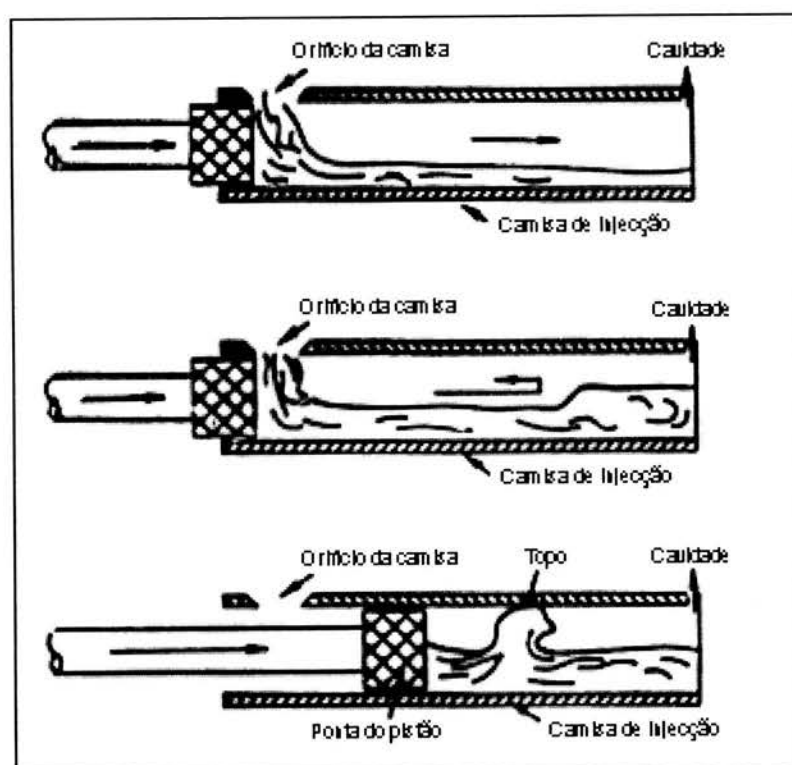


Fig. 6.7 – Formação de onda causada pelo vazamento do metal na camisa de injeção

A melhor solução é iniciar o movimento do pistão quando a onda reflectida atinge a superfície de contacto do pistão. Isto significa que o pistão irá movimentar-se na mesma direcção que a onda original, minimizando assim o aprisionamento de ar anteriormente gerado. Um outro método para reduzir esta potencial fonte de aprisionamento de ar é a utilização de PQ^2 , para que o projecto nos dê uma camisa com 50% de taxa de enchimento.

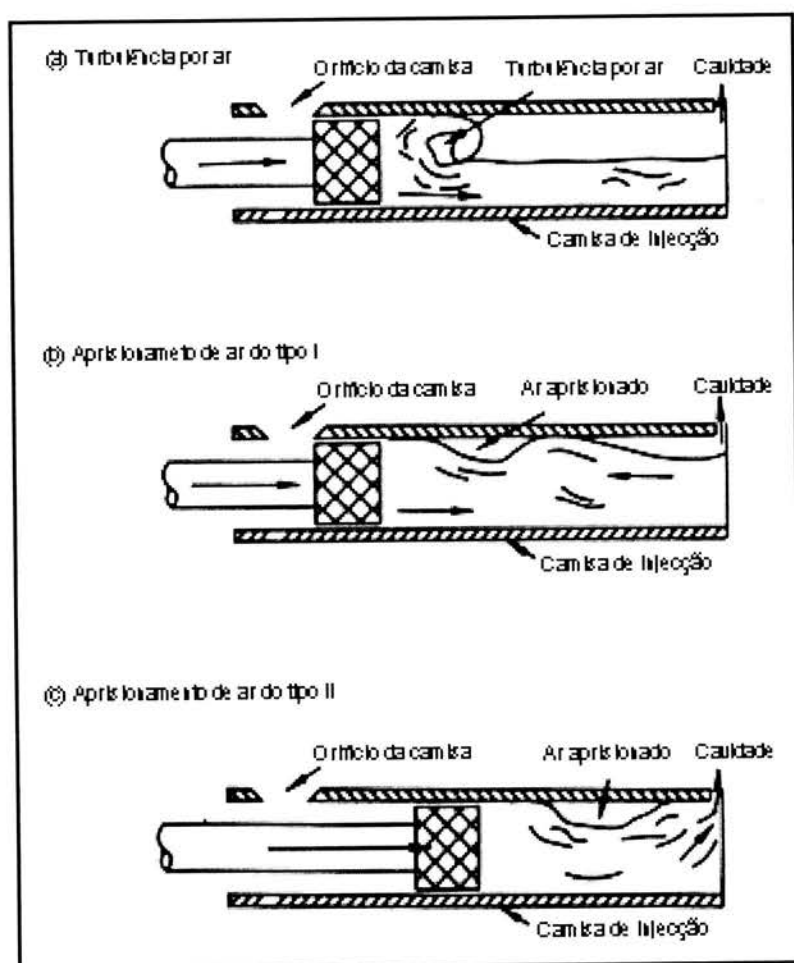


Fig. 6.8 – Formas de aprisionamento de ar

Há novos estudos que demonstram que, uma vez iniciado o movimento do pistão, a aceleração desde o repouso até à primeira velocidade (velocidade crítica de primeira fase) é muito importante. Se a aceleração for demasiado rápida, o topo da onda tende a enrolar, causando o aprisionamento de bolhas de ar.

Se, pelo contrário, a aceleração for demasiado lenta, a onda reflecte no final da camisa e encontra o pistão no seu movimento de injeção. Quando isto acontece, existe um perigo de um aprisionamento considerável de bolhas de ar. A aceleração óptima será aproximadamente linear quando a taxa de enchimento for inferior a 50%, quando esta técnica é mais precisa. Esta linha representa uma aceleração que irá atingir a velocidade crítica da fase lenta 25 a 50 mm

antes do enchimento total da camisa. Este pressuposto irá ser posto em causa seguidamente, através de 2 leis de movimento do pistão descritas na publicação *Journal of Fluids Engineering* da American Society of Mechanical Engineers (ASME).

O cálculo para determinar a aceleração óptima do pistão pode ser efectuado da melhor forma utilizando um novo programa, actualmente a ser desenvolvido pela North American Die Casting Association (NADCA).

A utilização destes perfis de velocidade é difícil de obter nas máquinas mais antigas, pois estas não têm capacidade para controlar a aceleração do pistão. A maioria destas máquinas tem tendência a dar um impulso no início do movimento, que causa turbulência e aprisionamento de ar. Uma simples modificação no sistema hidráulico do pistão fará com que a maior parte das máquinas consiga estes perfis de aceleração.

A aceleração ideal para uma dada situação é determinada pela taxa de enchimento e pelo comprimento activo da camisa. A partir da altura em que o pistão inicia o seu movimento, a velocidade lenta usada para a aceleração pode ser calculada utilizando a seguinte expressão:

$$V_{c1} = 22,8 \cdot \phi_p^{0,5} \cdot \left(1 - \frac{V_{gto}}{V_{cam}} \right)$$

Esta expressão é menos precisa quando a percentagem de enchimento for inferior a 50%, permitindo, no entanto, uma boa previsão da velocidade crítica da primeira fase que minimiza o aprisionamento de ar.

Se for usada a aceleração linear mencionada anteriormente, o pistão irá normalmente atingir a V_{c1} num ponto situado a aproximadamente 25/50 mm do enchimento total da camisa. Estas técnicas servem apenas para que o ar seja empurrado à frente do metal, nunca o irão remover completamente. No entanto, as boas práticas na ventilação e no vácuo irão certamente contribuir para eliminar ou minimizar a porosidade por aprisionamento de ar.

Concluindo, os factores que necessitam de ser ajustados e monitorizados numa máquina de câmara fria são:

- Taxa de enchimento
- Tempo de atraso antes da injeção
- Aceleração na primeira fase do ciclo de injeção
- Velocidade crítica da primeira fase
- Ponto de comutação para o início da aceleração rápida de injeção

7 - Procedimento para estudo de minimização do aprisionamento de ar na primeira fase da injeção

Na fase inicial do projecto, foram estabelecidas metas para que o estudo fosse o mais completo e abrangente possível. Para que este estudo não fosse limitado ao tempo deste projecto, foi modelado em 3D o gito completo, incluindo os masselotes. Deste modo, existe a possibilidade de, a partir do modelo completo da cavidade do molde, prosseguir com a simulação do mesmo.

Após a conclusão da modelação 3D, passou-se à fase de simulação do enchimento do molde através do software de simulação Flow 3D. Esta fase foi a mais morosa, pois implicou um processo de aprendizagem do funcionamento do *software* em questão.

Durante as fases de modelação e de simulação, foram efectuadas diversas pesquisas com o intuito de encontrar estudos sobre a primeira fase do ciclo de injeção. Os estudos consultados demonstram que a minimização do aprisionamento de ar na primeira fase está directamente ligada ao perfil de velocidade do pistão de injeção e seguindo este princípio, foi feita a aplicação ao molde em estudo. O objectivo principal desta pesquisa foi obter um perfil de velocidades facilmente definido através das informações básicas das características de um molde (comprimento da camisa de injeção, diâmetro da camisa, taxa de enchimento da camisa), de modo a otimizar o ajuste dos parâmetros deste processo de fundição.

8 - Dimensionamento do canal de alimentação

$$m_A = 736 \text{ g}$$

$$V_{MA} = 4000 \div 6000 \text{ [cm/s]} = 5000 \text{ cm/s (velocidade intermédia)}$$

$$\rho_{Al} = 2,657 \text{ g/cm}^3$$

Tempo de enchimento

Considerando os seguintes critérios para a liga 231D:

- Solidificação rápida (intervalo de solidificação de 10 °C)
- Temperatura do molde relativamente baixa (120 °C, menor tempo de ciclo)
- Complexidade geométrica da peça

$$t_f = 0,02 \text{ s}$$

$$S_{A_{tot}} = \frac{m_A}{\rho_{Al} \cdot V_{MA} \cdot t_f} = 278 \text{ mm}^2$$

$$S_A = \frac{S_{A_{tot}}}{4} = 69,4 \text{ mm}^2$$

$$A_{k0} = 1,8 \div 2,5 S_A$$

$$\Rightarrow 2 \cdot S_A = 138,8 \text{ mm}^2$$

$$A_{k0} = 2 \cdot C_{T0}^2 \Rightarrow C_{T0} = 8,3 \text{ mm}$$

$$C_{B0} = 16,7 \text{ mm}$$

$$A_{k1} = 2 \cdot A_{k0} = 278 \text{ mm}^2$$

$$C_{T1} = 11,8 \text{ mm}$$

$$C_{B1} = 23,6 \text{ mm}$$

$$A_{k2} = 2 \cdot A_{k1} = 555,2 \text{ mm}^2$$

$$C_{T2} = 16,7 \text{ mm}$$

$$C_{B2} = 33,3 \text{ mm}$$

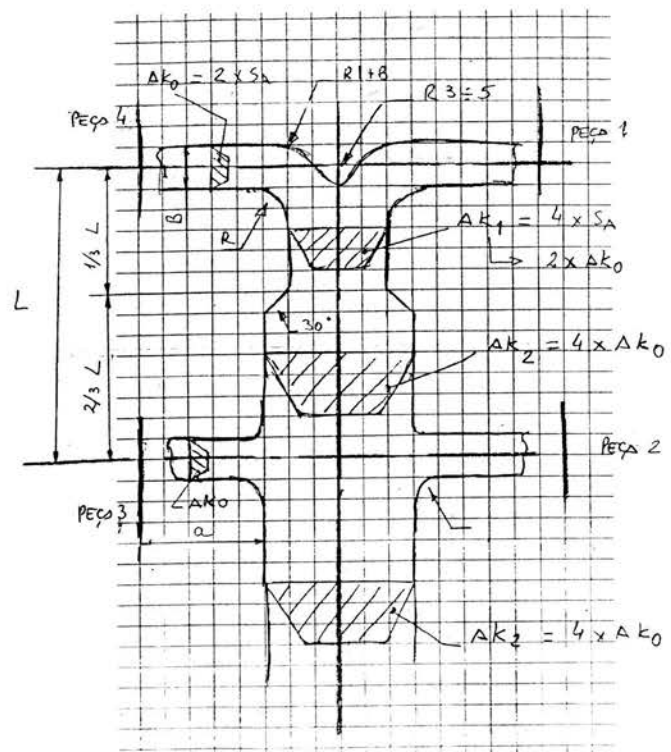


Fig. 8.1 – Relações no dimensionamento de um canal de alimentação de 4 cavidades

A distância L entre ramificações do canal deve ter como base a largura máxima das peças.

$$L = 2,5 \times L_{\text{máx,peça}} = 147,5 \text{ mm}$$

A modelação 3D do gito foi feita com base num já existente, através da sua medição com um paquímetro, no programa SolidWorks. Este processo de engenharia inversa foi útil para observar o que, na prática, é o dimensionamento de canais. A diferença pode ser comparada nas seguintes figuras:

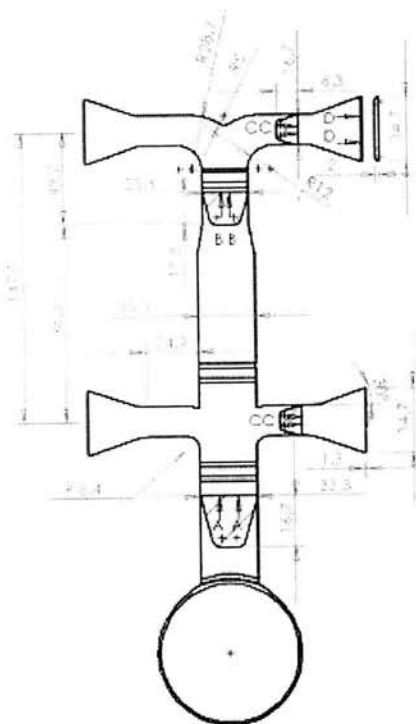


Fig. 8.2 - Dimensões calculadas do canal

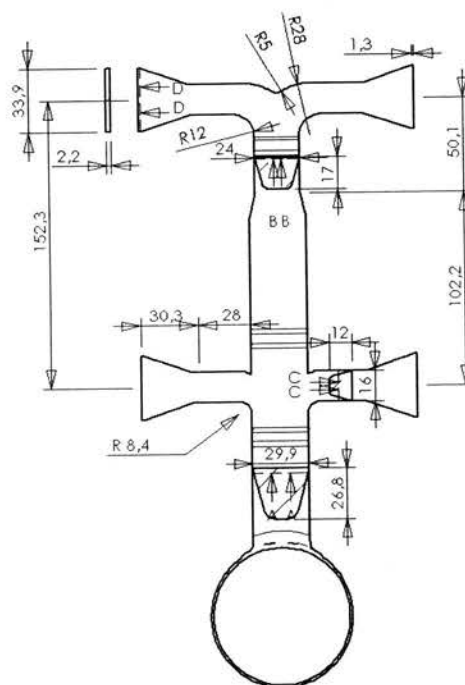


Fig. 8.3 - Dimensões reais do canal

O CINFU está equipado para facilitar o processo de engenharia inversa através do equipamento Cyclone Series 2 da Renishaw. Este é capaz de fazer uma digitalização 3D de um modelo.

A simulação do processo de injeção de um molde necessita da modelação 3D da cavidade moldante. Com este objectivo, foi feita a modelação do gito completo para a construção da cavidade.

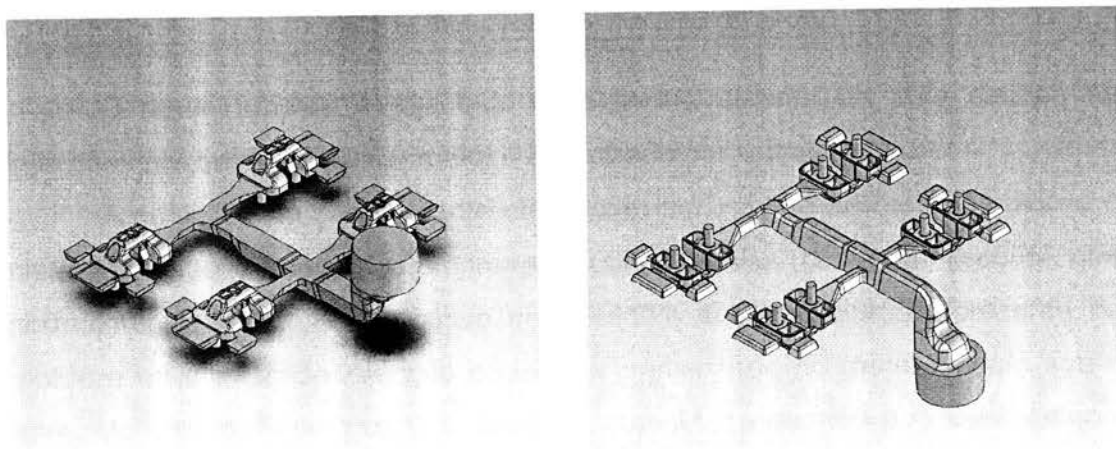


Fig. 8.4 – Vistas da modelação 3D do gito em estudo

9 - Leis de movimento do pistão

9.1 - Dinâmica da onda formada na camisa de injeção durante a fase lenta da moldação por fundição injectada

O defeito mais comum na Fundição Injectada é a porosidade, que limita a integridade da peça e dá origem a peças de baixa qualidade. Assim sendo, este tipo de processo só é adequado para peças que não necessitam de tratamento térmico (ou soldadura) para corresponderem às propriedades mecânicas especificadas.

Existem diferentes causas para a formação de porosidade. Na fundição injectada, a causa mais importante está relacionada com o aprisionamento de ar que ocorre durante a operação de injeção. Na figura 9.1, está representada esquematicamente uma camisa de injeção de uma máquina de fundição injectada.

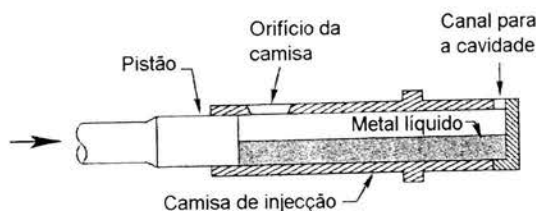


Fig. 9.1 – Representação de uma camisa de injeção

O metal fundido é injectado num molde através de uma camisa de injeção horizontal, na qual o metal é empurrado por um pistão.

A camisa está parcialmente cheia com um volume de metal fundido e o pistão move-se ao longo do comprimento útil da camisa (curso de injeção), que normalmente é fixo. No processo de injeção, o ar inicialmente presente no molde e na camisa de injeção pode ficar aprisionado no metal fundido sob a forma de bolhas de ar, que vão causar a porosidade quando o metal solidifica. Para minimizar o aprisionamento de ar, o processo de injeção de metal fundido é composto por uma fase lenta e outra rápida. Na fase lenta de injeção, o pistão começa por forçar o metal fundido a elevar-se e a encher a secção superior da camisa de injeção; de seguida, move-se a uma velocidade constante até que a camisa de injeção esteja completamente cheia de metal fundido. Durante o movimento do pistão, é formada uma onda, e se o pistão atingir uma velocidade superior à crítica, a onda poderá reflectir no topo da camisa de injeção e a frente desta poderá rolar, provocando o aprisionamento de ar. Por outro lado, se a velocidade do pistão não atingir a velocidade crítica, a onda poderá reflectir na parede final da camisa e aprisionar o ar na frente do pistão.

Para atingir a velocidade crítica, o pistão deve ser acelerado na fase inicial. A evolução do perfil da onda irá depender da lei de aceleração do pistão. Apesar dos diferentes estudos teóricos e experimentais acerca da influência da aceleração do pistão no processo de injeção, o planeamento do processo de injeção por fundição injectada é pouco utilizado na prática, visando este controlar a aceleração do pistão à medida que este se move até atingir a velocidade crítica.

Neste estudo, são consideradas três leis de movimentação, estando duas destas intimamente ligadas: lei de aceleração exponencial e lei de aceleração optimizada (ASME), e outra lei recomendada pela NADCA. Seguidamente, é feita uma descrição destas leis e aplicação ao estudo particular deste projecto.

9.2 - Lei de movimentação exponencial e optimizada

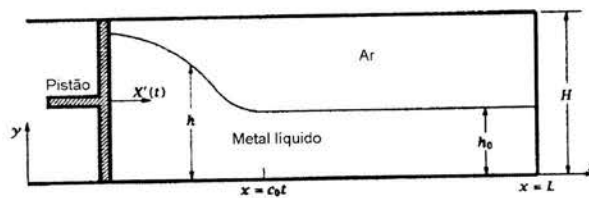


Fig. 9.2 – Representação esquemática de uma camisa de injeção

O problema é considerado como sendo bidimensional, com o sistema de coordenadas representado na figura 9.2. A base da camisa assume-se como sendo plana (para $y=0$), e a superfície livre é definida por $y=h(x,t)$. Assume-se que os efeitos viscosos são desprezáveis e que o valor típico de $h(x,t)$ é mais baixo que a escala típica de comprimento horizontal da onda, para que a aproximação *shallow-water* possa ser usada. Com esta aproximação, a componente vertical da aceleração pode ser desprezável quando comparada com a aceleração gravitacional, g , e portanto a distribuição de pressões pode ser considerada como hidrostática: $p=p_0+pg.(h-y)$.

Se a componente horizontal da velocidade, u , é inicialmente independente de y , pode deduzir-se que u se torna independente de y em qualquer momento. Introduzindo $c(x,t)=(gh)^{1/2}$, as equações podem ser escritas da seguinte forma:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + (u+c) \cdot \frac{\partial}{\partial x} \right] \cdot (u+2c) = 0 \quad (1)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + (u-c) \cdot \frac{\partial}{\partial x} \right] \cdot (u-2c) = 0 \quad (2)$$

Usando o método característico, estas equações podem ser reduzidas para:

$$u \pm 2c = \text{const} \quad (3)$$

as linhas características são definidas por:

$$\frac{dx}{dt} = u \pm c \quad (4)$$

Supondo que o metal fundido na camisa está inicialmente em repouso, com uma profundidade uniforme h_0 , e que a superfície do pistão em contacto com o metal começa a mover-se para $t=0$, no sentido positivo do eixo dos x de acordo com a lei $x=x(t)$, com $X(0)=0$. De acordo com a Eq. (3), qualquer característica negativa vinda da região em repouso, no plano xt , onde $u=0$ e $c=c_0=(gh_0)^{1/2}$, é satisfeita a seguinte condição:

$$c = \frac{u}{2} + c_0 \quad (5)$$

Quando os efeitos de reflexão da onda não são considerados, a velocidade e todas as outras magnitudes podem ser obtidas analiticamente, como função implícita de x e t :

$$x = X(t_1) + \left[\frac{3}{2} X'(t_1) + c_0 \right] (t - t_1) \quad (6)$$

$$u = X'(t_1) \quad (7)$$

onde $X(t)$ é a localização da face do pistão e $X'(t)$ a velocidade do pistão.

As condições de fronteira irão ser aplicadas à superfície do pistão, onde a velocidade do metal fundido é tida em conta como sendo igual à velocidade do pistão $X'(t)$, e na parede do molde da câmara, onde $u=0$.

Três leis diferentes de velocidade do pistão serão consideradas: a lei de aceleração exponencial,

$$X'(t) = \alpha\beta(e^{\alpha t_H} - 1) \quad , \quad t < t_H \quad (8)$$

onde α e β são constantes positivas e onde,

$$t_H = \frac{1}{\alpha} \ln \left[\frac{2(\sqrt{gH} - \sqrt{gh_0})}{\alpha\beta} + 1 \right] \quad (9)$$

$$\xi = \frac{2c_0}{3\alpha\beta} \quad \text{para } \xi \geq 4/3 \quad \text{e} \quad (10)$$

$$\frac{L}{\beta} = 5\xi - 4 - \ln(\xi - 1/3) \quad (11)$$

é o tempo que o metal fundido demora a atingir o topo da camisa na superfície do pistão

Uma lei designada por lei de aceleração optimizada e que é definida pela equação :

$$X'(t) = 2c_0 \left[\left(1 - \frac{c_0 t}{L} \right)^{-1/3} - 1 \right] \quad , \quad \text{para } t < t_H \quad (12)$$

onde L é uma constante positiva e onde

$$t_H = \frac{L}{c_0} \left(1 - t^{1/2} \right) \quad (13)$$

Podemos confirmar que, para valores suficientemente elevados de t , a Eq. (8) dá-nos uma velocidade do pistão proporcional à distância percorrida pelo pistão. Uma lei de movimento desta natureza pode ser considerada como representativa das máquinas de fundição injectada, onde a velocidade do pistão é programada em função do seu deslocamento. Por outro lado, quando L é igual

ao comprimento activo da câmara, L , o modelo de *shallow-water* prevê que a lei de velocidade da Eq. (10) irá produzir uma onda vertical no final da camisa de injeção para $t=L/c_0$, para que o volume de ar seja forçado a sair sem se aprisionar. Em ambas as leis, para $t>t_H$,

$$u_H = 2(\sqrt{gH} - \sqrt{gh_0}), \quad (14)$$

9.3 - Lei de aceleração da NADCA

Como foi anteriormente referido, a NADCA tem como equação para a velocidade crítica da primeira fase:

$$V_{cl} = 22,8 \cdot \phi_p^{0,5} \cdot \left(1 - \frac{V_{gito}}{V_{cam}}\right) \quad (15)$$

A evolução do movimento do pistão até atingir esta velocidade é feita de forma linear.

9.4 - Aplicação e comparação de resultados

O objectivo principal deste estudo é a minimização do aprisionamento de ar na primeira fase do ciclo de injeção. O estudo feito para as duas primeiras equações referidas revela que, com o ajuste de algumas das suas variáveis, se obtêm curvas de movimento diferentes, bem como diferentes taxas de aprisionamento de ar. Os gráficos seguintes dão-nos a variação da área adimensional (foi considerado um modelo bidimensional) do ar ocupado na câmara de injeção, no momento em que o metal atinge o canal de alimentação da cavidade.

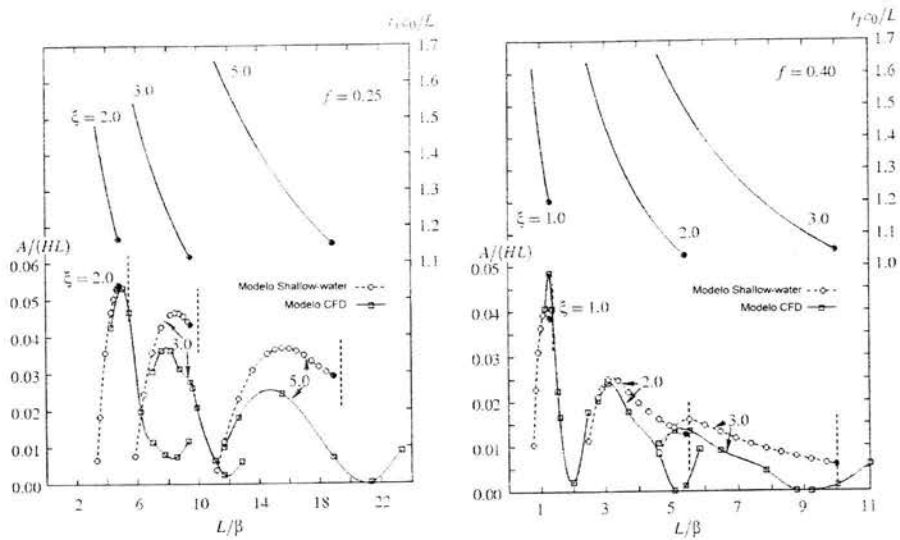


Fig. 9.3 - Área adimensional ocupada pelo ar, $A/(HL)$, quando o alumínio atinge o canal de alimentação da cavidade e o tempo de enchimento adimensional, $t_f c_0/L$, como função de L/β , para a equação de velocidade do pistão da Eq. (8), $L/H=9$, $f=0,25$ (a), $f=0,4$ (b) e para diferentes valores de ξ . As linhas verticais a tracejado indicam o valor óptimo previsto pelo modelo *shallow-water* quando os efeitos de reflexão da onda do fluido não são considerados.

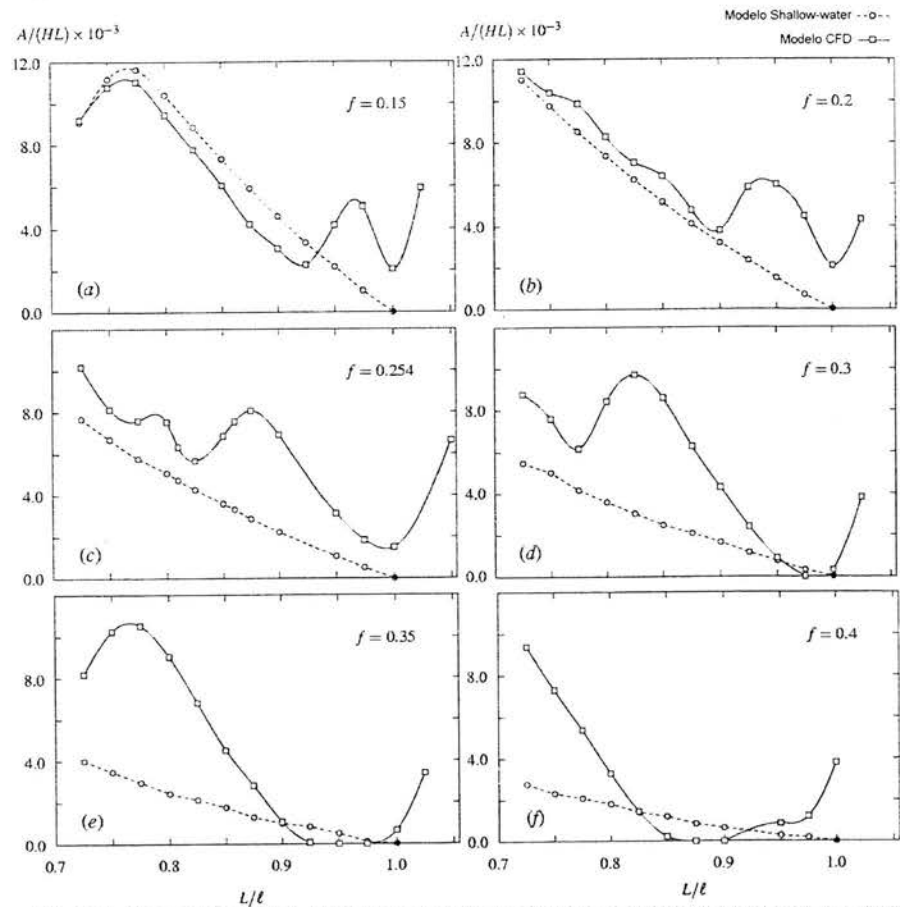


Fig. 9.4 - Área adimensional $A/(HL)$ como função de L/l para a Eq. (12) de velocidade do pistão e diferentes valores de taxa de enchimento inicial. Uma das linhas representa os resultados obtidos pelo modelo *shallow-water* e a outra, os resultados por CFD (Computational Fluid Dynamics).

10 - Propriedades da liga de alumínio

Designação:

Norma DIN:	Designação Química	EN AC-ALSi12(Cu)
	Designação Numérica	EN AC-47100
Designação ASTM:		413.0
ISO:		ALSi12

Composição química em % por massa:

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
10,5 a 13,5	0,8 (0,7)	1,0 (0,9)	0,05 a 0,55	0,35	0,10	0,30	0,55	0,20	0,10	0,20 (0,15)

Características de massa:

Densidade: 2657 kg/m³

Propriedades térmicas:

Calor específico: 963 J/kg°K

Calor latente de fusão: 389 kJ/kg

Condutividade térmica: 121 W/m°K

Intervalo de solidificação: 570 °C – 585 °C

Temperatura de injeção: 680 °C – 720 °C

11 - Cálculo dos perfis de velocidade de injeção

Parâmetros de entrada:

Peso gito	1810 g
Peso canal	1140 g
ma	670 g
Densidade	2,657 g/cm ³
φ pistão	70 mm
L	445 mm
tf	0,02 s

Estes foram os dados fornecidos para a peça em estudo. Com estes dados, pretende-se calcular a evolução do movimento do pistão, de modo a que o fluxo de alumínio seja laminar e o aprisionamento ar seja o mínimo possível.

Para isso, necessitamos dos seguintes dados:

- Comprimento da primeira fase
- Comprimento da segunda fase
- Perfil de velocidade da primeira fase (a calcular segundo as diferentes leis de aceleração)
- Velocidade crítica da segunda fase

São estes pontos que definem o perfil de velocidades do pistão e que vão ser calculados em seguida.

Volume da camisa

$$V_{cam} = \frac{\pi \cdot \phi_p}{4} L = 1712,6 \text{ cm}^3$$

Taxa de enchimento

$$V_{metal} = \frac{P_{gito}}{\rho_{Al}} = 681,2 \text{ cm}^3$$

$$f = \frac{V_{metal}}{V_{cam}} \cdot 100 = 39,8 \%$$

Comprimento da primeira fase

$$L_1 = L - \left(\frac{V_{Metal}}{S_{pistão}} \right) = 268 \text{ mm}$$

Comprimento da segunda fase

$$L_2 = L - \left(\frac{V_{Metal} - V_{cam}}{S_{pistão}} \right) = 373 \text{ mm}$$

Velocidade crítica da segunda fase

$$V_{c2} = \frac{m_A}{\rho_{Al} I_f \phi_p} = 3,28 \text{ m/s}$$

11.1 - Velocidade/deslocamento segundo a lei da aceleração otimizada

Como foi referido anteriormente para esta lei de aceleração, a equação de movimento do pistão é dada pela Eq. (12), para $t < t_H$, em que t_H é dado por Eq. (13).

Para uma análise mais abrangente, foram determinadas 3 curvas de movimento obtidas com a variação do parâmetro L/l .

Façamos o cálculo da velocidade para o ponto t_H , que define o momento em que a onda atinge o topo da camisa de injeção e a velocidade passa a ser constante.

g	385.8 in/s ²	9.8 m/s ²
ho	1.10 in	28 mm
H	2.76 in	70 mm
L	17.52 in	445 mm
f	39.8%	39.8%
L1	10.55 in	268 mm

Tabela 11.1 - Parâmetros de entrada.

Para $L/l=0,9$ temos:

$l = 19,47 \text{ in}$

$c_0=(gh_0)^{1/2} = 21,98 \text{ in/s}$

$t_H = \frac{l}{c_0} \left(1 - f^{3/2}\right) = \frac{19,47}{21,98} (1 - 0,398)^{3/2} = 0,709 \text{ s}$

Para este ponto, temos o pistão com o deslocamento e a velocidade:

$X(t) = 3l \left[1 - \left(1 - \frac{c_0 t_H}{l} \right)^{2/3} \right] - 2c_0 t_H = 6 \text{ in} = 152 \text{ mm}$

$X'(t) = 2c_0 \left[\left(1 - \frac{c_0 t_H}{l} \right)^{-1/3} - 1 \right] = 24 \text{ in/s} = 0,612 \text{ m/s}$

Eis os resultados da evolução do movimento do pistão segundo esta lei para $L/l= 0,9$, $L/l= 0,85$ e $L/l= 0,8$.

	1	2	3
L/l	0,9	0,85	0,8
th (s)	0,71	0,75	0,80
Δt (s)	0,19	0,17	0,16

Tabela 11.2 - Diferentes valores de tempo th (quanto demora a atingir o topo da camisa), obtidos pela variação do valor de L/l.

1			2			3		
t	X(t) mm	V(t) m/s	t	X(t) mm	V(t) m/s	t	X(t) mm	V(t) m/s
0,00	0	0,00	0,0	0	0,00	0,00	0	0,00
0,10	2	0,04	0,1	2	0,04	0,10	2	0,03
0,20	8	0,09	0,2	8	0,08	0,20	7	0,08
0,30	19	0,14	0,3	18	0,13	0,30	17	0,12
0,40	37	0,21	0,4	34	0,19	0,40	32	0,18
0,50	62	0,30	0,5	57	0,27	0,50	53	0,25
0,60	97	0,42	0,6	89	0,37	0,60	82	0,33
0,71	152	0,61	0,75	161	0,61	0,80	172	0,61
0,90	268	0,61	0,92	268	0,61	0,96	268	0,61
	379	3,28		379	3,28		379	3,28

Tabela 11.3 – Velocidade e deslocamento do pistão com o tempo para $L/l=0,9$, $L/l=0,85$ e $L/l=0,8$.

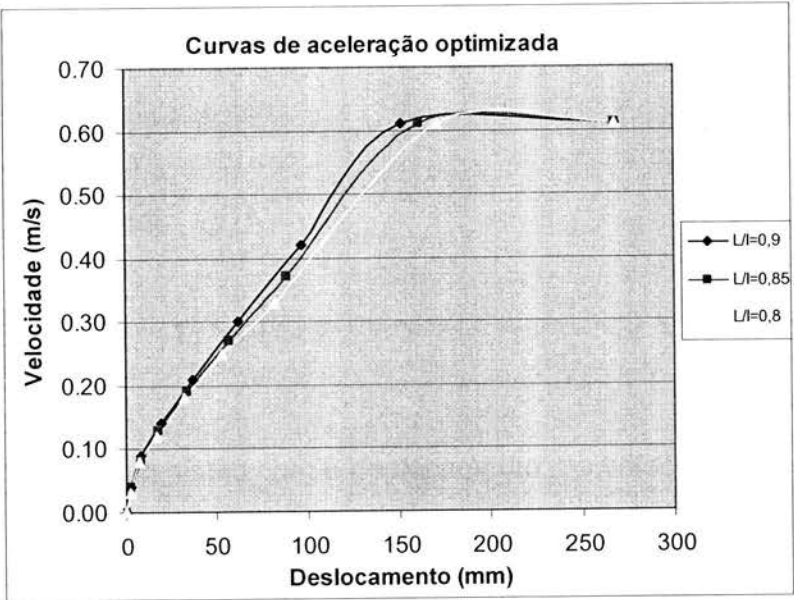


Gráfico 12.1 - Curvas de aceleração para os diferentes valores de L/l

Este é o resultado gráfico dos cálculos efectuados anteriormente, em que foi omitida a parte da curva referente à segunda fase de injeção para melhor visualização dos resultados.

11.2 - Velocidade/deslocamento segundo a lei de aceleração exponencial

Para se alcançar a solução óptima para a lei de aceleração exponencial, é necessário atribuir os valores de L/β Eq. (11), para que o volume de ar aprisionado seja o menor possível, de acordo com o gráfico da figura 9.3. O valor de $L/\beta=2,7$ foi escolhido para alargar a gama de resultados.

Façamos então um cálculo exemplificativo para esta lei de movimento do pistão da Eq. (8) para o valor arbitrado $L/\beta=2,7$:

g	385.8 in/s ²	9.8 m/s ²
h ₀	1.10 in	28 mm
H	2.76 in	70 mm
L	17.52 in	445 mm
f	39.8%	39.8%
L1	10.55 in	268 mm

Tabela 11.4 - Parâmetros de entrada.

$$\frac{L}{\beta} = 5\xi - 4 - \ln(\xi - 1/3) \Rightarrow \xi = 1,33$$
$$\Rightarrow \beta = 6,60$$
$$\xi = \frac{2c_0}{3\alpha\beta} \Rightarrow \alpha = 1,56$$

Para estes valores, temos:

$$t_H = \frac{1}{\alpha} \ln \left[\frac{2(\sqrt{gH} - \sqrt{gh_0})}{\alpha\beta} + 1 \right] = 0,772 \text{ s}$$

Para este ponto, temos o pistão com o deslocamento e a velocidade:

$$X(t) = \beta(e^{\alpha t_H} - \alpha t_H - 1) = 7 \text{ in} = 190 \text{ mm}$$

$$X'(t) = \alpha\beta(e^{\alpha t_H} - 1) = 24 \text{ in/s} = 0,612 \text{ m/s}$$

Eis os resultados da evolução do movimento do pistão segundo esta lei para $L/\beta = 2,7$, $L/\beta = 9$ e $L/\beta = 12,8$.

	1	2	3
L/β	2,7	9	12,8
t_H (s)	0,77	0,70	0,715
Δt (s)	0,13	0,19	0,19
ξ	1,33	2,78	3,60
α	1,56	2,54	2,79
β	6,60	1,95	1,37

Tabela 11.5 - Diferentes valores de tempo t_H (quanto demora a atingir o topo da camisa), obtidos pela variação do valor de L/β .

1			2			3		
t (s)	X1(t) (mm)	V1(t) (m/s)	t (s)	X2(t) (mm)	V2(t) (m/s)	t (s)	X3(t) (mm)	V3(t) (m/s)
0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00
0.10	2	0.04	0.10	2	0.04	0.10	1	0.03
0.20	9	0.10	0.20	8	0.08	0.20	7	0.07
0.30	22	0.16	0.30	19	0.14	0.30	16	0.13
0.40	41	0.23	0.40	37	0.22	0.40	32	0.20
0.50	67	0.31	0.50	63	0.32	0.50	57	0.29
0.60	103	0.41	0.60	103	0.41	0.60	92	0.42
0.77	190	0.61	0.89	268	0.61	0.71	150	0.61
0.90	268	0.61		379	3.28	0.91	268	0.61
	379	3.28					379	3.28

Tabela 11.6 – Velocidade e deslocamento do pistão com o tempo para $L/\beta = 2,7$, $L/\beta = 9$ e $L/\beta = 12,8$.

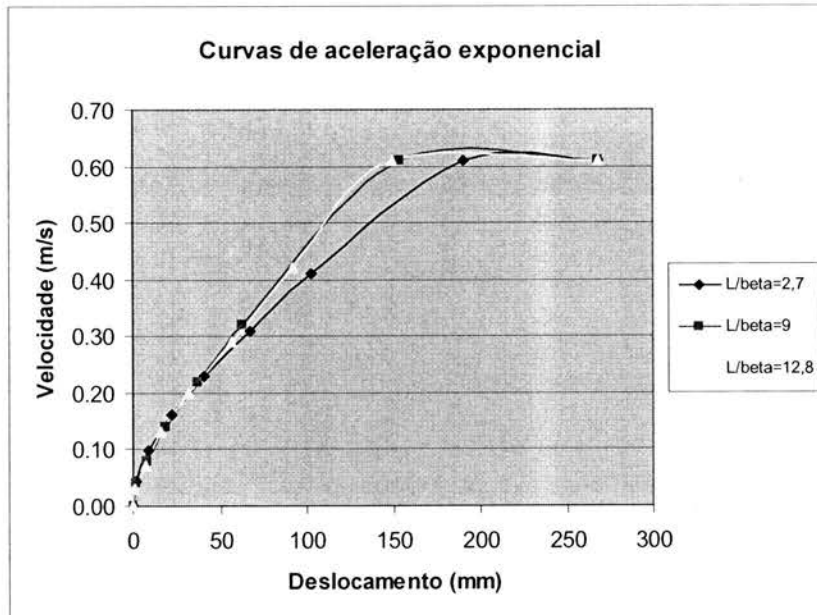


Gráfico 11.2 - Curvas de aceleração para diferentes valores de L/β .

Este gráfico ilustra a evolução da velocidade do pistão até ao final da primeira fase do ciclo de injeção.

11.3 - Velocidade/deslocamento do pistão segundo NADCA

Seguidamente, iremos calcular o perfil de velocidades pela lei de movimento aconselhada pela NADCA.

Uma vez que, neste caso, a evolução do movimento é feita de forma linear, temos apenas de encontrar o valor da velocidade crítica da primeira fase.

Velocidade crítica da primeira fase

$$V_{c1} = 22,8 \cdot \phi_p^{0,5} \cdot \left(1 - \frac{V_{gito}}{V_{cam}}\right) [\text{in/s}] = 22,8 \text{ in/s}$$

$$= 0,58 \text{ m/s}$$

X(t) mm	V(t) m/s
0	0
268	0,58
379	3,28

Tabela 11.7 – Velocidade e deslocamento do pistão

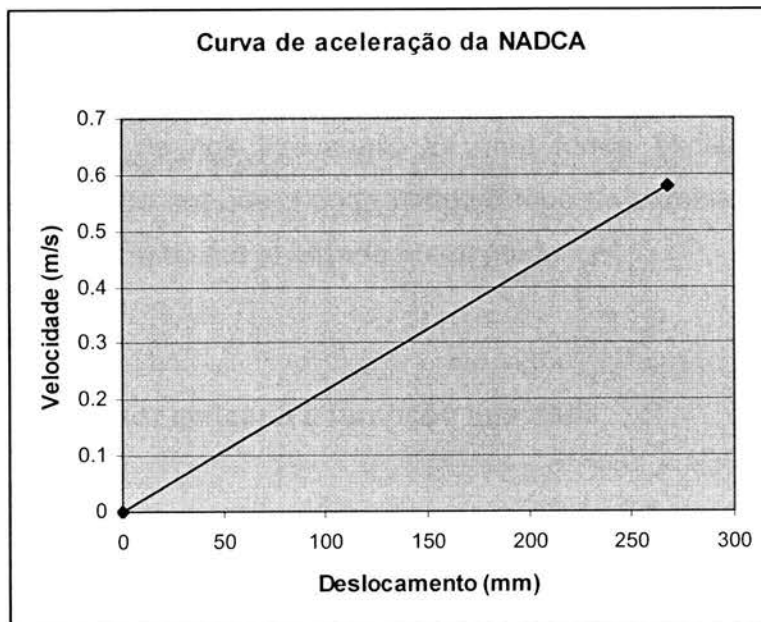


Gráfico 11.3 – Curva para a lei de aceleração da NADCA

O gráfico mostra-nos como se desenvolve a movimentação do pistão até ao final da primeira fase de injeção segundo esta lei.

11.4 – Análise e comparação dos resultados obtidos nas curvas de velocidade/deslocamento para as diferentes leis de aceleração

Os gráficos que acompanham cada curva calculada, para uma melhor visualização dos perfis, fazem referência apenas à primeira fase do ciclo de injeção.

No que diz respeito ao tempo que demora cada um dos perfis de velocidade estudados, todos são muito idênticos, na ordem dos $t=0,9$ s. Pode concluir-se que os ganhos no tempo de ciclo não são muito evidentes para nenhuma das leis estudadas.

Nas leis de aceleração otimizada e exponencial, os resultados obtidos foram muito idênticos, com uma aceleração do tipo parabólico até ao tempo t_H , mantendo-se a velocidade constante até ao final da primeira fase. Não deve

confundir-se com o perfil de velocidades convencional, no qual a velocidade era constante, mas a aceleração inicial era bastante mais rápida devido às limitações de controlo das máquinas mais antigas. A grande vantagem que estes perfis apresentam é o facto de nos indicarem, de uma forma explícita, o momento no espaço e no tempo em que a onda atinge o topo da camisa. Este fenómeno pode gerar turbulência e será analisado em seguida.

12 - Simulação por computador aplicada à fundição injectada

A simulação por computador envolve a aplicação de modelos numéricos para prever a evolução e a actuação dos diferentes processos físicos que existem num ciclo de fundição injectada:

- Fluxo do fluido durante o enchimento da cavidade
- Transferência de calor entre o metal fundido e a cavidade
- Solidificação, ou seja, a libertação do calor latente, assim como as alterações volumétricas e de fase que acompanham este processo
- Resposta termo-elástica do molde e da moldação: tensões, alongamentos, etc.

A finalidade de uma simulação é permitir uma visão da evolução destes mecanismos físicos. Com base numa análise cautelosa dos resultados de uma simulação, podem ser tomadas decisões relativas à forma como as diferentes condições do processo e parâmetros de concepção do molde podem ser manipulados para melhorar a qualidade de uma determinada operação de injeção.

Do ponto de vista do sector industrial, os objectivos de uma simulação e consequente análise são reduzir os tempos de produção e os índices de sucata, aumentar a vida útil do molde e a precisão do produto final. Evidentemente, estes objectivos não são atingidos por uma acção única e unidireccional.

12.1 - Software de simulação comercial

No mercado norte-americano, existem diversos sistemas informáticos que podem ser usados para analisar os processos físicos que ocorrem na fundição injectada. A tabela 12.1 representa uma lista dos principais atributos destes programas. Os programas ABAQUS e ANSYS foram incluídos nesta tabela como exemplos de códigos comerciais que podem ser usados para modelar a resposta estrutural do molde, uma capacidade que está fora das possibilidades do resto dos sistemas da tabela (excepto no caso do DieCas da General Motors).

	Magmasoft	ProCast	EKK	Flow 3D	DieCast	2D-BEM	MetlFlow
Sistema de resolução							
MEF		X	X				
MDF	X			X			
MEFr					X	X	
Forma fechada							X
Plataforma							
PC			X			X	X
Workstation	X	X	X	X	X		
Simulação de							
Fluxo Turbulento	X	X	X	X			
Jet Flow				X			
Acoplado com calor	X	X		X			
Pressão de retorno		X		X			
Aprisionamento de gases				X			
Solidificação							
Porosidade por contracção	X		X		X		
Análise termoelástica					X		

Tabela 12.1 – Comparação das principais características dos programas de simulação

Foram desenvolvidos dois códigos, MAGMAsoft e ProCast, para a análise dos processos de fundição em geral. Estes códigos são os maiores especialistas no campo da análise de solidificação no mercado norte-americano.

EKK, o mais recente código do mercado, foi concebido com a fundição injectada como referência, mas pode ser usado para analisar outros processos

de fundição.

Enquanto o MAGMASoft usa uma formulação de diferenças finitas para resolver os problemas de transferência de calor e de fluxo do fluido, o ProCast e o EKK usam uma aproximação por elementos finitos para gerar os mesmos resultados.

O Flow 3D é um sistema concebido principalmente para a análise de processos de fluxo de fluido complexo: desde fluxos de fluido Newtonianos sob condições isotérmicas em regimes laminares, até misturas de gás e líquidos sob condições não isotérmicas em regimes turbulentos e em *jet flow*. Originalmente, este código foi criado para analisar o fluxo em permutadores de calor de reactores nucleares. Não foi concebido para a análise de fundição; no entanto, a sua competência para modelar regimes de fluxo complexo pode ser aproveitada para a análise do processo de enchimento na fundição injectada.

A General Motors usa o DieCas, um código de computador proprietário desenvolvido na GM para a previsão dos campos térmicos e as deflexões induzidas pelo calor. Este sistema é, de certa forma, único em ambas as aproximações (as suas análises prevêem os campos térmicos no estado quase estático) e no método numérico que utiliza (formulação por elemento de fronteira).

Um trabalho de pesquisa da Commonwealth Scientific Research Organization (CSIRO) australiana resultou no desenvolvimento e comercialização de dois programas que facilitam a concepção de linhas de arrefecimento, canais de alimentação e ventilações, bem como dos parâmetros do processo de injeção.

Um destes códigos chama-se 2D-BEM, que é um código de elemento de fronteira de duas dimensões que auxilia a criação de linhas de arrefecimento. Com este software, os projectistas podem fazer uma estimativa da influência que a disposição e o dimensionamento das linhas de água têm nos campos térmicos de um molde e em diferentes secções. Podem então ser tomadas decisões no sentido de aproximar o projecto das linhas de arrefecimento da sua solução óptima.

Outro software disponível é o Metflow, um sistema que calcula as condições do processo (tempos de injeção, pressões), baseado na disposição e no tamanho dos canais de alimentação e ventilações. Os cálculos baseiam-se na análise do fluxo do fluido nos canais tangenciais, usando fórmulas clássicas da hidráulica. Nenhum destes códigos depende de formulações complexas ou de motores numéricos potentes. Por esta razão, as suas análises são limitadas em termos de abrangência e precisão. Contudo, estes sistemas dão-nos uma primeira abordagem da gama de resultados que podem ser usados para escolhas de projecto estudadas.

Os últimos desenvolvimentos em termos de ferramentas de análise focam-se nas necessidades dos projectistas durante as primeiras fases do projecto. O Castview, por exemplo, é uma ferramenta que pode ser usada para verificar a compatibilidade da forma de uma peça com o processo de fundição injectada. Esta ferramenta é capaz de gerar resultados num tempo relativamente curto quando comparado com outros sistemas disponíveis no mercado.

Os sistemas genéricos, tais como o ABAQUS e o ANSYS, oferecem opções diferentes. Estes sistemas podem ser usados para a análise da transferência de calor, da deflexão termo-elástica dos moldes, bem como das distorções nas moldações induzidas pela temperatura. A análise da solidificação da peça está para além das possibilidades destes sistemas. Por outro lado, estes possuem uma base de dados de elementos que podem ser usados para analisar vários processos físicos.

12.2 - Capacidades e limitações dos sistemas comerciais

Todos os sistemas de computador apresentados na tabela 12.1 exigem um investimento considerável. A maioria destes funciona com base em *workstations* ou PCs actuais, com elevada rapidez de processamento para produzir resultados em tempos razoáveis. Normalmente, o preço do *software*, assim como a formação para um analista, é superior ao investimento no

hardware. Parece ser consensual entre os utilizadores que, para se justificar o investimento, deve haver procura suficiente por resultados de simulações para manter um analista a trabalhar a tempo inteiro.

Os sistemas projectados para a análise da fundição ou fundição injectada dão-nos: o fluxo do fluido, a transferência de calor e os mecanismos de solidificação. Estes sistemas têm determinadas capacidades que reduzem a quantidade de trabalho necessário para preparar e analisar um modelo:

- São projectados para manejar e criar fronteiras múltiplas e materiais num modelo único, fundição e moldes
- Estão disponíveis ferramentas especiais e processos para facilitar a definição de cargas e de condições de fronteira comuns aos processos de fundição
- Fornecem-nos uma base de dados de propriedades de materiais e de condições de processamento que foram desenvolvidas para a aplicação na fundição
- Estão preparados para apresentar resultados de forma que sejam úteis para a aplicação, tais como a última zona a encher na cavidade ou a última zona a solidificar no gito.

Em termos de aplicação prática destes sistemas à análise da fundição injectada, a resolução dos resultados é um ponto importante. No contexto das condições de processo que é possível controlar na fundição injectada, qual será o grau de precisão mínimo necessário nos resultados da simulação para melhorar a qualidade da operação de fundição? A resposta a esta questão influencia significativamente as exigências colocadas no modelo e a qualidade dos dados físicos usados nestes modelos.

12.3 - Quais são os dados necessários para a simulação?

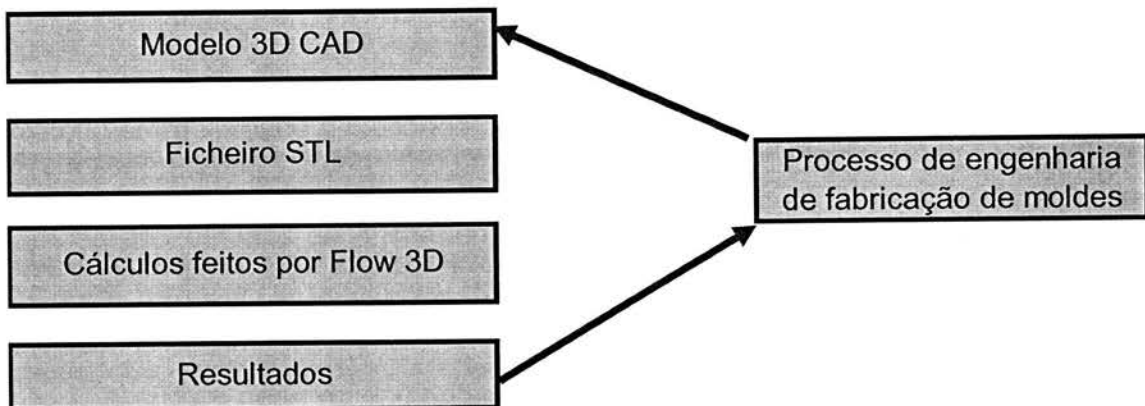
Os dados necessários para a simulação são:

- Modelo volúmico 3D–CAD: é necessário um modelo 3D da peça a ser moldada, incluindo o gito de alimentação.

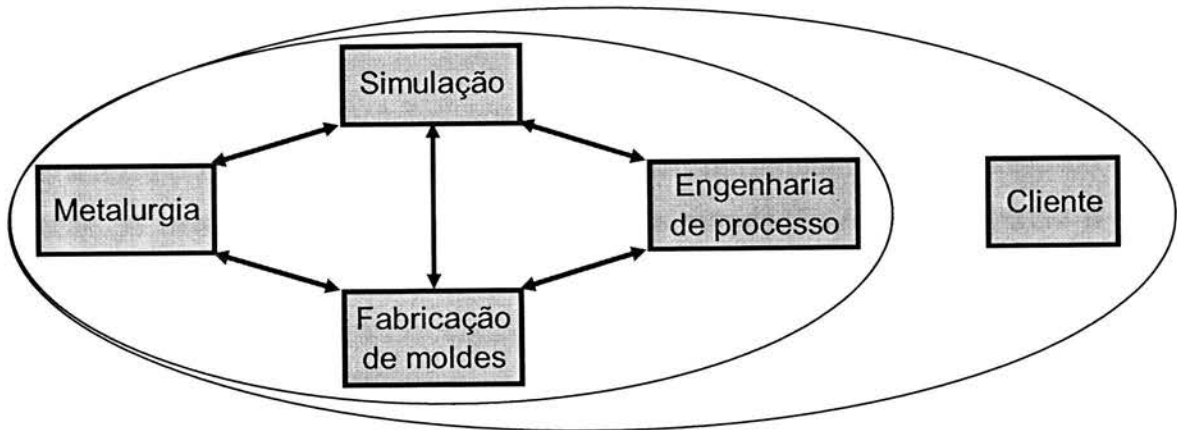
- Ficheiro STL: o modelo 3D-CAD é convertido para um formato denominado STL (Stereolithography). Este formato consiste numa representação da superfície da geometria formada por triângulos.

Para além destas condições básicas, é necessário especificar:

- Curva de injeção (velocidade)
- Temperatura do molde
- Temperatura do metal
- Tipo de liga



O trabalho em equipa é uma garantia para o sucesso. O enchimento e a solidificação devem ser sempre analisados em equipa. Naturalmente, a satisfação do cliente é sempre a maior preocupação.



Uma colaboração próxima entre a área de fabricação de moldes, a engenharia de processo, a metalurgia e o cliente também é obrigatória para garantir a obtenção de bons resultados.

Nos projectos de simulação, é importante que se aplique o seguinte princípio: sem a cooperação de pessoas com experiência prática no processo de fundição injectada, nunca se conseguirá alcançar o sucesso.

Para além disto, existe ainda a questão permanente no que diz respeito à relação entre verdade e realidade, isto é, a informação de retorno da experiência prática é muito importante para a verificação dos resultados da simulação. Graças aos estudos de enchimento com interrupção prematura da injeção, é possível verificar a qualidade dos modelos e a fiabilidade dos programas usados.

A crença cega no computador pode ser comparada a um jogo de poker: as consequências podem ser desastrosas.

13 - Simulação em Flow 3D

As simulações foram feitas com base nos estudos efectuados sobre a dinâmica da onda formada na camisa de injeção na primeira fase do ciclo de injeção. A malha utilizada para o processo de simulação engloba apenas a camisa de injeção e tem o tamanho de 7 mm, com um total de 11 664 células.

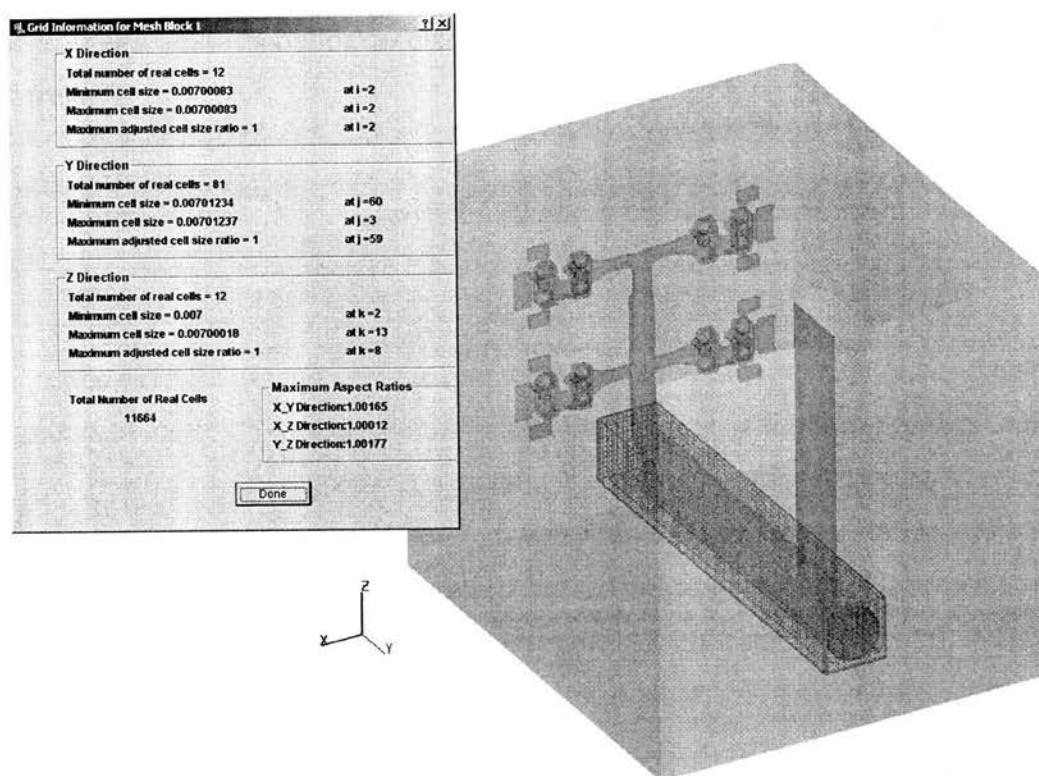


Fig. 13.1 – Malha criada para as simulações da primeira fase do ciclo de enchimento

Na parte de definição dos fluidos e suas propriedades, foram considerados 2 fluidos: o ar e o alumínio. O alumínio foi considerado como incompressível e o ar como compressível, com uma compressibilidade igual a $7,65 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{N}$.

A liga de alumínio e as suas propriedades, assim como as propriedades do ar consideradas para o cálculo, encontram-se definidas na seguinte tabela:

	Dens. [kg/m³]	Exp.Tér. [°C ⁻¹]	Const.Gas	Temp.Ref. [°C]	Calor Esp. [J/kg°K]	Cond. Term [W/m°K]	Temp.Solid [°C]	Temp.Liq. [°C]	Calor Lat. de fusão [J/kg]
Alumínio	2657	2,16x10 ⁻⁵	2,87x10 ⁶	650	963	121	570	585	38,9x10 ⁴
Ar	1,225	2,68x10 ⁻³	287	375	718	0,02346	-	-	-

As condições de fronteira foram definidas para uma pressão atmosférica na fronteira limite superior do eixo dos zs, e considerando todas as outras como barreira.

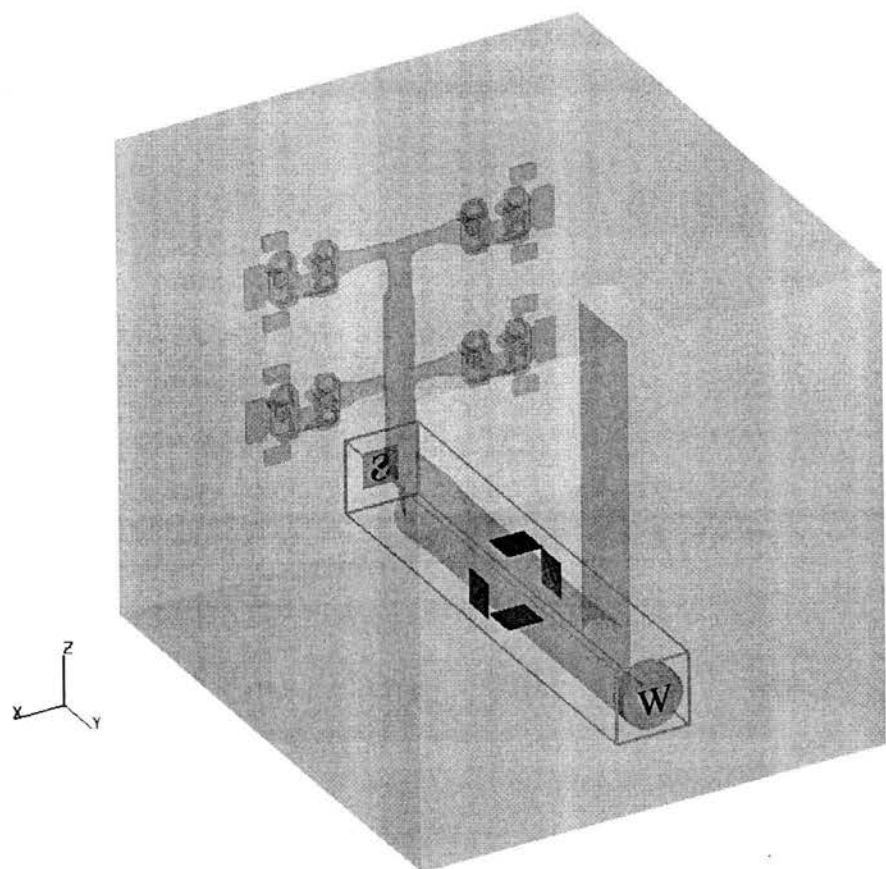


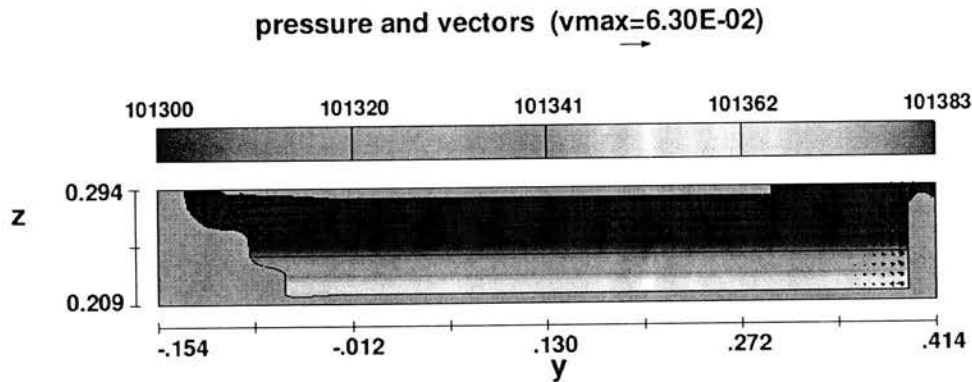
Fig. 13.2 – Condições de fronteira definidas para as simulações da primeira fase do ciclo de enchimento

13.1 - Simulações de enchimento na primeira fase do ciclo de injecção

Os resultados das simulações foram obtidos seguindo os perfis de velocidade calculados anteriormente.

Condições iniciais:

Pressão (Pa)

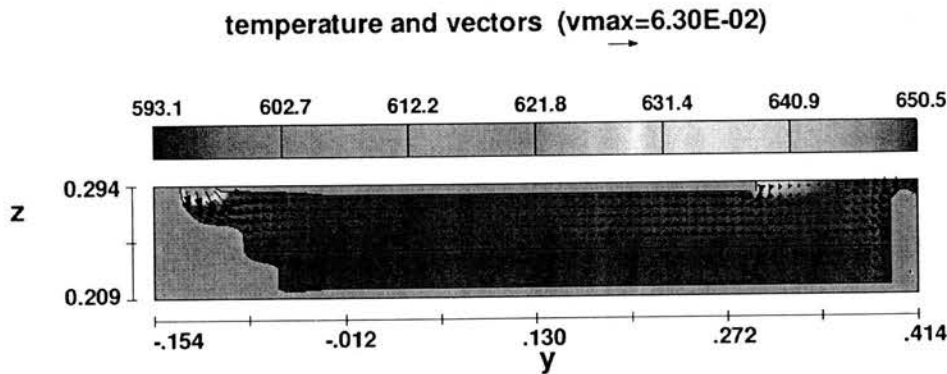


FLOW-3D t=.0195 x=1.780E-01 (jy=2 to 82 kz=2 to 13)
10:37:43 06/16/2006 hqop hydr3d: version 9.0.2 win32-iff 2005
Title

2

Fig. 13.3 – Situação inicial de pressão

Temperatura (°C)



FLOW-3D t=.0195 x=1.780E-01 (jy=2 to 82 kz=2 to 13)
12:20:35 06/08/2006 nomj hydr3d: version 9.0.2 win32-iff 2005
Title

2

Fig. 13.4 – Situação inicial de temperatura

O volume inicial de alumínio é de $V=6,81 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, conforme calculado.

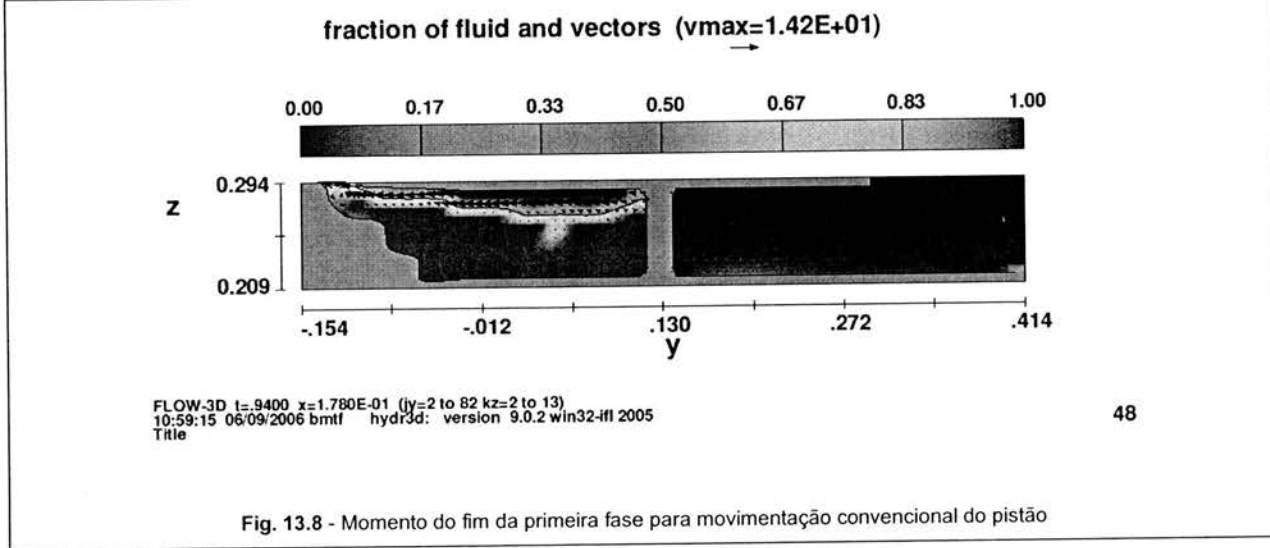
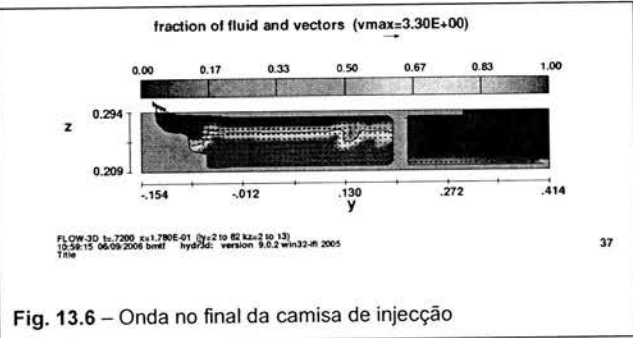
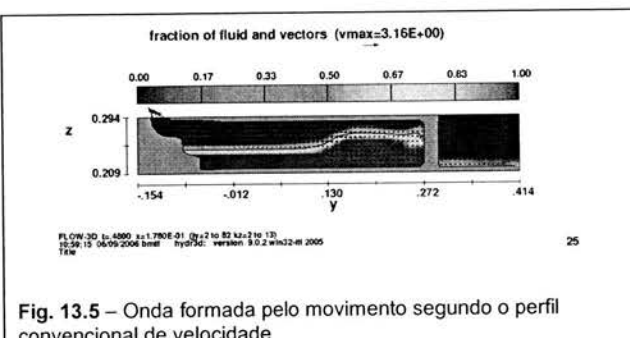
13.2 - Simulação segundo perfil de velocidade Convencional

A título de curiosidade, foi feita uma simulação para um perfil de velocidade idêntico ao usado nas máquinas convencionais, em que a velocidade é constante.

Foi usado o seguinte perfil de velocidades:

t (s)	V(t) [m/s]
0	0
0,2	0,32
0,92	0,32

Tabela 13.1 – Perfil de velocidades para caso convencional

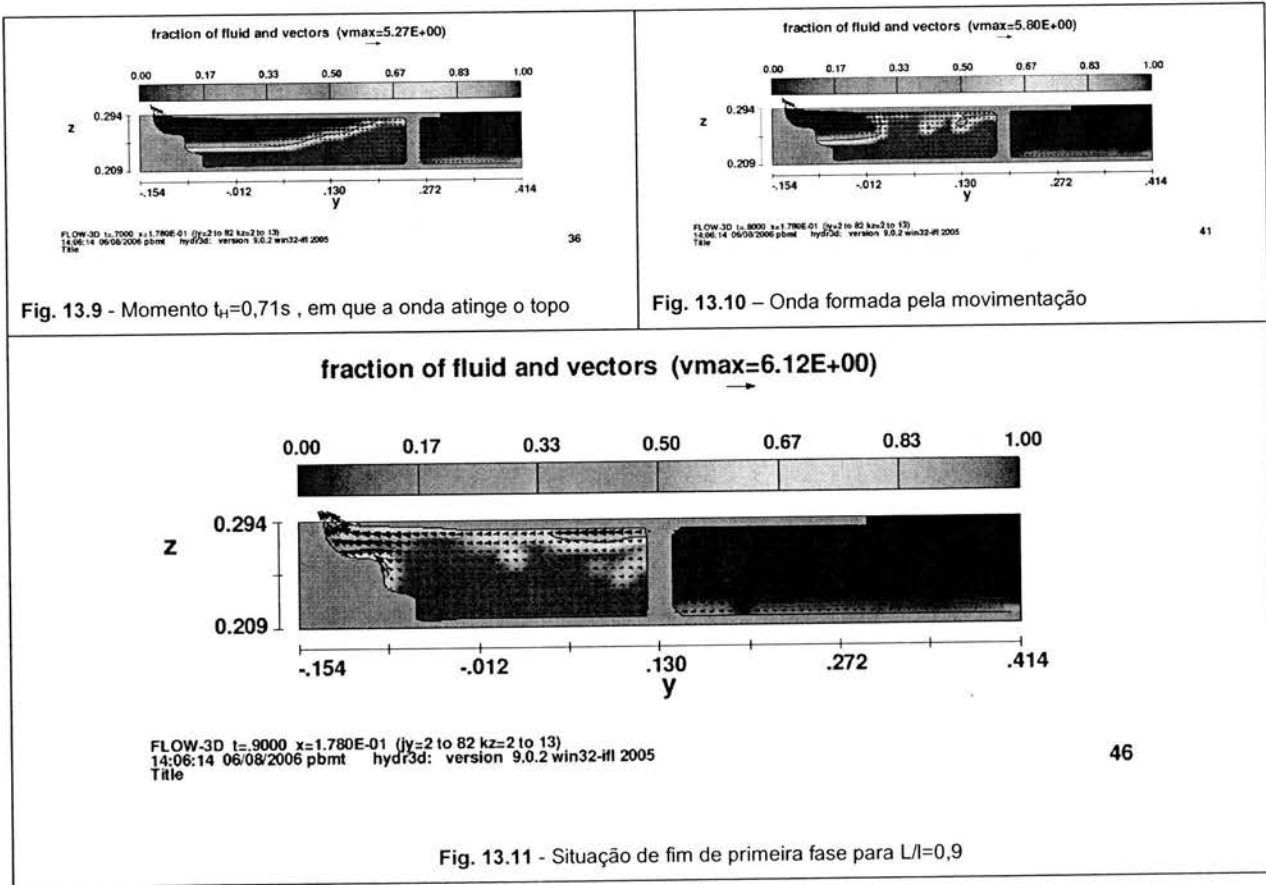


A onda formada por este perfil de movimento atinge o final da camisa muito antes desta se encontrar cheia. O resultado é o volume de ar aprisionado que se vê na figura 13.8.

13.3 - Simulação segundo lei de aceleração otimizada

Foram simuladas 3 curvas para esta lei de aceleração.

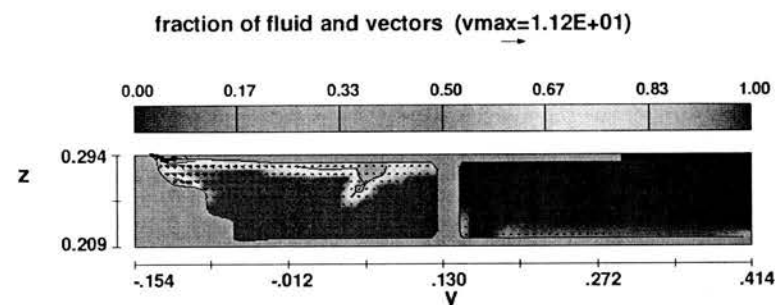
A primeira curva, definida por $L/l=0,9$, foi também testada nos ensaios experimentais. Para melhor identificação, esta curva será denominada AOE1.



Na figura 13.10, pode verificar-se que existe alguma turbulência no fluxo pelo ar aprisionado junto ao pistão; esse ar mantém-se aprisionado até ao final

da primeira fase (figura 13.11).

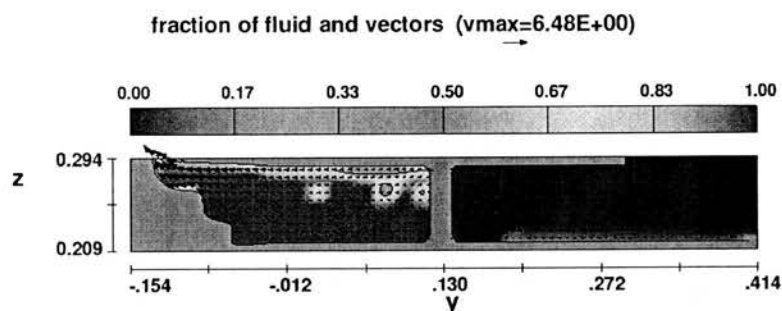
Nas imagens seguintes, são apresentadas as outras 2 curvas, com $L/l=0,85$ e $L/l=0,8$, respectivamente, na altura em que se atinge o final da primeira fase (camisa cheia).



FLOW-3D t=9200 x=1.760E-01 (jy=2 to 82 kz=2 to 13)
10:17:45 06/12/2006 opkh hydr3d: version 9.0.2 win32-ifi 2005
Title

47

Fig. 13.12 - Situação de fim de primeira fase para $L/l=0,85$



FLOW-3D t=9600 x=1.780E-01 (jy=2 to 82 kz=2 to 13)
10:49:36 06/12/2006 omjb hydr3d: version 9.0.2 win32-ifi 2005
Title

49

Fig. 13.13 - Situação de fim de primeira fase para $L/l=0,8$

Podemos verificar que o volume de ar aprisionado é maior para os dois últimos casos.

13.4 - Simulação segundo lei de aceleração exponencial

Tal como a análise para a lei de aceleração otimizada feita anteriormente, foi testada nos ensaios experimentais uma das curvas dadas pela lei de aceleração exponencial. Na curva testada, foi utilizado o parâmetro $L/\beta=2,7$ e esta será denominada AEE3.

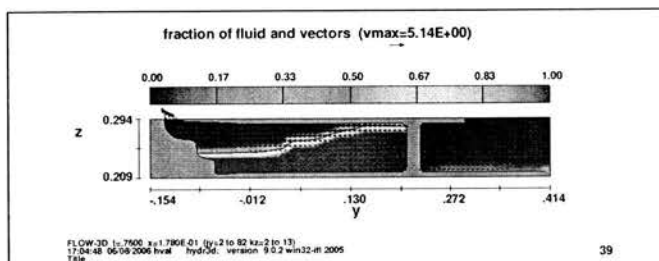


Fig. 13.14 - Momento $t_t=0,77s$, em que a onda atinge o topo

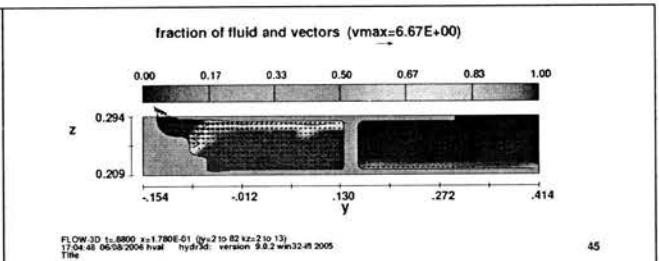


Fig. 13.15 - Onda formada pela movimentação

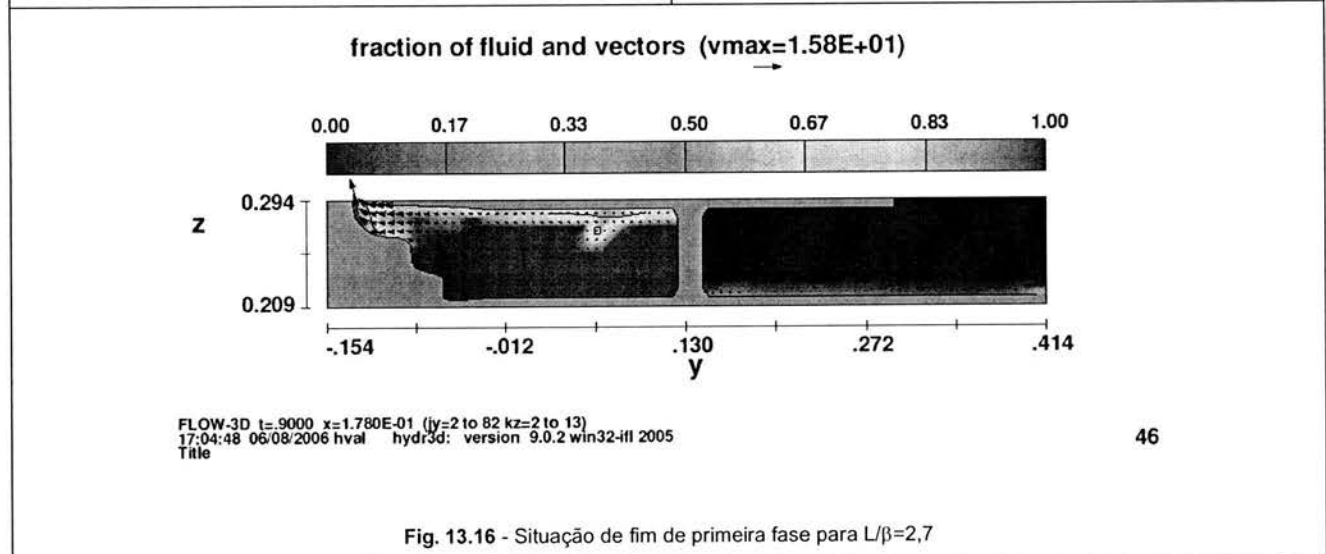


Fig. 13.16 - Situação de fim de primeira fase para $L/\beta=2,7$

Podemos verificar pelas imagens anteriores que o fluxo, neste caso, se executa de forma menos turbulenta e que a parte posterior da onda formada atinge o fim da camisa no momento de camisa cheia (figura 13.15), como seria aconselhável.

As imagens seguintes representam as curvas para a mesma lei, com os parâmetros $L/\beta=9$ e $L/\beta=12,8$, respectivamente, no final da primeira fase.

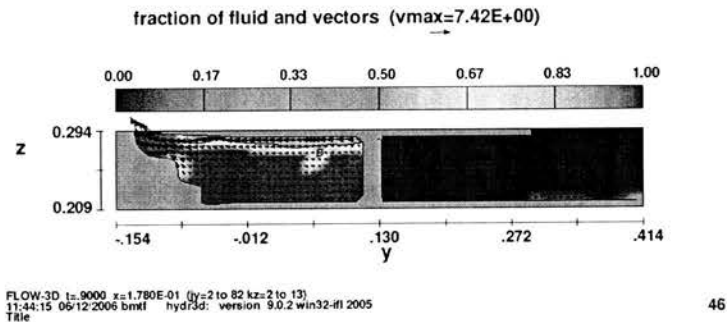


Fig. 13.19 - Situação de fim de primeira fase para $L/\beta=9$

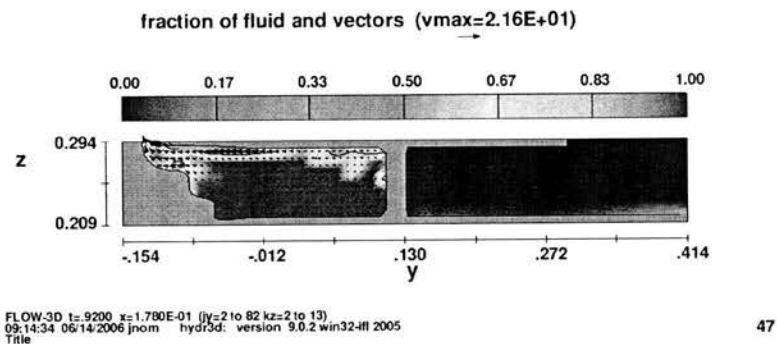


Fig. 13.20 - Situação de fim de primeira fase para $L/\beta=12,8$

Os resultados obtidos pelos 2 últimos perfis de movimentação são visivelmente piores no aprisionamento de ar do que na primeira situação analisada, talvez devido ao facto de a aceleração ser efectuada de forma mais rápida, causando maior turbulência.

13.5 - Simulação segundo lei indicada pela NADCA

Segue-se a simulação feita para o perfil de movimentação do pistão aconselhado pela NADCA. Esta curva será denominada ABE2.

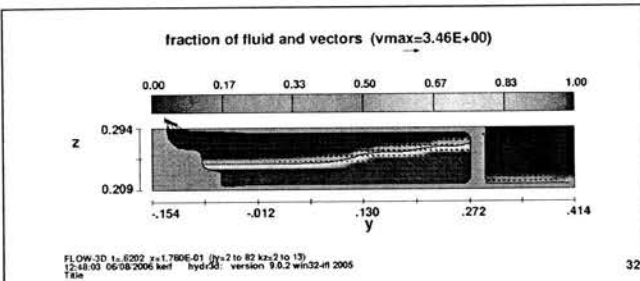


Fig. 13.21 – Onda formada pelo perfil de movimentação da NADCA

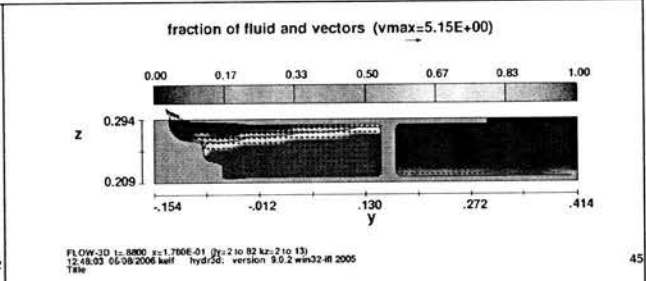


Fig. 13.22 – Onda formada pelo perfil de movimentação da NADCA

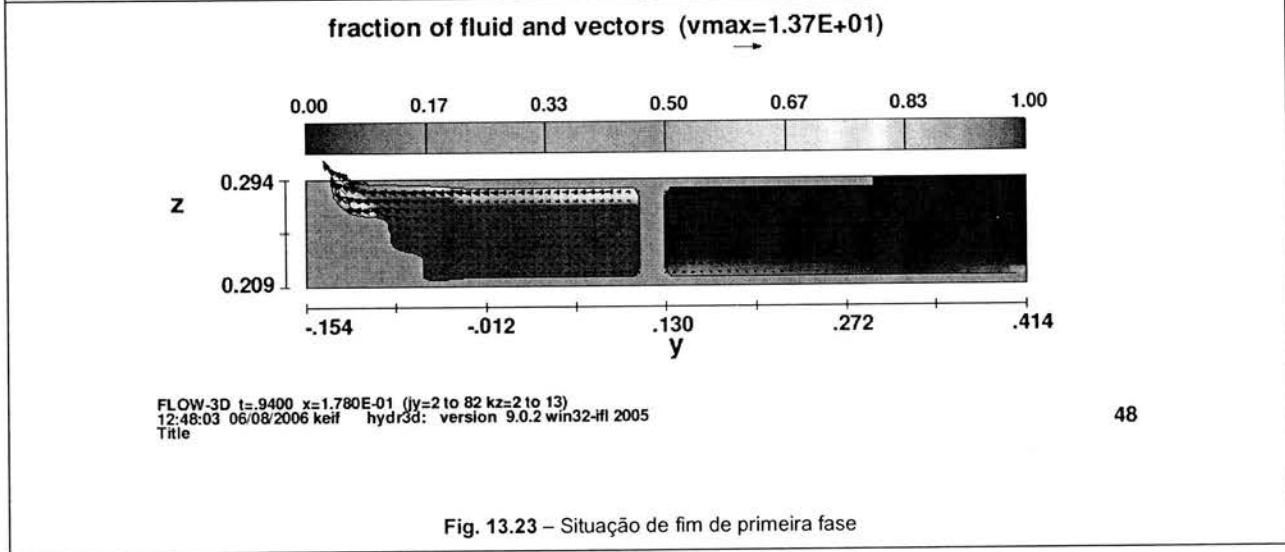


Fig. 13.23 – Situação de fim de primeira fase

A curva obtida pelos parâmetros de cálculo aconselhados pela NADCA, foi a que obteve melhores resultados, quer em termos de simulação, quer em termos de testes de enchimento. O fluxo é feito de forma pouco perturbada e o enchimento da camisa de injeção é quase total no final da primeira fase.

13.6 - Simulação segundo aproximação da lei exponencial sem patamar de velocidade constante

Para uma aproximação das três, foi analisada uma curva que não tivesse o patamar de velocidade constante. Esta análise foi feita para que as tentativas de obtenção de resultados fossem o mais abrangentes possível e para ver o comportamento do metal nessas situações. Esta curva será denominada AEE4.

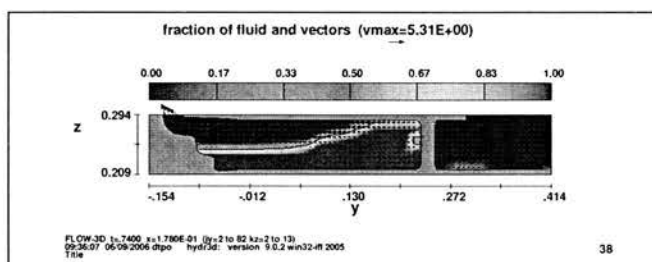


Fig. 13.24 – Onda formada pelo perfil de movimentação exponencial sem patamar de velocidade constante

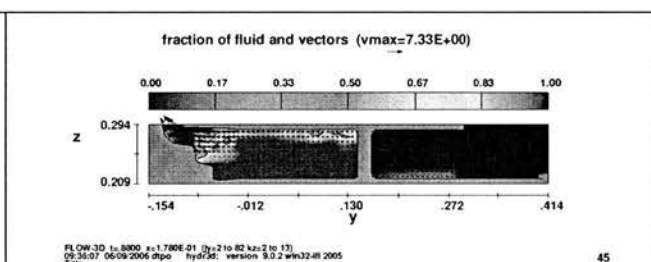


Fig. 13.25 – Onda formada pelo perfil de movimentação exponencial sem patamar de velocidade constante

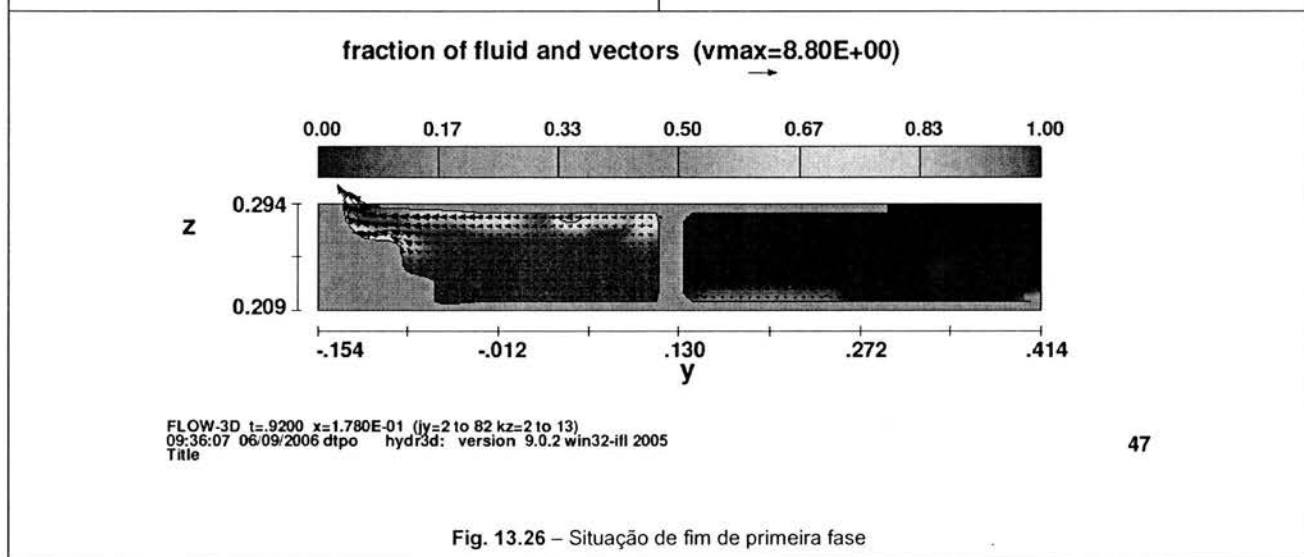


Fig. 13.26 – Situação de fim de primeira fase

Os resultados obtidos para o final da primeira fase são bons, mas o fluxo é bastante turbulento, como se pode observar na figura 13.25, o que pode originar aprisionamento de ar por turbulência.

Como foi mencionado anteriormente, a lei aconselhada pela NADCA foi a que obteve melhores resultados. Nas outras leis analisadas, temos a presença

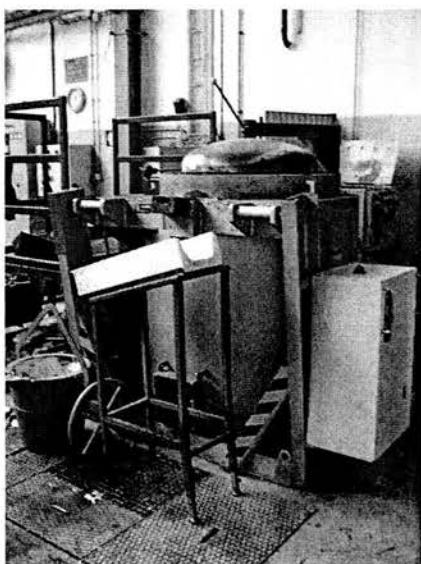
de fluxos não tão uniformes, mas para cada caso temos resultados melhores dependendo do ajuste feito. Os melhores resultados obtidos para cada caso vão ser analisados em pormenor nos testes de enchimento descritos seguidamente.

14 - Testes experimentais da primeira fase de fundição injectada

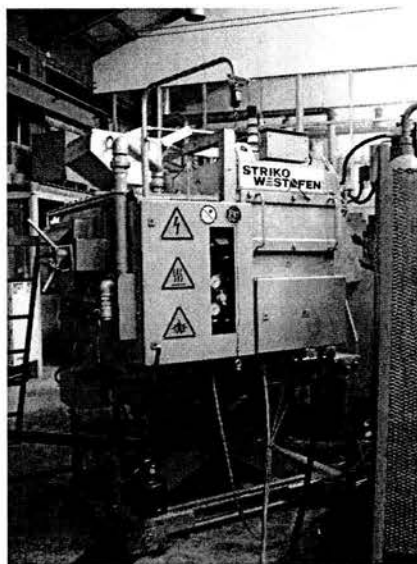
Depois de concluída a parte da simulação e consequente análise dos resultados obtidos, passamos para a parte de teste na máquina de injeção. Esta é a fase mais importante para análise das curvas de primeira fase, pois estão reunidas todas as condições reais do processo.

A célula de fundição injectada presente no CINFU e que foi utilizada para a realização destes testes inclui:

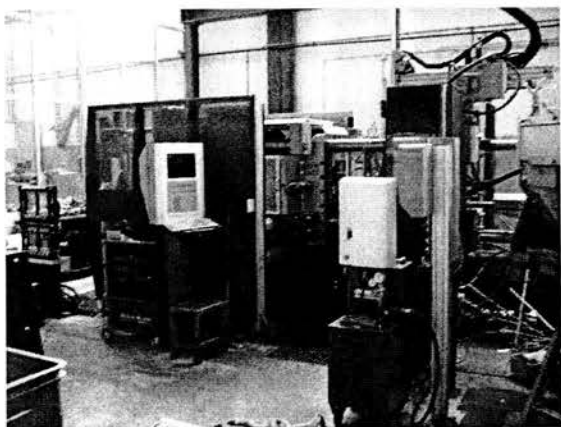
Forno de fusão de cadinho



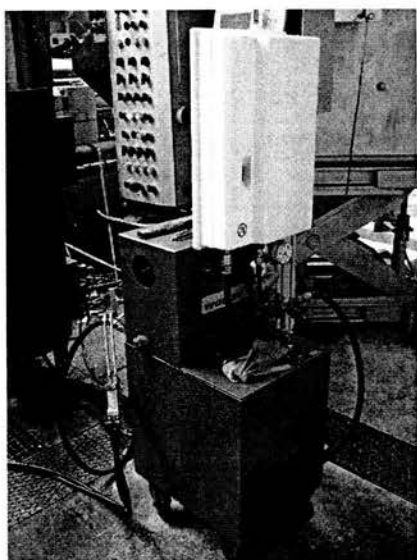
Forno de manutenção doseador



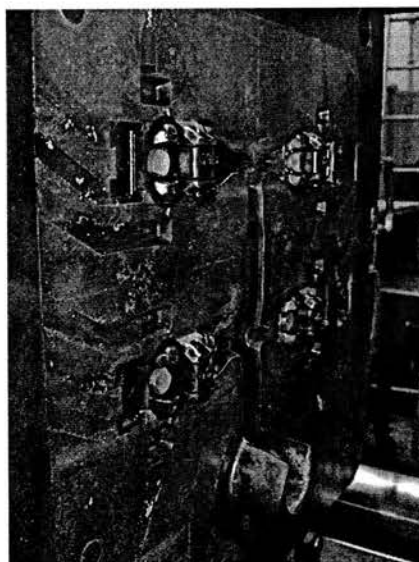
Máquina de injeção Bühler Evolution 42D



Lubrificador Wollin



Molde de 4 cavidades



Estavam também disponíveis para utilização um extractor automático de peças PickMat e um lubrificador automático, que são usados quando se precisa de uma produção mais automatizada, que não foi o caso.

14.1 - Procedimento de testes experimentais

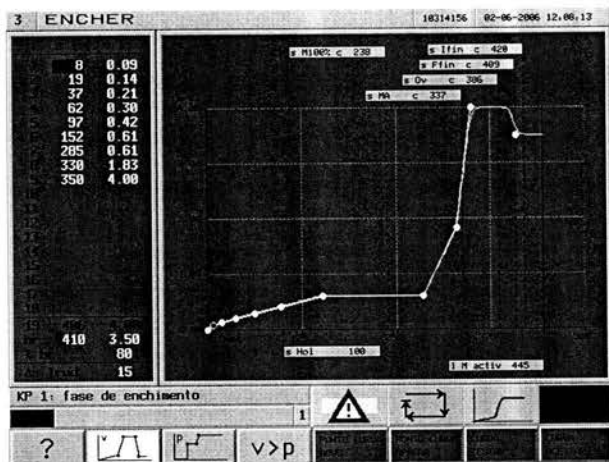
Foram estabelecidas as seguintes tarefas para o teste experimental:

- 1 - Determinação do deslocamento do pistão na altura de camisa cheia (camisa de injeção 100% cheia)
- 2 - Determinação do deslocamento do pistão na altura em que o metal chega à secção de ataque
- 3 - Injeção interrompida no final da primeira fase para os perfis de velocidade estudados e análise destrutiva das provas
- 4 - Análise termográfica do molde antes e após lubrificação
- 5 - Ciclo de injeção sem fase de compactação para os perfis de velocidade estudados e análise não destrutiva por raio X das provas

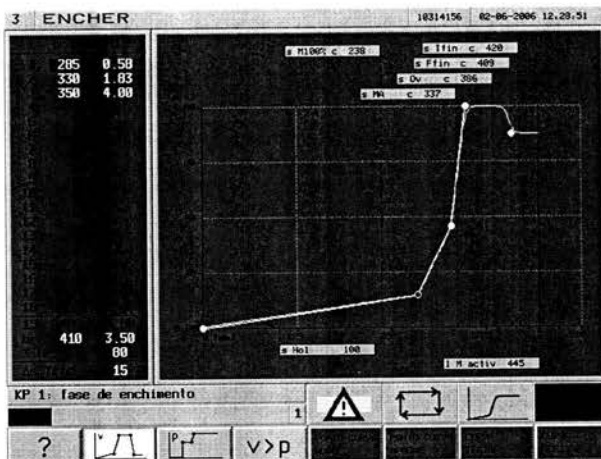
14.2 - Curvas testadas na máquina

Os perfis de velocidade foram seleccionados após avaliação dos resultados das simulações e com a preocupação de obter resultados o mais abrangentes possível. Antes das injeções de teste, foram efectuadas várias injeções com o ciclo de injeção completo para estabilização da temperatura do molde. Para cada um dos casos analisados, foram tiradas 3 provas, das quais foi cortada uma por caso para análise. Depois do ensaio para camisa 100 % cheia, foram executados, para cada caso, 2 testes de enchimento sem fase de compactação (depois de estabilizado o molde com 5 injeções com o ciclo completo). Os parâmetros de segunda fase não foram alterados e permaneceram constantes em todas as curvas testadas, pelo que não têm influência directa nos resultados obtidos posteriormente.

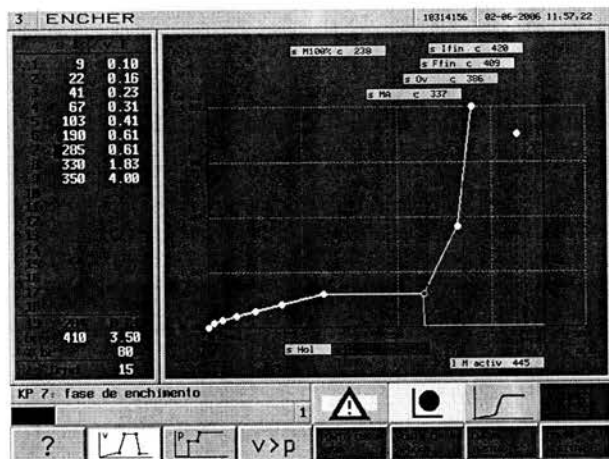
Foram então introduzidas na máquina as seguintes curvas:



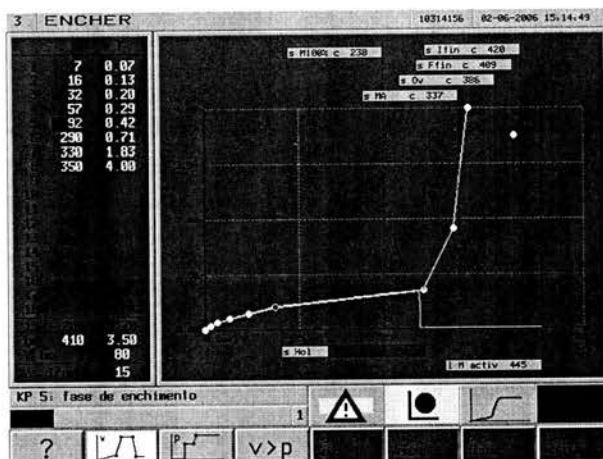
Perfil AOE1 – Obtido pela lei de aceleração otimizada para $L/l=0,9$



Perfil ABE2 – Obtido pela lei de aceleração da NADCA



Perfil AEE3 – Obtido pela lei de aceleração exponencial para $L/\beta=2,7$



Perfil AEE4 – Obtido pela aproximação da lei de aceleração exponencial à lei da NADCA

14.3 - Determinação do deslocamento do pistão na altura de camisa cheia (fim da primeira fase de enchimento)



Fig. 14.1 – Resultados de ensaios de injeção interrompida para o pistão nos pontos S=238 mm, S=244 mm, S=258 mm, S=268 mm, S=275 mm e S=290 mm,

Como podemos ver pela imagem, estas amostras ilustram de forma elucidativa o momento em que a camisa está cheia. Os valores de S dão-nos o momento em que foi interrompida a injeção. Nos cálculos feitos anteriormente, obteve-se o resultado de fim da primeira fase $S = 268$ mm. O valor do peso do gito ($P = 1,81$ kg) é ajustado no sistema de doseamento automático do forno de manutenção. No entanto, existem perdas de material, especialmente na calha de vazamento do metal entre o forno de manutenção e a camisa, que podem influenciar o valor real deste peso. Como consequência, o valor do ponto de deslocamento em que o pistão atinge o final da primeira fase pode aumentar no sentido da injeção; tal como se verificou experimentalmente, o valor real deste ponto é de cerca de $S = 290$ mm. Esta diferença entre resultados calculados e experimentais revela que a taxa de perda de material na calha ronda os 13%.

14.4 - Determinação do deslocamento do pistão na altura em que o metal chega à secção de ataque



Fig. 14.2 – Resultado do ensaio para determinação da posição do pistão quando o metal chega à secção de ataque das peças.

O valor de deslocamento do pistão obtido com os ensaios para o momento em que o metal atinge a secção de ataque das peças é de $S=330$ mm. Podemos concluir com isto que, para o valor calculado $S=379$ mm, o metal já estaria dentro das peças, o que é indesejado para a injeção. Podemos ver pela imagem que o metal chega em simultâneo às 4 cavidades, o que demonstra que o dimensionamento do canal foi bem executado. Pela simulação feita para o mesmo canal, conclui-se o mesmo.



Fig. 14.3 – Resultado da simulação da distribuição do fluxo no canal

14.5 - Injecção interrompida no final da primeira fase para os perfis de velocidade estudados e análise destrutiva das provas

Para todas as curvas testadas, foi alterado o comprimento de interrupção do pistão de $S=268\text{ mm}$ (valor calculado) para $S=290\text{ mm}$, para obter melhores resultados.

Perfil de aceleração otimizada: AOE1

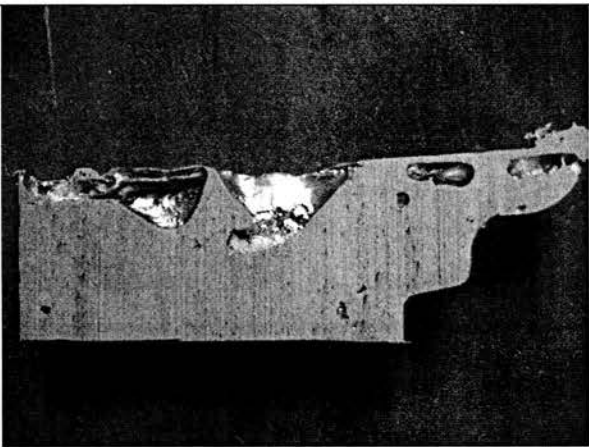


Fig. 14.4 – Resultado da análise destrutiva por corte do teste com interrupção no final da primeira fase

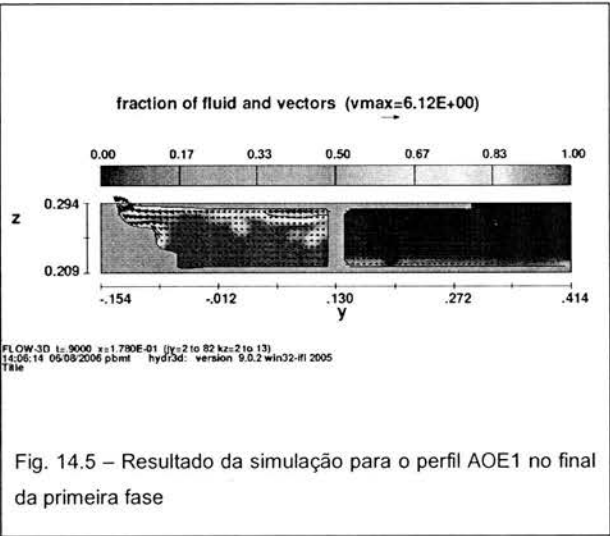


Fig. 14.5 – Resultado da simulação para o perfil AOE1 no final da primeira fase

Os resultados desta curva não foram satisfatórios, pois revelaram algum volume de ar aprisionado, como podemos ver pela figura anterior. O poro tem o aspecto de que o ar foi aprisionado pela reflexão da onda no final da camisa (aprisionamento de ar do tipo I, fig. 6.8). O avanço do ponto em que a onda atinge o topo da camisa, diminuindo com isto a aceleração do pistão e a velocidade com que a onda se desloca, teria um efeito benéfico nos resultados.

Perfil de aceleração da NADCA: ABE2

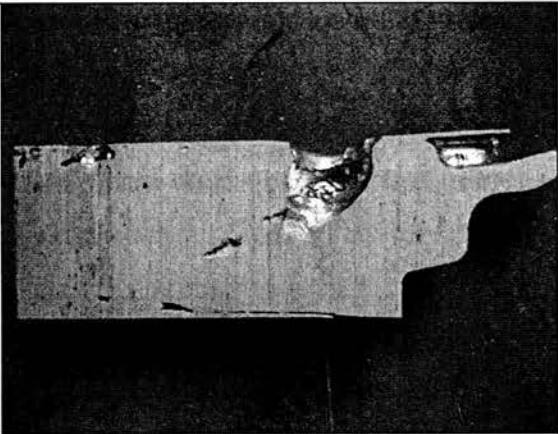


Fig. 14.6 – Resultado da análise destrutiva por corte do teste com interrupção no final da primeira fase

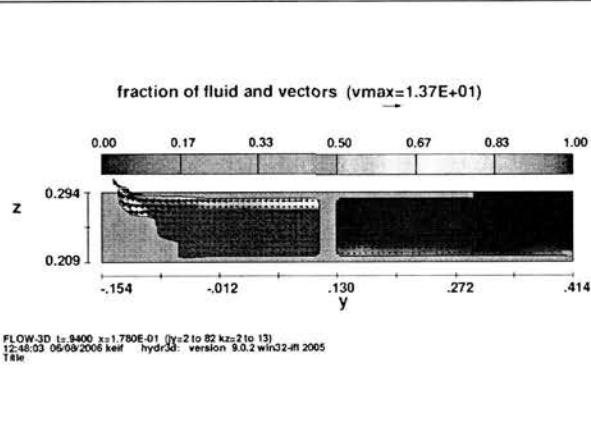


Fig. 14.7 – Resultado da simulação para o perfil ABE2 no final da primeira fase

Como podemos ver na figura anterior, este será o ensaio com melhores resultados ao nível do volume de ar aprisionado. No entanto, existe ainda a presença de ar, devido à forma como foi acelerado o pistão. O tipo de aprisionamento será mais idêntico ao do tipo II (fig. 6.8), em que acontece a obstrução prematura do canal de alimentação. Para evitar esta obstrução, dever-se-ia otimizar um pouco a velocidade crítica de primeira fase; contudo, esta conclusão só pode ser tirada depois do corte da amostra.

Perfil de aceleração exponencial: AEE3

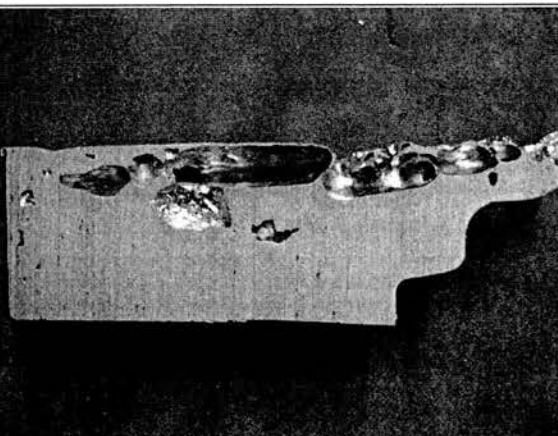


Fig. 14.8 – Resultado da análise destrutiva por corte do teste com interrupção no final da primeira fase

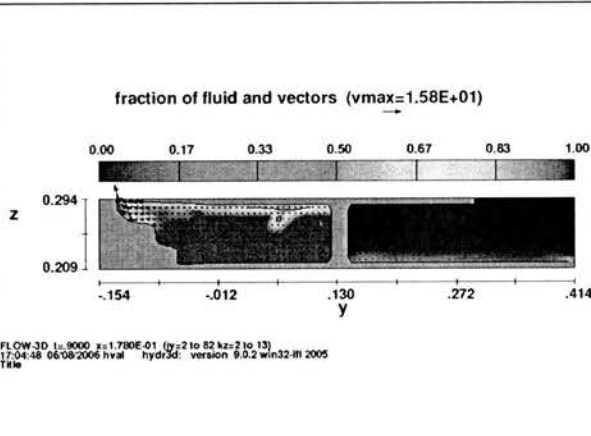


Fig. 14.9 – Resultado da simulação para o perfil AEE3 no final da primeira fase

Este ensaio resultou num problema interessante. No início, pensou-se que fosse o melhor ensaio pela forma compacta da prova. No entanto, após o corte da amostra, verificou-se que o seu interior estava oco. Na imagem anterior podemos observar este fenómeno. O que podemos concluir com isto é que raramente é possível tirar conclusões sem uma análise do interior da prova. O tipo de aprisionamento, neste caso, é sem dúvida um aprisionamento por turbulência, notório pelo formato e distribuição das bolhas. Esta curva tem uma forma muito idêntica à primeira testada, com a diferença de que a aceleração do pistão é menor. O facto de diminuirmos a aceleração não trouxe melhorias à quantidade de ar aprisionado, pelo que a solução óptima para este perfil ficou por determinar.

Perfil de aceleração exponencial sem patamar de velocidade constante: AEE4

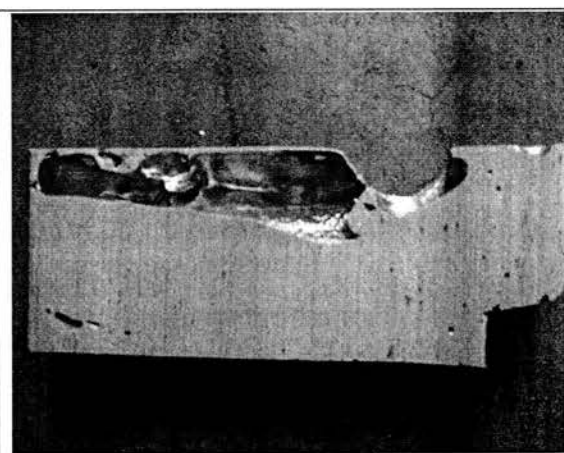


Fig. 14.10 – Resultado da análise destrutiva por corte do teste com interrupção no final da primeira fase

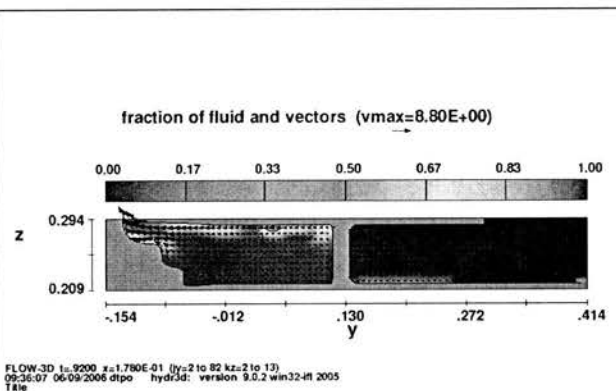


Fig. 14.11 – Resultado da simulação para o perfil AEE4 no final da primeira fase

À partida, sem o corte da amostra, poder-se-ia pensar que este teste seria bom, mas este foi sem dúvida o teste com piores resultados a nível de volume de aprisionamento de ar. Neste caso particular, o aprisionamento de ar parece englobar dois tipos de formação (fig. 6.8): por turbulência, pelas bolhas

existentes na parte mais próxima do pistão; por aprisionamento de ar do tipo II, pela bolha idêntica à obtida no caso ABE2, provocada pela obstrução prematura do canal de alimentação das cavidades. Também é evidente que este é o resultado com maior discrepância em relação ao resultado da simulação.

Os resultados obtidos nos testes não foram os mais esclarecedores. No entanto, podemos concluir que o perfil de velocidades escolhido na primeira fase está na origem da quase totalidade de casos de porosidade por gás. A optimização da minimização deste defeito é um factor determinante para o processo de Fundição Injectada.

Os resultados obtidos nas simulações em Flow 3D prevêm muitos dos defeitos obtidos na realidade. Contudo, seria necessária a inclusão dos diversos factores existentes na realidade (temperatura da camisa, campo real de pressões, temperatura real do metal, etc.).

14.6 - Termografia

A termografia é a técnica que estende a visão humana através do espectro infravermelho. A vibração de campos eléctricos e magnéticos que se propagam no espaço à velocidade da luz, gera uma onda electromagnética, e o conjunto de ondas electromagnéticas formam o espectro electromagnético. O infravermelho é uma frequência electromagnética emitida naturalmente por qualquer corpo, com intensidade proporcional à sua temperatura. Hoje em dia, a termografia desempenha um papel muito importante na área da manutenção preventiva. Através da sua utilização, é possível eliminar muitos problemas de produção, evitando falhas eléctricas, mecânica e fadiga de materiais.

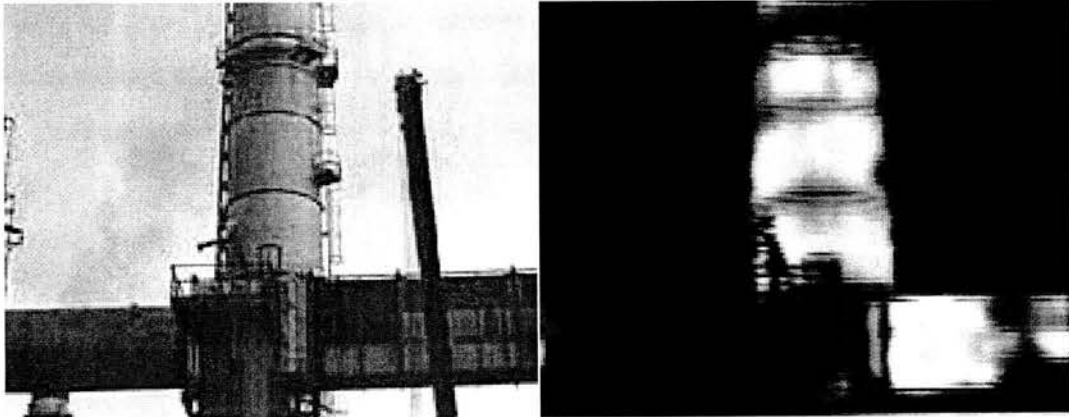


Fig. 14.12 – Termografia realizada sobre uma chaminé

14.6.1 - Classificação dos sistemas de termografia por infravermelhos

Pontuais - Pirómetros IR

- Medida de temperatura num ponto
- Equipamentos fixos e portáteis

Lineares - *Scanners* de linha

- Obtenção de perfis de temperatura
- Combinados com deslocamento, permitem obter mapas térmicos

Superficiais - Câmaras termográficas

- Sistemas de formação de imagens térmicas
- Distribuição da temperatura superficial em tempo real

14.6.2 – Aplicações da termografia

Fornos e Refractários

- Estudo da espessura das paredes do refractário
- Controlo de temperatura em fornos
- Localização de fugas de calor
- Estudo do funcionamento dos queimadores

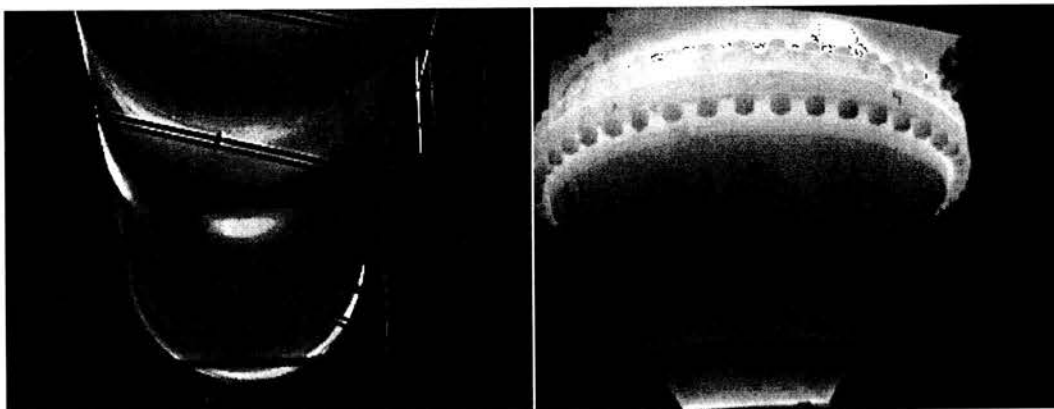


Figura 14.13 – Exemplos de termografias realizadas em fornos

Indústria Automóvel

- Análise das características térmicas de motores
- Estudo do aquecimento dos travões
- Controlo dos sistemas de descongelação
- Análise de aquecimento dos faróis
- Verificação de temperaturas em pneus

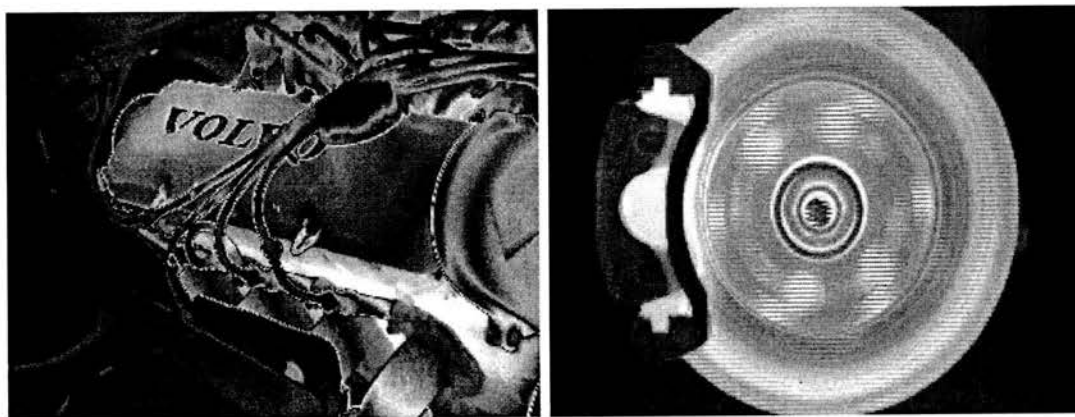


Figura 14.14 – Exemplos de termografias realizadas num automóvel

As principais vantagens para o uso deste processo de análise são:

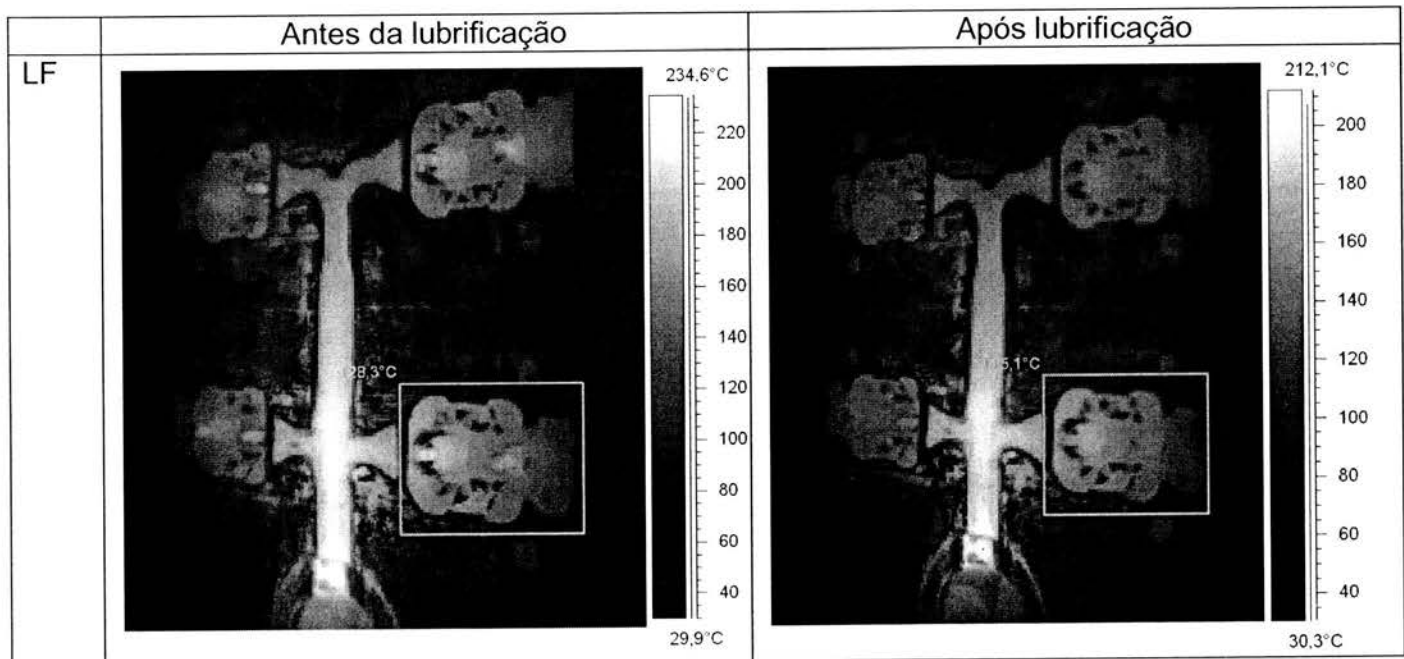
- Medição facilitada da temperatura de objectos móveis e de difícil acesso
- Por ser uma técnica sem contacto não interfere com o funcionamento e

comportamento próprio do elemento a medir

- Facilidade e rapidez na medida de grandes superfícies
- Medida de temperatura de vários objectos ao mesmo tempo
- Tempo rápido de resposta; permite seguir fenómenos transitórios de temperatura
- Precisão elevada e fiabilidade das medições

14.6.3 - Análise termográfica do molde antes e após lubrificação

Para a captação das termografias foi utilizada uma câmara termográfica, gentilmente disponibilizada pela Kupper Schmidt. O objectivo principal da análise térmica do molde está na obtenção da característica de temperaturas da superfície do molde em contacto com o metal líquido, depois de aberto, antes e após a lubrificação.



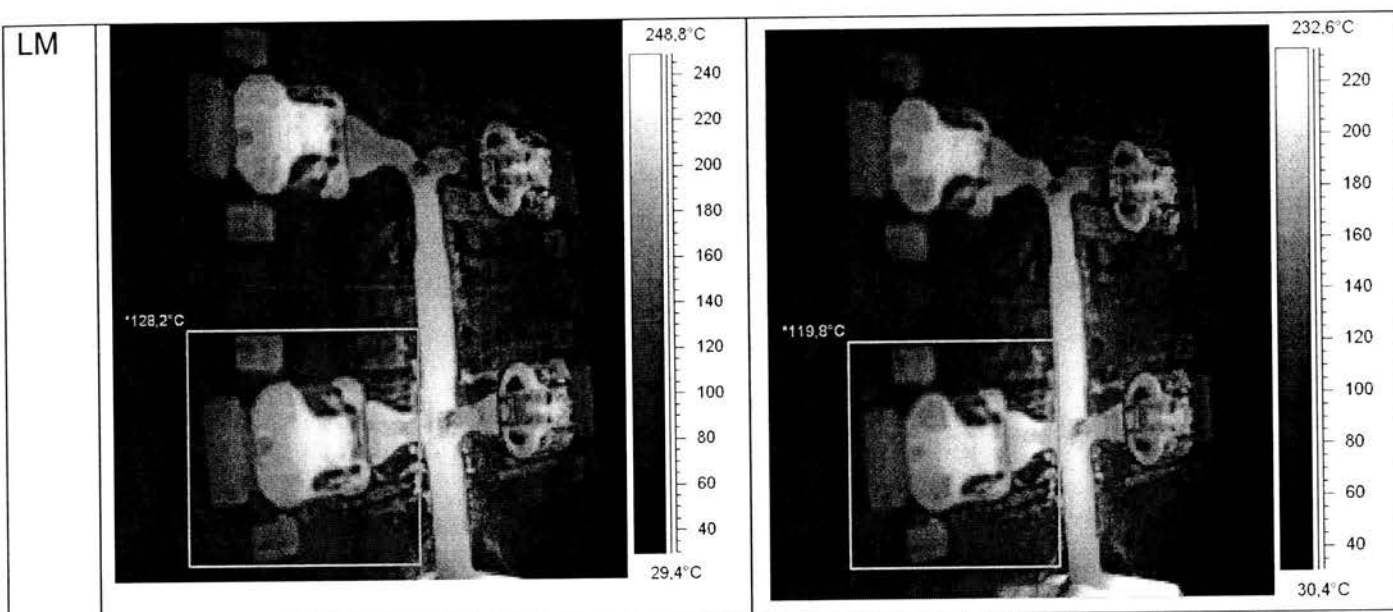


Fig. 14.15 – Termografias dos lados fixo e móvel do molde, antes e após lubrificação.

Pode verificar-se pelos termogramas que o molde sofre oscilações na sua temperatura superficial antes e após a lubrificação, de cerca de 10 °C. A diferença entre as temperaturas no lado fixo e no lado móvel não são muito grandes, o que revela o correcto dimensionamento dos canais de arrefecimento do molde (com o óleo ajustado para a temperatura de 120 °C).

Um aspecto também relevante a verificar está nas temperaturas elevadas que atingem o taco do molde devido à sua geometria algo complexa e à grande massa de material que existe nesta zona. A taxa de enchimento da camisa é um factor importante para a forma como o fluxo de alumínio enche o molde e a dimensão do taco está directamente relacionada com este aspecto. No entanto, como se verifica pelos termogramas, este componente atrai a concentração de temperaturas altas, que é um factor de problemas na solidificação e desgaste ao próprio molde.

14.7 - Raio X

Os raios X são emissões electromagnéticas de natureza semelhante à luz visível. O seu comprimento de onda vai desde 0,05 angstrom a centenas de angstroms. O espectro de comprimentos de onda utilizável situa-se aproximadamente entre os 5 picómetros e 1,0 nanómetro. A geração desta energia electromagnética deve-se à transição de electrões nos átomos, ou à desaceleração de partículas carregadas. Como toda a energia electromagnética de natureza ondulatória, os raios X sofrem interferência, polarização, refacção, difracção, reflexão, entre outros efeitos. Embora o seu comprimento de onda seja muito superior, a sua natureza electromagnética é idêntica à da luz.

Detecção

A detecção dos raios X pode ser feita de diversas maneiras; a principal é a impressão por chapas fotográficas, que permitem o uso medicinal e industrial através das radiografias. Outras formas de detecção são através do aquecimento de elementos à base de chumbo, que geram imagens termográficas, através do aquecimento de lâminas de chumbo para medir a intensidade, para além de elementos que possuam gases no interior.

Aplicações

Na área da medicina, os raios X são utilizados para analisar o estado dos órgãos internos, para detectar fracturas ou para determinar o tratamento de tumores, cancro, doenças ósseas, etc.

Na indústria, os raios X são utilizados para analisar fracturas de peças, condições de fundição, detectar a porosidade e outras anomalias de fundição.

14.7.1 - Ciclo de injeção sem fase de compactação para os perfis de velocidade estudados e análise não destrutiva por raio X das provas

A influência do ar aprisionado na porosidade das peças na primeira fase da injeção só pode ser analisada em detalhe se as peças forem enchidas. No ciclo de injeção, existe a terceira fase, descrita anteriormente, em que se exerce uma pressão de compactação ao gito, para minimizar o efeito das porosidades por gás e evitar o efeito de porosidade por contracção. Se completássemos o ciclo, estaríamos a eliminar as porosidades pelo ar aprisionado na primeira fase, cuja análise teria algum interesse. Por este facto, para se observarem de forma mais clara as diferenças, foram feitas provas sem a fase de compactação, normalmente integrada no ciclo de injeção. Os parâmetros de segunda fase não foram alterados e permaneceram constantes em todas as curvas testadas, pelo que não têm influência directa nos resultados obtidos posteriormente.

A análise das provas por raio X foi feita no laboratório de radiologia da Kupper & Schmidt.

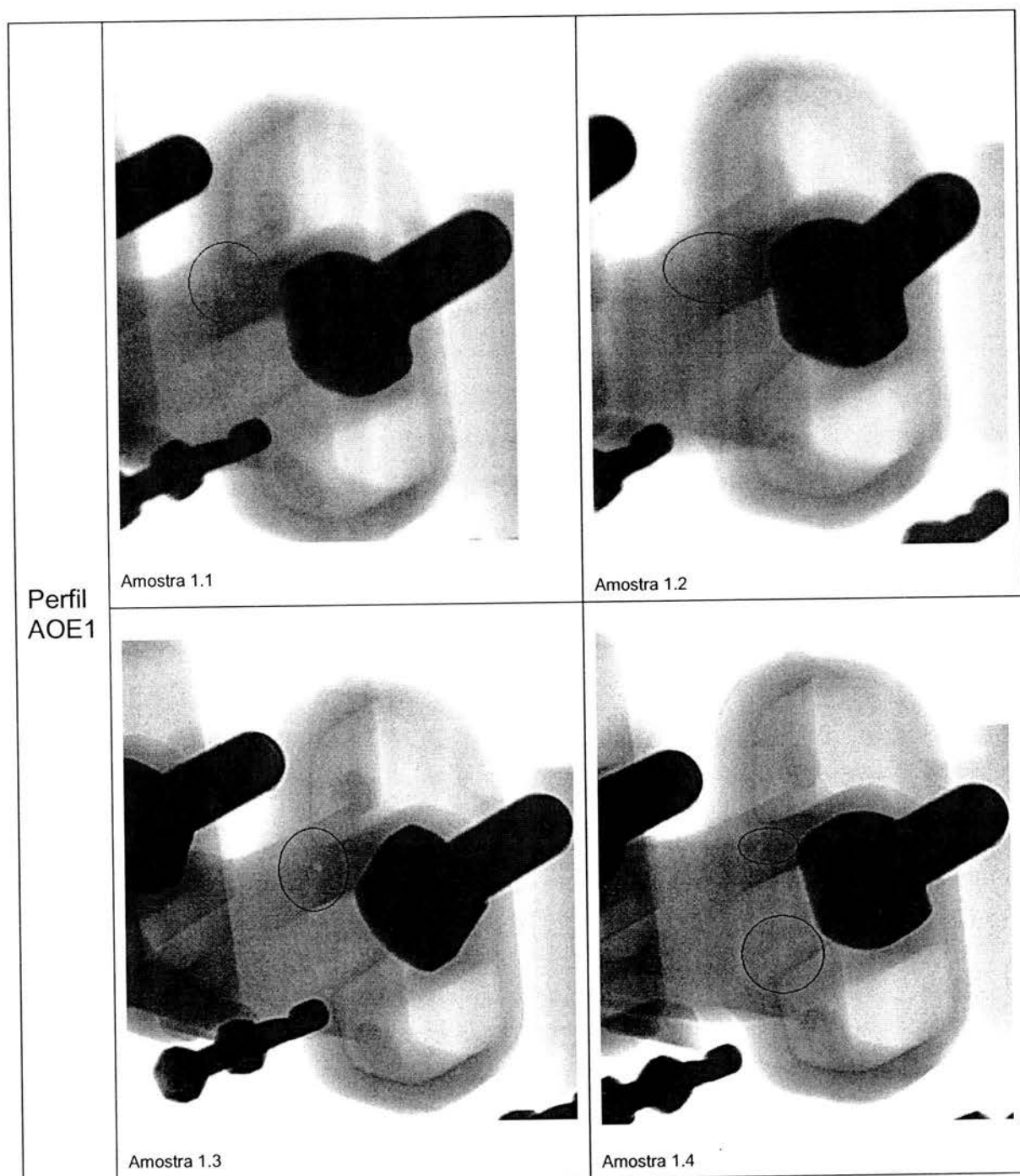


Fig. 14.16 - Quatro amostras tiradas do mesmo gito, que foi injectado sem compactação com o perfil de aceleração otimizada AOE1.

Os resultados para as 4 amostras são diferentes e podemos constatar que as porosidades são localizadas e que não existem grandes áreas de pequenas porosidades.

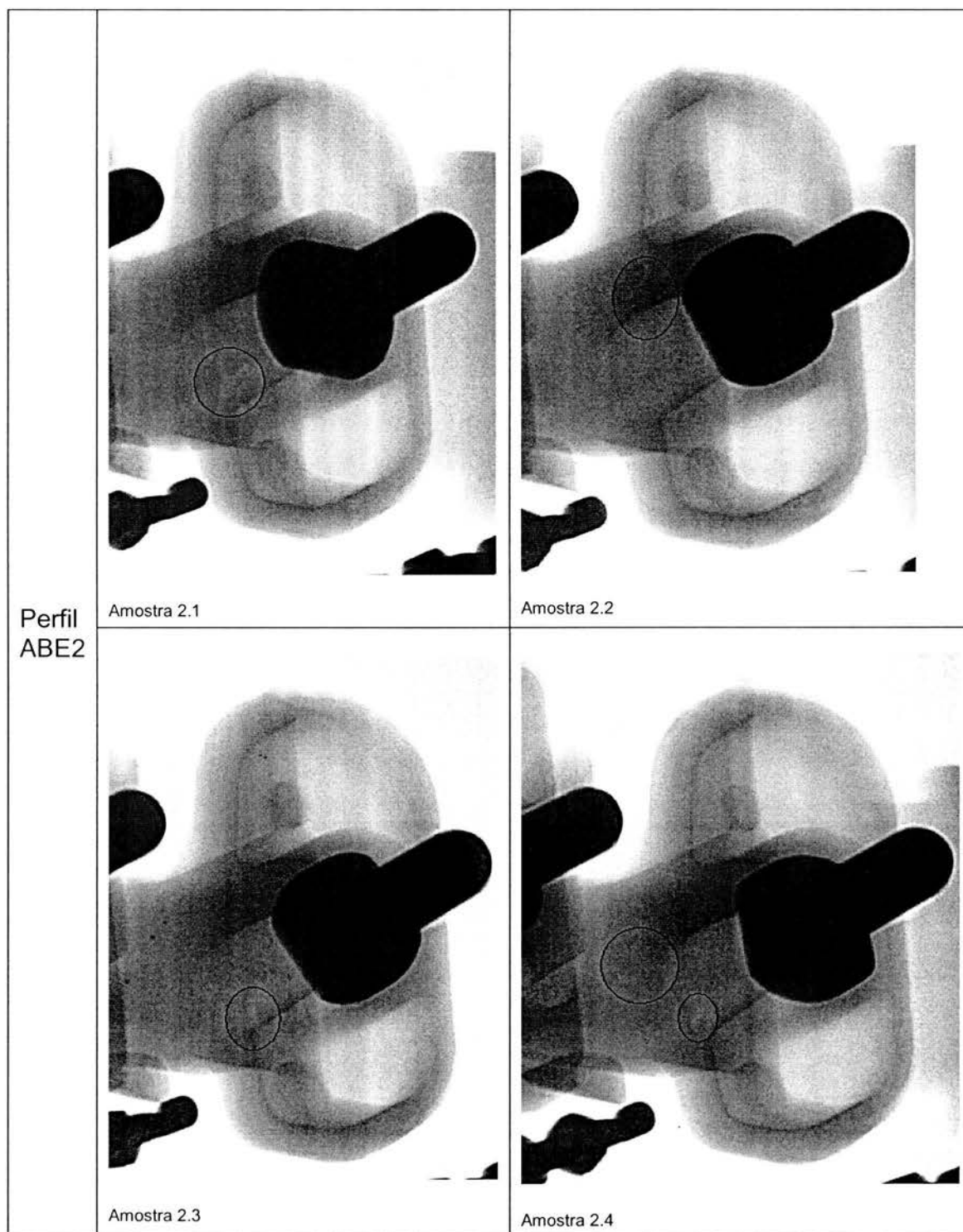


Fig. 14.17 - Quatro amostras tiradas do mesmo gito, que foi injectado sem compactação com o perfil de aceleração da NADCA designado ABE2.

O resultado é idêntico ao caso anterior, no qual as porosidades são localizadas, mas de menor dimensão e mais distribuídas.

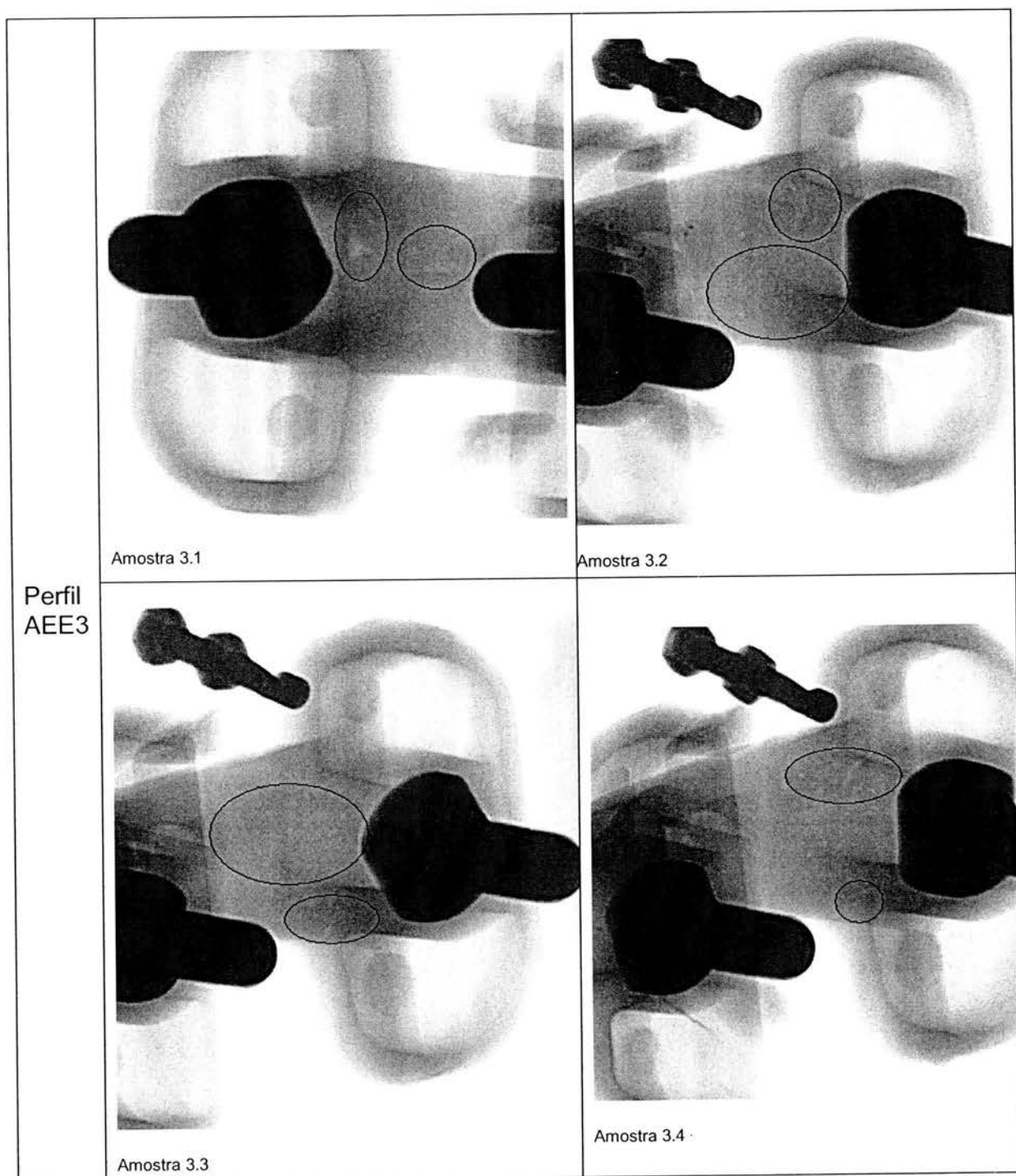


Fig. 14.18 - Quatro amostras tiradas do mesmo gito, que foi injectado sem compactação com o perfil de aceleração exponencial designado AEE3.

As imagens de raio X mostram que existem não só porosidades maiores localizadas, como também áreas onde existem pequenas porosidades, que demonstram que o perfil de velocidades não é eficaz na função de minimização de porosidades.

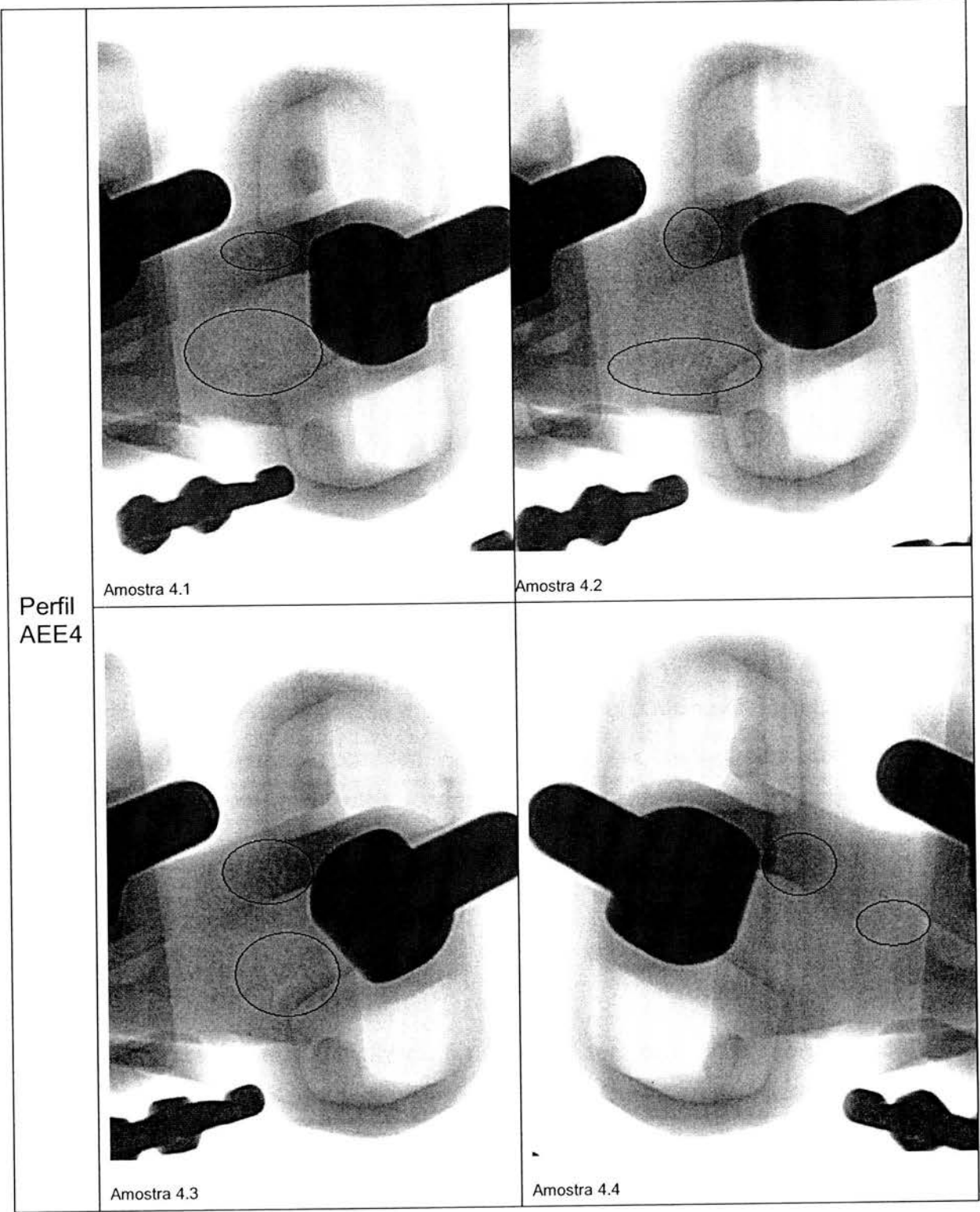


Fig. 14.19 - Quatro amostras tiradas do mesmo gito, que foi injectado sem compactação com o perfil de aceleração exponencial designado AEE4.

Tal como no caso anterior, podemos observar que as porosidades se encontram localizadas e são de maior dimensão. Também se verificam pequenas porosidades dispersas, exemplificativas da inadequação do perfil de velocidades usado.

Os ensaios de raio X vieram comprovar as análises feitas anteriormente nos ensaios destrutivos por corte, que revelavam que os 2 últimos perfis eram os que tinham piores resultados no aprisionamento de ar na camisa de injeção, e consequente porosidade por gás nas peças.

15 - Ferramenta de ajuste dos parâmetros de movimentação do pistão para a primeira fase do ciclo de injeção

Uma das propostas para este trabalho passava pelo desenvolvimento de uma ferramenta informática que facilitasse o ajuste das variáveis que determinam a movimentação do pistão na primeira fase. A plataforma escolhida para o desenvolvimento desta ferramenta de cálculo foi o Microsoft Excel.

Esta ferramenta tem também a obrigação de ser flexível, numa tentativa de se conseguirem resultados otimizados pela experiência prática dos operadores da máquina.

15.1 - Optimização

Um processo está optimizado se decorrer com êxito, quer do ponto de vista técnico, quer do ponto de vista económico. Qualquer optimização deve começar com o registo da situação actual, incluindo todo o ambiente do processo, ao que se deve seguir uma análise e uma reorganização dos dados deste.

- Produtividade: tempo de ciclo, tempo de fecho, tempo de troca, custo/hora da máquina, operações multimáquinas.

- Processo: tempo de vida do molde, custo de manutenção do molde, material operativo e auxiliar, material para fundir novamente.
- Qualidade: rejeições na máquina de fundição injectada, rejeições após maquinagem, *rework*, custo devido à qualidade.

A análise deve ser seguida pela avaliação e decisão das medidas que irão resultar num sucesso mais rápido, tendo em conta que: um projecto de optimização terá mais hipóteses de sucesso se toda a gente envolvida participar; a qualidade não pode ser comprada, tem que ser moldada; há que ter sempre em consideração os critérios-chave do projecto.

15.2 - Optimização da primeira fase da injeção

Para a optimização da fase de alimentação, podem aplicar-se os seguintes métodos:

- 1 - Utilização de dados de produções anteriores e tentar encontrar um ajuste óptimo com eles
- 2 - Aproveitamento dos dados de cálculo da peça e tentar encontrar um ajuste óptimo com eles
- 3 - Ter em conta a nossa experiência pessoal com produções semelhantes e encontrar um ajuste óptimo com a mesma.

A optimização pode ser feita através da prova de enchimento:

- Durante toda a fase de alimentação, o ar deve ser mantido em frente do metal
- Temos de evitar que a onda quebre, já que isto resultaria na inclusão de ar e num desgaste do canal de entrada

Nesta fase de alimentação, prevalecem os seguintes critérios:

- 1 - Inclusões de ar
- 2 - Esfriamento do metal
- 3 - Produtividade

Para obter resultados válidos, é importante que se mantenham estáveis as condições marginais (temperatura do molde, etc.)

Com esta ferramenta de cálculo, pretende-se que o tempo de configuração dos parâmetros operatórios da máquina de injeção seja reduzido aquando a montagem de um novo molde na máquina.

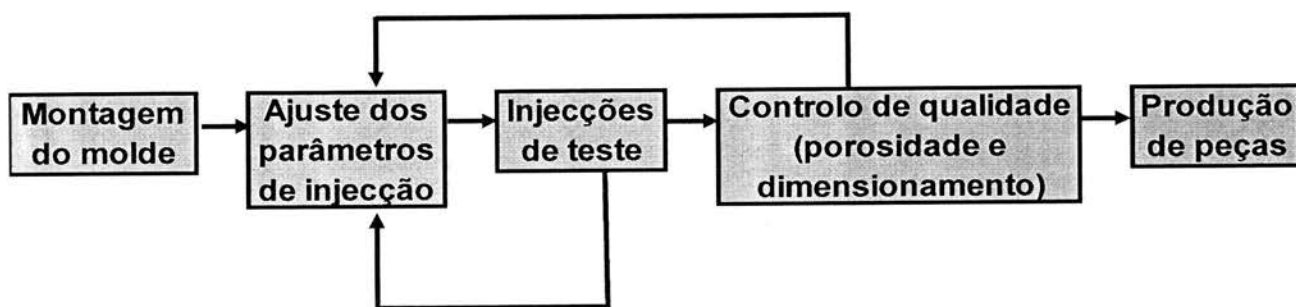


Fig. 15.1 – Ciclo normal de ajuste de parâmetros de injeção

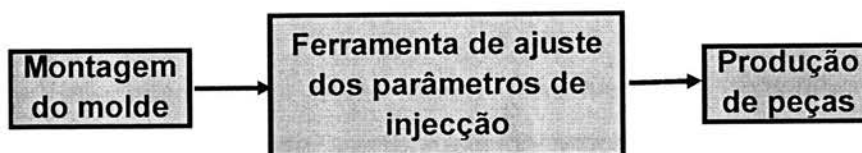


Fig. 15.2 – Ciclo ideal de ajuste de parâmetros de injeção

Com a folha de cálculo, existe a possibilidade de se aceder a um conjunto de informações, entre as quais estão: relações de tempos de enchimento com espessura mínima das peças e uma base de dados de propriedades de vários alumínio usados na Fundição Injectada. Estas informações servem para simplificar a pesquisa de dados, que podem estar disponíveis num só local.

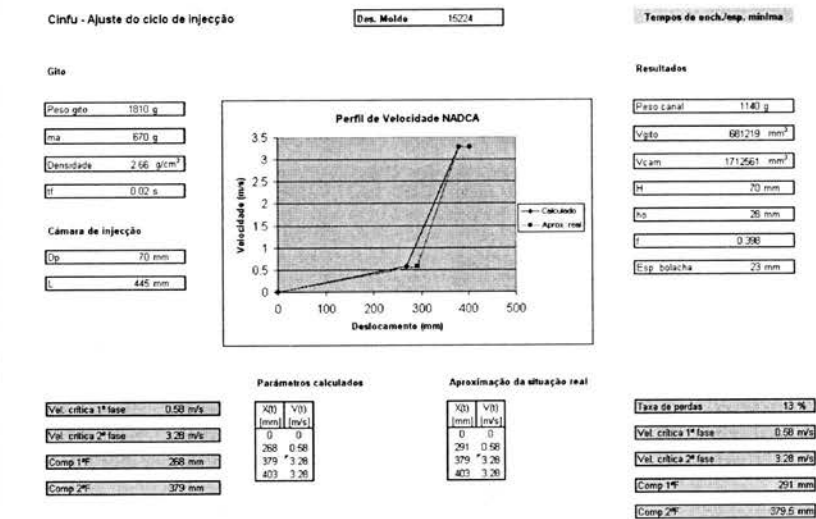


Fig. 15.3 – Ferramenta de cálculo em Excel

Os resultados obtidos são os perfis de movimento do pistão de todo o ciclo de injeção, usando as leis de aceleração na primeira fase estudadas anteriormente. Os resultados obtidos com estas leis serão melhorados com o auxílio desta ferramenta, que irá funcionar de forma evolutiva com a experiência de futuras injeções. Uma parte desta ferramenta de cálculo fará uma aproximação às condições de ajuste reais do processo, com a introdução de factores que, à partida, não estão previstos nas leis de aceleração. Um exemplo real do que não se prevê nestas leis tem a ver com as perdas de metal antes da injeção. A flexibilidade desta ferramenta permitirá acoplar todos os factores não previstos de forma a minimizar os erros de ajuste dos parâmetros do processo. Obviamente que, com esta ferramenta, ainda não será possível atingir o ciclo ideal de ajuste dos parâmetros de processo (fig. 15.2), mas a investigação foi feita com esse objectivo.

Conclusão

O projecto iniciado em Março tinha como proposta principal a optimização do processo de Fundição Injectada, com especial ênfase na análise do comportamento do metal no interior da camisa de injeção durante a primeira fase do ciclo de injeção.

A análise do fluxo de alumínio no interior da camisa de injeção foi feita recorrendo a simulações feitas em Flow 3D e a testes de enchimento numa máquina de Fundição Injectada. Foram apresentados perfis de aceleração do pistão, assim como os resultados obtidos segundo três leis de movimentação.

O aspecto do aprisionamento de ar foi analisado com maior detalhe, por se tratar de um aspecto importante na optimização da primeira fase do processo.

Na minha perspectiva, e pela experiência que adquiri enquanto utilizador de um programa de simulação, a simulação deve ser uma ferramenta de acompanhamento do projecto de um molde. Quando falamos na optimização da primeira fase através da minimização do aprisionamento de ar, falamos em intervalos de tempo muito curtos para obtenção de resultados. Neste aspecto, o desenvolvimento informático, a nível tecnológico e do próprio programa, ainda não permite a obtenção dos resultados mais precisos e num tempo aceitável.

Nos dias de hoje, os métodos de análise preventivos, como a análise por corte, a análise por raio X e o recurso a ferramentas de cálculo, são sem dúvida os mais eficazes. Contudo, o avanço tecnológico e a investigação permitirão que, num futuro próximo, se utilize o processo de simulação como ferramenta de optimização do ajuste de parâmetros de injeção no processo de Fundição Injectada.

POCI - Programa Operacional Ciência e Inovação

O projecto de fim de curso realizado no âmbito do curso de Licenciatura em Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, contou, durante o tempo de realização do estágio, com o apoio do Programa Operacional Ciência e Inovação – POCI2010

Financiamento FCT/POCI



O programa de estágios no ensino superior visa fomentar a interacção das instituições de ensino superior com as instituições empregadoras dos diversos sectores de actividade, de modo a possibilitar uma maior articulação entre os perfis profissionais dos alunos e as exigências do mercado de trabalho.

Agradecimentos

Concluído o projecto, resta-me agradecer às pessoas que estiveram, directa ou indirectamente, ligadas a este trabalho.

Um sincero agradecimento aos meus orientadores, Eng.º Luís Villas-Boas, supervisor da FEUP, e Eng.º Paulo Rocha, orientador do CINFU, por me disponibilizarem todos os meios e a ajuda possíveis para a elaboração deste projecto.

Queria agradecer também a todas as pessoas que estiveram em contacto comigo no CINFU, pelo acolhimento que contribuiu para uma rápida integração no ambiente de trabalho, Eng.º Paulo Aguiar, Sr. José Filipe, do CINFU, e Eng.º Nuno Andrade, da Kupper & Schmidt, pelo auxílio dado neste projecto.

Nomenclatura:

A	= área ocupada pelo ar quando o metal líquido atinge o canal de alimentação da cavidade
A_k	= área do canal de alimentação
c	= velocidade relacionada com fluido numa onda de baixa amplitude h
c_0	= velocidade relacionada com fluido numa onda de baixa amplitude h_0
C_B	= largura máxima do canal de alimentação para secção A_k
C_T	= altura máxima do canal de alimentação para secção A_k
f	= taxa inicial de enchimento da camisa de injeção
g	= aceleração gravitacional
H	= altura da camisa de injeção
h_0	= altura inicial do fluido na camisa de injeção
L_1	= comprimento de primeira fase
L_2	= comprimento de segunda fase
L	= comprimento activo da camisa de injeção
m_A	= peso depois da secção de ataque
P_{gito}	= peso do gito
S_A	= secção de ataque
$S_{pistão}$	= secção do pistão
t_f	= tempo de enchimento da câmara de injeção
t_H	= tempo que o metal demora a atingir o topo da camisa
u_H	= velocidade do pistão quando o metal atinge o topo da camisa
V_{c1}	= velocidade crítica de primeira fase
V_{c2}	= velocidade crítica de segunda fase
V_{MA}	= velocidade do metal na secção de ataque
V_{Cam}	= volume da camisa de injeção
V_{metal}	= volume do gito
α, β	= parâmetros da lei de aceleração exponencial Eq. (8)
ϕ_p	= diâmetro do pistão
ρ_{Al}	= densidade do alumínio
ξ	= parâmetro adimensional Eq. (10)

Bibliografia

KAUFMAN, J. Gilbert, ROOY, Elwin L., *Aluminium Alloy Castings, Properties, Processes and Applications*, Ed. ASM International, 2004.

YU, Kuang-O, *Modelling for casting and solidification processing*, Ed. Marcel Dekker, 2002.

Casting, ASM Handbook, Vol. 15, Ed. ASM, 1988.

LÓPEZ, J., HERNÁNDEZ, J., FAURA, F., TRAPAGA, G., "Shot Sleeve Wave Dynamics in the Slow Phase of Die Casting Injection" in *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 122(2), pp. 349-356, ASME, 2000.

HERNÁNDEZ, J., LÓPEZ, J., FAURA, F., GÓMEZ, P., "Analysis of the Flow in a High-Pressure Die Casting Injection Chamber" in *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 125(2), pp. 314-324, ASME, 2003.

Manual de optimização do processo de Fundição Injectada, Bühler.

Die Casting Defects Textbook, NADCA.



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000105270