

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

DEMEGI

Projecto de Fim de Curso

Aplicabilidade da tecnologia de *squeeze pin*

Orientador: Eng^o Luís Villas Boas
Supervisor: Eng^o Luís Cruz
Aluno: Tiago António Costa Martinho

621(047.3)
LEM 2004/MARt



Porto, 25 de Julho de 2005



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Social Europeu



Ministério da Educação

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

DEMEGI

Projecto de Fim de Curso

Aplicabilidade da tecnologia de *squeeze pin*

Orientador: Eng^o Luís Villas Boas

Supervisor: Eng^o Luís Cruz

Aluno: Tiago António Costa Martinho



Porto, 25 de Julho de 2005



621 (047.3) / LEM 2004 / PAR *

Universidade do Porto Faculdade de Engenharia Biblioteca	
Nº	30020
CDU	
Data	22 05 2007

Resumo

Este projecto tem como objectivo implementar melhorias no processo de injeção de um componente de fundição.

Para concretizar este objectivo foi necessário observar o processo actual de produção do componente de fundição e determinar opções de melhoria do processo. Nesse sentido, optou-se por aplicar a tecnologia dos *squeeze pins* para eliminar a porosidade provocada por contracção (*shrinkage*) originada numa zona da peça de maior massividade de alumínio. A existência de porosidades provocada por contracção na zona em que foi aplicado o *squeeze pin* foi comprovada recorrendo a uma simulação de enchimento efectuada pelo software MagmaSoft. Um *squeeze pin* é um perno de compactação (que neste caso concreto é actuado pelo sistema hidráulico da máquina de injeção) destinado a aplicar uma pressão localizada, antes e durante a solidificação do metal, na zona da peça onde os defeitos de *shrinkage* são mais comuns. Essa pressão tem o objectivo de contrariar a contracção natural do metal e homogeneizar a estrutura do metal.

A introdução desta tecnologia foi feita numa peça de fundição que tem como objectivo servir de suporte ao filtro de óleo do motor de um carro. O *squeeze pin* visa minimizar o problema de fuga interna que por vezes ocorre, entre dois dos canais da peça, diminuindo assim a sua percentagem de refugo.

Conclui-se que a implementação da tecnologia referida teve um efeito significativo na redução dos defeitos que se propunha eliminar, redução essa que foi de mais de 50%.

Índice

Resumo.....	2
Índice.....	3
Lista de Figuras.....	5
Lista de Tabelas.....	7
1. Apresentação da Empresa.....	8
1.1 Historial da empresa.....	9
1.2 Objectivos da empresa.....	9
1.3 Descrição da empresa.....	10
1.3.1. Orgânica.....	10
1.3.2. Processo de fabrico.....	11
1.3.3. Tipos de matérias primas utilizadas.....	12
1.3.4. Linhas de produto.....	12
2. Projecto.....	14
2.1 Designação do projecto de fim de curso.....	14
2.2 Objectivos.....	14
2.3 Descrição.....	14
3. Fundição injectada.....	15
3.1 Vantagens.....	16
3.2 Processo de injeção.....	17
3.3 Molde de Fundição Injectada.....	18
3.3.1. Descrição dos constituintes de um molde.....	18
3.3.2. Tipos de moldes.....	20
3.3.3. Constituição.....	21
3.3.4. Constituição de um Gito.....	21
3.4 Instrumentação das máquinas de injeção.....	22
4. Ligas de fundição injectada.....	24
4.1 Características do produto em função do tipo de liga.....	26
4.2 Ligas utilizadas na SONAFI.....	28
4.3 Influência dos elementos de liga das ligas de alumínio.....	30
4.3.1. Cobre.....	30
4.3.2. Silício.....	30
4.3.3. Magnésio.....	30
4.4 Factores que influenciam os mecanismos de solidificação.....	31
5. Porosidade provocada por contracção: <i>shrinkage</i>	33
5.1 Aparecimento de porosidade provocada por contracção.....	34
5.2 Modificação da porosidade provocada por contracção através da alteração da temperatura do molde.....	35
5.3 Pressão do metal.....	36
5.4 Controlo da porosidade.....	37

6.	A peça em estudo	38
6.1	Ciclo da peça dentro da empresa.....	39
6.2	Liga utilizada no fabrico da peça	39
6.3	Características da máquina de injectar	40
6.4	Histórico das alterações feitas na peça.....	41
7.	Sistema de compactação externa - <i>Squeeze Pin</i>	43
7.1	Aspectos a ter em conta durante o projecto de um <i>squeeze pin</i>	44
7.1.1.	Relação entre o atraso do tempo de entrada e a profundidade de penetração.....	45
7.2	Constituição de uma unidade de <i>squeeze pin</i>	46
7.3	Programação da unidade de <i>squeeze pin</i>	46
7.3.1.	Ponto de início (S:SqStart).....	47
7.3.2.	Monitorização do curso do <i>squeeze pin</i> (S:Sq ctr).....	48
7.3.3.	Reacção da máquina ao sistema de monitorização do curso (S:Sq stop).....	48
7.4	Método alternativo de controlo do <i>squeeze pin</i>	48
8.	Anteprojecto do <i>squeeze pin</i>	51
8.1	Determinação do diâmetro e do curso do <i>squeeze pin</i>	53
8.2	Escolha do cilindro hidráulico.....	53
8.3	Determinação da força necessária para recuar o <i>squeeze pin</i>	54
8.4	Escolha do detector de fim-de-curso	55
8.5	Características e tratamentos térmicos do aço do <i>squeeze pin</i>	56
8.5.1.	Aplicações	58
8.5.2.	Tratamento de endurecimento superficial a efectuar no <i>squeeze pin</i> e no casquilho.....	58
8.5.2.1	Nitruração.....	58
8.5.2.2	PVD – Physical Vapour Deposition.....	59
8.6	Desenho esquemático do <i>squeeze pin</i>	59
8.6.1.	Imagem em 3D das alterações na estrutura do molde	62
	Figura 39 - Imagem em 3D das alterações na estrutura do molde.	62
8.7	Alteração dos canais de água e de óleo	63
9.	Simulação de enchimento.....	65
9.1	Requisitos necessários para se efectuar a simulação de enchimento	66
9.2	Parâmetros necessários para efectuar a simulação	66
9.3	Análise da simulação de enchimento efectuada através do <i>software</i> MagmasoftR.....	67
9.3.1.	Distribuição de temperatura durante o enchimento.....	68
9.3.2.	Velocidade do metal durante o enchimento do gito	70
9.3.3.	Solidificação	70
9.3.4.	Pressão do ar no interior do molde.....	74
9.4	Conclusão da análise em Magmasoft	74
10.	Ensaio do <i>squeeze pin</i>	76
11.	Análise metalográfica.....	80
11.1	Exame Macroscópico	83
11.2	Exame Microscópico.....	83
12.	Análise do impacto da aplicação do <i>squeeze pin</i>	86
12.1	Análise económica	88
13.	Conclusão	90
	Apêndice A - Simulação de enchimento em Flow3D ^R	92

Lista de Figuras

Figura 1 – Mapa ilustrativo da localização da Sonafi.	8
Figura 2 - Organigrama da empresa.	10
Figura 3 - Fluxograma de fabrico e controlo.	11
Figura 4 – Distribuição dos modos de falha na operação de rever e embalar.	15
Figura 5 – Máquina de injeção.	15
Figura 6 – Célula de injeção.	15
Figura 7 – Etapas do processo de injeção, utilizando a tecnologia de vácuo.	16
Figura 8 - Esquema do processo de injeção num molde com três cavidades.	17
Figura 9 - Curvas típicas do deslocamento e velocidade do pistão, assim como da pressão a ele aplicada durante uma injeção.	18
Figura 10 – Representação esquemática de um meio molde, constituído por seis cavidades, e seus canais de alimentação.	18
Figura 11 – Pormenor do molde.	19
Figura 12 - Exemplos de peças fabricadas por esta tecnologia.	20
Figura 13 - Curvas típicas de injeção na fase de enchimento com indicação de alguns dos parâmetros de injeção. A - velocidade na fase 2, B - duração do enchimento, C - atraso do multiplicador, D - deslocamento no fim da fase 3.	23
Figura 14 - Poro causado por contracção numa liga Al-Si2.	33
Figura 15 - Raio-X da zona da peça de fundição antes da aplicação do <i>squeeze pin</i>	35
Figura 16 – Corpo de filtro TU5.	38
Figura 17 – Diagrama P/Q ² característico da máquina.	40
Figura 18 – Corte da peça onde são visíveis os problemas de shrinkage.	41
Figura 19 – Pormenor da peça onde se aplicou a tecnologia.	42
Figura 20 – Ilustração da variação da distância e pressão com o tempo.	43
Figura 21- Relação entre o tempo de entrada, profundidade de penetração e qualidade do efeito obtido.	46
Figura 22 - Ilustração da página da unidade de comando.	47
Figura 23 - Máquina de fundição injectada com implementação de um sistema de controlo alternativo.	49
Figura 24 - Imagem pormenorizada do sensor de deslocamento.	50
Figura 25 – Peça e localização da actuação do <i>squeeze pin</i>	51
Figura 26 – Corte da peça onde evidencia a zona problemática, antes e após a maquinagem.	51
Figura 27 – Esquema representativo de um poro e dimensões características.	52
Figura 28 - Alteração à peça original.	52
Figura 30 – Imagem 3D do cilindro hidráulico.	54
Figura 31 – Gráfico ilustrativo da variação da força de recuo do cilindro extractor em função do diâmetro do furo.	55
Figura 32 – Detector XCM D2 10L1.	56
Figura 33 - Efeito do tempo e da temperatura na dureza.	58
Figura 34 - Variação das propriedades mecânicas com a temperatura.	58
Figura 35 – Ampliação de uma imagem do revestimento em PVD.	59
Figura 36 – Desenho esquemático da unidade de <i>squeeze pin</i> (vista “T”).	60
Figura 37 - Desenho esquemático da unidade de <i>squeeze pin</i> (vista “K”).	61
Figura 38 - Desenho esquemático da unidade de <i>squeeze pin</i>	62
Figura 39 - Imagem em 3D das alterações na estrutura do molde.	62

Figura 40 - Canais de óleo e de água existentes.....	63
Figura 41 - Alterações nos circuitos de água e de óleo.	64
Figura 42 – Imagem 3D do canal da alimentação e da peça (pré-processamento para a simulação de enchimento em Flow3D ^R)	66
Figura 43 - Distribuição de temperaturas 0,641s após o início do enchimento do molde.	68
Figura 44 - Distribuição de temperaturas 0,656s após o início do enchimento do molde.	69
Figura 45 - Distribuição de temperaturas 0,67s após o início do enchimento do molde.....	69
Figura 46 - Distribuição de temperaturas no interior de uma das peças ao longo do período de enchimento.	70
Figura 47 - Gradiente de velocidades que se estabelece nas zonas do gito durante o enchimento.	70
Figura 48 - Distribuição de temperaturas a 5,79% de solidificação.....	71
Figura 49 - Distribuição de temperaturas a 26% de solidificação.....	71
Figura 50 - Distribuição de temperaturas com solidificação total do ataque.	72
Figura 51 - Distribuição de temperaturas 16s após o início do enchimento do gito.	72
Figura 52 - Gradiente do tempo de solidificação.	73
Figura 53 – Pormenor da peça onde se evidencia a existência de fenómenos de <i>shrinkage</i>	73
Figura 54 – Monitorização da pressão na peça.	74
Figura 55 - Ilustração da página da unidade de comando.	77
Figura 56 – Corte das peças onde se evidencia a presença de poros causados por contracção do metal (atraso no tempo de entrada 3s).	77
Figura 57 – Pormenor da peça que não sofreu acção do <i>squeeze pin</i>	78
Figura 58 - Pormenor da peça que sofreu acção do <i>squeeze pin</i> (atraso no tempo de entrada 8s).	78
Figura 59 – Pormenor do <i>squeeze pin</i>	79
Figura 60 - Pormenor da peça que sofreu acção do <i>squeeze pin</i> (utilizando um perno mais curto).	79
Figura 61 – Amostras da peça com e sem actuação de <i>squeeze pin</i> (da esquerda para a direita).	81
Figura 62 – Ampliações (5x) das zonas das peças assinaladas na Figura 61 com os números 6 e 10.	83
Figura 63 - Ampliações (50x) das zonas das peças assinaladas na Figura 61 com os números 4 e 10.	84
Figura 64 - Ampliações (50x) das zonas das peças assinaladas na Figura 61 com os números (3) e (9).	84
Figura 65 - Ampliações (50x) das zonas das peças assinaladas na Figura 61 com os números (2) e (7).	85
Figura 66 – Ampliação (30x) da zona de actuação do <i>squeeze pin</i> , assinalada na Figura 62 com o número (5).	85
Figura 67 – Percentagem do refugo acumulado no 1º semestre do ano.....	86
Figura 68 – Diagrama de Pareto dos modos de falha.....	86
Figura 69 – Diagrama de Pareto dos modos de falha (cavidade com <i>squeeze pin</i>).	87
Figura 70 - Percentagem do refugo (cavidade em que foi aplicado o <i>squeeze pin</i>).	87
Figura 71 - Sequência de imagens da simulação de enchimento obtidas, em Flow3D ^R	92

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Ligas e respectivas normas utilizadas na Sonafi.	12
Tabela 2- Destino da produção (dados referentes a 2003).	12
Tabela 3 – Principais clientes e respectivas áreas de mercado.....	13
Tabela 4 – Parâmetros de processo.	22
Tabela 5 – Parâmetros de injeção.	24
Tabela 6 - Tipos e qualidade do acabamento das diversas ligas de fundição injectada.	26
Tabela 7 - Características da liga e custos do processo em função do tipo de liga.	26
Tabela 8 - Tipo de máquina, número de injeções por hora e pressão de injeção em função tipo de liga utilizado.	27
Tabela 9 - Pesos e dimensões limites das peças em função da liga.	27
Tabela 10 - Tempo de vida do molde e temperatura de trabalho em função da liga utilizada.	28
Tabela 11 – Ligas de alumínio utilizadas na Sonafi.....	28
Tabela 12 - Propriedades mecânicas e físicas das ligas utilizadas na Sonafi.....	29
Tabela 13 - Comparação das características das ligas usadas.	29
Tabela 14 - Classificação da liga segundo diferentes normas.....	39
Tabela 15 – Constituição da liga, em termos percentuais de acordo com a norma NF EN 1706.	40
Tabela 16 – Características da máquina de injeção.....	40
Tabela 17 - Modificações introduzidas na peça.	42
Tabela 18 – Características do cilindro hidráulico.....	54
Tabela 19 – Características do detector.....	56
Tabela 20 – Designação do aço segundo as normas DIN e AISI.....	56
Tabela 21 - Composição química do aço (valores médios em %).	56
Tabela 22 - Propriedades físicas do aço.	57
Tabela 23 - Propriedades mecânicas do aço, à temperatura ambiente.	57
Tabela 24 – Características do revestimento.....	59
Tabela 25 – Parâmetros necessários para a realização da simulação em Magmasoft ^R	67
Tabela 26 – Parâmetros de injeção utilizados durante o ensaio do <i>squeeze pin</i>	76

1. Apresentação da Empresa

A empresa envolvida no presente projecto foi a “Sonafi, S.A.”, cuja área de trabalho compreende a fundição injectada de ligas de alumínio.

Localizada em S. Mamede de Infesta (concelho de Matosinhos), fundada em 1951, actualmente com 53 anos de existência, pode ser descrita como uma das primeiras empresas em Portugal a dedicar-se à fundição injectada, daí que o seu historial e prestígio sejam reconhecidos por todos aqueles que se encontram inseridos no sector.

De certa forma pode dizer-se que a sua localização é estratégica relativamente às vias de comunicação, facilitando o transporte de matérias-primas, assim como o envio dos produtos que fabrica, quer para o estrangeiro quer ao nível do território nacional. A Sonafi está localizada a uma distância de cerca de 5 km do Aeroporto Francisco Sá Carneiro, a cerca de 3 km da cidade do Porto e a aproximadamente 8 km do porto de mar de Leixões. Encontra-se também muito perto dos acessos às auto-estradas A1 (Porto / Lisboa), A3 (Porto / Braga) e A4 (Porto / Vila Real) (Figura 1).

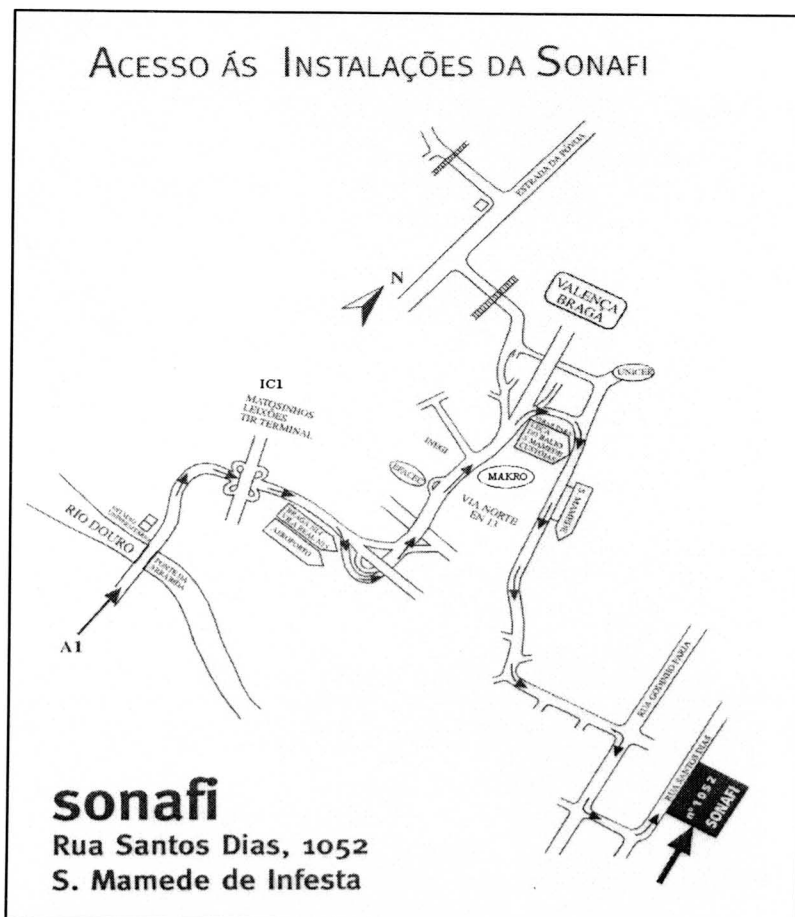


Figura 1 – Mapa ilustrativo da localização da Sonafi.

1.1 Historial da empresa

Fundada em 1951, pela *Société Générale de Belgique*, a Sonafi foi a primeira fábrica de fundição injectada no país, especializando-se na produção de ferragens para a construção civil e mobiliário, tendo, em 1977, acrescentado a esta actividade o fabrico de fechaduras.

Em 1981, aproveitando a entrada da Renault em Portugal e prevendo a adesão do país ao Mercado Comum Europeu, a Sonafi define como prioridade estratégica o mercado automóvel, continuando, no entanto, a operar com uma divisão de ferragens em simultâneo.

Em Janeiro de 1989, deu-se a ruptura definitiva com o mercado das ferragens com a venda da actividade e equipamentos dedicados à produção das mesmas.

Produzindo quase em exclusivo para a indústria automóvel, a Sonafi foi adquirida em Dezembro de 2001, pelo grupo internacional EurALcom, juntando-se a um número considerável de empresas de renome internacional na área da produção de peças técnicas, mecanizações e montagens.

1.2 Objectivos da empresa

A Sonafi é uma empresa especializada de fundição e mecanização de peças técnicas de pequena e média dimensões em alumínio. A qualidade no serviço e o cumprimento dos prazos de entrega são a preocupação principal da Sonafi.

A empresa aposta na qualidade e fiabilidade no processo de produção como resposta às exigências do mercado. A permanente preocupação na melhoria contínua como antecipação à mudança representa para a Sonafi a garantia da sua sobrevivência. Dentro deste objectivo privilegia-se o sector automóvel e do gás como seus principais clientes.

O posicionamento geográfico diverso e a necessidade de resposta rápida ao cliente levam a *Sonafi* a encarar a internacionalização dos seus pólos produtivos como um objectivo a curto prazo.

1.3 Descrição da empresa

1.3.1. Orgânica

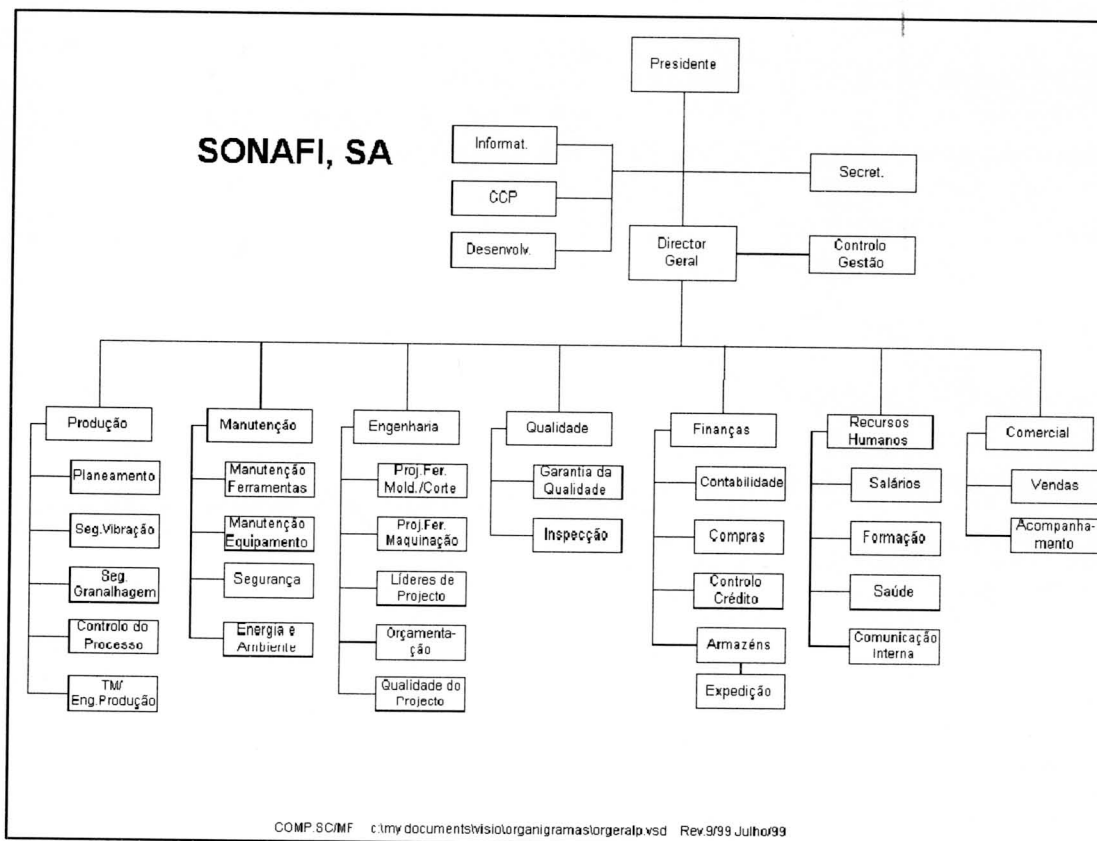


Figura 2 - Organigrama da empresa.

A Sonafi está organizada em departamentos e estes, por sua vez, em secções. Cada departamento tem um responsável ao qual estão subordinados os diferentes chefes de secção. Ao Conselho de Administração é atribuída a função de estabelecer os objectivos de organização da empresa e controlar a acção executiva da Direcção-Geral. A Direcção-Geral implementa os objectivos definidos pelo Conselho de Administração, estabelecendo uma estratégia de actuação para os diferentes departamentos. O Director de Departamento assegura, na área da sua responsabilidade, a implementação da estratégia definida pela Direcção-Geral. Os Encarregados e Chefes de Secção são responsáveis pela coordenação dos meios produtivos e outros que lhe estão afectos sempre prevendo o cumprimento das estratégias do departamento (Figura 2).

1.3.2. Processo de fabrico

O processo de fabrico encontra-se descrito na Figura 3:

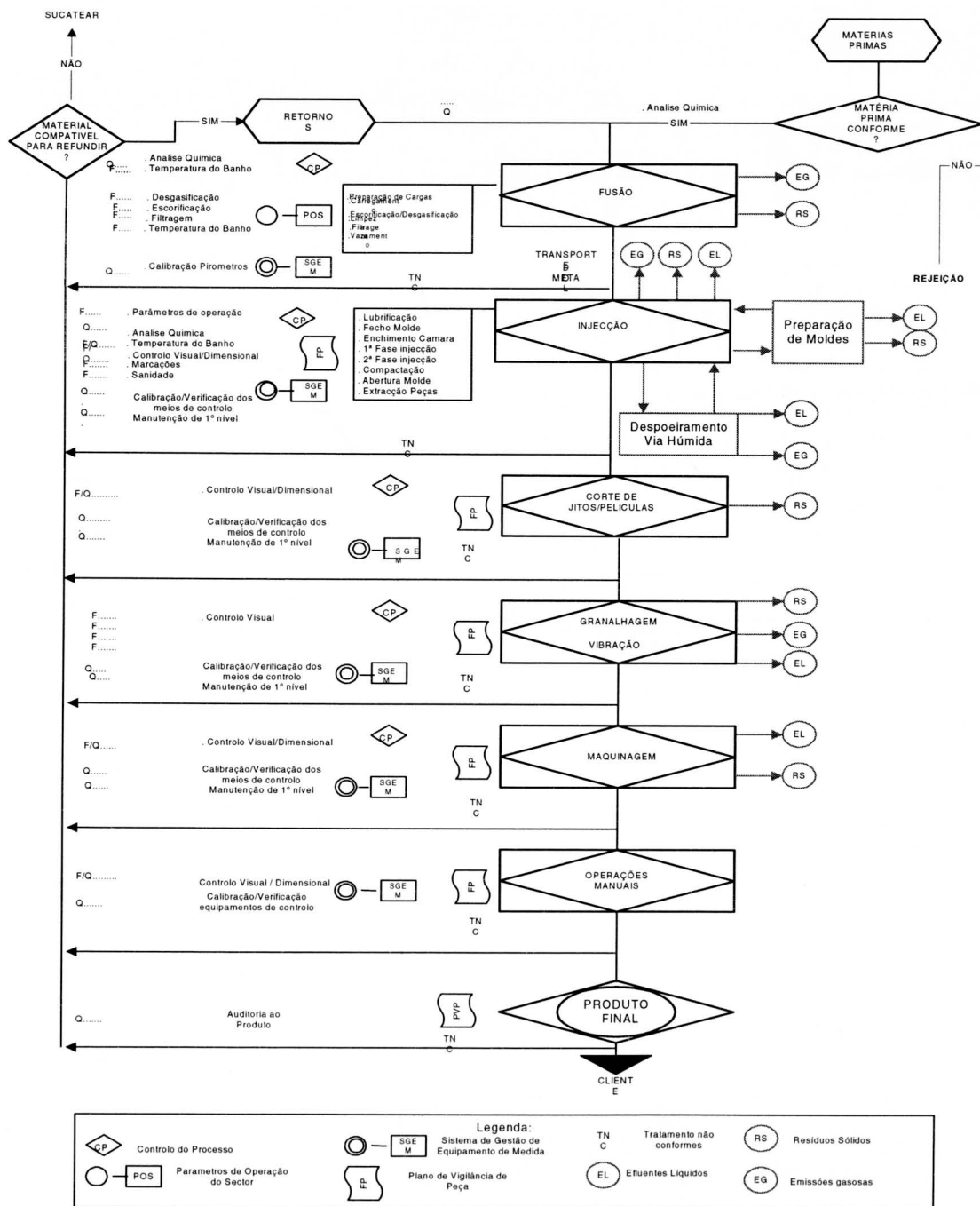


Figura 3 - Fluxograma de fabrico e controlo.

1.3.3. Tipos de matérias primas utilizadas

Actualmente, fabricam-se na Sonafi peças em Ligas de Alumínio para fundição injectada, cuja designação e respectiva norma se encontram descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Ligas e respectivas normas utilizadas na Sonafi.

Liga	Norma
AlSi9Cu3 (Fe)	NF EN 1706
AlSi10Mg	DIN 1725 – BLATT 2
AlSi12Cu1 (Fe)	DIN - 1706

1.3.4. Linhas de produto

Como foi referido atrás, a produção visa principalmente o ramo automóvel, de acordo com o ilustrado na **Error! Reference source not found.**:

Tabela 2- Destino da produção (dados referentes a 2003).

Ramo automóvel	≅ 94.2%
Aparelhos domésticos	≅ 5.3%
Outros	≅ 0.5%

Mais concretamente, os clientes da empresa são os apresentados na Tabela 3**Error! Reference source not found.**:

Tabela 3 – Principais clientes e respectivas áreas de mercado.

Mercado	Cliente	Linha de Produto
	Vulcano/Bosch	Gás/Aquecimento
Portugal	Renault Ford/Visteon Jac Products Delphi	
Espanha	Renault/Fasa	
Alemanha	Lear GM Daimler Chrysler Volkswagem	
Inglaterra	Delphi	Automóvel
França	Renault Filtrauto/Sogefi Delphi	
Brasil	GM Renault	
Áustria	GM	
Itália	Filtrauto/Sogefi	
Bélgica	GM	

2. Projecto

2.1 Designação do projecto de fim de curso

Aplicabilidade da tecnologia dos *squeeze pins*.

2.2 Objectivos

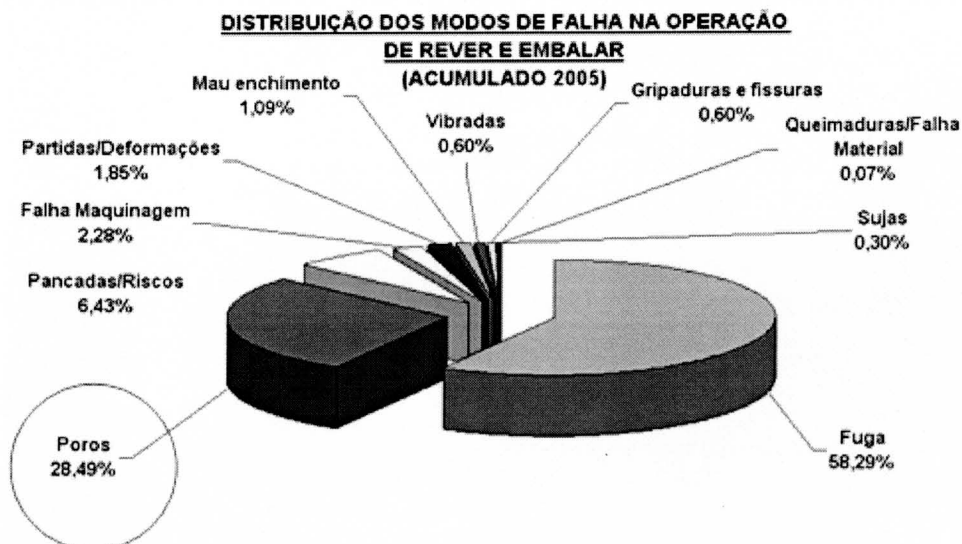
Estudo e aplicação da tecnologia de *squeeze pin* na resolução de defeitos de macroporos/rechupes.

Análise do modelo 3D da peça e selecção das áreas de actuação do *squeeze pin*.

2.3 Descrição

O objectivo deste projecto é implementar melhorias no processo de injeção de um componente de fundição. Para concretizar este objectivo foi necessário observar o processo actual de produção do componente de fundição e determinar opções de melhoria do processo. Nesse sentido, optou-se por aplicar a tecnologia dos *squeeze pins* para eliminar a porosidade provocada por contracção originada numa zona da peça de maior massividade de alumínio. Mais à frente, ao analisar a peça, verificar-se-á em pormenor a zona em que os problemas de *shrinkage* se manifestam.

A introdução desta tecnologia visa minimizar o problema de fuga interna que por vezes ocorre, diminuindo assim a percentagem de refugo da peça. A percentagem de defeitos de fundição causada por poros de contracção está ilustrada na Figura 4.



3.

Figura 4 – Distribuição dos modos de falha na operação de rever e embalar.

4. Fundição injectada

Entende-se fundição injectada como um processo mecânico de fundição em que o metal fundido é comprimido dentro de um molde metálico e permanente. A fundição injectada possibilita o fabrico em série de peças com dimensões exactas e uniformes de metais não ferrosos, em particular ligas de alumínio, zinco e magnésio, assim como ligas de cobre, estanho e chumbo.

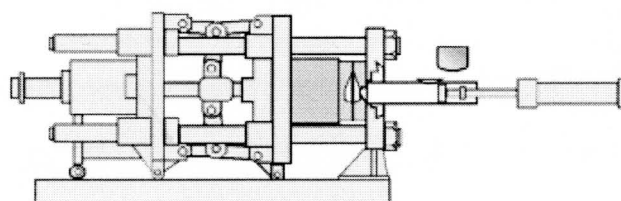


Figura 5 – Máquina de injeção.

Existem dois tipos de máquinas de injeção: as máquinas de câmara quente e as máquinas de câmara fria.

Nas máquinas de câmara quente a câmara de injeção e o pistão estão no sifão submersos no material em fusão, isto é, estão permanentemente sujeitos a temperaturas elevadas; por isso só se utilizam estas máquinas para a injeção de metais com baixo ponto de fusão.

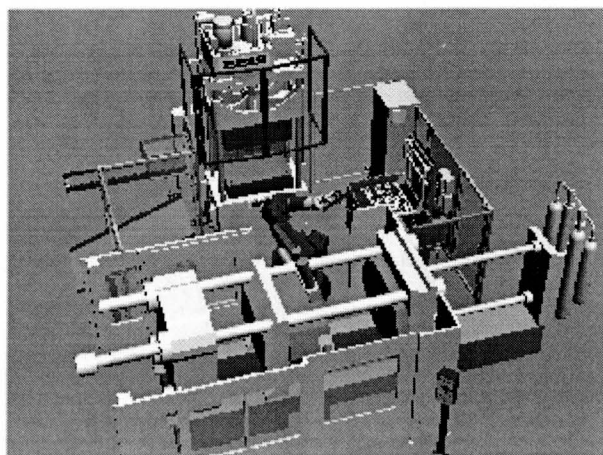


Figura 6 – Célula de injeção.

Nas máquinas de câmara fria o forno com o metal em fusão está separado da máquina de injeção. Antes de cada injeção, o metal é vazado para a câmara fria, que deve estar pré-aquecida. Estas máquinas são utilizadas para os materiais não ferrosos com elevado ponto de fusão.

Este processo permite a produção de peças metálicas de dimensões precisas, de formas perfeitamente definidas e com acabamento superficial liso ou texturizado; permite igualmente grande versatilidade na produção de peças com formas complexas, bem como flexibilidade no seu desenvolvimento. As peças obtidas na fundição injectada representam, quer em termos qualitativos, quer em termos quantitativos, um dos mais volumosos processos de produção de peças metálicas.

As peças assim produzidas apresentam formas simples ou complexas, paredes finas e de agradável aspecto visual. Em termos de características mecânicas podem estar sujeitas a diversos tipos de solicitações, mantendo no geral um bom comportamento. São peças de fácil mecanização e tratamento superficial.

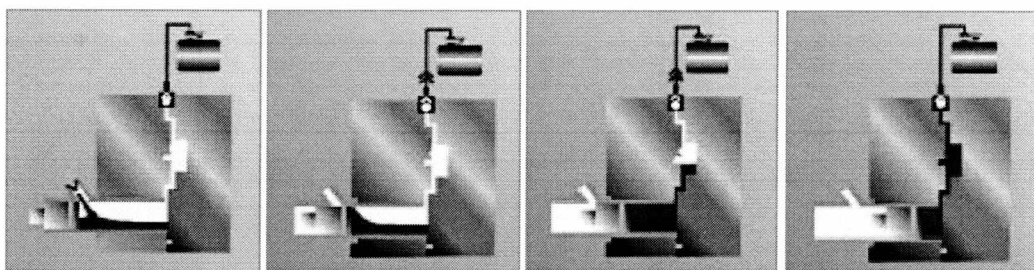


Figura 7 – Etapas do processo de injeção, utilizando a tecnologia de vácuo.

4.1 Vantagens

As vantagens da fundição injectada são as seguintes:

- Produção de peças com tolerâncias apertadas;
- Elevadas cadências;
- É necessária pouca ou nenhuma maquinagem;
- Produção de peças que apresentam elevado tempo de vida, estabilidade dimensional e boa qualidade;
- As peças podem apresentar superfícies com texturização;
- Roscas exteriores são facilmente obtidas;
- Podem ser incorporados insertos metálicos;

- As peças apresentam boa resistência à corrosão.

4.2 Processo de injeção

Cada máquina de injeção tem adjacente um forno com a liga de alumínio à temperatura de aproximadamente 680°C. Para efectuar uma injeção, um cadinho refractário retira do forno uma certa quantidade de liga e despeja-o à frente do pistão da máquina de injectar, como se pode ver esquematicamente na Figura 8.

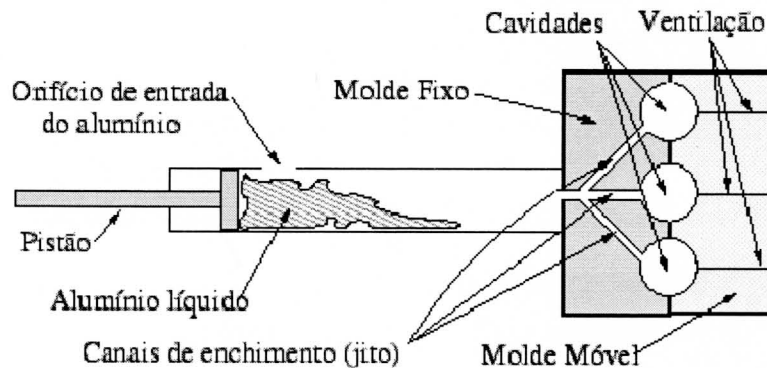


Figura 8 - Esquema do processo de injeção num molde com três cavidades.

O pistão, actuado pela pressão fornecida por um complexo sistema hidráulico, começa então por se deslocar a baixa velocidade, empurrando a liga à sua frente. Esta é a designada fase de aproximação ou fase 1; no seu decorrer, pretende-se que o alumínio líquido seja levado até à entrada do molde o mais rapidamente possível, para evitar o arrefecimento da liga mas em regime de fluxo laminar, para evitar o envolvimento do ar no metal líquido.

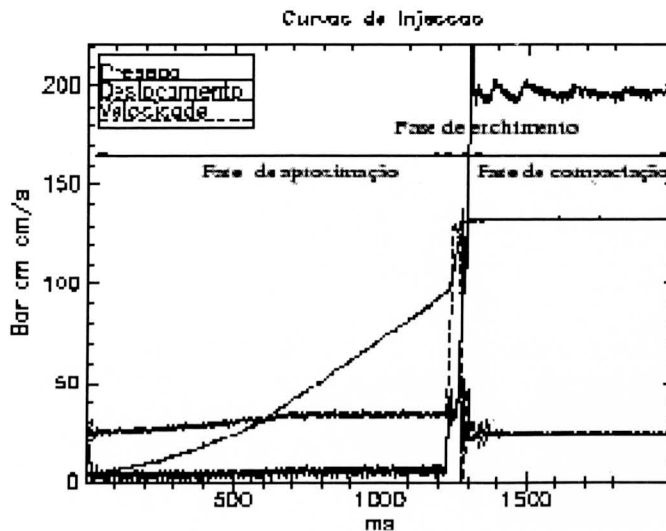


Figura 9 - Curvas típicas do deslocamento e velocidade do pistão, assim como da pressão a ele aplicada durante uma injeção.

Quando a liga chega finalmente à entrada das cavidades moldantes, o pistão aumenta de velocidade, provocando rapidamente o enchimento do molde, razão pela qual esta fase se designa de fase de enchimento ou fase 2. O enchimento do molde, que se encontra aproximadamente a 200°C, deve ser efectuado o mais rapidamente possível para evitar o arrefecimento prematuro da liga, mas deve ser suficientemente lento para permitir a total expulsão do ar do interior do molde através dos orifícios de ventilação.

Quando o molde se encontra cheio, a liga apresenta-se já perto da sua temperatura de solidificação e, ao pistão, é aplicado um súbito aumento de pressão com o objectivo de compactar a liga, que solidifica sujeita a essa pressão. Esta fase denomina-se por fase de compactação ou fase 3 e a pressão aplicada pelo pistão nesta fase é muito elevada; as máquinas são mesmo classificadas pela força que são capazes de suportar nesta fase (força de fecho).

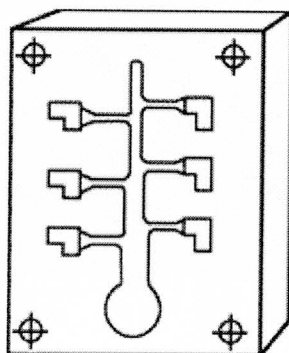


Figura 10 – Representação esquemática de um meio molde, constituído por seis cavidades, e seus canais de alimentação.

4.3 Molde de Fundição Injectada

4.3.1. Descrição dos constituintes de um molde

O molde de fundição injectada é construído em aço e é constituído por, pelo menos, duas partes: o Molde do Lado Fixo, que é montado no lado do sistema de injeção da máquina, e o Molde do Lado Móvel, montado no prato móvel da máquina, onde fica agarrado o gito e de onde este é ejetado quando o molde abre. Em ambas as partes do

molde existem Furos de Refrigeração, que permitem o arrefecimento do molde durante o ciclo produtivo.

O lado fixo é projectado de forma a receber a camisa de injeção, elemento onde o metal é vazado antes de ser injectado para o interior do molde.

Inseridos normalmente no lado móvel, encontram-se o canal de alimentação e a secção de ataque, responsáveis pelo encaminhamento e passagem do metal fundido para o interior molde (cavidade). As cavidades do molde devem ser polidas ou trabalhadas em função do aspecto superficial pretendido. Ao lado móvel estão também ligadas as Placas Extractoras, nas quais existe o sistema de ejeção do gito.

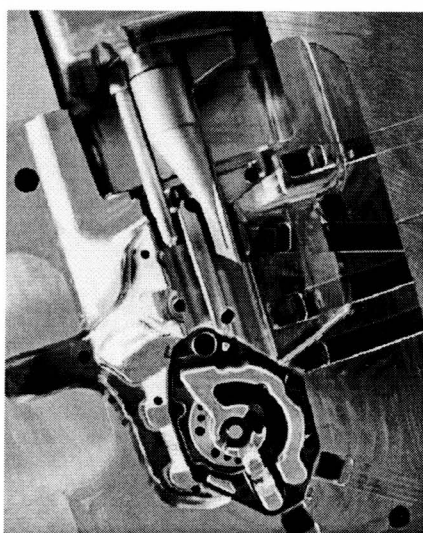


Figura 11 – Pormenor do molde.

A extracção do gito ocorre quando os Extractores, que estão montados nas respectivas placas extractoras, se deslocam para a frente, forçando assim o gito, movendo-o para fora da cavidade. Nas placas extractoras estão também montados os pernos de retorno que permitem o recuo da placa durante o fecho do molde.

Os moldes podem ter Pernos Moldantes fixos ou móveis. Se são fixos, o seu eixo deve ser paralelo à direcção de abertura do molde, se são móveis encontram-se montados em Gavetas.

As gavetas têm movimentos de deslocação perfeitamente sintonizados com a abertura e o fecho do molde. Estes elementos, também chamados Movimentos, podem ser accionadas mecanicamente, por acção dos Pernos Inclinados, ou hidráulicamente, através de Cilindros Hidráulicos. A opção dos cilindros hidráulicos é feita sempre que as gavetas tenham um percurso longo ou o esforço de recuo destas seja considerável.

As gavetas devem ser ajustados no molde de forma perfeita, precisa e segura para que, durante o ciclo de injeção, o metal fundido não se escape das cavidades provocando assim anomalias no processo.

É obrigatória a existência dos chamados ângulos de saída no gito e de polimento, de modo a permitir que a peça seja facilmente extraída.

Há também a possibilidade de incluir um *squeeze pin*, que tem como finalidade compactar uma determinada zona da peça, com o objectivo de eliminar possíveis defeitos localizados. É montado no molde um perno que será accionado hidraulicamente através do sistema existente na máquina ou através de um sistema externo montado com o objectivo de actuar o *squeeze pin*.

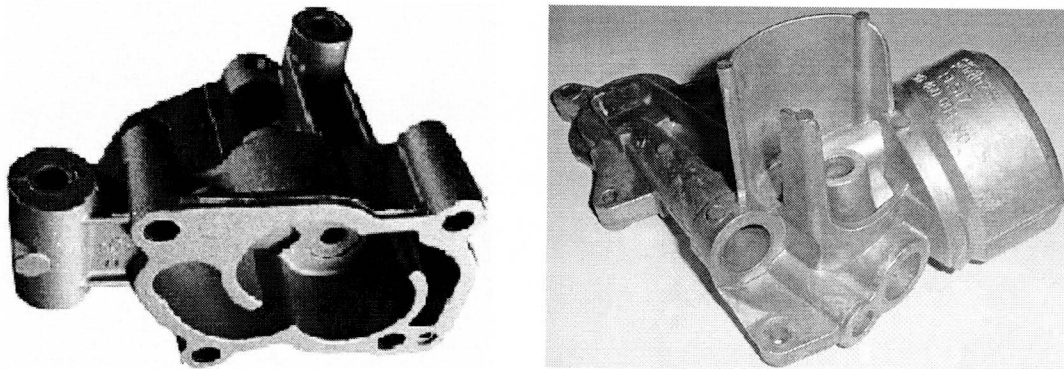


Figura 12 - Exemplos de peças fabricadas por esta tecnologia.

4.3.2. Tipos de moldes

Os moldes podem ser classificados quanto às cavidades, quanto ao número de placas ou de acordo com o tipo de liga a injectar.

Quanto ao número de cavidades, os moldes podem ser classificados como Moldes de Cavidade Única, Moldes de Cavidades Múltiplas ou Moldes de Cavidades Combinadas.

Os moldes de cavidade única permitem a produção de uma peça por injeção. Os de cavidades múltiplas permitem obter várias peças idênticas na mesma injeção e os de cavidades combinadas, que têm cavidades com formas diferentes, permitem obter diferentes tipos de peças na mesma injeção.

Quanto à classificação que tem por base o número de placas, o molde pode ser classificado como Molde de Duas Placas (que é o tipo mais vulgar) ou como Molde de Três Placas, que permite a injeção central (este tipo de molde é utilizado em máquinas de câmara fria).

A terceira forma de classificar os moldes tem por base o tipo de liga a injectar. Por exemplo, se se tratar de liga de Alumínio chamam-se Moldes para Fundição Injectada de Alumínio, se a liga a utilizar é de zinco temos os Moldes para Zamak.

4.3.3. Constituição

Um molde para fundição injectada é constituído por 4 grandes grupos:

- Estrutura - é a base do molde. Nela são montados e ajustados os restantes grupos;
- Inserções - são os elementos críticos do molde. Nelas estão gravadas as formas complexas das peças a produzir em negativo;
- Gavetas - são elementos móveis opcionais, ou seja, nem sempre estão presentes no molde; são compostas por vários elementos que, depois de montados na estrutura, permitem obter formas simples ou complexas em direcções paralelas, ou não, à abertura do molde.
- Acessórios - são os elementos responsáveis pela segurança e funcionamento do molde

4.3.4. Constituição de um Gito

Ao conjunto fundido ejectado no fim de cada ciclo dá-se o nome de Gito. O gito é constituído por:

- Peça fundida;
- Alimentação – parte fundida resultante do enchimento do canal de alimentação durante a injeção do metal para o interior da cavidade;
- Bolacha – Parte do metal fundido que permanece no interior da camisa de injeção e que permite a continuidade quer do enchimento quer da pressão de injeção;

- Masselotes – formas bem definidas, gravadas ao longo das cavidades, que permitem a limpeza das impurezas existentes no molde provenientes da lubrificação, o fácil escoamento do ar evitando assim que este fique no interior da peça e facilitam a extracção da peça;
- Película – pode aparecer no gito quer por exigência do projecto do molde, quer por deficiência deste, da máquina ou do processo. Também existe uma película proveniente do canal de ventilação (canal que permite a passagem do ar contido no interior do molde para o exterior).

4.4 Instrumentação das máquinas de injeção

Cada máquina de injeção está equipada com transdutores que medem vários tipos de grandezas, desde a temperatura do forno da liga ou de vários pontos do molde, à pressão de vários fluidos, como a pressão do fluido hidráulico ou pressão do azoto, entre outros. A maioria destes transdutores mede grandezas que variam lentamente no tempo, se comparados com a duração de uma injeção. Essas grandezas são designadas parâmetros ou variáveis de processo, e encontram-se enumeradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de processo.

Parâmetros do processo	
Temperatura do Forno	Temperatura do Fluido Hidráulico
Temperatura do Molde Fixo 1	Temperatura do Molde Fixo 2
Temperatura do Molde Móvel 1	Temperatura do Molde Móvel 2
Pressão do Fluido Hidráulico	Pressão do óleo do Acumulador
Pressão do Azoto do Acumulador	Pressão do óleo do Multiplicador

Há três transdutores que são especialmente importantes para o processo de injeção e que medem as variações de posição e velocidade do pistão, assim como a pressão a ele aplicada durante a injeção, e são designados por *sinais PDV* (Pressão, Deslocamento e Velocidade).

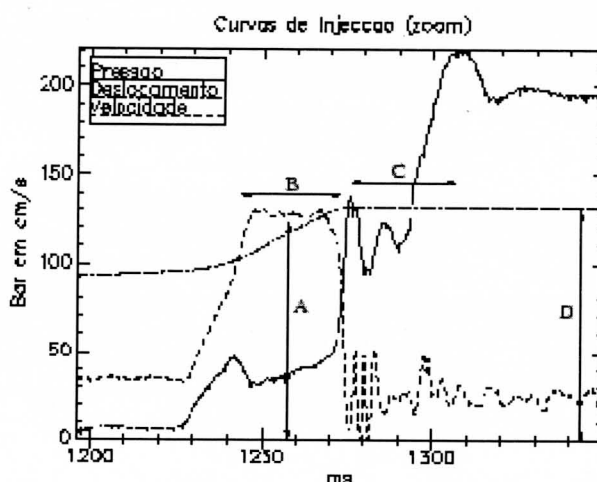


Figura 13 - Curvas típicas de injeção na fase de enchimento com indicação de alguns dos parâmetros de injeção. A - velocidade na fase 2, B - duração do enchimento, C - atraso do multiplicador, D - deslocamento no fim da fase 3.

As três fases de injeção atrás descritas têm uma duração de 1 a 3s, conforme as peças que se pretende fabricar, podendo ver-se a evolução dos sinais de pressão, deslocamento e velocidade do pistão na Figura 13. A fase mais crítica da injeção é a segunda fase, de enchimento, que dura entre 100 a 300ms e cujas curvas PDV para um determinado molde se podem ver na Figura 13.

Um programa de computador extrai dos sinais PDV um conjunto de variáveis designadas *variáveis de injeção*, variáveis que se encontram enumeradas na Tabela 5 e que fornecem aos engenheiros de processo indicações vitais sobre as condições em que foi efectuada a injeção. A algumas destas variáveis correspondem parâmetros de afinação da máquina de injeção, sendo portanto controláveis. Os parâmetros de injeção que não têm correspondência com parâmetros de afinação da máquina são também muito importantes, já que contêm informação relevante para os engenheiros de processo caracterizarem a injeção.

Tabela 5 – Parâmetros de injeção.

Parâmetros de injeção	
Duração da fase 1	Pressão no início da fase 2
Deslocamento à entrada do multiplicador	Velocidade à entrada do multiplicador
Deslocamento no início da fase 2	Pressão à entrada do multiplicador
Velocidade no início da fase 2	Tempo de compressão
Duração da aprox. na fase 2	Pressão do multiplicador
Duração do enchimento	Pressão no fim da fase 3
Pressão no fim da fase 2	Deslocamento no fim da fase 3
Duração da fase 2	Duração total do ciclo de injeção
Atraso do multiplicador	Velocidade na fase 2

5.

6. Ligas de fundição injectada

As matérias-primas utilizadas na fundição injectada são ligas de:

- **Alumínio** – são especialmente indicadas para a fundição injectada. Estas ligas possuem elevada estabilidade dimensional, o que as torna particularmente indicadas para a fundição de peças de formas complexas e de paredes finas. As ligas de Alumínio têm boa resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas, elevada condutibilidade térmica e eléctrica, bem como resistência a temperaturas elevadas.
- **Magnésio** – os materiais à base de magnésio utilizam-se em peças em que a redução do peso é essencial. O campo principal de aplicação é a construção de motores e veículos, onde o reduzido peso específico da liga de magnésio tem um papel decisivo. Como a capacidade térmica destas ligas é mais baixa que a de materiais de alumínio de igual volume, a troca de calor com o molde efectua-se

mais rapidamente. Em consequência, os tempos de solidificação são mais curtos; logo, com peças de paredes delgadas, deve trabalhar-se com velocidades do pistão de injeção relativamente altas.

- **Zinco** – estas ligas são as que têm um peso específico mais elevado (6,5 - 6,7kg/dm³). O componente mais importante das ligas de zinco é o alumínio, que confere à liga uma granulação muito fina e elevada tenacidade. As únicas ligas de zinco que, em estado de fusão, não atacam o ferro nem o aço, são as que contêm alumínio e permitem portanto utilizar máquinas de câmara quente. As ligas mais utilizadas têm uma percentagem de aproximadamente 4% de alumínio. Os produtos injectados em zinco podem apresentar uma certa instabilidade dimensional, causada pela transformação eutectóide da fase alfa, que aparece por volta dos 275 °C. Uma melhor estabilidade dimensional pode ser conseguida com a ajuda de um envelhecimento artificial, fazendo um aquecimento de várias horas, a uma temperatura compreendida entre 90 e 95 °C. A maior parte das peças injectadas nesta liga são depois cromadas galvanicamente. Do ponto de vista das propriedades da peça, os melhores resultados são obtidos para temperaturas de injeção entre os 410 e 420 °C e para temperaturas do molde não superiores a 200 °C.
- **Cobre** – da grande quantidade de ligas de cobre conhecidas, para a fundição injectada utiliza-se principalmente o latão. O latão para fundição injectada está normalmente ligado com alumínio. O alumínio tem como função diminuir a oxidação do latão enquanto este se encontra fundido. Os produtos de latão utilizam-se principalmente no fabrico de válvulas e na indústria eléctrica. O latão é muito resistente à corrosão pela água, é facilmente maquinado e admite o polimento. As altas temperaturas de injeção da ordem dos 1000 °C, reduzem significativamente a vida do molde. Por isso para conseguir uma injeção de latão mais económica, os elementos do molde submetidos a forte solicitação térmica devem ser construídos em materiais especiais. A injeção de latão efectua-se em máquinas de câmara fria. Devido à elevada densidade do material a injectar não se conseguem alcançar, regra geral, elevadas velocidades de circulação aquando da injeção, pelo que se recomenda o uso de velocidades elevadas do pistão de injeção (pelo menos 3 m/s). Para conseguir condições uniformes de injeção é essencial a utilização de uma refrigeração adequada.

6.1 Características do produto em função do tipo de liga

Nas peças obtidas por fundição injectada, o acabamento superficial, a mecanização, a espessura, as propriedades mecânicas e as suas características são função da liga utilizada, como se apresenta nas tabelas seguintes:

Tabela 6 - Tipos e qualidade do acabamento das diversas ligas de fundição injectada.

Acabamento Superficial				
	Al	Zn	Mg	Cu
<u>Decoração</u>				
Cromagem	Razoável	Excelente	Razoável	Excelente
Polimento	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Anodização	Razoável	-----	-----	-----
<u>Protecção</u>				
Anodização	Excelente	Excelente	Boa	-----
Pintura	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente

Tabela 7 - Características da liga e custos do processo em função do tipo de liga.

Características da liga e custos do processo de injecção				
	Al	Zn	Mg	Cu
<u>Dimensões</u>				
Estabilidade	Boa	Boa	Excelente	Excelente
Precisão	Boa	Excelente	Excelente	Razoável
Resistência à corrosão	Boa	Razoável	Razoável	Excelente
<u>Custos</u>				
Molde	Médio	Baixo	Médio	Alto
Mecanização	Baixo	Baixo	Baixo	Médio

Final	Médio	Baixo	Alto	Baixo
Processo	Bom	Excelente	Bom	Razoável

Tal como as características do produto, também a máquina a utilizar, o peso máximo das peças que se conseguem obter por este processo, bem como a espessura de parede mínima, ângulo de saída e diâmetros dos furos, são função da matéria-prima utilizada.

Tabela 8 - Tipo de máquina, número de injeções por hora e pressão de injeção em função tipo de liga utilizado.

Processo e produção (Máquina)				
	Al	Zn	Mg	Cu
<u>Tipo de máquina</u>				
Câmara fria	Sim	Sim	Sim	Sim
Câmara quente	Não	Sim	Sim	Não
<u>Injeção/hora</u>	40-200	220-550	75-400	40-200
<u>Pressão Injeção (bar)</u>				
Peças normais	400	100-200	300-400	
Peças técnicas	400-600	200-300	400-500	
Peças sujeitas a pressão interior	800-1000	250-400	800-1000	

Tabela 9 - Pesos e dimensões limites das peças em função da liga.

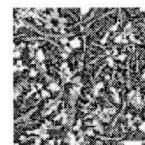
Pesos e Dimensões Limites				
	Al	Zn	Mg	Cu
Peso máximo (kg)	32	34	20	4,5
<u>Espessura de parede mínima(mm)</u>				
Peças grandes	2	0,9	2,5	2,3
Peças pequenas	1	0,4	1,0	1,4
<u>Diâmetro mínimo dos furos (mm)</u>	2	1,3	2	6,4
<u>Ângulo de saída mínimo</u>	0,012	0,005	0,009	0,002

para furos (mm/mm)

Tabela 10 - Tempo de vida do molde e temperatura de trabalho em função da liga utilizada.

	Processo e produção (Molde)			
	Al	Zn	Mg	Cu
Tempo médio de vida (nº injeções * 1000)	125	500	200	20
Temperatura Trabalho (°C)	180 - 300	150 - 200	200 - 250	300 - 500

6.2 Ligas utilizadas na SONAFI



Actualmente, fabricam-se na Sonafi peças em ligas de alumínio para fundição injectada, apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Ligas de alumínio utilizadas na Sonafi.

Liga	Norma	Designação interna
AlSi9Cu3 (Fe)	NF EN 1706 – A380	Liga Vermelha
AlSi10Mg	DIN 1725 – A360	Liga Azul
AlSi12Cu1 (Fe)	DIN – 1706 – A13	Liga Branca

A liga A380 é de longe a mais utilizada das ligas de alumínio usadas na fundição injectada; tem a melhor combinação entre as propriedades do material e a facilidade de produção. Pode ser usada num grande número de produtos como componentes eléctricos, partes de motores, suportes de filtros.

A liga A360 apresenta maior resistência à corrosão e maior dureza a quente, mas é mais difícil de trabalhar.

A A13 tem óptima estanqueidade a elevadas pressões, o que a torna particularmente indicada para o fabrico de cilindros hidráulicos.

Em seguida apresenta-se uma listagem das propriedades mecânicas e físicas das ligas utilizadas na Sonafi (Tabela 12).

Tabela 12 - Propriedades mecânicas e físicas das ligas utilizadas na Sonafi.

	Liga de Alumínio		
	A360	A380	A13
<u>Propriedades mecânicas</u>			
Resistência à tracção (MPa)	320	320	290
Resistência teórica de deformação (MPa)	170	160	130
Dureza (BHN)	75	80	80
Resistência ao corte (MPa)	180	190	170
Resistência à fadiga (MPa)	120	140	130
Módulo de young (GPa)	71	71	
<u>Propriedades físicas</u>			
Densidade (g/cm ³)	2,63	2,71	2,66
Intervalo de fusão (°C)	557-596	540-595	574-582
Condutividade térmica (W/mK)	113	96,2	121
Coef. expansão térmica	21	21.8	21.6

A comparação entre as diferentes ligas de alumínio utilizadas vem descrita na Tabela 13.

Tabela 13 - Comparação das características das ligas usadas.

	Características das ligas usadas na Sonafi (1-melhor; 5-pior)		
	A360	A380	A13
Resistência à fissuração a quente	1	2	1
Capacidade de enchimento do molde	3	2	1
Resistência à soldadura com o molde	2	1	1
Resistência à corrosão	2	4	2
Maquinabilidade	3	3	4
Polimento	3	3	5
Anodização	3	3	5

Resistência a elevada temperatura	1	3	3
Pressão de estanqueidade	2	2	1

6.3 Influência dos elementos de liga das ligas de alumínio

6.3.1. Cobre

O cobre ligado com o alumínio numa percentagem inferior a 12%, aumenta a dureza, a resistência e melhora a maquinabilidade da liga. Acima deste nível, a liga de alumínio torna-se demasiado frágil para poder ser usada na engenharia. Aumentar a percentagem de cobre leva a uma diminuição da resistência à corrosão.

6.3.2. Silício

Até 12,5%, o silício melhora consideravelmente as propriedades de fundição. Aumenta a fluidez, diminui a tendência à fissuração a quente e reduz os rechupes de solidificação. Daí que as ligas Al-Si sejam das mais indicadas para a fundição injectada. Estas ligas apresentam boa resistência à corrosão e ao desgaste. À medida que se aumenta a percentagem de silício há um aumento progressivo da resistência e da dureza proporcional à diminuição da ductilidade e da maquinabilidade.

No ponto de solidificação (580°C), a solubilidade do silício no alumínio é 1,65% e vai diminuindo até menos de 0,1%, à temperatura ambiente. Normalmente as ligas de alumínio-silício não podem ser tratadas termicamente.

Quando estas ligas contêm magnésio, dentro de um intervalo de 0,25 até 1%, a sua resistência, dureza e capacidade de serem tratadas termicamente melhora bastante.

6.3.3. Magnésio

À medida que o conteúdo de magnésio aumenta (até 6%) há um aumento gradual da resistência e da dureza da liga. As propriedades físicas e mecânicas, bem como a resistência à corrosão e a maquinabilidade melhoram. As ligas de Al-Mg mantêm estas boas propriedades, mesmo a temperaturas elevadas. Estas ligas estão praticamente isentas de fissuração a quente mas têm tendência à formação de rechupes. As ligas de

Al-Si formam inclusões e filmes de óxidos com relativa facilidade pelo que é necessário um cuidado especial no manuseamento do metal líquido e é necessário o uso de procedimentos de fundição adequados.

Ligas com teores superiores a 8% de magnésio podem ser tratadas termicamente.

6.4 Factores que influenciam os mecanismos de solidificação

Há vários factores que influenciam o modo de solidificação de uma determinada liga. O intervalo de solidificação de uma liga, medido em graus de temperatura, não é o melhor indicador do modo de solidificação. O factor que tem mais influência no modo como uma liga solidifica é o intervalo de tempo que essa solidificação demora. O intervalo entre líquido e sólido é determinado por diversos factores incluindo:

- o intervalo de solidificação da liga, característica fundamental de uma determinada liga.;
- características térmicas do molde: um aumento da condutividade térmica do molde reduz o intervalo de tempo que demora a solidificação;
- a condutividade térmica da liga: uma liga de elevada condutividade térmica leva à redução dos gradientes térmicos dentro da peça, o que provoca uma diminuição do tempo de solidificação;
- temperatura de solidificação: uma temperatura de solidificação baixa, que reduz os gradientes de temperatura entre o molde e a peça, vai diminuir os gradientes térmicos dentro da peça, o que resultará numa diminuição do tempo de solidificação.

7. Porosidade provocada por contracção: *shrinkage*

Existem vários fenómenos físicos que influenciam o aparecimento de porosidades devido à contracção do alumínio durante a solidificação.

Como o metal líquido é praticamente incompressível, qualquer perda de volume causada pela contracção durante a solidificação tem que ser preenchida por metal líquido, caso contrário forma-se um vazio algures na peça fundida. A chave para a formação de porosidade é a pressão. À medida que o material arrefece, aumenta a sua densidade, porque a agitação térmica das moléculas é incapaz de superar as forças intermoleculares que atraem as moléculas entre si. A porosidade causada por contracção reduz a pressão do metal.

A contracção do material atrai metal líquido para o vazio causado pela contracção do metal; isto, desde que exista metal líquido capaz de fluir para essa zona. Se o líquido for impedido de fluir pode ocorrer a formação de vazios internos, caso a pressão desça abaixo da pressão de vapor do líquido ou, mais tipicamente, abaixo da pressão de vapor dos gases que se encontram dissolvidos no metal.

A capacidade do material fluir em resposta a uma diminuição da pressão depende do grau de solidificação.

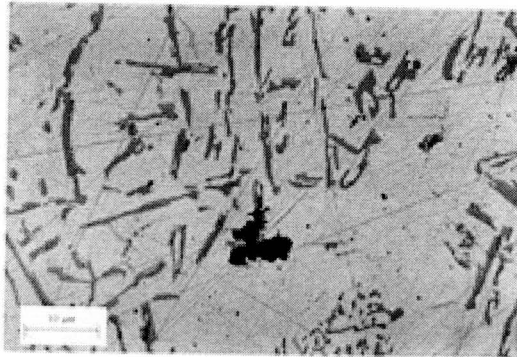


Figura 14 - Poro causado por contracção numa liga Al-Si2.

À medida que o metal líquido arrefece, começam a formar-se os primeiros cristais sólidos, a uma temperatura designada **temperatura de liquidus**. Se o arrefecimento continuar, a percentagem de metal sólido em comparação com o líquido aumenta, até que o metal solidifica completamente a uma temperatura designada **temperatura de solidus**. Entre a temperatura de *liquidus* e de *solidus* há algumas mudanças qualitativas no metal que devem ser tidas em conta. Por exemplo, à medida que a fracção de sólido

aumenta, a viscosidade do metal aumenta, devido aos cristais sólidos existentes no líquido.

Quando uma quantidade suficiente de metal solidifica nas paredes do molde, desenvolve-se uma resistência ao fluxo porque o metal tem dificuldades em entrar na matriz de cristais. Finalmente, quando a fracção sólida atinge um valor suficientemente alto para que se forme uma estrutura dendrítica, o fluxo de metal torna-se impossível sem recorrer a elevados gradientes de pressão. O ponto em que deixa de haver um fluxo de metal chama-se **fracção sólida crítica**.

Desde a altura em que se começa a notar uma resistência ao fluxo de metal até ao ponto de fracção sólida crítica, a resistência é função do grau de solidificação.

Depois de a fracção sólida do metal ultrapassar a fracção crítica deixa de haver fluxo de metal para compensar a contracção do material. No alumínio A380, a fracção sólida crítica é aproximadamente 63%.

7.1 Aparecimento de porosidade provocada por contracção

Uma das principais características deste tipo de porosidade é a sua forma irregular e rugosa. Esta característica é muito importante quando se pretende efectuar uma análise preliminar do defeito até que outros factores sejam confirmados.

A forma irregular e a aparência rugosa vêm do modo como a peça solidifica. O metal é injectado na cavidade da peça a elevada velocidade e com um fluxo muito turbulento. Quando o metal passa na zona de ataque, entra na cavidade que vai moldar a peça sob a forma de *spray*. Quando esse metal fundido se encontra com a superfície do molde solidifica quase instantaneamente. Esta cama de metal que solidificou muito depressa forma uma superfície muito dura e densa, com uma porosidade muito baixa. Estas são características muito desejáveis numa peça e, por isso, é importante que essa “pele” seja o mais grossa e resistente possível.

Uma vez formada esta camada superficial, a velocidade de solidificação do resto da peça diminui e a estrutura no interior da peça vai-se modificando à medida que aumenta distância em relação à camada superficial. Ao mesmo tempo que a peça vai solidificando em direcção à zona mais quente, a velocidade de solidificação diminui e uma estrutura dendrítica começa a aparecer. As dendrites, na maioria das ligas de fundição, são formadas por metal base puro. Estas estruturas encontram-se distribuídas

de um modo aleatório aparentando forma de árvore – possuem um tronco central com ramos em cada um dos lados. Estas estruturas crescem lentamente (quando comparado com a velocidade de solidificação) e por isso elas serão maiores no último ponto a solidificar, onde o tempo disponível para o seu crescimento é maior.

O último ponto a solidificar será, potencialmente, o ponto onde não existirá metal suficiente para preencher o espaço disponível. O metal solidificado preencheu todo o espaço disponível até este ponto mas, na última zona a solidificar, a redução de volume associada a uma mudança de estado provoca o aparecimento de porosidades.

Isto significa que a porosidade provocada por contracção ocorre onde a estrutura é mais dendrítica e, conseqüentemente, as paredes dos poros têm uma aparência rugosa e irregular.

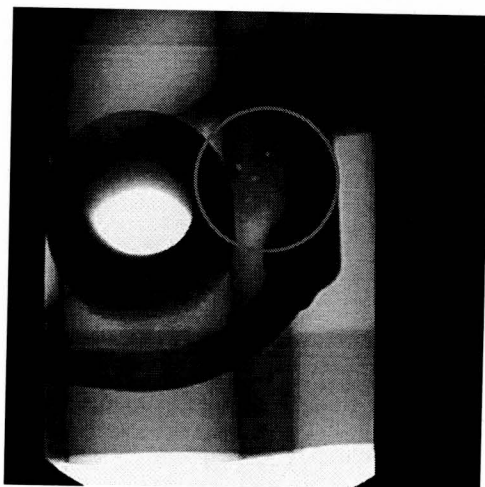


Figura 15 - Raio-X da zona da peça de fundição antes da aplicação do *squeeze pin*.

7.2 Modificação da porosidade provocada por contracção através da alteração da temperatura do molde

Os problemas causados por este defeito podem ser ultrapassados alterando a localização do ponto quente para uma zona da peça em que a porosidade possa ser tolerada. Isto pode ser conseguido através de uma alteração das temperaturas do molde.

No entanto a mudança da localização dos pontos quentes na peça não altera a quantidade de porosidade, apenas altera o lugar em que ela se encontra. Por vezes isto é

suficiente para resolver o problema. Se isto não for suficiente, é necessário procurar outras soluções.

Interessa lembrar que a temperatura no interior do molde não é o mais importante, mas sim a última zona no interior da peça a solidificar. Embora a temperatura do molde afecte indirectamente o problema, existem situações em que não há margem suficiente de manobra na alteração da temperatura do molde para o poder resolver.

Embora a alteração da temperatura possa ser consideravelmente eficiente na diminuição da porosidade, quando estamos na presença de peças com paredes relativamente finas (até 3 mm), isso já não acontece quando há paredes espessas na peça (> 20mm). Neste caso, a forma da peça e do molde são os factores determinantes.

Uma das principais limitações à alteração da temperatura do molde é o efeito que essa alteração tem no tempo de ciclo, na gripagem, nas soldaduras e nas dimensões da peça. Manter a temperatura o mais uniforme possível durante a solidificação deve ser o objectivo a atingir; no entanto, isso requer uma temperatura diferente em zona distintas do molde. Por exemplo, em situações em que o molde necessite de estar bastante frio em áreas de grande massa da peça e quente em zonas de pouca massa. O resultado disto seria uma temperatura mais uniforme na peça durante o arrefecimento, o que resultaria numa dispersão da porosidade. Na prática, a porosidade pode estar tão dispersa que deixe de ser visível à vista desarmada, ou que deixe de afectar as características funcionais da peça.

Muitas vezes esta solução é bastante satisfatória, mas é preciso ter em atenção que não resolve um problema de fugas (como é o caso da peça que é moldada no molde onde vai ser aplicado o *squeeze pin*), podendo até agravar o problema.

7.3 Pressão do metal

A pressão do metal injectado é muito importante para combater a porosidade causada pela contracção do metal.

O multiplicador tem como função aumentar a pressão a que a liga está sujeita aquando da solidificação e, deste modo, reduzir a ocorrência de poros na peça. Apesar deste aumento de pressão permitir preencher alguns dos vazios que aparecem, é fundamental obter este aumento de pressão durante o intervalo de temperatura em que a liga passa da fase líquida para a fase sólida.

O tempo de entrada da pressão é crítico porque a pressão só é eficiente se a liga estiver no intervalo de temperatura mencionado anteriormente, uma vez que, se o metal se encontrar no estado líquido ou totalmente sólido, o efeito desse aumento de pressão vai ser nulo. No caso da liga utilizada no fabrico da peça em que vai ser aplicado o *squeeze pin* (liga de alumínio A380) esse intervalo é de aproximadamente 12°C.

É igualmente importante controlar a pressão a que a liga está sujeita no fim da segunda fase e a pressão que se consegue quando entra o multiplicador. A pressão metalo-estática nas ligas de alumínio deve ser sempre superior a 200 bar e a pressão específica final no metal deve ser superior a 400 bar.

Se a ocorrência de *shrinkage* afectar de um modo determinante a peça em questão, a escolha dos parâmetros do processo que afectam directamente a pressão que é possível obter (força de fecho da máquina, diâmetro do pistão, pressão de operação e outros) devem ser um factor a ter em conta na fase de projecto.

Apesar de se conseguir uma ligeira diminuição da porosidade com o aumento da pressão, um aumento contínuo desta vai trazer poucos benefícios devido ao aumento da quantidade de rebarbas que irão surgir. É por isso necessário avaliar bem as vantagens e desvantagens de um aumento de pressão.

Nas máquinas de câmara fria a espessura da bolacha é muito importante para manter a pressão no metal durante a solidificação. Apesar de bolachas com pequenas espessuras poderem ser vantajosas do ponto de vista do tempo de ciclo, podem por outro lado ser prejudiciais para se conseguir manter uma correcta pressão durante a solidificação. A pressão na cavidade diminui muito rapidamente se a espessura da bolacha descer abaixo de um determinado valor mínimo. Apesar de a espessura mínima da bolacha ser, normalmente, da ordem dos 20mm, varia em função do diâmetro da camisa de injeção, da temperatura do metal, do tempo de injeção e de outros factores, como por exemplo o bom ajuste do molde de modo a minimizar a formação de rebarbas.

7.4 Controlo da porosidade

O processo mais usual de controlar a porosidade das peças é efectuar regularmente uma amostragem na linha de produção, submetendo as peças a análise por raios X. O critério de qualidade não é contudo o mesmo para todas as peças, já que a existência de poros em certas zonas pode ser perfeitamente tolerada, enquanto que noutras zonas não pode. A porosidade pode assim caracterizar-se pelo número e dimensão dos poros em

zonas pré-determinadas das peças. As porosidades não estão apenas relacionadas com a rigidez mecânica das peças, mas também com o seu acabamento, já que a existência de poros, em zonas que irão funcionar como juntas de vedação, pode inviabilizar a sua utilização. Outro dos critérios de qualidade importante é a conformidade dimensional das peças. O procedimento usual para manter a qualidade nos níveis desejados é determinar por amostragem a qualidade das peças produzidas e, eventualmente, reajustar os controlos da máquina de injeção, de modo a repor a qualidade nos níveis pré-estabelecidos. Este reajuste é efectuado por tentativa e erro, variando os controlos da máquina de injeção de modo mais ou menos sistemático; as peças produzidas nas novas condições são sujeitas a análise de raios X e o processo repetido até se obter o nível de qualidade desejado. O procedimento utilizado para manter a qualidade das peças é assim efectuado *off-line*, com as desvantagens inerentes, nomeadamente a produção de peças não conformes, até a situação ser detectada por nova amostragem e análise por raios X.

8. A peça em estudo

A peça (Figura 16) tem como função suportar o filtro do óleo do motor. É fixada ao motor, sendo nela montado filtro de óleo e outros elementos. O filtro é acoplado com parafusos M6 no bloco do motor. São utilizadas duas juntas para assegurar a vedação do óleo. Na parte exterior da peça é montado um monocontacto para detectar a temperatura do óleo, o filtro e tampa do filtro de óleo.

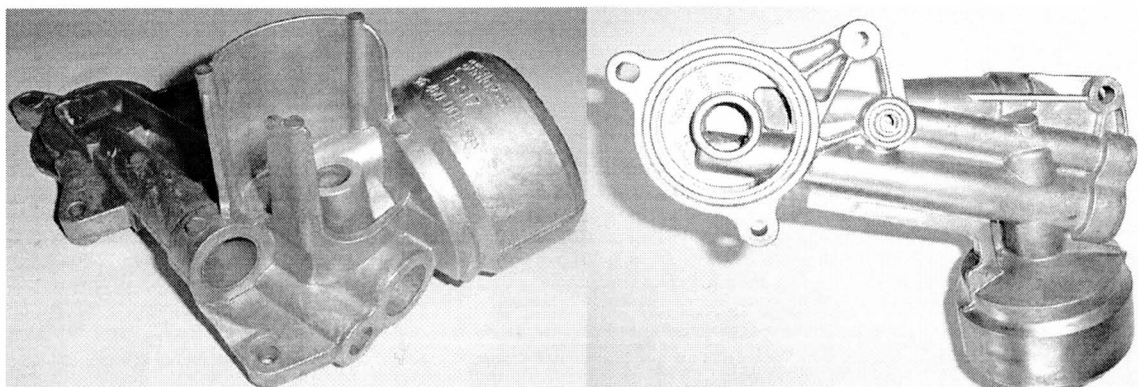
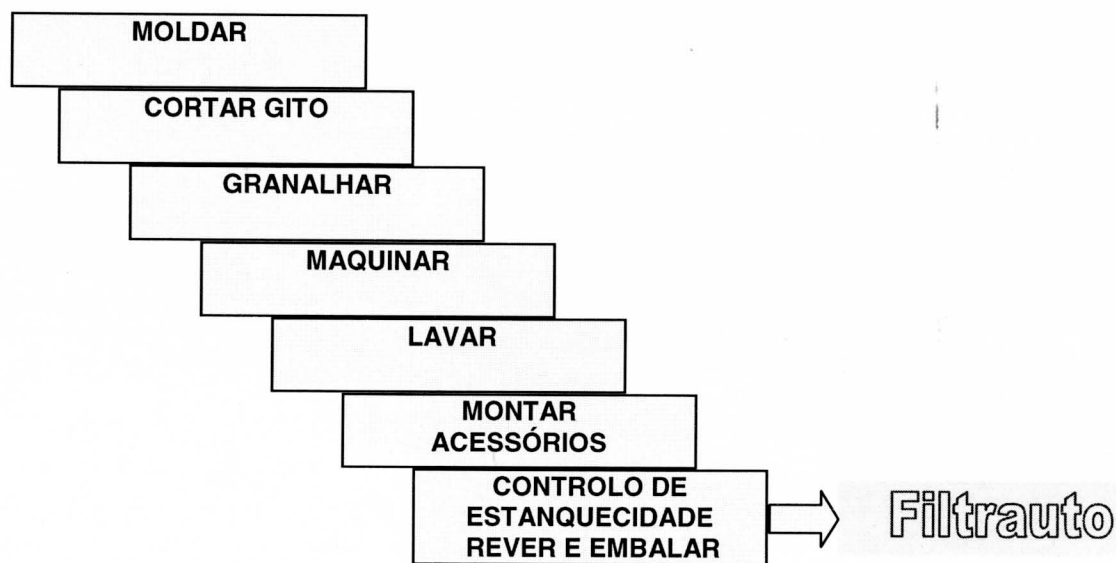


Figura 16 – Corpo de filtro TU5.

8.1 Ciclo da peça dentro da empresa



8.2 Liga utilizada no fabrico da peça

O material utilizado para produzir a peça é uma liga de alumínio, mais especificamente AlSi9Cu3. Esta liga é designada pela empresa - designação interna - como liga vermelha.

A liga em questão é designada segundo as diferentes normas conforme exposto na Tabela 14:

Tabela 14 - Classificação da liga segundo diferentes normas.

Designação interna	DIN	GB BS	USA ASTM	ASIA JIS
Liga Vermelha	G - Al Si9 Cu3	LM 24	A 380,0	ADC 10

Para comprovar os teores dos diferentes componentes existentes na liga em questão são realizadas análises à liga que indicam as percentagens dos diferentes elementos que a constituem. Os resultados são expostos na Tabela 15.

Tabela 15 – Constituição da liga, em termos percentuais de acordo com a norma NF EN 1706.*

Composição da liga							
Elemento	%	Elemento	%	Elemento	%	Elemento	%
Si	8 – 10	Fe	0,7 – 1	Pb	0,2	Mg	0,1 – 0,3
Cr	0,15	Zn	1	Mn	0,55	Ti	0,2
Ni	0,5	Cu	2,7 – 3,5	Sn	0,2		

8.3 Características da máquina de injectar

A máquina de injectar onde funciona o molde no qual vai ser introduzida a tecnologia de *squeeze pin* é a BUHLER Evolution 84D, cujas características são apresentadas na

Figura 17.

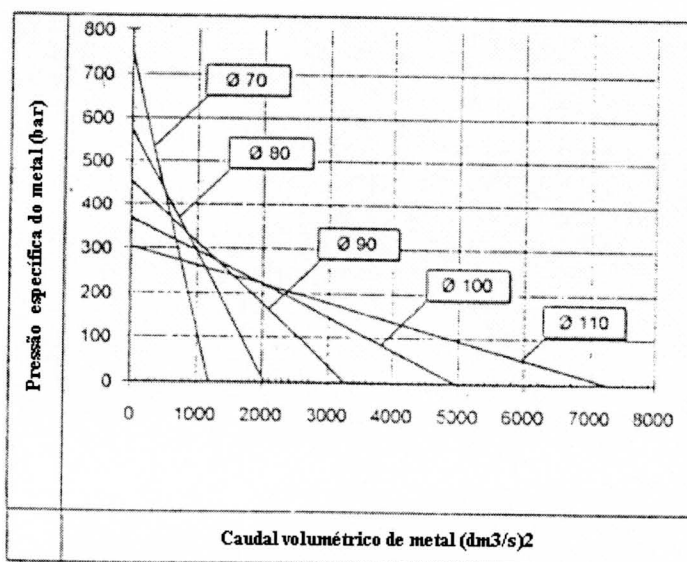


Figura 17 – Diagrama P/Q^2 característico da máquina.

Tabela 16 – Características da máquina de injeção.

<u>Unidade de injeção</u>		<u>Sistema hidráulico</u>	
Força de injeção	289 kN	Pressão máxima	210 bar
Pressão final	703 kN	Potência de propulsão	45 kW

* Os teores que não possuem intervalos de especificação são os teores máximos admissíveis.

Curso do pistão de injeção	600 mm		
Velocidade máx. do pistão de injeção	8,98 m/s	<u>Dados de produção</u>	
Posição de injeção	0/-300 mm	Diâmetro do pistão	90 mm
<u>Unidade de fecho</u>		Volume máximo de injeção	2545 cm ³
Força de fecho	6615 kN	Peso máximo de injeção	6.36 Kg
Força de extracção	225 kN	Pressão máxima de injeção (Al)	1106 bar
Curso de abertura do molde	800 mm	Superfície máxima projectada	598 cm ²
Altura do molde	360-900 mm	Velocidade máxima do pistão de injeção	8.98 m/s

8.4 Histórico das alterações feitas na peça

Na Tabela 17 estão descritas as alterações que foram feitas na peça para eliminar problemas de mau enchimento, fugas e poros. Após a implementação das medidas para eliminar esses problemas, chegou-se à conclusão que os defeitos de porosidade causada por contracção que existiam na zona assinalada na Figura 18 não se conseguiam resolver alterando os parâmetros de injeção e que a melhor forma de eliminar este defeito seria utilizar um dispositivo de *squeeze pin* que compactasse a zona em questão durante a solidificação.

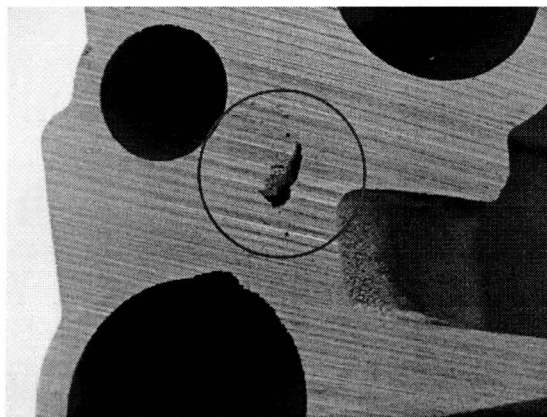


Figura 18 – Corte da peça onde são visíveis os problemas de shrinkage.

Tabela 17 - Modificações introduzidas na peça.

Modificação	Objectivo
Aumentar raios da peça	Melhorar enchimentos da peça e reduzir fuga
Aumentar saída da parede da zona do furo M16	Reduzir fuga observada nessa zona
Aumentar espessura das paredes do fundo da zona do furo M16	Reduzir fuga observada nessa zona
Aumento do masselote junto ao furo M24	Melhorar enchimento da peça
Modificação do masselote do furo de aperto ao motor (aumento do masselote, passagem do mesmo por baixo da gaveta)	Melhorar enchimento da peça
Aumento da película do furo M16	Melhorar alimentação da peça
Aumento dos canais de refrigeração dos pernos 83A3	Reduzir rejeição por porosidade (eliminar porosidade existente nessa zona)
Modificação dos canais de alimentação (passagem a três canais de alimentação)	Eliminação da fuga no copo
Inserir bossa na gaveta que molda furo M27	Eliminar fuga nessa zona, após maquinação

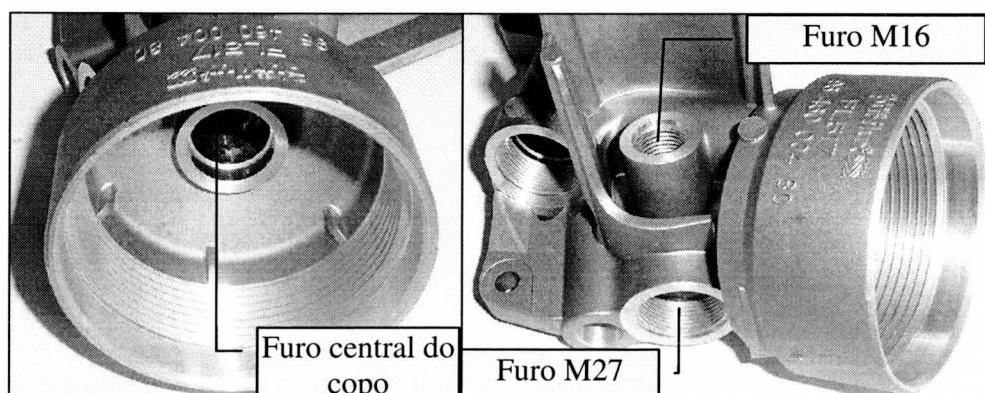


Figura 19 – Pormenor da peça onde se aplicou a tecnologia.

9. Sistema de compactação externa - *Squeeze Pin*

Após o enchimento do molde, a zona de ataque só se encontra aberta (com metal em estado líquido) por um curto período de tempo. Uma vez solidificado, só é possível comprimir a liga de alumínio recorrendo ao uso de um sistema de compactação externa.

Tal como foi descrito atrás, quando o metal injectado na cavidade do molde arrefece e solidifica aparecem vazios resultantes da contracção do metal no interior da peça fundida. Em consequência disso, as propriedades da peças são seriamente prejudicadas. Com o intuito de eliminar esses defeitos aplica-se um perno de compactação - *squeeze pin* - para aplicar uma pressão localizada, antes da solidificação do metal, na zona da peça onde os defeitos de *shrinkage* são mais comuns. Essa pressão tem o objectivo de compensar por deslocação a contracção natural do metal e homogeneizar a estrutura do metal.

Quando se pressuriza localmente a peça usando um *squeeze pin* é importante escolher uma pressão apropriada e um tempo de pressurização adequado às condições de injeção.

Para controlar o *squeeze pin*, existe um sensor que detecta a pressão de injeção. Quando a pressão atinge um determinado nível, uma válvula solenóide é activada e, depois de um tempo previamente estabelecido, pressuriza o cilindro hidráulico que comanda o perno de compactação.

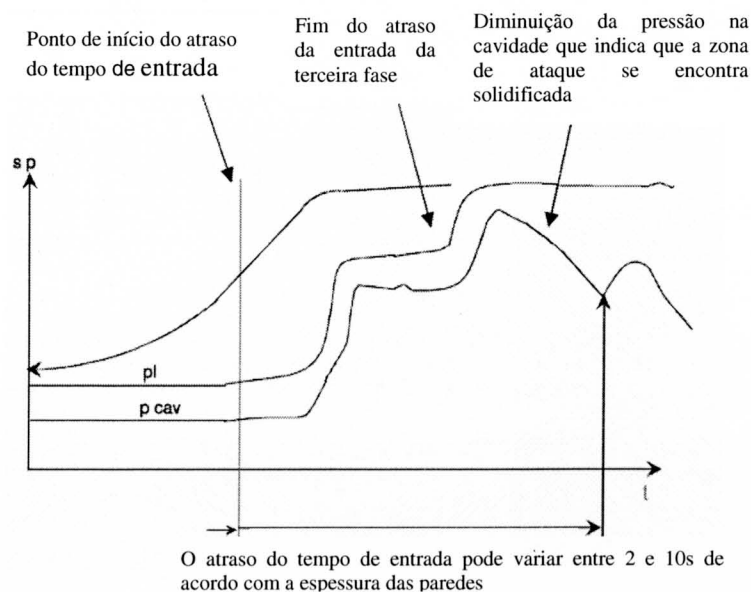


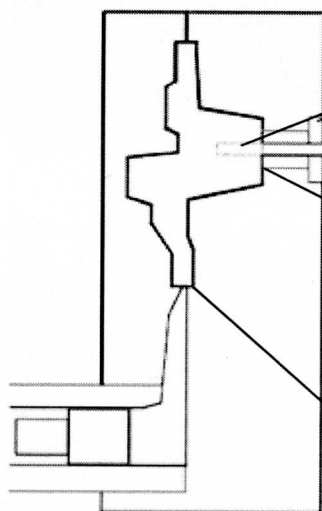
Figura 20 – Ilustração da variação da distância e pressão com o tempo.

Um dos factores mais importantes na programação do *squeeze pin* é a escolha correcta do tempo de entrada. Como o metal solidifica rapidamente, se o momento de entrada do *squeeze pin* for, ou muito adiantado ou muito atrasado não se conseguem obter os resultados esperados.

Dado que o tempo de solidificação é muito curto, o intervalo de tempo adequado à entrada do *squeeze pin* torna-se bastante reduzido. Este é um dos principais problemas na implementação deste tipo de mecanismos. A escolha do tempo de entrada tem que ser feita por tentativa e erro, usando a profundidade de penetração do perno de compactação como referência. Este método de ajuste torna-se por vezes demorado e obriga a que sejam feitos ajustes com alguma frequência porque as condições de injeção e as temperaturas da liga e do molde podem sofrer alterações.

Na parte frontal da máquina, onde funciona o molde onde se vai introduzir esta tecnologia, estão montados lateralmente, no prato móvel e no prato fixo, as unidades hidráulicas e eléctricas de accionamento dos pernos de compactação. No limite, a máquina permite a montagem de 5 unidades independentes de *squeeze pins* na placa móvel e 2 na placa fixa.

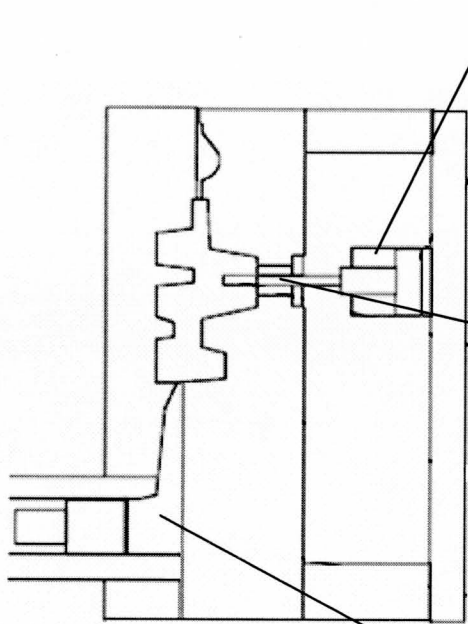
9.1 Aspectos a ter em conta durante o projecto de um *squeeze pin*



O volume deslocado pelo *squeeze pin* deve ser, no mínimo, 4% do volume parcial a comprimir, devendo variar entre 4 e 7%.

Tanto o perno compactador como o casquilho guia são peças de desgaste. Há que ter em conta este facto durante a fase de projecto do molde de modo a que a sua substituição seja fácil.

A zona de ataque tem que estar solidificada antes da actuação do *squeeze pin*.



Cilindro de accionamento

O molde deve ser projectado de modo a que o cilindro hidráulico não fique sujeito a temperaturas superiores a 60 °C.

Squeeze pin

O *squeeze pin* deve ser projectado de modo a que seja possível obter pressões específicas no alumínio na ordem dos 3000 bar, o que implica que a área do *squeeze pin* seja pelo menos 20 vezes inferior ao do cilindro de accionamento.

Para que se consiga uma boa compressão da liga é necessário que a bolacha tenha pelo menos 20mm de espessura.

9.1.1. Relação entre o atraso do tempo de entrada e a profundidade de penetração

O momento de entrada do *squeeze pin* é crítico porque a pressão só é eficiente se a liga estiver dentro de um determinado intervalo de temperatura. Se o metal estiver no estado líquido, o *squeeze pin* vai penetrar na peça mas as vantagens dessa penetração serão nulas uma vez que esse avanço não vai compactar o material e evitar a formação dos poros de contracção. No entanto, se o avanço do cilindro acontecer muito tarde, quando o metal se encontra no estado sólido, o *squeeze pin* não compacta o metal tornando a sua utilização inútil.

Na **Error! Reference source not found.** ilustra-se a relação que existe entre o tempo de entrada, a profundidade de penetração e a qualidade do efeito obtido

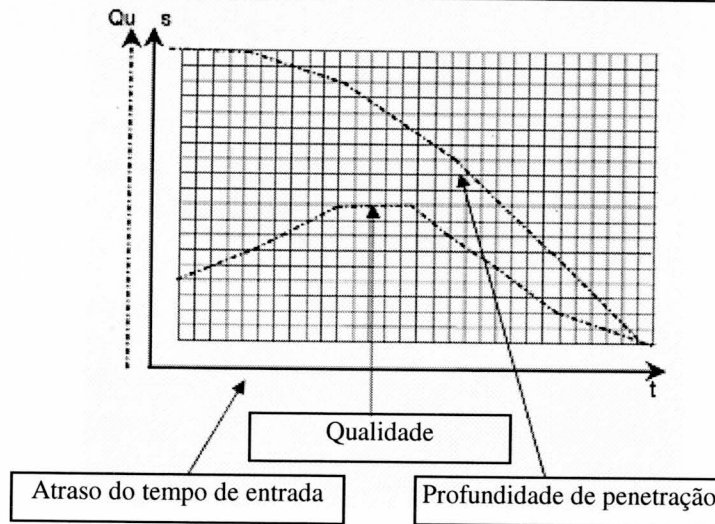


Figura 21- Relação entre o tempo de entrada, profundidade de penetração e qualidade do efeito obtido.

9.2 Constituição de uma unidade de *squeeze pin*

Uma unidade de *squeeze pin* é constituída por:

- Uma válvula solenóide;
- Uma válvula de retenção com redução de pressão, para ajuste da velocidade de entrada do *squeeze pin*;
- Uma válvula redutora de pressão, para redução da pressão do *squeeze pin*;
- Uma placa de medição intermediária;
- Um bloco de conexão.

9.3 Programação da unidade de *squeeze pin*

O controlo da unidade de *squeeze pin* é efectuado através da coluna de comando, pela unidade de operação DATASPEED. Na coluna de comando da máquina existe uma página que permite definir os parâmetros necessários para programar a unidade. A Figura 22 ilustra a página da unidade de comando onde se introduzem os valores pretendidos para os vários parâmetros que é necessário definir para programar a unidade.

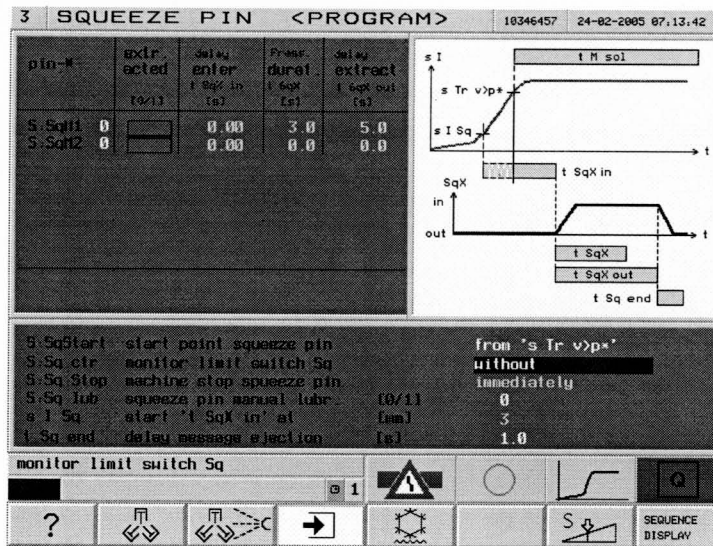


Figura 22 - Ilustração da página da unidade de comando.

Na unidade de comando são programáveis os seguintes parâmetros:

- Atraso do tempo de entrada (**t SqX in**): este parâmetro indica o tempo de atraso da entrada em funcionamento do *squeeze pin*, contado a partir do ponto de início;
- Duração da activação (**t SqX**): este parâmetro indica o tempo total em que o cilindro hidráulico, que comanda o *squeeze pin*, está sobre pressão. Ou seja, é o intervalo de tempo que dura a compactação do metal no interior do molde;
- Atraso do tempo de saída (**t SqX out**). Indica o tempo de atraso do fim da actuação do *squeeze pin*, contado a partir do ponto de início.

9.3.1. Ponto de início (S:SqStart)

O ponto de início é definido como sendo a altura do ciclo de injeção a partir da qual é contado o *atraso do tempo de entrada e de saída*. O ponto de início pode ser o momento de passagem da fase enchimento para a fase de compactação ou pode ser o momento em que o curso do pistão de injeção atinge um determinado valor.

S:SqStart = 1: os dois tempos de atraso (**t SqX in**) e (**t SqX out**) iniciam-se no momento de passagem da fase de enchimento para a fase de compactação;

S:SqStart = 0: o início é definido a partir de um determinado valor do curso do pistão de injeção.

9.3.2. Monitorização do curso do squeeze pin (S:Sq ctr)

Este parâmetro permite escolher a altura em que é feita a monitorização do curso do *squeeze pin*. Para efectuar esta monitorização é necessária a colocação de sensores de fim-de-curso, quando se introduz o *squeeze pin* no molde.

S:Sq ctr = 0: não é feita qualquer monitorização;

S:Sq ctr = 1: a monitorização é feita após a abertura do molde;

S:Sq ctr = 2: a monitorização é feita sempre que o *squeeze pin* é activado;

S:Sq ctr = 3: a monitorização é feita após a abertura do molde e quando o *squeeze pin* é activado.

9.3.3. Reacção da máquina ao sistema de monitorização do curso (S:Sq stop)

Este parâmetro permite definir a reacção da máquina no caso de a monitorização detectar algum erro.

S:Sq stop = 0: a máquina pára imediatamente;

S:Sq stop = 1: a máquina pára após o avanço dos ejectores;

S:Sq stop = 2: a máquina pára no fim do ciclo.

9.4 Método alternativo de controlo do *squeeze pin*

Existe um método capaz de minorar os inconvenientes encontrados no método de controlo do *squeeze pin* atrás apresentado. Esse método implica a determinação do tempo ideal para a actuação do *squeeze pin* e a manutenção desse tempo no valor correcto. Estes objectivos podem ser atingidos através do uso de um sistema capaz de controlar o já referido *squeeze pin*. É necessário em primeiro lugar determinar qual o curso ideal para otimizar o efeito do *squeeze pin* e qual o tempo de entrada para obter esse curso. É necessário ter na máquina um sensor que detecte o curso realizado em cada actuação. O curso detectado é depois comparado com o curso ideal e é feita uma correcção instantânea ao tempo de actuação, para que esse curso se mantenha no valor estipulado como ideal.

O tempo de entrada do *squeeze pin* é determinado de acordo com o curso detectado: este é comparado com o curso de referencia e, de acordo com o resultado da

comparação, é enviado um sinal para a unidade de controlo, sendo feita a alteração ao tempo de entrada previamente estabelecido. Se o curso do pino for inferior ao curso de referência, considera-se que o metal solidificou antes que o pino pudesse atingir o curso ideal. Em consequência, o valor do tempo de entrada é modificado de maneira a que o cilindro hidráulico que comanda o perno actue ligeiramente mais cedo. Por outro lado, se o curso for maior que o curso de referência, parte-se do princípio que a percentagem de metal que se encontra no estado sólido é demasiado baixa para a obtenção dos resultados pretendidos com a utilização do *squeeze pin*. Logo, o tempo de entrada é modificado para que o cilindro seja actuado numa fase de solidificação mais adequada para se obterem os resultados ideais.

A Figura 23 apresenta uma máquina de fundição injectada onde está implementado um sistema de controlo semelhante ao acima descrito. O sensor representado está inserido no cilindro de accionamento e permite efectuar uma leitura correcta do curso real do *squeeze pin*.

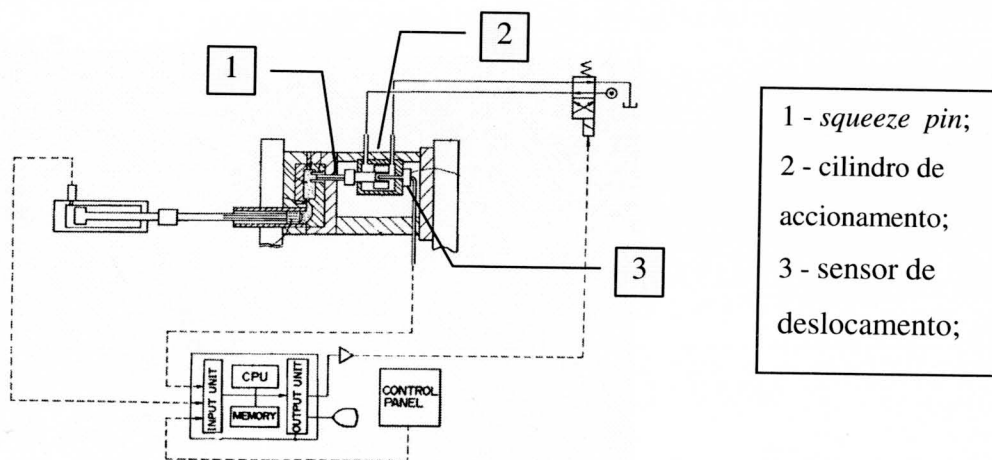


Figura 23 - Máquina de fundição injectada com implementação de um sistema de controlo alternativo.

Na Figura 24 é apresentada uma imagem mais pormenorizada do sensor (3) indicado na Figura 23; nessa mesma figura o número (3) representa um casquilho roscado que está acoplado ao pistão (1) do cilindro que acciona o *squeeze pin* e o número (2) representa uma bobina eléctrica. Quando o pistão avança, o casquilho roscado move-se juntamente, provocando uma mudança do posicionamento da bobina relativamente ao casquilho. Em resultado disso, a voltagem correspondente ao posicionamento do pistão

é transmitida à unidade de controlo do curso do cilindro. Como o *squeeze pin* e o pistão que o comanda estão ligados, o curso do *squeeze pin* pode ser detectado medindo a posição do pistão.

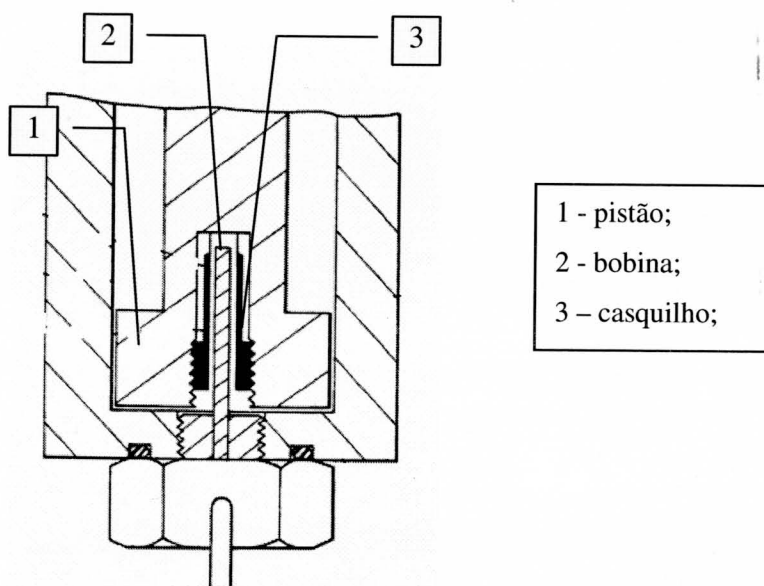


Figura 24 - Imagem pormenorizada do sensor de deslocamento.

Podem ser utilizados outros sensores para detectar o curso do cilindro; porém, este tipo de sensor apresenta a vantagem, relativamente a outros tipos de sensores, de ser possível a sua introdução no interior do cilindro hidráulico, o que permite poupar espaço.

Este tipo de controlo tem grandes vantagens relativamente ao sistema de controlo usado neste projecto; no entanto, a sua implementação requer mais tempo porque é necessário criar um *software* que permita ajustar o tempo de entrada do *squeeze pin* em função do seu curso. E como o tempo disponível para desenvolver o projecto é limitado optou-se por utilizar o sistema de controlo existente na máquina. No entanto se no futuro a tecnologia dos *squeeze pins* for utilizada noutros moldes, este método de controlo do curso do perno de compactação deve ser tido em conta devido às vantagens que apresenta relativamente ao método tradicional.

10. Anteprojecto do *squeeze pin*

Como já foi referido anteriormente, o *squeeze pin* vai ser introduzido na parte fixa do molde e vai ter como objectivo compactar a zona assinalada na Figura 25 para eliminar os poros que se formam devido à contracção do material durante a solidificação.

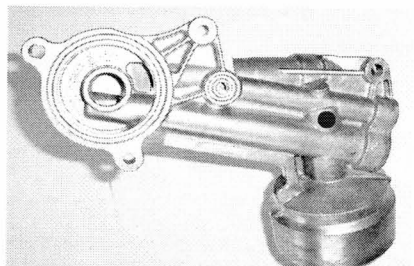


Figura 25 – Peça e localização da actuação do *squeeze pin*.

Na Figura 26 é possível ver um corte da peça de fundição, antes e após maquinagem, da zona em que o *squeeze pin* actua. Como é possível ver nesta figura, parte da massa de alumínio que sofre o efeito da actuação do *squeeze pin* é retirada durante a operação de maquinagem.

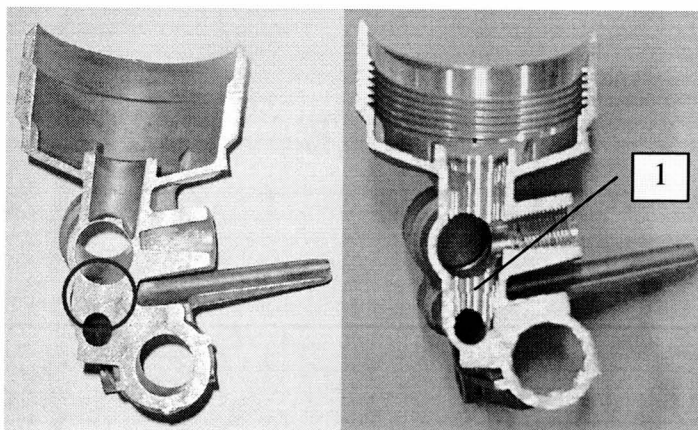


Figura 26 – Corte da peça onde evidencia a zona problemática, antes e após a maquinagem.

O processo mais usual de controlar a porosidade das peças é retirar regularmente amostras da linha de produção e submetendo as peças a análise por raios X .

Após maquinagem, as peças são também submetidas a uma análise visual. A zona da peça representada na Figura 26 pelo número (1) funciona como junta de vedação e está sujeita a um determinado critério de porosidade.

O critério de qualidade não é contudo o mesmo para todas as peças, já que a existência de poros em certas zonas de uma determinada peça pode ser perfeitamente tolerada, enquanto que noutras zonas pode não o ser. A porosidade caracteriza-se assim pelo número e dimensão dos poros em zonas pré-determinadas das peças. As porosidades não estão apenas relacionadas com a rigidez mecânica das peças mas também com o seu acabamento, já que a existência de poros em zonas que irão funcionar como juntas de vedação pode inviabilizar a sua utilização, como é o caso da peça em estudo.

Para a zona em questão, seguindo o critério de porosidade utilizado, a peça é rejeitada se (Figura 27):

- Diâmetro do poro (\emptyset) for superior a 1,5 mm;
- Distância entre poros (T) for inferior a 10 mm.

Porosidades de diâmetro inferior a 0,2 mm não devem ser tidas em consideração.

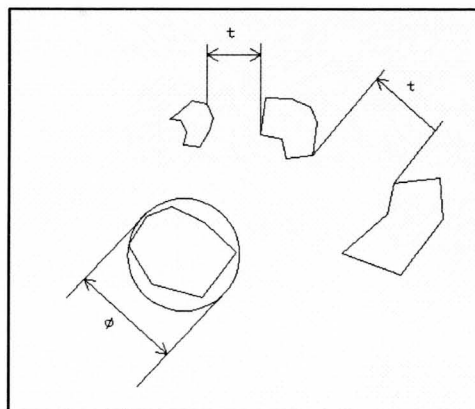


Figura 27 – Esquema representativo de um poro e dimensões características.

Alteração à peça original

O *squeeze pin* vai ser introduzido na parte fixa do molde. A introdução deste dispositivo vai implicar alterações nas linhas de água e de óleo existentes neste parte do molde e a criação de uma *mesa* na zona da peça, como é visível na Figura 28, que vai sofrer a compactação.

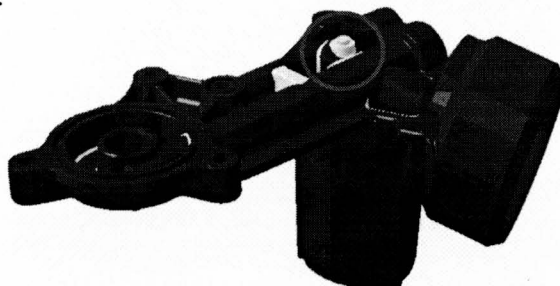


Figura 28 - Alteração à peça original.

10.1 Determinação do diâmetro e do curso do *squeeze pin*

Atendendo à zona onde vai ser aplicado e as limitações de espaço que aí existem, o diâmetro máximo admissível para o *squeeze pin* é 7mm.

A Buhler sugere que o volume deslocado pelo *squeeze pin* deve variar dentro de um intervalo de 4 a 7% do volume da zona da peça que se pretende compactar. Na $C = V_{sp} / A_{sp} = 0,18/0,38 = 5\text{mm}$ é visível a massa de alumínio que se pretende compactar.

Volume aproximado de material a compactar:

$$V_m = 2,5\text{cm}^3$$

Volume deslocado pelo *squeeze pin*:

$$V_{sp} = 2,5 \times 0,07 = 0,18\text{cm}^3$$

Área do *squeeze pin*:

$$A_{sp} = \pi r^2 = \pi \times (0,35)^2 = 0,38\text{cm}^2$$

Curso do *squeeze pin*:

$$C = V_{sp} / A_{sp} = 0,18/0,38 = 5\text{mm}$$

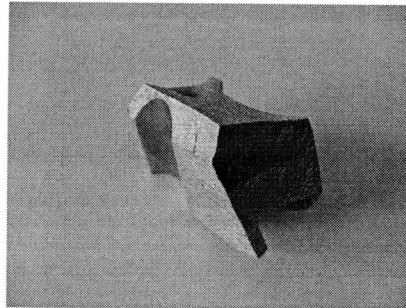


Figura 29 - Metal a compactar pelo *squeeze pin*

10.2 Escolha do cilindro hidráulico

O *squeeze pin* deve ser projectado de modo a que seja possível obter pressões específicas no alumínio de aproximadamente 3000 bar. É necessário que o área do *squeeze pin* seja pelo menos 20 vezes inferior à do cilindro de accionamento. Com base nestes dados e no diâmetro do *squeeze pin* estabelecido anteriormente, é possível escolher o cilindro hidráulico de accionamento (Figura 30):

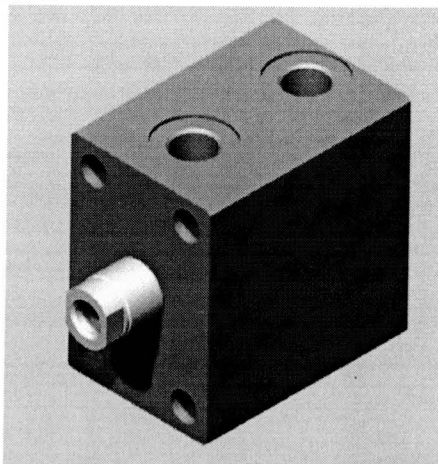


Figura 30 – Imagem 3D do cilindro hidráulico.

$$\begin{aligned} \text{Área do cilindro: } A_c &= 20 \times A_{sp} \\ \pi \times r_c^2 &= 20 \times \pi \times (0,35)^2 \end{aligned}$$

$$\text{Raio do cilindro: } r_c = 1,55\text{cm}$$

Foi escolhido um cilindro de duplo efeito da HP – Systems com as seguintes características (Tabela 18):

Tabela 18 – Características do cilindro hidráulico.

Características do cilindro hidráulico	
Série	VBL
Diâmetro	32 mm
Curso	10 mm
Amortecimento	sem
Pressão de serviço	250 bar
Velocidade máxima	0,5 m/s
Filtro	ISO 17/14
Temperatura de funcionamento	20°C a +160°C

10.3 Determinação da força necessária para recuar o *squeeze pin*

Quando se trabalha com gavetas ou outros dispositivos que penetram na peça, é importante determinar as forças necessárias para contrariar as forças de contracção resultantes da solidificação do metal.

No caso do *squeeze pin* que foi projectado, este calculo é desnecessário porque o perno de compactação não penetra na peça. No entanto, no caso de se pretender introduzir um *squeeze pin* de diâmetro superior que penetre na peça, a determinação das forças necessárias para recuar o cilindro pode ser feita utilizando o gráfico apresentado na Figura 31:

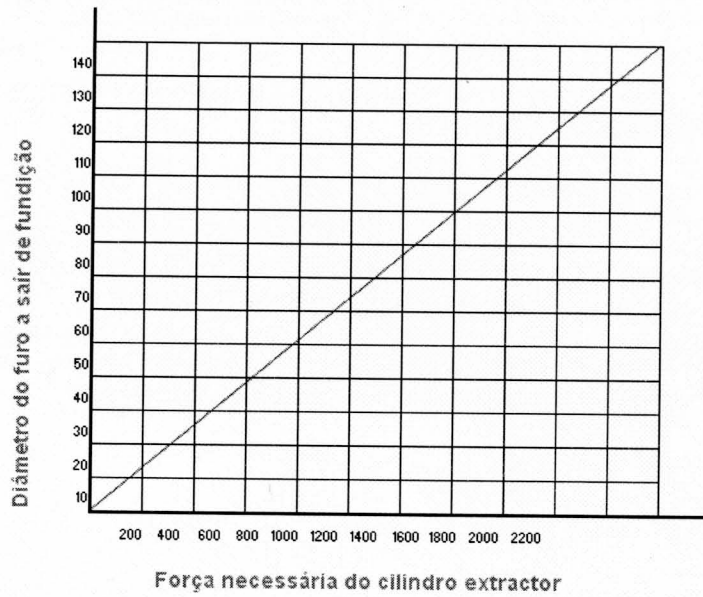


Figura 31 – Gráfico ilustrativo da variação da força de recuo do cilindro extractor em função do diâmetro do furo.

Este gráfico permite determinar a força de tracção necessária para extrair um núcleo cilíndrico de 10mm de comprimento de uma fusão de alumínio cuja parede apresenta uma espessura normal. Para núcleos de maior comprimento, a força de tracção necessária é proporcional.

10.4 Escolha do detector de fim-de-curso

O detector de fim-de-curso escolhido, o XCM D2 10L1 da Telemecanique, é idêntico ao utilizado na Sonafi para controlar o movimento das gavetas. Encontrando-se disponível e sabendo que as suas características são as necessárias para efectuar o controlo do curso do *squeeze pin*, este foi o tipo de detector utilizado (Figura 32).

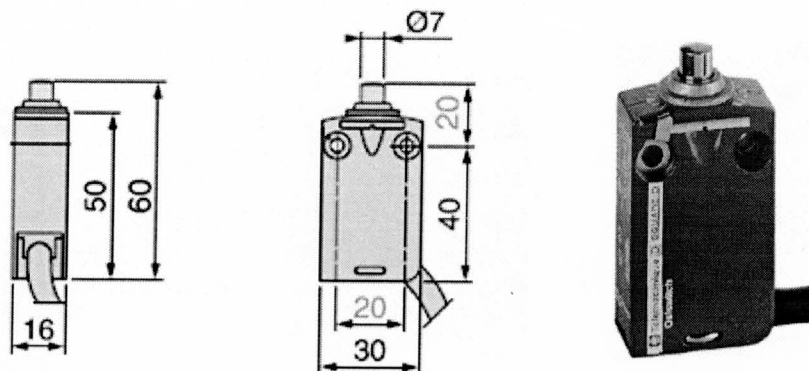
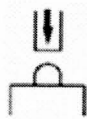


Figura 32 – Detector XCM D2 10L1.

As características do detector estão apresentadas na Tabela 19:

Tabela 19 – Características do detector.

Características do detector	
Tipo de actuação	
Velocidade máxima de actuação	0,5 m/s
Durabilidade mecânica	10 000 000 ciclos
Força mínima de actuação	8,5 N

10.5 Características e tratamentos térmicos do aço do *squeeze pin*

O aço escolhido para o perno de compactação foi o aço da Thyssen, **THYROTHERM 2343**. Este aço foi o escolhido devido às boas características para trabalho a quente. Tem alta resistência à tracção a quente, alta tenacidade, boa condutibilidade térmica e é pouco susceptível aos choques térmicos. Admite refrigeração com água. Tem boa maquinabilidade e aptidão à textura química, devido ao tratamento adicional de cálcio. Apresenta muito boa aptidão à nitruração e ao polimento. A sua designação segundo as normas DIN e AISI é apresentada na Tabela 20, a sua composição química encontra-se discriminada na Tabela 21 e, as suas propriedades físicas e mecânicas, nas Tabela 22 e Tabela 23, respectivamente.

Tabela 20 – Designação do aço segundo as normas DIN e AISI.

DIN	X 38 CrMo V5 1
AISI	H 11

Tabela 21 - Composição química do aço (valores médios em %).

C	Cr	Ni	Mo	V
0,56	1,10	1,70	0,50	0,10

Tabela 22 - Propriedades físicas do aço.

Temperatura (°C)	20	400	600
Densidade (kg/m ³)	7800	7700	7600
Módulo de elasticidade (Mpa)	210000	180000	140000
Coef. dilatação térmica (m/(m.K))	-	12,6 * 10 ⁻⁶	13,2 * 10 ⁻⁶
Condutibilidade térmica (W/(m.K))	25	29	30

Tabela 23 - Propriedades mecânicas do aço, à temperatura ambiente.

Propriedades mecânicas à temperatura ambiente	
Dureza (HRC)	44
Resistência à tracção, R _m (MPa)	1410
Força de deformação, R _{p 0,2} (MPa)	1170
Alongamento, A ₅ (%)	12
Estricção, Z (%)	50

Enquanto que acima se apresentaram as propriedades mecânicas à temperatura ambiente, na Figura 34 ilustra-se a variação das mesmas numa gama de temperaturas alargada. Na

Figura 33, apresenta-se a variação da dureza com o tempo e a temperatura, verificando-se que, decorrido o mesmo espaço de tempo, a dureza é tanto maior quanto menor a temperatura.

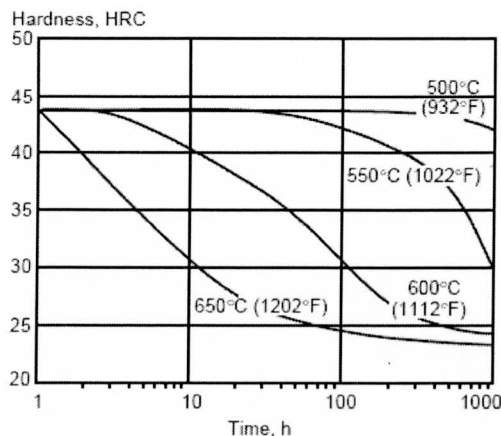


Figura 33 - Efeito do tempo e da temperatura na dureza.

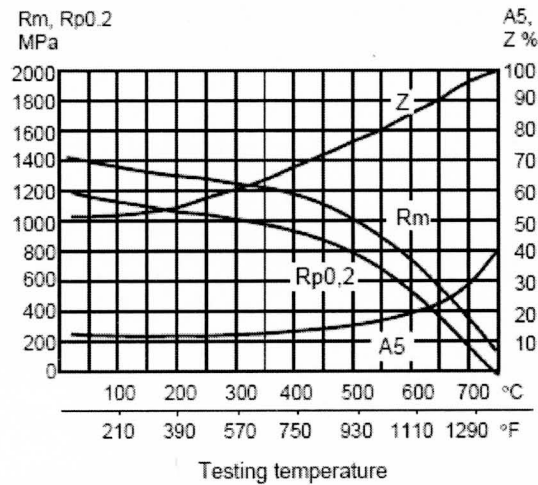


Figura 34 - Variação das propriedades mecânicas com a temperatura.

10.5.1. Aplicações

Este aço é indicado para: construção de moldes para peças de plástico e fundição injectada de ligas leves, ferramentas de extrusão de metais leves, matrizes de estampagem, lâminas de corte a quente, anéis de armação, cilindros e sem-fins plásticos.

10.5.2. Tratamento de endurecimento superficial a efectuar no *squeeze pin* e no casquilho.

10.5.2.1 Nitruração

É um tratamento termoquímico de difusão de azoto nas superfícies das peças, por aquecimento a temperaturas adequadas e durante um certo tempo.

O azoto, tal como o carbono, é difundido no espaço interatômico da ferrite, provocando uma dilatação e uma distorção da rede cristalina que origina um aumento de dureza e melhoria de outras características.

A nitruração tem como objectivo aumentar a resistência ao desgaste, à corrosão e à fadiga, atenuar o atrito e evitar a adesão de metais, ou seja, o fenómeno de colamento característico da injeção de ligas leves, dos punções e ferramentas de corte.

10.5.2.2 PVD – Physical Vapour Deposition

Processo de revestimento fino (espessura de 2-5 μ m) de deposição em vácuo onde um material é transformado em vapor, transportado e, por fim, depositado na superfície de um substrato (Figura 35). As suas características são apresentadas na Tabela 24 :

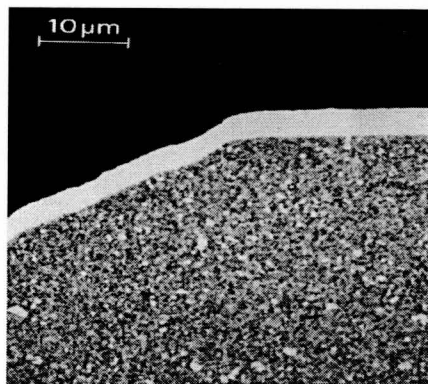


Figura 35 – Ampliação de uma imagem do revestimento em PVD.

Tabela 24 – Características do revestimento.

Material do revestimento	TiAlN
Microdureza HV	3300
Coefficiente de atrito contra o aço	0,30 – 0,35
Tensão interna (Gpa)	-1,3 / -1,5
Temperatura máxima de aplicação (°C)	900
Cor do revestimento	cinza violeta
Estrutura do revestimento	nanoestruturado

10.6 Desenho esquemático do *squeeze pin*

A Figura 36 ilustra a composição do *squeeze pin* a implementar; o número (1) representa a estrutura do molde e o (2) representa a inserção. Na inserção é aberto um furo que recebe o casquilho guia, representado pelo número (3). O casquilho não está aparafusado à inserção, estando o seu movimento limitado pela estrutura do molde. Apesar disto implicar o fabrico de um casquilho mais complexo do que seria necessário se o casquilho fosse aparafusado directamente à inserção, optou-se por esta solução porque os parafusos ficavam pouco acessíveis e por motivos económicos (sugestão dos fornecedores); como a remoção deste casquilho implica uma desmontagem do molde

fixo, optou-se por escolher um casquilho com uma dureza superficial maior, de modo a prolongar o seu tempo de vida. Deste modo a avaliação do estado do casquilho é feita durante o alívio de tensões a efectuar periodicamente no molde.

Dentro do casquilho, movimenta-se o perno de compactação da unidade de *squeeze pin*, representado pelo número (6).

É aberta uma cavidade na estrutura onde é alojado o cilindro hidráulico, representado pelo número (5). O cilindro é fixo à estrutura através de 4 parafusos, sendo dois dos furos do cilindro roscados até ao meio do cilindro, para facilitar a desmontagem do sistema de *squeeze pin*. O número (4) representa a tampa que é colocada entre o cilindro e o prato fixo da máquina.

O perno de compactação é ligado ao cilindro de accionamento através de uma união (porta *squeeze pin*), representada pelo número (7), que permite transmitir o movimento do cilindro para o perno.

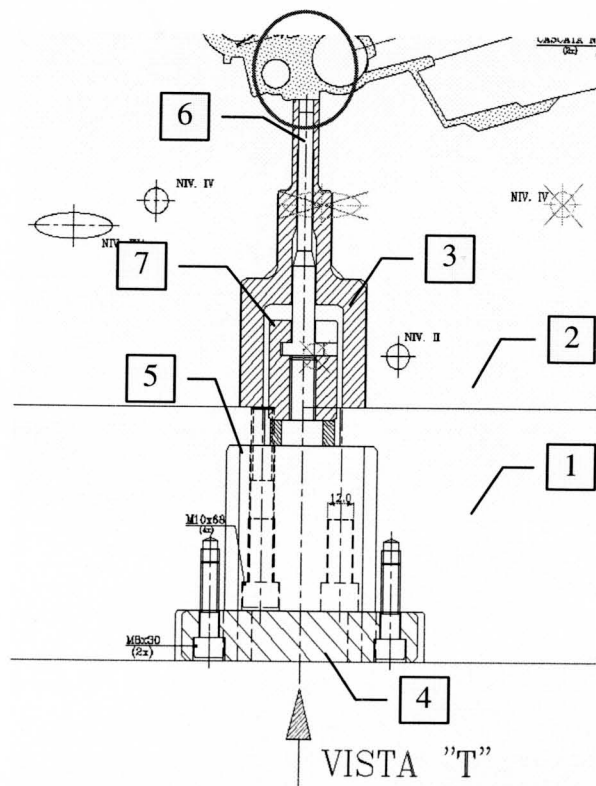


Figura 36 – Desenho esquemático da unidade de *squeeze pin* (vista “T”).

Na Figura 37 está representada outra vista do sistema de *squeeze pin*. Nesta figura, é visível o detector de fim-de-curso e o mecanismo que permite actuar o detector aquando do recuo do cilindro; o número (1) representa o detector, o número (2) representa o suporte que permite fixar o detector à estrutura do molde e o número

(3) representa o braço de metal que está acoplado ao pistão do cilindro de accionamento e que actua o fim-de-curso quando o cilindro recua.

Ao projectar o mecanismo que permite actuar o detector foram consideradas duas soluções alternativas. A primeira consistia em colocar o detector no exterior do molde. Para actuar o detector seria aberto um furo na inserção e na estrutura do lado fixo do molde, paralelo ao prato fixo da máquina e, dentro desse furo, deslocar-se-ia uma vareta que, quando o cilindro recua, actua o detector. Se a solução escolhida fosse esta, a união (porta *squeeze pin*) entre o cilindro teria que ser cónica para permitir transmitir o movimento da união à vareta e desta ao detector. O avanço da vareta seria feito por uma mola. Esta solução acabou por ser posta de lado porque o *squeeze pin* foi implantado num molde já existente e o furo que seria necessário abrir implicaria alterações nos furos de refrigeração e de aquecimento; para além deste inconveniente, como o curso do perno de compactação é relativamente pequeno (6mm), seria necessário um detector mais sensível do que os actualmente utilizados na empresa, uma vez que, a um curso da vareta de 6mm, corresponderia um curso da vareta de menos de 1mm (dependendo do ângulo da união - porta *squeeze pin*).

Pelas razões acima apresentadas optou-se por utilizar o mecanismo descrito na Figura 37.

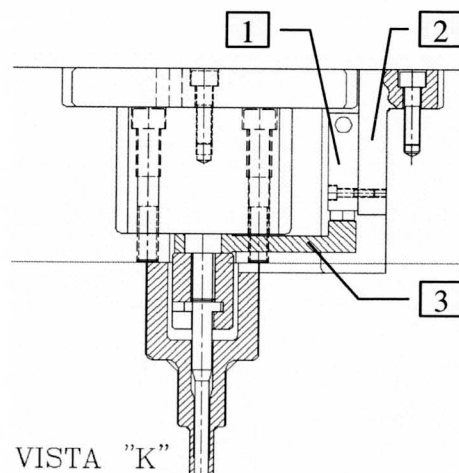


Figura 37 - Desenho esquemático da unidade de *squeeze pin* (vista "K").

Na Figura 38 está representada uma vista de trás do lado fixo do molde. Nesta figura é visível, representado com o número (1), o rasgo aberto na parte traseira do molde que permite a passagem do cabo eléctrico do detector e, com o número (2), o furo na tampa representada na Figura 37 com o número (4).

Este furo é utilizado para desmontar a unidade de *squeeze pin*. Sendo necessário substituir algum componente da unidade, a tampa é desaparafusada e rodada 90° e, posteriormente, são introduzidos dois parafusos no furo (2) e nos furos do cilindro previamente roscados.

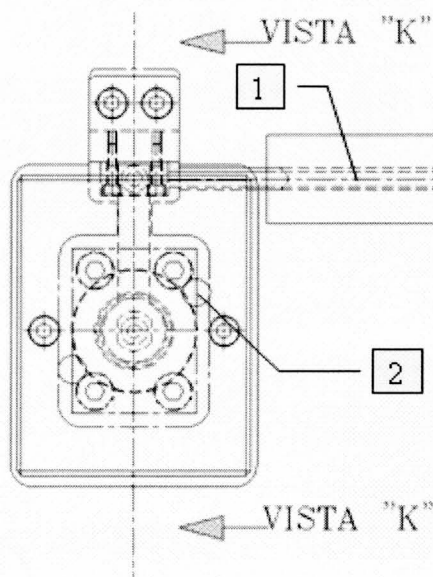


Figura 38 - Desenho esquemático da unidade de *squeeze pin*.

10.6.1. Imagem em 3D das alterações na estrutura do molde

A introdução do *squeeze pin* obrigou à abertura de um cavidade (2) para receber o cilindro que acciona o perno de compactação, um canal (3) para a passagem das mangueiras em que circula o óleo que actua o cilindro e um canal (1) por onde passam os fios eléctricos que ligam o detector à máquina, como é visível na Figura 39.

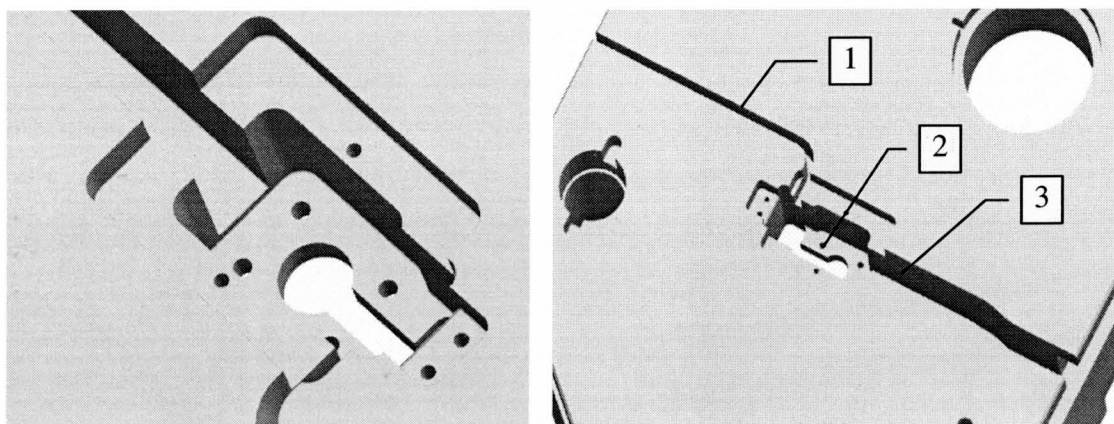


Figura 39 - Imagem em 3D das alterações na estrutura do molde.

10.7 Alteração dos canais de água e de óleo

A introdução do *squeeze pin* implicou a alteração dos canais de água e de óleo existentes porque foram abertas cavidades que cortavam esses canais. Nas Figura 40 e Figura 41 estão representados os canais existentes e as alterações que foram feitas. A verde está representado o circuito de água, a vermelho o de óleo e a azul e branco as alterações aos respectivos circuitos.

No circuito de água foi prolongado um canal já existente e abriram-se dois novos canais para desviar o circuito original das cavidades que foram abertas para a introdução do *squeeze pin*. Para o circuito do óleo foi necessário prolongar dois canais já existentes e abrir um canal paralelo ao original mas num nível inferior (nível IVA); um nível inferior porque, caso este canal se mantivesse no nível IV, passaria a distar 1mm da gaveta representada na Figura 40 com o número (1).

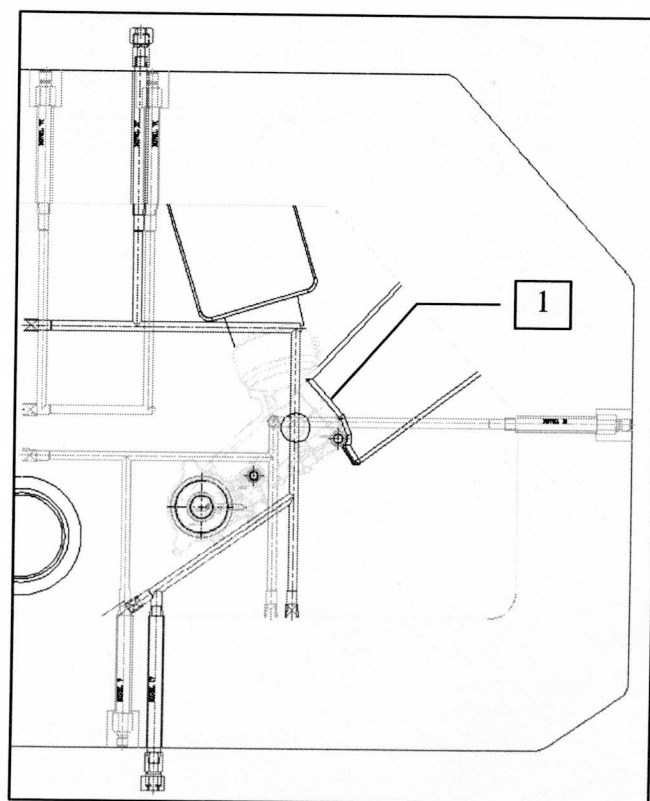


Figura 40 - Canais de óleo e de água existentes.

As alterações nos circuitos de água e de óleo foram feitas após discussão das várias alternativas possíveis com os responsáveis do controlo de processo.

Foi sugerido pelos engenheiros do controlo do processo que se aproximasse o canal do óleo do copo do filtro. De resto, optou-se por uma distribuição dos canais semelhante à que existia, de modo a minimizar os efeitos negativos que uma alteração poderia provocar.

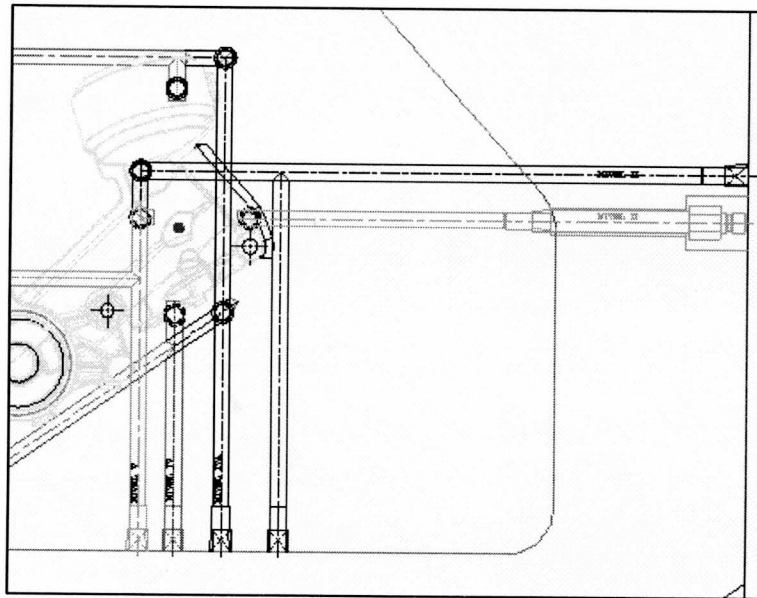


Figura 41 - Alterações nos circuitos de água e de óleo.

11. Simulação de enchimento

O principal objectivo de uma simulação é permitir antecipar o desenrolar do processo e eliminar erros de projecto que poderiam pôr em causa a qualidade das peças obtidas. É igualmente útil na optimização das variáveis intervenientes no processo.

O fabrico de peças defeituosas origina um aumento de custos e uma perda de tempo de operação. Tentar melhorar a qualidade das peças obtidas através de um processo de tentativa e erro provoca atrasos. Através da utilização de *software* de simulação podemos prever situações e alterá-las se necessário. Existem actualmente vários tipos de *software* de simulação que auxiliam no desenvolvimento do produto, como o Magmasoft^R ou o Flow3D^R.

Com este tipo de *software*, é possível escolher os canais de enchimento de forma a assegurar sempre um correcto enchimento da peça e otimizar o perfil de velocidades do pistão de injeção, reduzindo as hipóteses de obter porosidades na peça causadas pela entrada de ar no molde durante a injeção. Permite ainda ajustar os canais de refrigeração e a temperatura do molde, de modo a evitar a formação de rechupes no produto da fundição.

Um dos grandes objectivos é a optimização da taxa de solidificação e a obtenção de uma peça de qualidade com uma taxa de solidificação uniforme, o mais rapidamente possível.

A simulação implica a definição de um modelo CAD de um produto, o desenvolvimento, através de meios informáticos, do molde em que a peça será produzida, a realização de testes ao produto sob diferentes condições, a análise do comportamento do mesmo e modificação do modelo de forma a melhorar o seu comportamento. A simulação por computador torna mais fácil a avaliação do comportamento de um produto antes da sua implementação. É possível construir vários modelos que podem ser testados e comparados posteriormente. A simulação ajuda à celeridade do processo de desenvolvimento, visto prescindir de modelos físicos de um produto e do meio ambiente. Ao invés, utiliza modelos projectados em computador economizando tempo e dinheiro.

Usualmente a simulação divide-se em pré-processamento (construção do modelo), processamento (simulação propriamente dita) e pós-processamento (análise de resultados).

A empresa Kupper & Schmidt, empresa de fundição injectada localizada em Oliveira de Azeméis permitiu utilização do *software* **Flow3D^R** para efectuar a simulação. A empresa Metal Progres, membro do grupo EurAlcom, da República Checa, que está a iniciar a produção do suporte de filtro, utilizado neste projecto para introduzir a tecnologia dos *squeeze pins*, forneceu uma simulação de enchimento feita usando o *software* **Magmasoft^R**.

11.1 Requisitos necessários para se efectuar a simulação de enchimento

Para que se possa efectuar a simulação, é necessário ter um ficheiro do gito, cujo enchimento se pretende simular, num dos seguintes formatos:

- Geometria CAD 3D (formatos nativos do SolidWorks ou CATIAV5)
- Parasolid versão 9 (SolidWorks ou Unigraphics)
- STEP (CATIAV5)
- IGES ou Step (protocolo n.214) (ProEngineer)

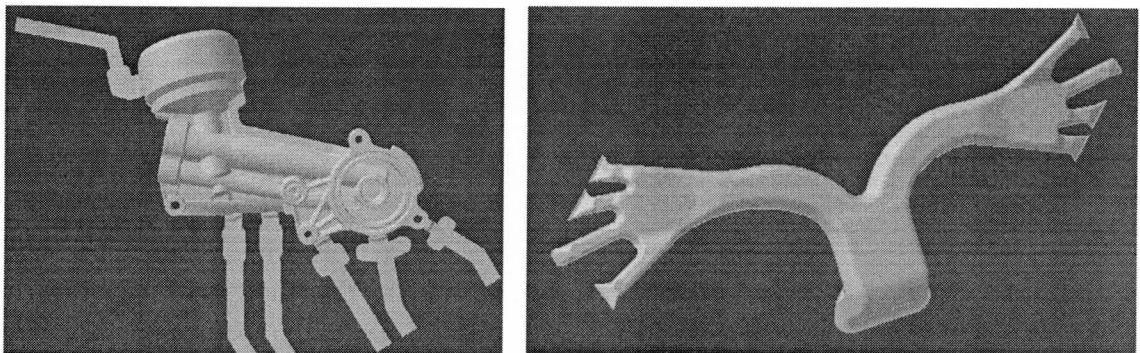


Figura 42 – Imagem 3D do canal da alimentação e da peça (pré-processamento para a simulação de enchimento em Flow3D^R)

11.2 Parâmetros necessários para efectuar a simulação

Para efectuar a simulação de enchimento são necessários os seguintes parâmetros:

- tipo de liga;
- temperatura;

- velocidade do pistão;
- pressão de compactação;
- tempo de enchimento;
- curso da 1ª fase;
- curso da 2ª fase;
- taxa de enchimento;
- peso da peça;
- espessura mínima e média da peça;
- dimensões da bolacha: espessura e diâmetro, se não estiver representada no modelo.

11.3 Análise da simulação de enchimento efectuada através do *software* MagmasoftR

Como já foi mencionado anteriormente, a liga utilizada na produção da peça em questão é a liga AlSi9Cu3 e o aço usado no fabrico do molde é o X38CrMoV5_1. Na Tabela 25 apresentam-se os parâmetros do processo necessários para realizar a simulação.

Tabela 25 – Parâmetros necessários para a realização da simulação em Magmasoft^R.

Peça	Liga	AlSi9Cu3
	Temperatura de injeção	650 °C
Molde	Material	X38CrMoV5_1
	Temperatura	200 °C
	Diâmetro do pistão	90 mm
	Velocidade do pistão – 1ª fase	0,4 m/s
	Velocidade do pistão – 2ª fase	3,2 m/s
	Tempo de transição da 1ª para a 2ª fase	0,05 s
Refrigeração	Meio	Água
	Temperatura	30 °C

11.3.1. Distribuição de temperatura durante o enchimento

Nas figuras que se seguem pode visualizar-se a distribuição de temperaturas durante o enchimento da peça. Na Figura 43 é visível a distribuição de temperaturas 0,641s após o início do enchimento do molde, numa fase em que cerca de 50% do gito se encontra cheio. Nesta fase a liga encontra-se a uma temperatura compreendida entre os 642 e os 650 °C.

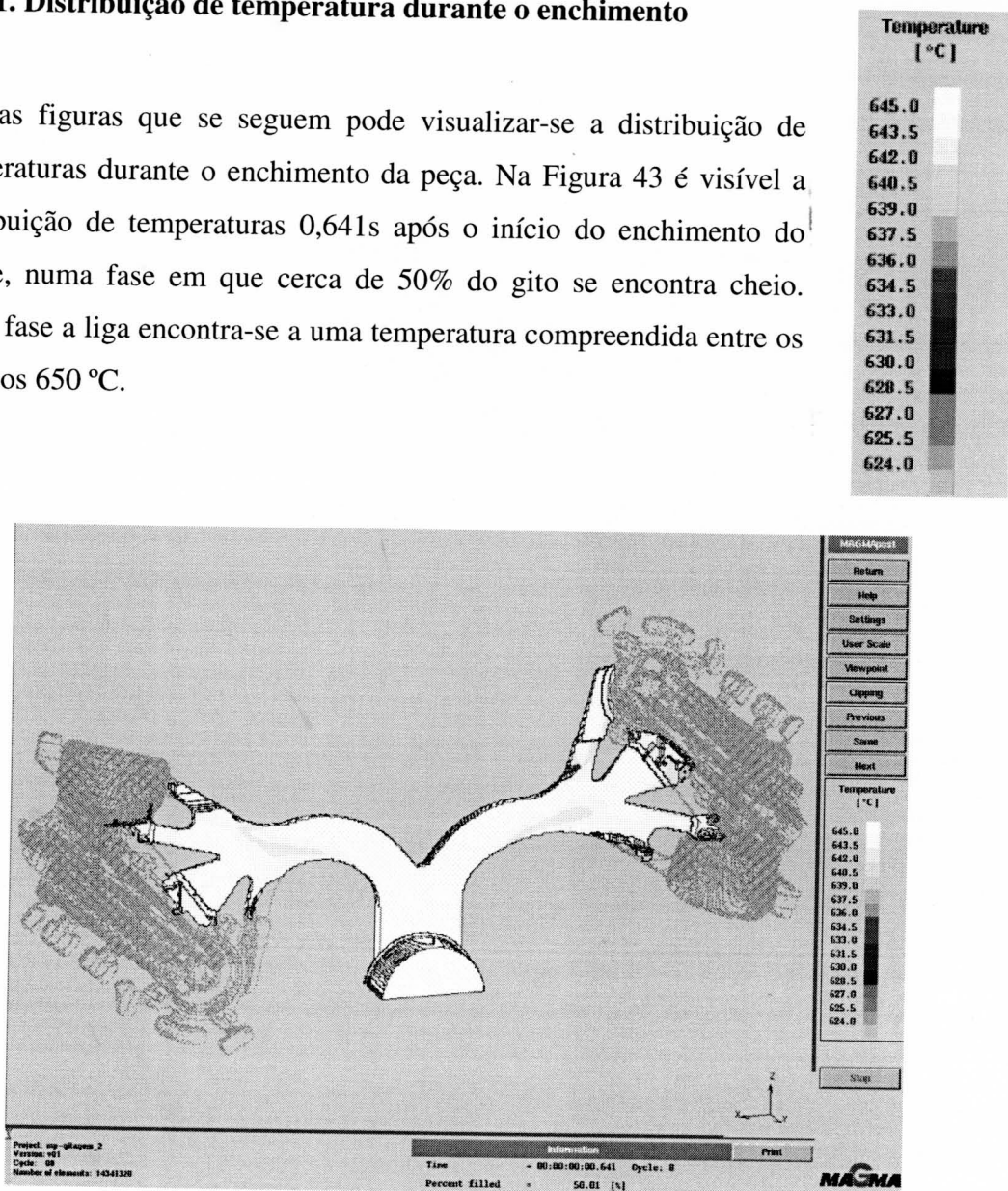


Figura 43 - Distribuição de temperaturas 0,641s após o início do enchimento do molde.

A próxima figura (Figura 44) representa a distribuição de temperaturas 0,656s após o início da injeção e quando 76% do gito já se encontra cheio. Nesta altura o intervalo de temperaturas varia entre os 650 °C do canal de alimentação, que é obviamente a parte do gito que se encontra a maior temperatura, e os 630 °C de certas zonas da peça.

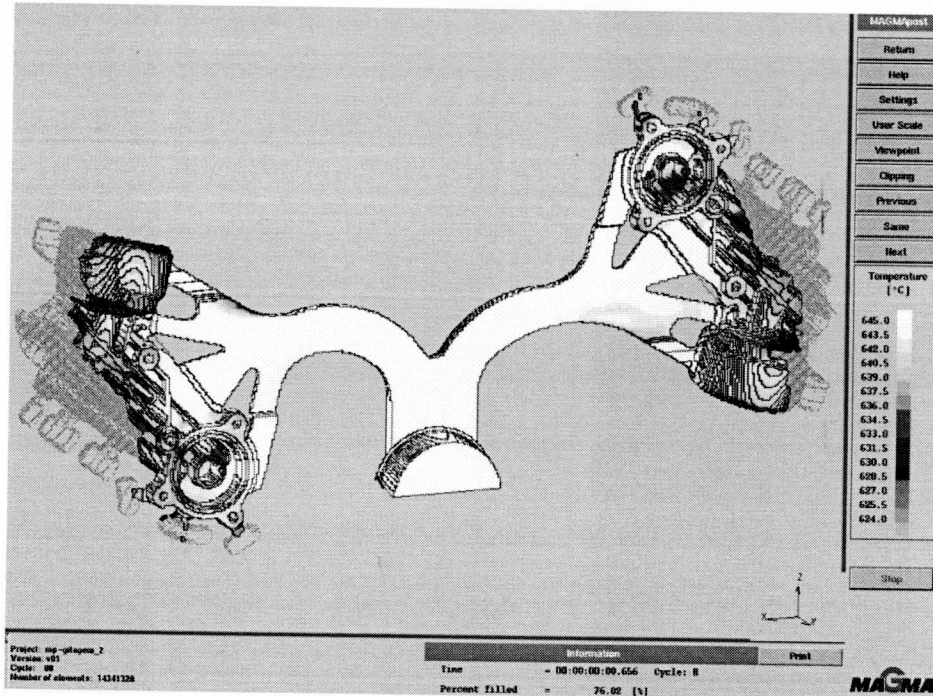


Figura 44 - Distribuição de temperaturas 0,656s após o início do enchimento do molde.

De seguida pode ver-se a distribuição de temperaturas após o enchimento completo do gito (Figura 45), 0,67 segundos após o início do enchimento. O canal de enchimento está a uma temperatura perto dos 650 °C e deve ser a ultima parte da peça a solidificar de modo a permitir a compactação da peça durante a 3ª fase da injecção.

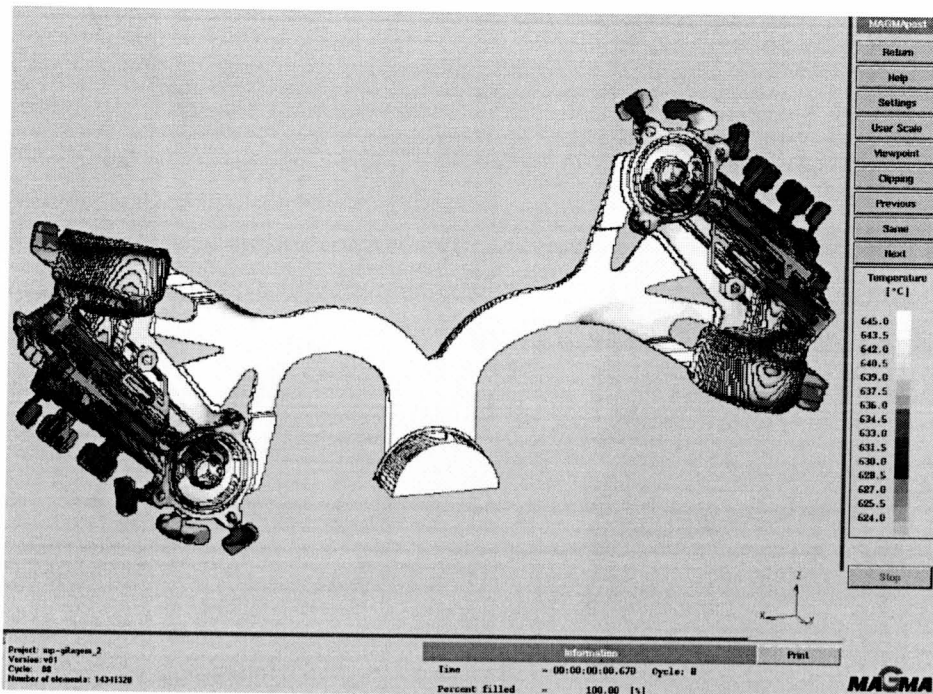


Figura 45 - Distribuição de temperaturas 0,67s após o início do enchimento do molde.

A Figura 46 mostra a distribuição de temperaturas no interior de uma das peças ao longo de vários períodos de tempo durante o enchimento.

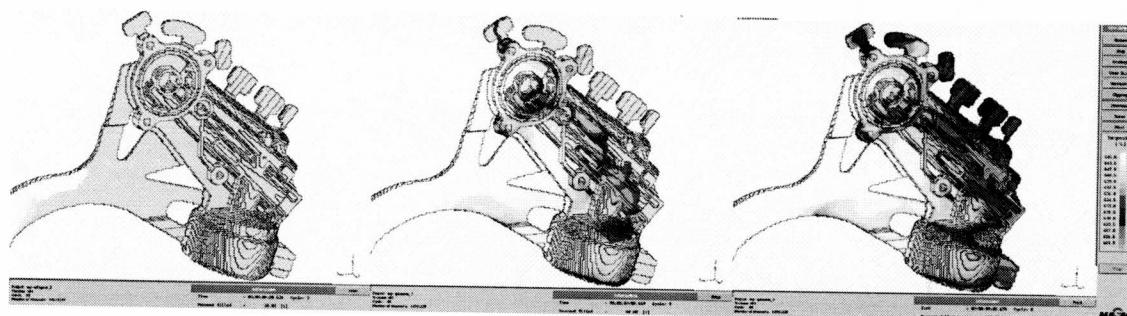


Figura 46 - Distribuição de temperaturas no interior de uma das peças ao longo do período de enchimento.

11.3.2. Velocidade do metal durante o enchimento do gito

Na Figura 47 apresenta-se o gradiente de velocidades que se estabelece nas zonas do gito durante o enchimento. A velocidade varia entre os 500 e os 5000 cm/s e, como seria de esperar, é maior nas zonas de ataque da peça e na entrada dos masselotes. Os valores da velocidade nestas zonas estão dentro dos valores recomendados pela Buhler (20 – 60m/s).

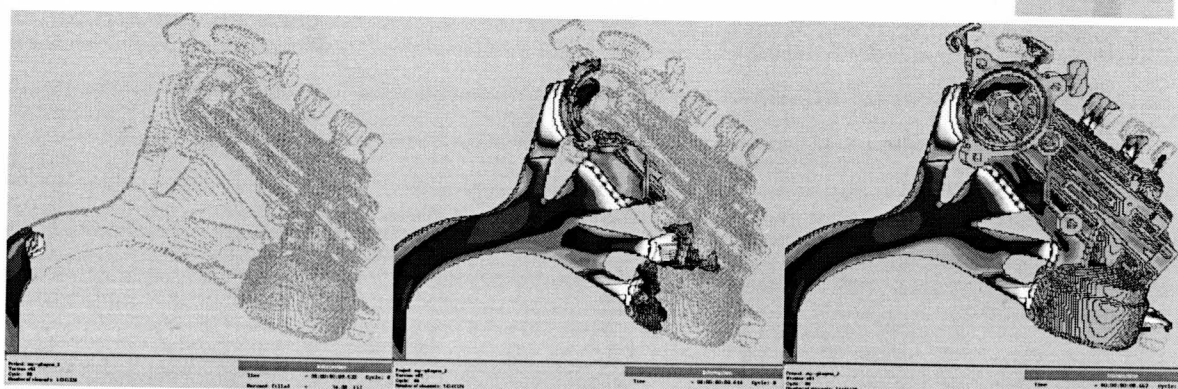
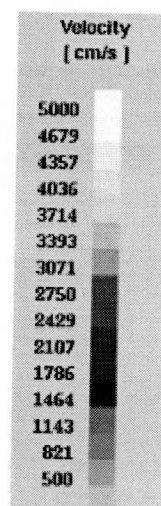


Figura 47 - Gradiente de velocidades que se estabelece nas zonas do gito durante o enchimento.

11.3.3. Solidificação

Esta parte da simulação é importante pois permite obter uma estimativa do tempo mínimo a aguardar para a entrada do *squeeze pin*. Enquanto o ataque não estiver

solidificado, o *squeeze pin* não deve actuar, uma vez que a peça está ainda a ser compactada pelo pistão de injeção.

A Figura 48 ilustra a temperatura da liga no interior do gito decorridos 0,946 segundos após o seu completo enchimento, encontrando-se já cerca de 5,79% solidificado. Nesta fase da solidificação, a temperatura oscila entre 530 e 580°C.

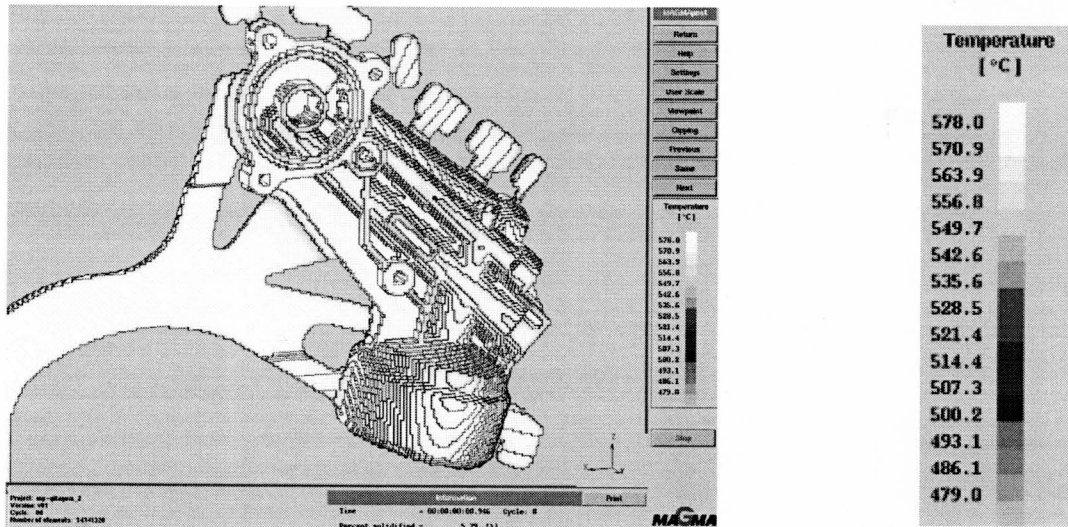


Figura 48 - Distribuição de temperaturas a 5,79% de solidificação.

Como se pode verificar pela análise da Figura 49, passados 1,64s do enchimento completo da peça, a temperatura na zona de ataque varia entre os 500 e os 550°C e encontra-se já solidificado cerca de 26% do gito.

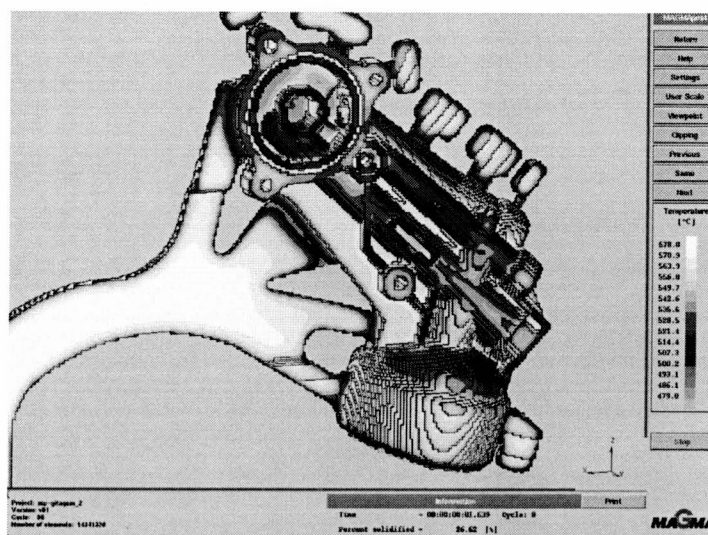


Figura 49 - Distribuição de temperaturas à 26% de solidificação.

Decorridos 2,9s verifica-se que o ataque se encontra completamente solidificado (Figura 50). Estabelece-se pois 3s como tempo mínimo de atraso para a actuação do *squeeze pin*.

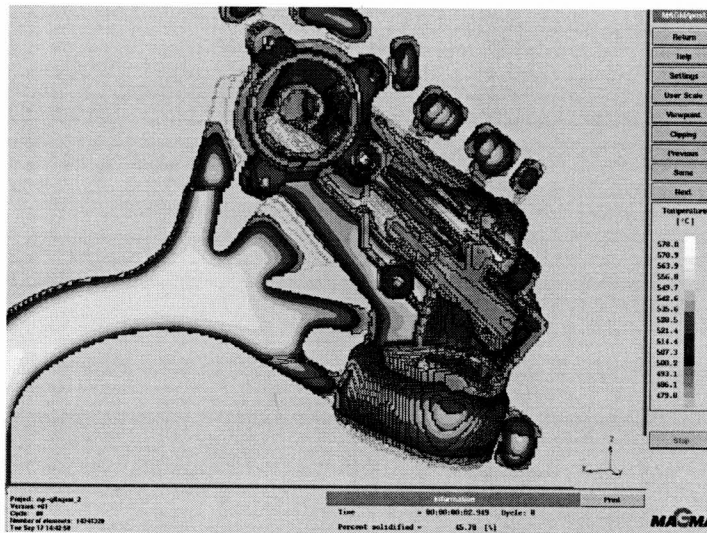


Figura 50 - Distribuição de temperaturas com solidificação total do ataque.

Na imagem seguinte comprova-se a existência de um ponto quente onde se verifica a ocorrência de poros causados por contracção do metal durante a solidificação. Isto mesmo era já notado na análise de controlo de qualidade da peça e constituí o motivo pelo qual se decidiu aplicar a tecnologia de *squeeze pin* no sentido de eliminar a porosidade verificada. Passados 16s do enchimento completo do gito, este ponto da peça encontra-se ainda a cerca de 480°C.

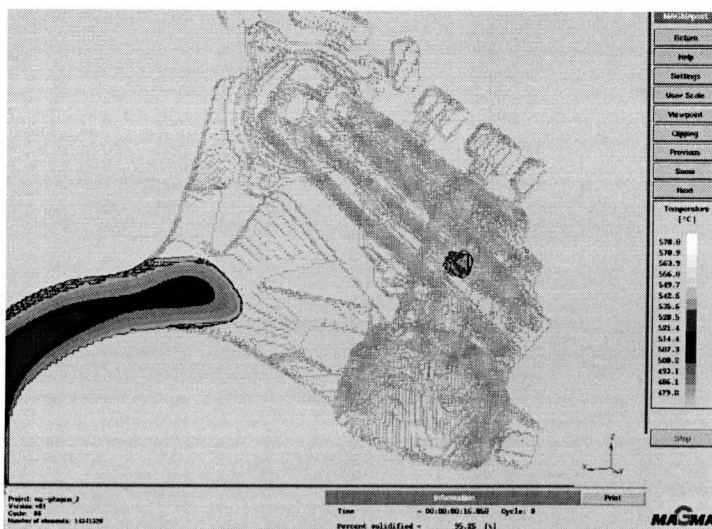


Figura 51 - Distribuição de temperaturas 16s após o início do enchimento do gito.

Os mesmos 16s acima referidos estão patentes na Figura 52 que ilustra o gradiente de tempo de solidificação da peça.

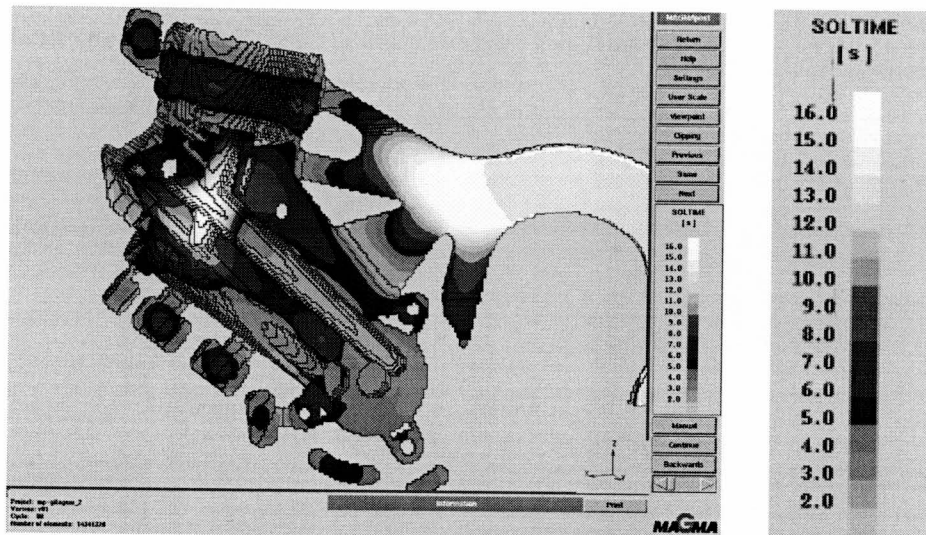


Figura 52 - Gradiente do tempo de solidificação.

A existência de rechupes no interior da peça é igualmente comprovada pela Figura 53, onde se mostra que, na zona de actuação do *squeeze pin*, existe uma lacuna de material resultante da contracção do metal durante o arrefecimento.

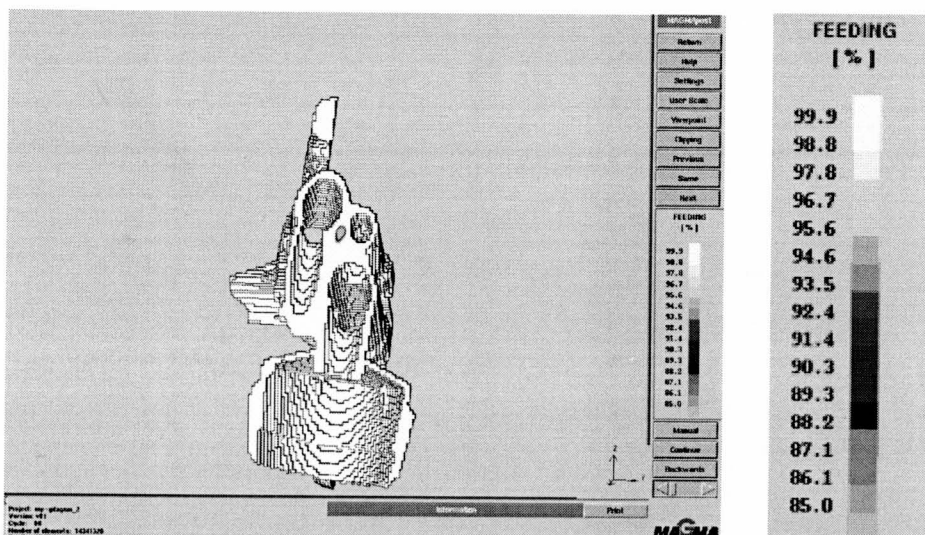


Figura 53 – Pormenor da peça onde se evidencia a existência de fenómenos de *shrinkage*.

11.3.4. Pressão do ar no interior do molde

Um dos tipos de porosidade que pode ocorrer na peça deve-se à existência de bolhas de ar aprisionadas no seu interior. A monitorização da pressão no interior do molde apresentada na Figura 54 é útil na medida em que permite determinar zona críticas onde a pressão é consideravelmente mais alta, podendo originar bolhas de ar no interior da peça. Mais concretamente na zona inferior direita da peça, a pressão atinge cerca de 5500mbar, o que pode ser razão suficiente para que se repense o dimensionamento do masselote e da respectiva saída de ar.

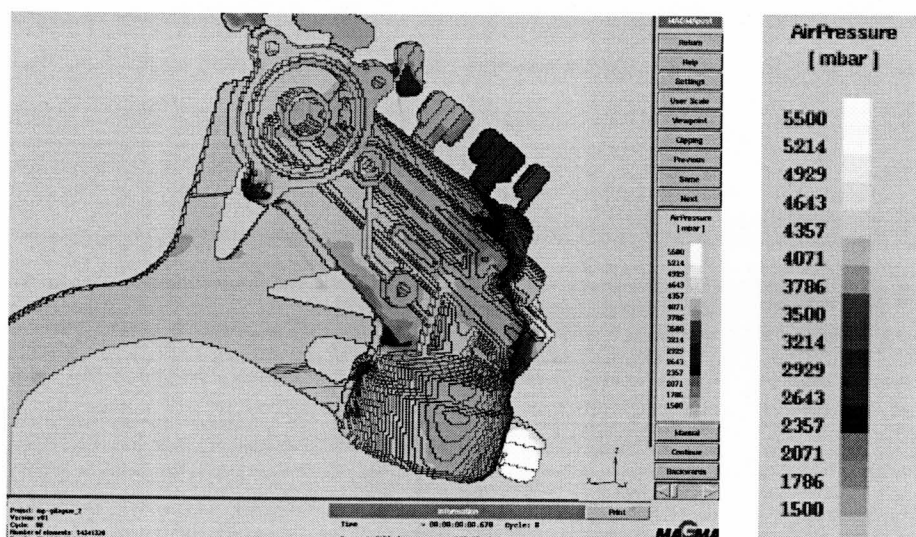


Figura 54 – Monitorização da pressão na peça.

11.4 Conclusão da análise em Magmasoft

Como a simulação foi efectuada posteriormente ao desenvolvimento do projecto do molde não foram aproveitadas todas as vantagens resultantes da utilização deste *software*. Uma simulação durante a fase de projecto permite, por exemplo, testar várias soluções alternativas para o canal de enchimento, escolher a posição e dimensões ideais dos masselotes, idealizar a localização dos canais de água ou de óleo de forma a evitar o aparecimentos de defeitos de fundição que estão relacionados com um projecto mal desenvolvido. A simulação de enchimento permite ao projectista detectar erros que de outra forma só se tornariam evidentes durante o funcionamento do molde. Isto, como é óbvio, tem grande importância em termos económicos para a empresa. Um projecto mal

executado implica que o molde seja sujeito a uma série de alterações, durante a sua vida útil, para corrigir erros que poderiam ser facilmente evitados.

No projecto de *squeeze pin*, a simulação serviu principalmente para comprovar a existência de um ponto quente, responsável pelo aparecimento de *shrinkage* na zona da peça em que este actua. Foi também importante para obter uma estimativa do tempo mínimo a aguardar para a entrada do *squeeze pin*.

Embora não fosse esse o seu objectivo inicial, comprovou a existência de pressões localizadas no interior do molde, que podem ser responsáveis pelo aparecimento de bolhas no interior das paredes da peça. Estes poros são por vezes responsáveis por problemas de falta de estanquicidade e por uma percentagem de refugo considerável, resultante do aparecimento de poros no copo do filtro, visíveis após maquinagem, fora dos critérios aceitáveis para esta parte da peça. Isto levou a que fosse repensada a localização e dimensão do masselote e respectiva saída de ar existente nessa área.

12. Ensaio do *squeeze pin*

O molde onde se introduziu o *squeeze pin* tem duas cavidades. No entanto, o *squeeze pin* foi introduzido apenas numa cavidade porque a máquina só estava preparada para uma unidade de *squeeze pin*. Como o projecto tinha um prazo relativamente curto para ser implementado, considerou-se que a melhor solução seria aproveitar a unidade presente na máquina para desenvolver a tecnologia, preparando mais tarde, em função dos resultados obtidos, as máquinas de injeção para receberem as unidades de comando de *squeeze pin* necessárias.

Esta situação acabou por se revelar valiosa para analisar os efeitos da actuação do *squeeze pin*, permitindo comparar duas peças produzidas sob condições idênticas, em que apenas uma delas sofreu intervenção do sistema de compactação externa. As imagens das peças durante a análise do efeito da aplicação do *squeeze pin* referem-se a peças do mesmo gito.

Na Tabela 26 estão presentes os parâmetros de injeção utilizados no ensaio.

Tabela 26 – Parâmetros de injeção utilizados durante o ensaio do *squeeze pin*.

Parâmetros de injeção	
Tempo de enchimento	0,04 s
Velocidade do pistão – 1ª fase	0,4 m/s
Velocidade do pistão – 2ª fase	3,2 m/s
Tempo de ciclo	66 s
Tempo de solidificação	12 s
Tempo de transição da 1ª para a 2ª fase	0,05 s
Pressão final	980 bar

De acordo com as indicações fornecidas pela simulação de enchimento, definiu-se 3s como atraso do tempo de entrada (**t Sqx in**)¹. Este tempo é contado a partir do momento de passagem da fase de enchimento para a fase de compactação (**S:SqStart = 1**).[†] Para o tempo de duração da compressão, o valor escolhido foi 8s. O valor do atraso

[†] **Nota:** uma descrição mais pormenorizada do significado de cada um dos parâmetros de controlo do *squeeze pin* pode ser encontrado na introdução teórica feita a esta tecnologia no Capítulo 7.

do tempo de entrada e o tempo de duração da pressão estão limitados pelo tempo de arrefecimento da liga no interior do molde, que é cerca de 12s.

Na Figura 55 está ilustrada a página de comando da unidade de *squeeze pin* existente na máquina.

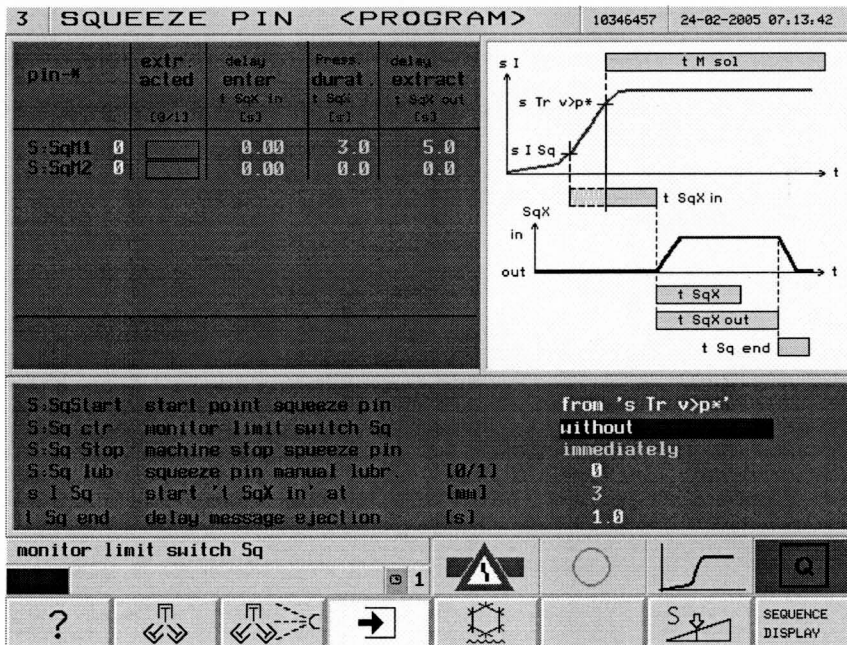


Figura 55 - Ilustração da página da unidade de comando.

Após o ensaio inicial, as peças foram submetidas a um controlo de qualidade, que consistiu numa análise ao raio-X e corte da peça para analisar visualmente os efeitos da actuação do *squeeze pin*. Apesar dos defeitos de *shrinkage* da peça que sofreu a actuação do *squeeze pin* serem menores que os da peça, do mesmo gito, que não sofreu o efeito da compactação externa, concluiu-se que que o valor escolhido para o atraso do tempo de entrada não era o ideal.

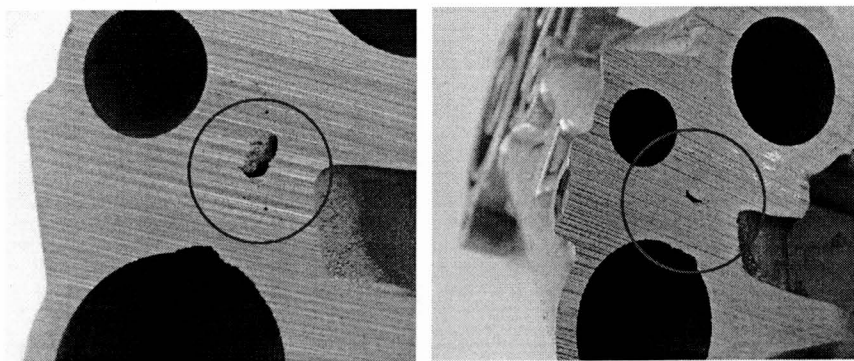


Figura 56 – Corte das peças onde se evidencia a presença de poros causados por contracção do metal (atraso no tempo de entrada 3s).

Foram feitos ensaios para valores diferentes de atraso de tempo de entrada e de tempo de compressão, e os valores com os quais se obteve melhores resultados foram: 8s para o tempo de atraso e 3s para a duração da compressão. Na Figura 57 são visíveis os poros, causados por contracção do metal durante a solidificação, na peça onde não existe *squeeze pin*.

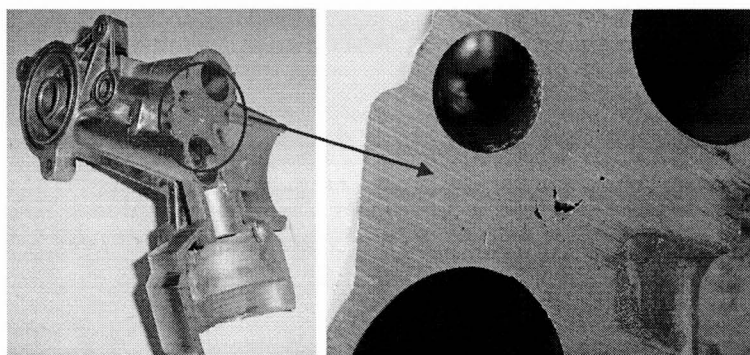


Figura 57 – Pormenor da peça que não sofreu acção do *squeeze pin*.

Na Figura 58 é visível o resultado que a actuação do *squeeze pin* teve na redução dos defeitos de *shrinkage*. Salienta-se de novo que as peças representadas nas Figura 57 e Figura 58 pertencem ao mesmo gito.

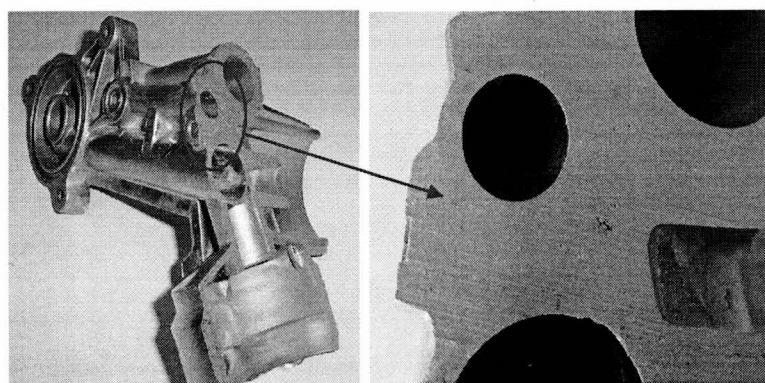


Figura 58 - Pormenor da peça que sofreu acção do *squeeze pin*(atraso no tempo de entrada 8s).

Apesar da clara melhoria que a introdução do *squeeze pin* provocou, observa-se ainda a presença, apesar de vestigial, de fenómenos de *shrinkage*. Os resultados obtidos nesta fase podem ser ainda melhores se o volume deslocado pelo *squeeze pin* for maior. Apesar de os cálculos para determinar o volume deslocado pelo perno de compactação terem sido efectuados de acordo com recomendações da Buhler e da NADCA, na fase de projecto houve o cuidado de projectar o *squeeze pin* de modo a que fosse possível

aumentar o volume deslocado com alguma facilidade. Nesse sentido foram encomendados pernos de stock com menos 2mm que os pernos representados na Figura 59.

O curso do cilindro de accionamento é de 10mm, estando esse curso limitado a 6mm como é visível na Figura 59. Tudo que é necessário para aumentar o volume deslocado pelo *squeeze pin* é trocar o perno de compactação por um de tamanho inferior e, através de uma simples operação de maquinagem, retirar 2mm ao porta *squeeze pin*.

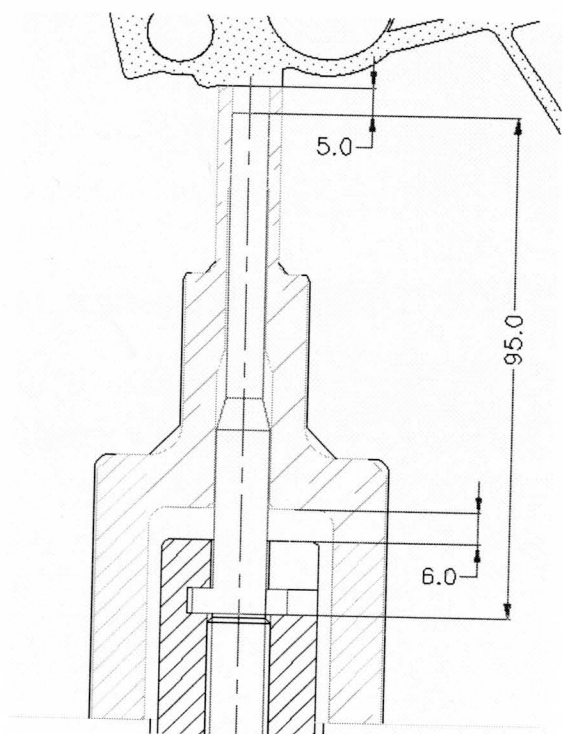


Figura 59 – Pormenor do *squeeze pin*.

Os resultados obtidos com a alteração atrás referida, e mantendo as mesmas condições de ensaio, estão ilustrados na Figura 60.

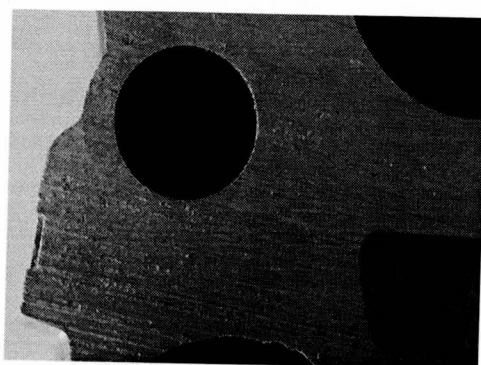


Figura 60 - Pormenor da peça que sofreu acção do *squeeze pin* (utilizando um perno mais curto).

13. Análise metalográfica

O exame metalográfico foi efectuado nos laboratórios do departamento de metalurgia da Faculdade de Engenharia.

O exame metalográfico de amostras da peça fundida pode fornecer informação importante sobre a composição, produção e tratamentos térmicos dos produtos da fundição. Este tipo de exame pode, também, dar informação sobre os efeitos das condições de serviço.

Este exame permite identificar o tipo de liga, desvios da composição da liga, presença de vazios ou inclusões. A partir do tamanho do grão, células dendríticas ou dos micro-constituintes da segunda fase, o tipo de vazios, a taxa de solidificação e o método de fundição podem ser determinados.

A espessura do revestimento superficial pode ser medida e o tipo de revestimento pode ser determinado, bem como a presença, tipo e profundidade de qualquer corrosão.

O exame de fracturas resultantes de testes ou de serviço permite determinar a principal causa responsável pelo sucedido. É possível saber se a fractura se deveu a corrosão sobre tensão, a tracção superior à resistência à tracção do material ou a uma combinação dos dois factores.

Esta informação pode mostrar que erros de projecto, escolha inapropriada da liga, falhas na maquinaria, ou outros factores contribuíram para a falha prematura da peça analisada.

A análise metalográfica é normalmente utilizada para controlo do processo, verificação da qualidade ou para determinação da causa de falhas detectadas em testes ou em serviço. As informações fornecidas por estes testes têm que ser complementadas, em muitos casos, por outros métodos de análise ou exame para se chegar a conclusões inequívocas.

Para uma investigação mais detalhada, a determinação da composição química da liga por outros meios, identificação de fases ou de características microscópicas da microestrutura, através de outros métodos pode ser necessária. Entre esses métodos está a análise espectroquímica, radiografia, microscopia electrónica por varrimento, raio-X e difractógrafo electrónico.

O exame metalográfico pode ser:

- Macroscópico – quando a ampliação linear é reduzida (<10x);
- Microscópico - quando a ampliação linear é maior que 20 vezes;

Na Figura 61 apresentam-se as imagens referentes às duas amostras. A imagem da direita corresponde à amostra retirada da peça de fundição que não esteve sujeita à actuação do *squeeze pin* e, a da esquerda, corresponde à amostra da peça em que actuou o *squeeze pin*. Estão assinaladas zonas cujas respectivas imagens ampliadas se encontram nas Figura 62 até Figura 66.

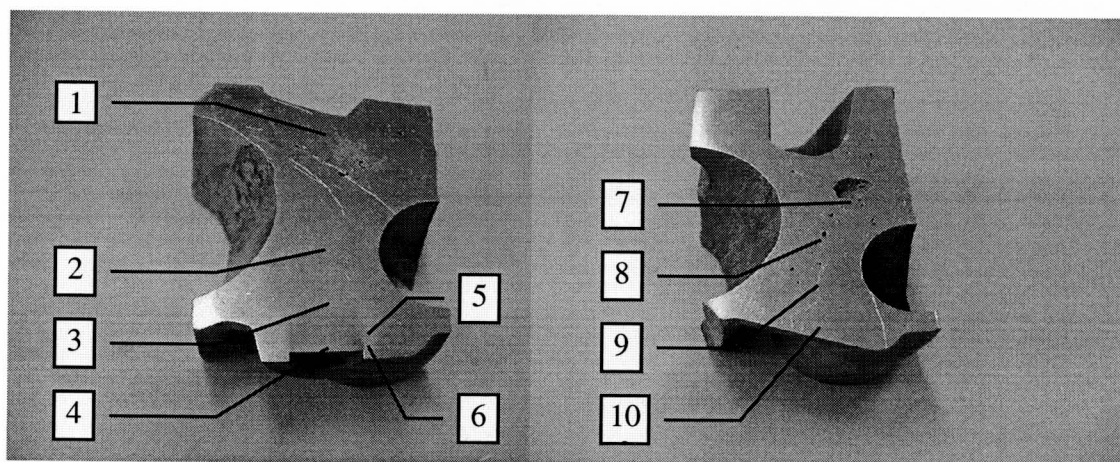


Figura 61 – Amostras da peça com e sem actuação de *squeeze pin* (da esquerda para a direita).

Em consequência da opacidade dos metais, o instrumento óptico utilizado poderá receber apenas luz reflectida, razão pela qual é absolutamente necessário que a superfície da amostra seja plana e cuidadosamente polida.

A preparação da amostra engloba a realização de toda uma série de operações cuja finalidade última é a obtenção de uma superfície plana suficientemente polida para permitir o exame metalográfico.

Entre essas operações contam-se:

- Maquinagem (esta operação foi levada a cabo na Sonafi, com a ajuda do pessoal do armazém de moldes).
- Polimento preparatório (com lixas de granulometria progressivamente mais fina)
 - Manual – movimentos alternativos
 - Mecânico – Movimento de rotação de um disco de lixa
- Polimento final
 - Mecânico – Abrasão das zonas salientes

- Químico
- Electrolítico – Dissolução electrolítica selectiva das zonas salientes.

No polimento mecânico, a amostra é comprimida sobre um disco de tecido em rotação e embebido numa suspensão de abrasivos de grão fino (por exemplo: alumina, óxido de cromo, magnésio, pó de diamante). O polimento poderá ser feito em vários passes usando grãos abrasivos sucessivamente mais finos. No caso do polimento automático, a amostra tem geralmente um movimento de pivotamento sobre o seu próprio eixo.

No polimento electrolítico, a amostra constitui o ânodo de uma célula electrolítica verificando-se uma dissolução selectiva das zonas salientes – efeito de ponta. Este processo não permite polir as inclusões ou constituintes não metálicos; tem no entanto a vantagem de não encruar nem aquecer a superfície a polir. O electrolítico, a sua agitação, a intensidade de corrente a utilizar e a temperatura serão determinadas pela liga a polir.

As amostras em causa foram sujeitas a polimento mecânico. No entanto, o contraste na superfície polida era insuficiente, pelo que foi necessário aumentá-lo, fazendo aquilo que se designa por ataque da amostra. Esse ataque pode ser:

- Químico – usando reagentes adequados;
- Electrolítico – o processo é basicamente o mesmo usado no polimento só que agora a densidade de corrente será inferior;
- Outros processos – por exemplo, oxidação a quente, bombardeamento iónico.

O ataque permite não apenas distinguir entre si os diferentes constituintes, mas permite também tornar visível a estrutura do material ao evidenciar as juntas de grão, que geralmente são mais atacadas do que a superfície dos grãos.

Neste caso as amostras foram sujeitas a ataque químico, tendo sido usada para esse fim uma solução de ácido fluorídrico em água e metanol.

13.1 Exame Macroscópico

Após preparação da amostra e a realização do ataque apropriado, um exame macroscópico dará uma imagem da heterogeneidade de uma peça metálica, permitindo localizar e identificar defeitos à escala macroscópica, geralmente relacionados com os processos tecnológicos a que a peça foi submetida.

A natureza das heterogeneidades pode ser:

- Cristalográfica – o ataque tornará visíveis os grãos de tamanho suficiente. As dimensões e a orientação dos grãos estão ligados à história do material – solidificação, laminagem, forjamento, encruamento;
- Mecânica – uma zona encruada é atacada mais facilmente e portanto a observação de uma superfície atacada pode dar uma ideia do seu grau de encruamento;
- Química – uma vez que o ataque é função da composição química, uma superfície atacada pode permitir tirar conclusões sobre a amplitude da segregação.

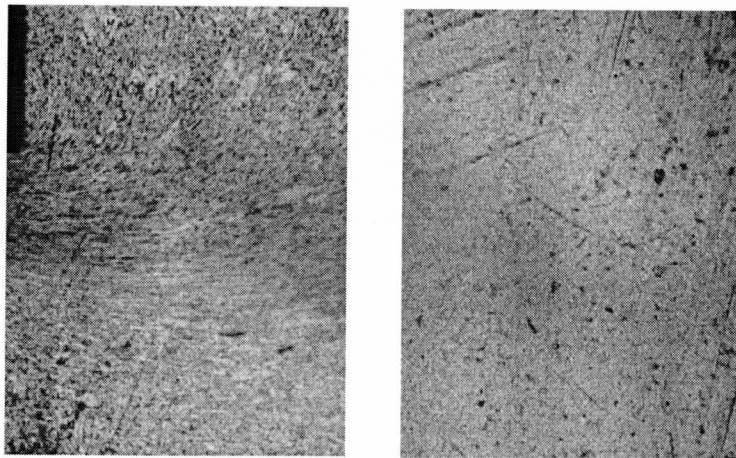


Figura 62 – Ampliações (5x) das zonas das peças assinaladas na Figura 61 com os números 6 e 10.

13.2 Exame Microscópico

A diferença entre o microscópio metalográfico e o microscópio normal reside principalmente no sistema de iluminação, já que no primeiro caso o microscópio recebe na sua ocular unicamente a luz reflectida pela amostra.

A qualidade essencial de um microscópio não é a de permitir uma ampliação particularmente forte, mas antes distinguir (evidenciar) os detalhes de um objecto o mais distintamente possível, ou seja, ter um bom poder de resolução. O poder de resolução é definido como sendo a distancia mínima de dois pontos dos quais o

instrumento dá ainda imagens suficientemente distintas quando observadas visualmente com uma ampliação suficiente.

Em seguida, apresentam-se as figuras referentes a ampliação de 50× das zonas das peças assinaladas na Figura 61 com os números (4) e (10), onde é possível verificar que a peça que sofreu a actuação do *squeeze pin* apresenta grão mais pequeno, não sendo visível uma orientação definida do mesmo.

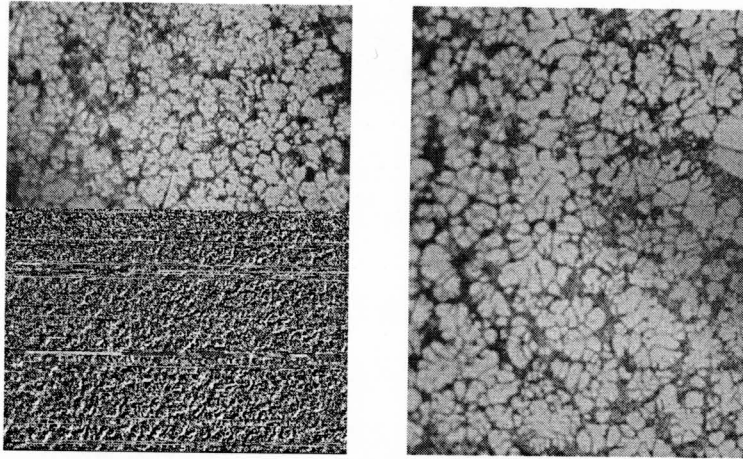


Figura 63 - Ampliações (50×) das zonas das peças assinaladas na Figura 61 com os números 4 e 10.

Em seguida, apresentam-se as figuras referentes a ampliação de 50× das zonas das peças assinaladas na Figura 61 com os números (3) e (9). Nesta figura é possível verificar o efeito da actuação do *squeeze pin* na estrutura do metal. Na imagem da esquerda é visível um alinhamento do grão, as dendrites da imagem da direita são muito mais uniformes e é perfeitamente visível que o eutectico que se forma em torno das dendrites é consideravelmente maior.

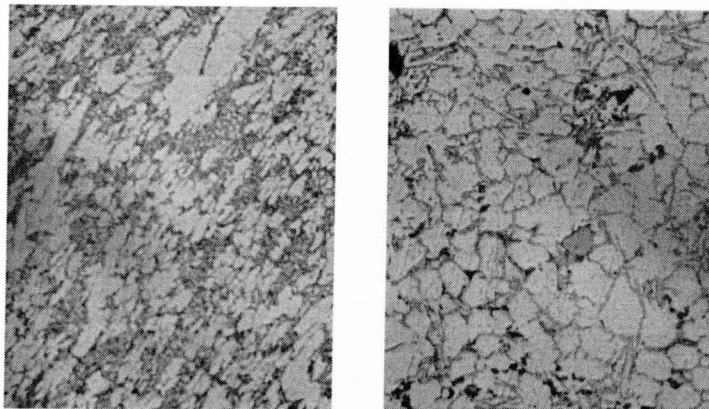


Figura 64 - Ampliações (50×) das zonas das peças assinaladas na Figura 61 com os números (3) e (9).

As imagens referentes à ampliação de 50× das zonas das peças assinaladas na Figura 61 com os números (2) e (7) estão patentes na Figura 65. Nesta figura é possível verificar o efeito da actuação do *squeeze pin* na estrutura do metal: na imagem da direita é visível um poro, que não está presente na imagem da esquerda; nesta última continua a verificar-se a ocorrência de um certo alinhamento do grão e uma diminuição do eutectico que se forma em torno das dendrites.

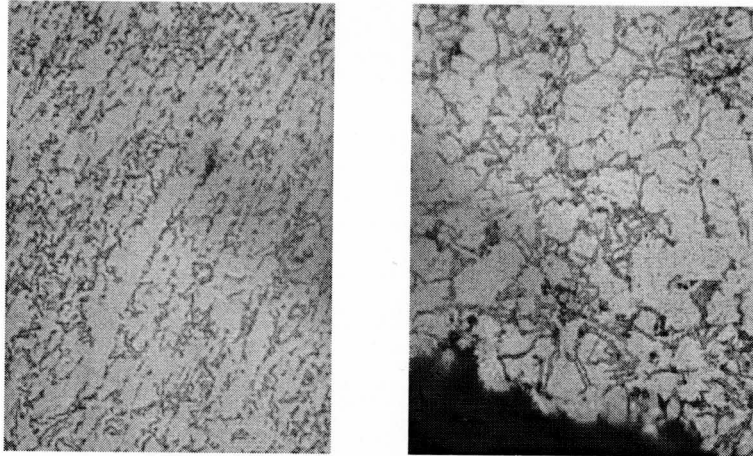


Figura 65 - Ampliações (50×) das zonas das peças assinaladas na Figura 61 com os números (2) e (7).

Na Figura 66 é perfeitamente visível a deformação plástica que o *squeeze pin* provocou na sua zona de actuação.

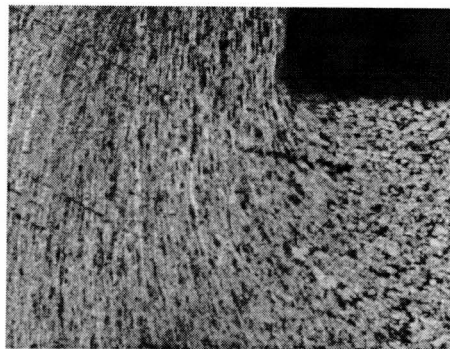


Figura 66 – Ampliação (30×) da zona de actuação do *squeeze pin*, assinalada na Figura 61 com o número (5).

14. Análise do impacto da aplicação do *squeeze pin*

De seguida é feita a análise do impacto da introdução do *squeeze pin* na diminuição dos defeitos de fundição. Na Figura 67 está representado um gráfico que mostra o valor, em percentagem, do refugo acumulado do primeiro semestre do ano.

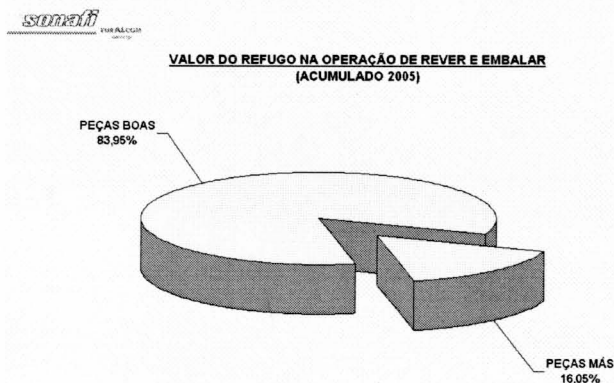


Figura 67 – Percentagem do refugo acumulado no 1º semestre do ano.

O diagrama de Pareto (Figura 68), mostra o peso da existência de poros na percentagem de refugo final. Os poros mencionados neste diagrama dizem respeito a poros causados por contracção do metal na zona em que, durante a realização deste projecto, se implementou a unidade de *squeeze pin*. Como foi dito anteriormente a presença de poros não implica o refugo imediato da peça. Para a peça ser enviada para o refugo é necessário que os poros estejam fora dos limites estabelecidos pelo critério de porosidade imposto para aquela zona da peça.

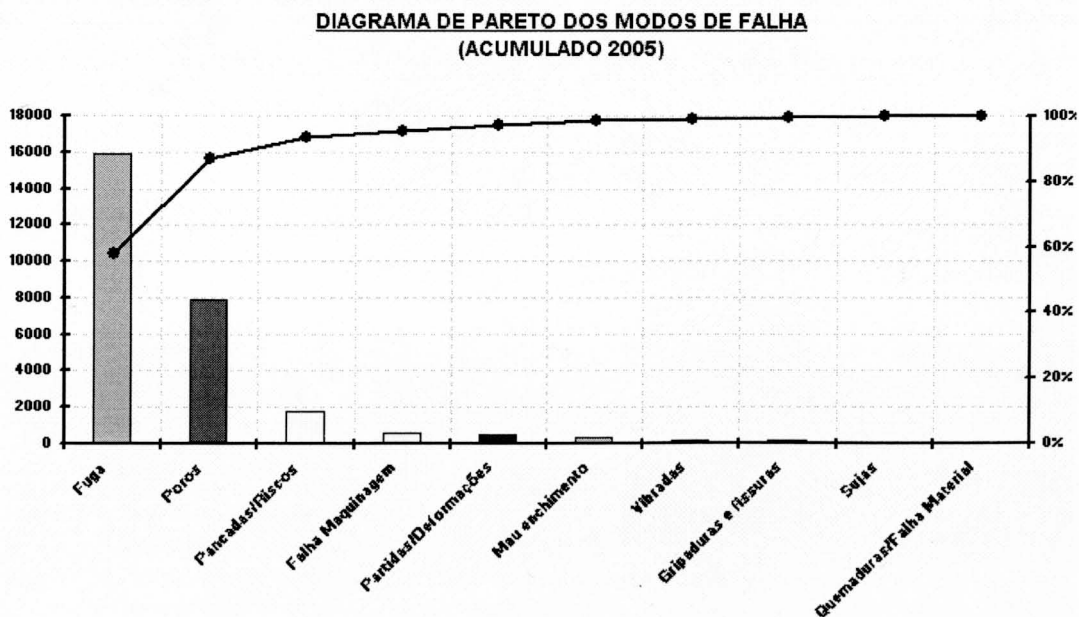


Figura 68 – Diagrama de Pareto dos modos de falha.

Como já foi referido em capítulos anteriores, o *squeeze pin* foi aplicado na cavidade 2 do molde 1 (molde de duas cavidades).

Para efeitos de ensaio foram efectuadas 1000 injeções, o que permitiu obter 500 peças com *squeeze pin*. De seguida, foi feito o controlo final a 150 peças. Os resultados obtidos são visíveis no diagrama de Pareto representado na Figura 69.

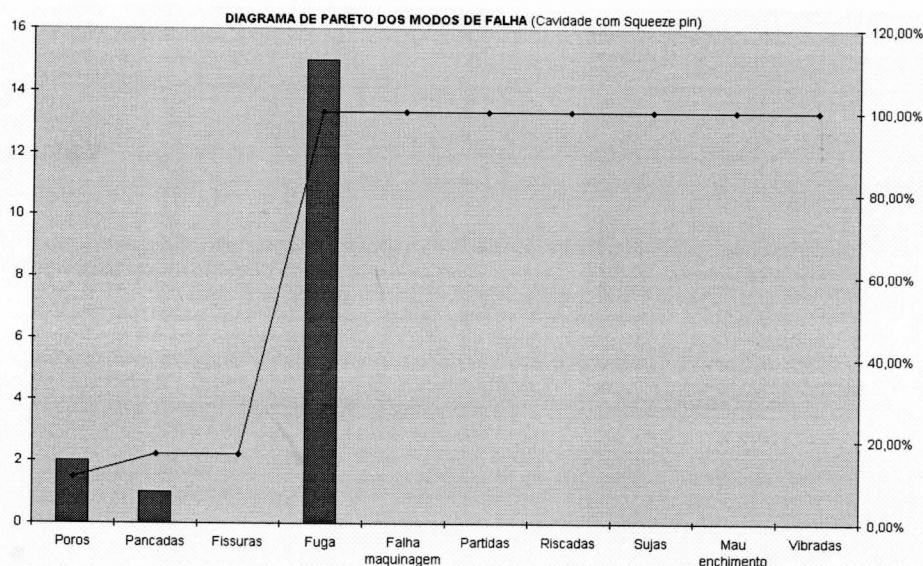


Figura 69 – Diagrama de Pareto dos modos de falha (cavidade com *squeeze pin*).

A relação entre a percentagem de peças boas e peças más está ilustrada do diagrama da Figura 70.

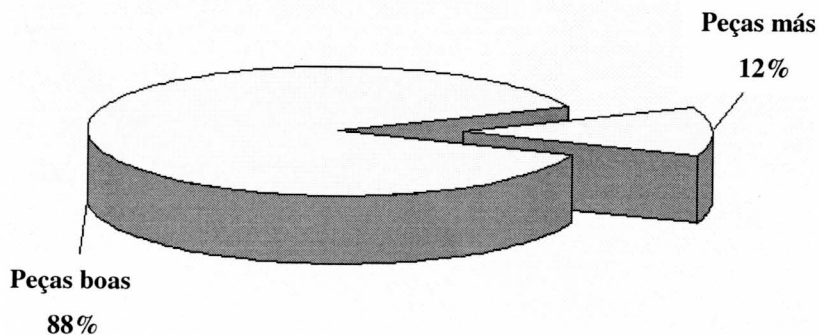


Figura 70 - Percentagem do refugo (cavidade em que foi aplicado o *squeeze pin*).

Da análise dos diagramas anteriores verifica-se que houve uma redução da percentagem de refugo de cerca de 4%. Essa redução da percentagem de peças defeituosas deve-se principalmente à diminuição dos poros causados por *shrinkage*, cuja percentagem passou de 28,8 para aproximadamente 11%. É de salientar que estes resultados foram obtidos no primeiro ensaio realizado, sendo por isso de esperar uma melhoria dos resultados obtidos à medida que aumenta o domínio desta tecnologia.

14.1 Análise económica

O impacto económico real não pode ser ainda avaliado uma vez que as alterações efectuadas na peça não foram ainda aprovadas pelo cliente. Partindo do princípio que a resposta do cliente é positiva e com base nos resultados obtidos no ensaio, é possível fazer uma estimativa dos ganhos que a empresa poderá ter, se esta tecnologia for aplicada aos restantes moldes.

Admitindo que a necessidades do cliente se mantém nas 2000 peças/dia actuais e que a percentagem de peças defeituosas passa dos 16%, sem a utilização do *squeeze pin*, para os 11%, obtidos durante a fase de ensaio, vai haver uma redução nas peças defeituosas de cerca de 80 peças/dia. Partindo deste valor e sabendo que o custo aproximado de uma peça defeituosa (CPD) pode ser calculado por:

$$CPD = CRP + VAP + CA + CCE + CDA$$

$$CPD = 3,39 \text{ €/peça}$$

em que:

- CRP – Custos da refundição da peça, que pode ser calculado por:

$$CRP = PP \times CF + PPF \times PP \times CL$$

$$CRP = 0,3 \text{ €/peça}$$

com:

- PP – Peso da peça (0,82 kg/peça)
 - CF – Custo de fusão (0,2 €/kg)
 - PPF – Percentagem de perdas por fusão (10%)
 - CL – Custo da liga (1,66 €/kg)
- VAP – valor acrescentado de produção: engloba a mecanização, o corte de gito, a granalhagem e a lavagem (2,6 €/peça).
 - CA – Custo dos acessórios que não são reutilizáveis (0,3 €/peça).
 - CCE – Custo do controlo de estanqueidade (0,09 €/peça).
 - CDA – Custo de desmontagem dos acessórios (0,1 €/peça)

Se o custo de uma peça defeituosa para a empresa é de 3,39 €/peça, então o montante poupado por dia é $80 \times 3,39 \text{ €/peça}$, ou seja, 271,2 €/dia.

Os montantes atrás calculados constituem os ganhos directos que se podem obter com a introdução da tecnologia de *squeeze pin*. Além disso, há que considerar os ganhos provenientes da menor ocupação dos equipamentos e mão de obra envolvidos, podendo estes ser utilizados para a produção de outras peças.

De acordo com os ganhos diários calculados anteriormente, o investimento necessário para introduzir esta tecnologia noutros moldes e para dotar as máquinas de injeção dos mecanismos necessários à actuação dos sistemas de *squeeze pin* tem retorno em, aproximadamente, 1 ano.

É de salientar que as modificações efectuadas nas máquinas podem vir a ser úteis no fabrico de outras peças onde seja necessária a intervenção de *squeeze pins*.

15. Conclusão

Da realização deste projecto é possível concluir que a aplicação da tecnologia de *squeeze pin* teve o efeito desejado, uma vez que permitiu reduzir significativamente a ocorrência de porosidade devida à contracção do metal durante a solidificação, contribuindo deste modo para uma diminuição da percentagem total de refugo.

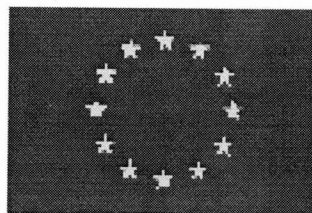
Em relação ao controlo do *squeeze pin*, sugere-se que se estude a possibilidade de utilizar o método alternativo de controlo apresentado neste trabalho, dado que são claras as vantagens relativamente ao sistema tradicional. O primeiro permite comparar o curso detectado com o curso ideal do *squeeze pin*, fazendo uma correcção instantânea no tempo de actuação para que esse curso se mantenha no valor estipulado como ideal. Evita-se deste modo a produção de peças não conformes, desde o momento em que o problema é detectado pelo operador até que é solucionado pelos responsáveis do controlo do processo.

Verificou-se a importância que a utilização de um *software* de simulação pode ter ao permitir antecipar o desenrolar do processo e eliminar erros de projecto que poderiam pôr em causa a qualidade das peças obtidas. Sendo evidente que o fabrico de peças defeituosas origina um aumento de custos e uma perda de tempo de operação, é fácil apercebermo-nos dos benefícios económicos que este tipo de ferramentas computacionais pode trazer uma empresa.

Da análise económica efectuada, verifica-se que, com a introdução da tecnologia de *squeeze pin*, é possível poupar aproximadamente 270 Euros por dia.

16. Prodep

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 de Estágios no Ensino Superior do PRODEP III – Programa de desenvolvimento educativo para Portugal.



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.

2004 / 2005

Apêndice A - Simulação de enchimento em Flow3D^R

Recorreu-se à FEUP para efectuar a simulação de enchimento em Flow3D^R, no entanto não existia, ou não estava disponível, pessoal com conhecimento suficiente para fazer o pré-processamento dos dados necessários no sentido de levar a cabo a simulação. Assim, foi pedida ajuda à empresa Kupper & Schmidt. Aí, o Engenheiro Hugo Sousa mostrou grande disponibilidade para ajudar no que fosse necessário. Limitações de tempo levaram a que não fosse possível efectuar parte mais importante da simulação para este projecto (simulação de solidificação). De qualquer modo, apresentam-se de seguida as imagens conseguidas nessa simulação (Figura 71).

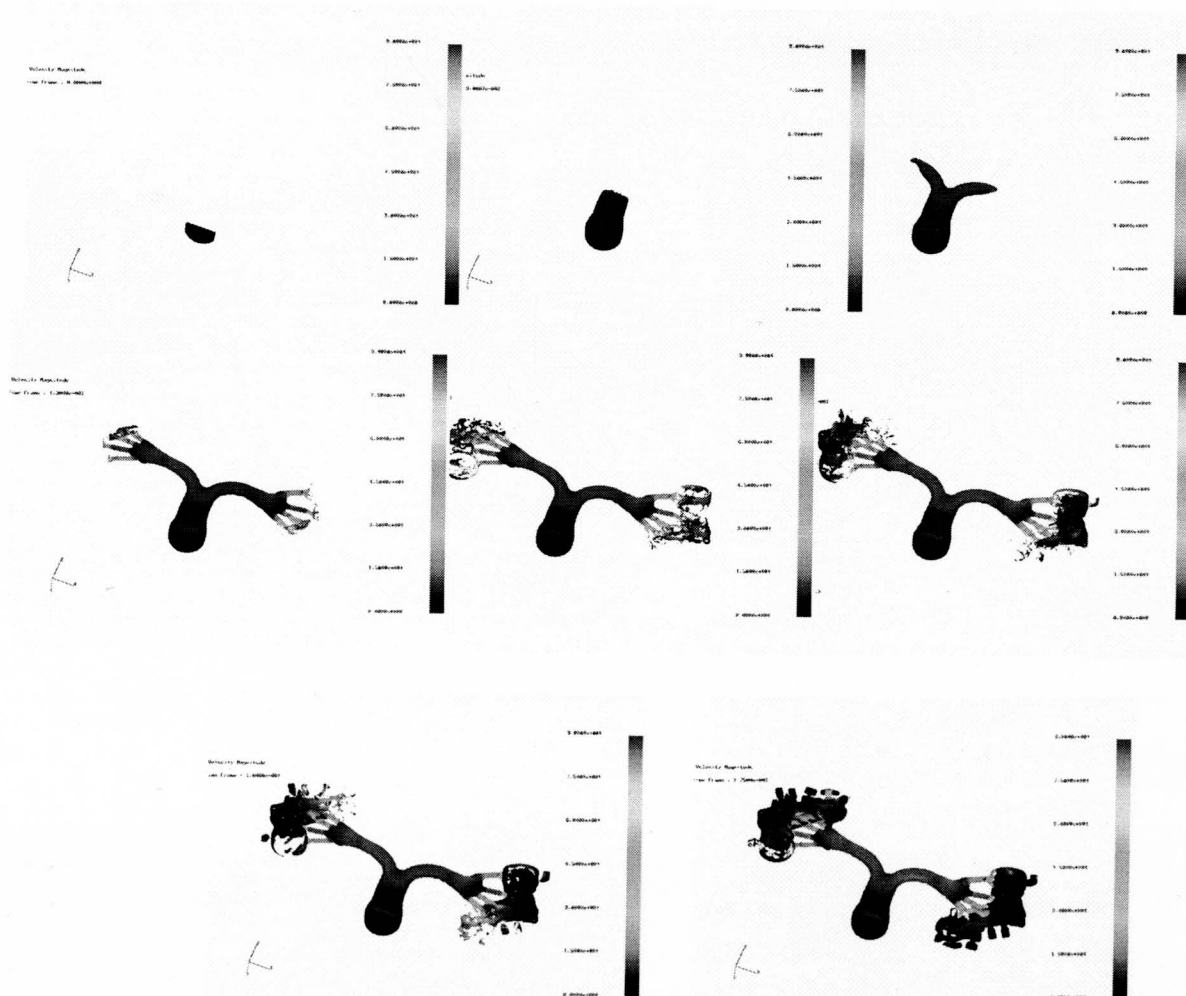


Figura 71 - Sequência de imagens da simulação de enchimento obtidas, em Flow3D^R.



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000090020