



**FACULDADE DE ENGENHARIA
DA
UNIVERSIDADE DO PORTO**

Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial



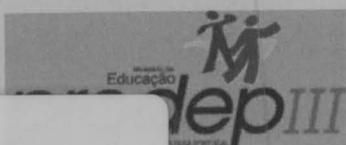
**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA
SANIDADE DAS PEÇAS DE
FUNDIÇÃO INJECTADA**

Projecto Fim de Curso

Elaborado por:

Nuno Miguel Pinto Ferraz

2004-07-09



621(047.3)
LEM 2003/FERn

621(047.3)/LEM 2003/FERM

| | |
|-------------------------|----------------|
| Universidade do Porto | |
| Faculdade de Engenharia | |
| Biblioteca | |
| Nº | 88459 |
| CDU | 621.74(047.3) |
| Data | 98 / 05 / 2007 |



Índice

| | |
|---|----|
| Introdução | 3 |
| A empresa | 4 |
| A fundição injectada | 5 |
| Molde para fundição injectada | 5 |
| Características do processo de fabrico | 7 |
| Transferência de calor num molde | 8 |
| Convexão | 9 |
| Condução | 10 |
| Radiação | 10 |
| Termopares | 11 |
| O circuito do par termoeléctrico e a força electromotriz (f.e.m.) | 11 |
| Cabos compensados | 14 |
| Precisão dos termopares | 15 |
| Vantagens e desvantagens | 15 |
| Equipamento de aquisição de dados dos termopares | 16 |
| Raio X | 17 |
| Interação dos raios X com a matéria | 17 |
| Aplicações do raio X | 18 |
| Procedimento | 20 |
| Adaptação do molde à máquina de injectar | 22 |
| Reparações efectuadas no molde | 26 |
| Reparação das fugas do sistema hidráulico das gavetas | 26 |
| Fugas de água | 26 |
| Tubo de termoregulação partido | 26 |
| Reparação da folga nos KO's | 28 |
| Reparação do circuito eléctrico dos fins de curso das gavetas | 28 |
| Reparação de um pino de uma gaveta | 28 |
| Homogeneidade da temperatura no forno de manutenção | 30 |
| Variação da temperatura entre o forno de manutenção e a camisa de injeção | 34 |
| Estudo da geometria da peça | 36 |
| Colocação dos termopares no molde e na camisa de injeção | 37 |
| Estudo do comportamento térmico do molde | 40 |
| Análise das peças | 42 |
| Análise não destrutiva das peças ao Raio X | 42 |
| Análise destrutiva das peças | 42 |
| Ajuste do ciclo de injeção | 44 |
| Cálculos teóricos | 44 |
| Ensaio da 1ª fase | 47 |
| 1º Ensaio de 2ª fase | 48 |
| 2º ensaio de 2ª fase | 50 |
| 3º ensaio de 2ª fase | 51 |
| Variações dos parâmetros de injeção | 54 |
| Variação da temperatura da termoregulação | 54 |
| Variação da temperatura da liga | 57 |
| Variação da velocidade de injeção | 58 |
| Interpretação dos valores das temperaturas obtidas | 60 |
| Variação da temperatura da termoregulação | 60 |
| Variação da temperatura da liga | 61 |
| Variação da velocidade de injeção | 61 |
| Optimização do ciclo de injeção | 62 |
| Conclusão | 63 |
| Bibliografia | 65 |
| ANEXOS | 66 |



Introdução

O objectivo deste trabalho consiste no estudo da influência da temperatura na sanidade das peças obtidas por fundição injectada. O trabalho foi realizado maioritariamente nas instalações do Cinfu e insere-se no âmbito do Projecto Fim de Curso.

Em fundição injectada, a temperatura é considerada uma das principais variáveis, senão a principal, no que concerne à sanidade das peças. A optimização das temperaturas tem como principal objectivo a diminuição do tempo de ciclo. Uma diminuição do tempo de ciclo, por mais pequena que seja, pode significar muito tempo numa fábrica que tenha um grande nível produtivo. Este tempo ganho pode ser utilizado para produzir mais peças ou ainda para a manutenção do equipamento. As temperaturas utilizadas deverão ser aquelas que permitem um menor tempo de ciclo e que originam peças de qualidade de acordo com os requisitos dos clientes.

Embora este trabalho se centre na temperatura, o ciclo de fundição injectada envolve um grande número de variáveis. O ajuste das diversas variáveis irá determinar a qualidade final da peça e as suas propriedades. Neste trabalho, os parâmetros a variar serão limitadas pelo tempo disponível e os outros parâmetros serão ajustados de acordo com os valores correntemente utilizados em produção de peças de tamanho similar, em máquinas iguais, e serão mantidas durante todas as experiências.

Este relatório foca apenas as fases mais importante do trabalho prático.



A empresa

O CINFU – Centro de Formação Profissional da Indústria da Fundição, foi criado em 24 de Abril de 1981 por protocolo assinado entre o IEFP e a Associação Portuguesa de Fundição (APF), tendo-se tornado em 27 de Maio de 1987 um Centro de Gestão Participada por força do Dec. Lei 165/85.

O CINFU tem por objectivo a valorização do sector da fundição, nomeadamente através da formação profissional sob as formas de qualificação profissional de jovens e adultos e a reciclagem, especialização e aperfeiçoamento de trabalhadores activos ou desempregados de curta ou longa duração.

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

A empresa está sediada na Zona Industrial do Porto próxima do aeroporto internacional Francisco Sá Carneiro e do porto marítimo de Leixões.



Figura 1 – A empresa

O projecto foi realizado na secção de Fundição Injectada a qual conta com uma célula de fundição. Esta célula é constituída por um forno de fusão de cadinho, um forno de manutenção de cadinho, uma máquina de injectar Buhler Evolution 42D, um lubrificador Wollin e um extractor automático de peças PickMat.



A fundição injectada

O processo de fundição injectada de ligas de alumínio é fundamental em certas áreas industriais.

Cada célula de injeção tem vizinho um forno de manutenção com a liga de alumínio que será injectada posteriormente, à temperatura de aproximada de 680°C. Para efectuar uma injeção, uma colher refractária retira do forno de manutenção uma certa quantidade de liga e vaza-a à frente do êmbolo da máquina de injeção. O mecanismo de injeção divide-se em três fases.

Na 1ª fase o êmbolo, actuado pela pressão fornecida pelo sistema hidráulico, começa por se deslocar a baixa velocidade, empurrando a liga à sua frente. Esta fase é chamada a fase de aproximação e nela 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 a incorporação de ar no metal líquido.

Na 2ª fase, quando a liga atinge a entrada do molde, o pistão comuta para a velocidade rápida, provocando rapidamente o enchimento do molde, originando assim a fase de enchimento. O enchimento do molde, que se encontra aproximadamente a 200 graus centígrados, deve ser efectuado o mais rapidamente possível evitando o arrefecimento prematuro da liga e um mau enchimento da cavidade, mas permitindo a evacuação do ar da cavidade através das aberturas de ventilação.

A 3ª fase inicia-se quando o molde se encontra cheio e a liga vai arrefecendo até próximo da sua temperatura de solidificação. É aplicado um súbito aumento de pressão ao pistão com o objectivo de compactar a liga, que solidifica sujeita a essa pressão. Esta fase é chamada de fase de compactação.

Molde para fundição injectada

Um molde para fundição injectada pode pesar entre algumas centenas ou milhares de quilos. É feito de aço e é dividido em duas metades, o meio molde fixo e o meio molde móvel. É de uma construção complexa e deverá permitir a



obtenção de peças o mais próximo do produto final possível, evitando assim custos adicionais de acabamento. A maioria dos moldes utilizados são os de câmara fria em que a colher refractária leva o material fundido do forno de manutenção até à camisa de injeção. No caso da câmara quente o pistão e o sifão estão submersos no metal fundido.

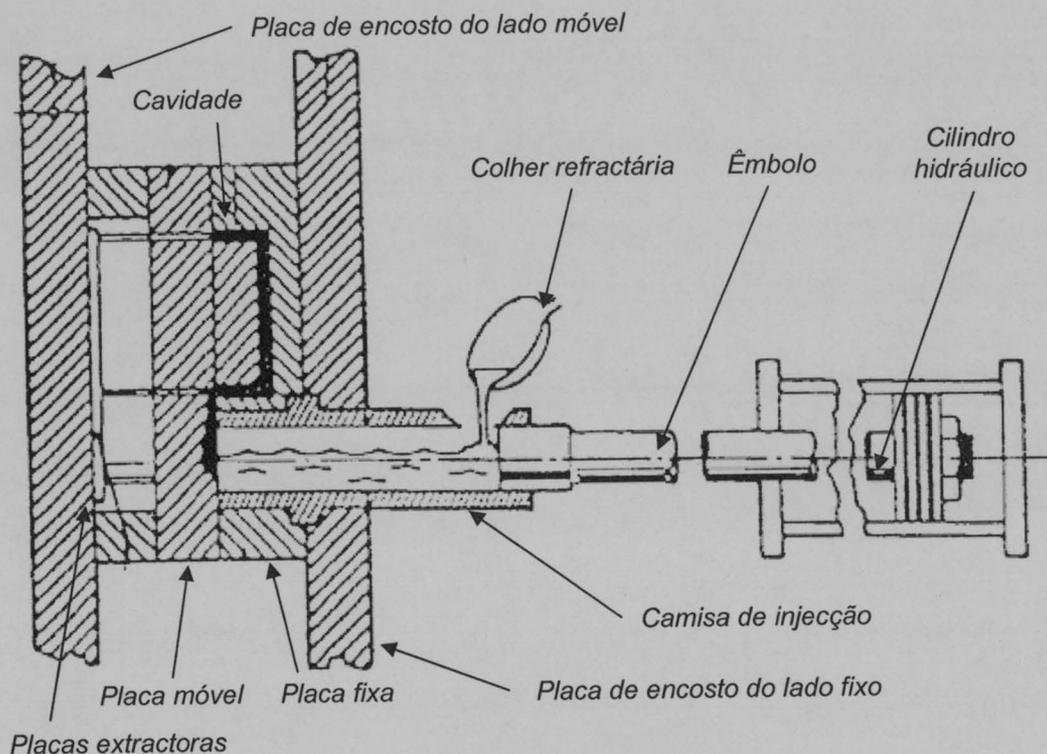


Figura 2 – Esquema de molde de câmara fria

O molde fixo é montado no prato do lado do sistema de injeção da máquina e é projectado de forma a receber a camisa de injeção.

O molde móvel, (parte do molde onde fica a peça e de onde esta é extraída quando o molde abre), é montado no prato móvel da máquina. É no lado móvel que existe o canal de alimentação bem como a secção de ataque, responsáveis pelo encaminhamento e passagem do metal fundido para as cavidades. Deste lado estão também as placas extractoras, nas quais existe um sistema de extracção do gito (constituído pela peça, pelo canal de alimentação, pela bolacha e pelos masselotes). Os extractores são elementos que são impulsionados pela placa extractora e que empurram a peça, descolando-a do molde móvel. Os extractores têm portanto uma zona moldante



e não deverão ser obrigados a fazer um grande esforço pois de outra forma poderiam empenar a peça.

O molde abre e fecha através de uma acção hidráulica. No seu interior pode ter uma ou várias cavidades que constituem o negativo da peça que se pretende fabricar. As diversas cavidades encontram-se ligadas entre si por canais por onde a liga fundida circula durante a fase de enchimento. Após a liga solidificar a peça é extraída juntamente com os canais de alimentação e com os masselotes que devem ser cortados posteriormente de modo a separar as peças. Este material que de outra forma seria sucata, é geralmente reaproveitado e volta para o forno de fusão.

Características do processo de fabrico

Este processo de fabrico é constituído pela existência de um elevado numero de parâmetros, a maioria dos quais são controláveis, directa ou indirectamente, e que afectam a qualidade final do produto e o tempo de produção. A qualidade dos produtos fabricados por esta tecnologia está intimamente ligada ao grau de porosidade existente. Esta porosidade é considerada a consequência inevitável do processo de fabrico e afecta a rigidez e homogeneidade de acabamento das peças injectadas. A porosidade das peças injectadas é pois um dos parâmetros determinantes da sua qualidade. Uma parte expressiva da investigação realizada no domínio da fundição injectada tem como objectivo diminuir o aparecimento de porosidade durante o fabrico. No entanto, é considerado impossível remover na sua totalidade a porosidade. Por este motivo é importante conhecer o grau de porosidade das peças injectadas de forma a saber até que ponto estes poros poderão influenciar as características mecânicas das peças. Essa detecção e quantificação é tipicamente efectuada por amostragem, em lotes, e mais raramente por inspecção peça a peça. A detecção e quantificação da porosidade pode ser efectuada por inspecção visual ou por análise ao raio X. A inspecção das peças é efectuada após o seu fabrico, numa outra célula da linha de produção. No caso de o molde começar a produzir peças fora das especificações, devido ao desfasamento temporal entre a produção e a

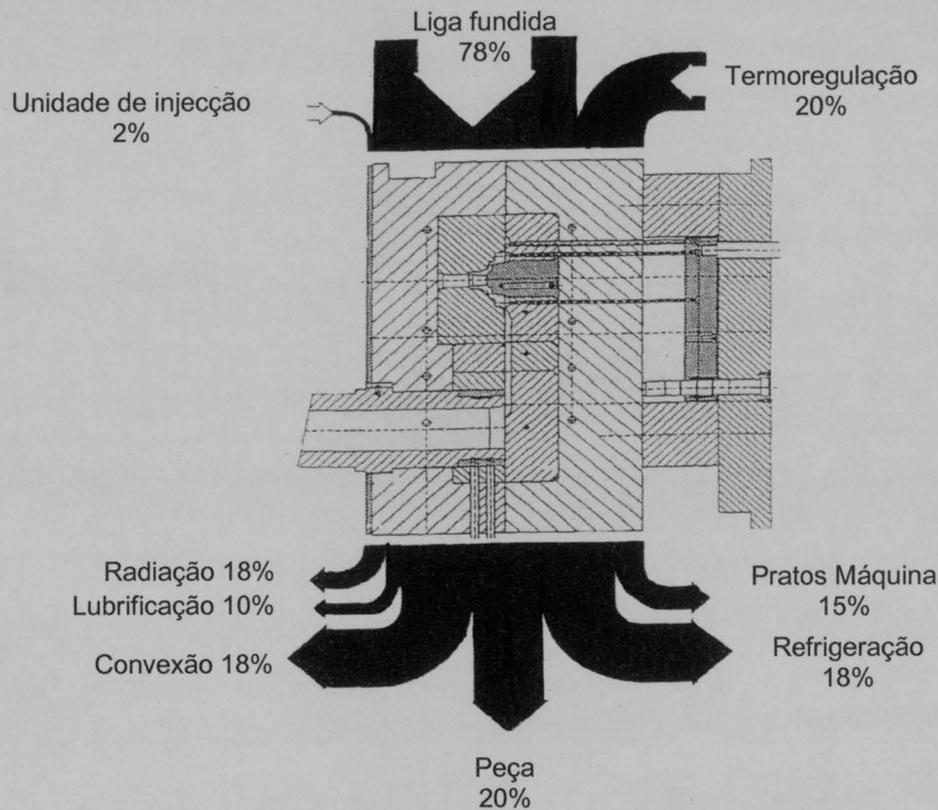


detecção dos defeitos, serão produzidas diversas peças que poderão não ter recuperação e tornam-se sucata.

A existência de poros nas peças produzidas por fundição injectada é um dos principais tormentos desta indústria, sendo por essa razão um dos principais objectos de controlo por parte do departamento de qualidade. As altas pressões utilizadas ajudam a diminuir a quantidade dos poros e o seu tamanho mas não permitem a sua total extinção.

Transferência de calor num molde

O conhecimento do fenómeno térmico englobado num molde de injeção deve ser o mais aprofundado possível. A temperatura é considerada como a principal causadora de defeitos numa peça como porosidade, mau acabamento superficial, má precisão dimensional entre outras. É prática corrente, na indústria, que o projectista do molde projecte o sistema de refrigeração baseado em conhecimentos adquiridos no passado e só depois efectue os cálculos para garantir se o esquema projectado será capaz de dissipar o calor introduzido. Na realidade, os sistemas de refrigeração projectados inicialmente são na grande maioria das vezes sobredimensionados. Há ainda a considerar, além das perdas de calor por convecção para o fluido refrigerante, as perdas de calor para o ar por radiação e para os pratos da máquina por condução. Este último meio de transferência de calor pode ser praticamente anulado utilizando placas térmicas entre o molde e o prato da máquina.



Convexão

A transferência de calor por convexão envolve uma transferência de energia entre uma superfície e um fluido. Este efeito é macroscópico e envolve transferência de calor da superfície para o líquido em movimento nos canais de refrigeração. É desejado um fluxo turbulento do fluido de modo a maximizar a transferência de calor.

Em fundição injectada, os fluidos refrigerantes utilizados são água ou óleo. Geralmente, a água é utilizada para refrigerar o taco e o pistão do cilindro hidráulico e o óleo é utilizado para refrigerar a estrutura do molde e a inserção pois também permite aquecer o molde quando este está parado. Este processo é talvez o principal meio de transferência de calor em fundição injectada.

$$Q_{CONV} = \alpha \cdot A \cdot (T_{molde} - T_{fluido})$$

onde:

Q_{CONV} = quantidade de calor retirada por convexão [kJ]

α = coeficiente de transmissão de calor [$W/m^2 \text{ } ^\circ C$]

A = superfície útil dos canais de refrigeração [m^2]



T_{molde} = temperatura média do molde

T_{fluido} = temperatura média do fluido refrigerante

Condução

A transferência de calor por condução envolve uma transferência de energia entre dois corpos diferentes. Este processo é microscópico e envolve a transferência de calor de molécula para molécula. Sendo este um processo que envolve directamente as ligações moleculares, a condutividade térmica vai variar de material para material.

Em fundição injectada, este tipo de transferência de calor dá-se por exemplo do molde para os pratos da máquina. A transferência de calor por condução do molde para os pratos da máquina é considerável quando o molde está à temperatura de funcionamento.

$$Q_{\text{CON}} = K.A.(T_{\text{molde}} - T_{\text{pratos}})$$

onde:

Q_{CON} = quantidade de calor retirada por condução [kJ]

K = coeficiente de transmissão de calor do aço [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$]

A = superfície de contacto [m^2]

T_{molde} = temperatura média do molde

T_{pratos} = temperatura média dos pratos da máquina

Radiação

A transferência de calor por radiação consiste na transmissão térmica por radiação electromagnética. Como o próprio nome indica o molde emite uma radiação para o ambiente e perde energia. Existe portanto um conseqüente aumento da temperatura do ar que envolve o molde. Além da radiação térmica dá-se ainda uma radiação de infra-vermelhos que não é visível para o olho humano mas pode ser utilizado para o conhecimento das temperaturas superficiais do molde através de uma câmara de infra-vermelhos.



$$Q_{RAD} = A \cdot \varepsilon \cdot C_s \cdot (T_{molde}^4 - T_{ambiente}^4)$$

onde:

Q_{RAD} = quantidade de calor retirada por radiação [kJ]

A = superfície de contacto [m^2]

ε = grau de emissão [$W/m^2 \text{ } ^\circ C$]

emissividade

T_{molde} = temperatura média do molde

$T_{ambiente}$ = temperatura média do meio ambiente

Termopares

Um termopar é um sensor que permite medir temperaturas utilizando para tal a variação da força electromotriz gerada.

Em 1821, o físico Thomas Johann Seebeck obsevou que se gerava uma força electromotriz (f.e.m.) quando se unem as extremidades de dois condutores de materiais diferentes e existem temperaturas diferentes nas duas extremidades. Este efeito tomou o nome do seu descobridor e é actualmente conhecido pelo "Efeito Seebeck". Este efeito diz-nos que a diferença de potencial entre as duas extremidades de um par termoeléctrico varia com diferentes combinações de metais e com diferentes temperaturas.

O circuito do par termoeléctrico e a força electromotriz (f.e.m.)

Um par termoeléctrico ou termopar é um transdutor constituído por dois condutores (metais ou ligas metálicas) A e B associados, contendo duas junções A/B. Uma das junções destina-se a estar em contacto com a temperatura que se quer medir e por isso se designa por junção de medição ou junção quente e a outra encontra-se a uma temperatura definida designando-se por junção fria ou de referência.

A diferença de potencial que aparece aos terminais de circuito aberto do par termoeléctrico constituído por dois materiais A e B, quando as suas duas junções A/B se encontram às temperaturas T_1 e T_2 , é função dos materiais A e B e da diferença de temperaturas entre as suas junções.

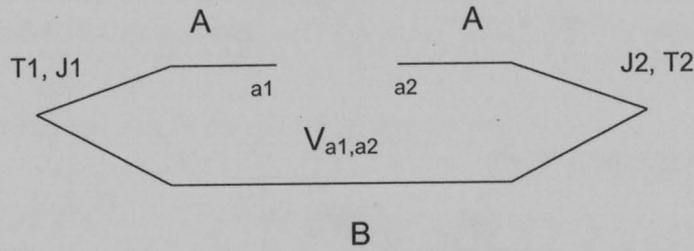


Figura 3 – Esquema de um termopar

$$\Delta V = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int -S \cdot \nabla T \cdot d\vec{l} = \int -S \cdot dT$$

S é o coeficiente de Seebeck¹ do material

$$V_{a_1 a_2} = \int_{T_1}^{T_2} -S_A \cdot dT + \int_{T_1}^{T_2} -S_B \cdot dT + \int_{T_2}^{T_1} -S_A \cdot dT$$

$$V_{a_1 a_2} = (S_A - S_B) \cdot (T_2 - T_1) ; \text{ se } T_1 = T_2 \text{ então } V_{a_1 a_2} = 0$$

A diferença de potencial em circuito aberto do termopar da figura seguinte é uma função dos materiais A e B e da diferença de temperaturas entre a junção da medição e a “junção em circuito aberto” mantida a temperatura constante. Esta junção realiza-se fisicamente no acto da medição. No caso de ambas as junções estarem à mesma temperatura a força electromotriz gerada será obviamente nula.

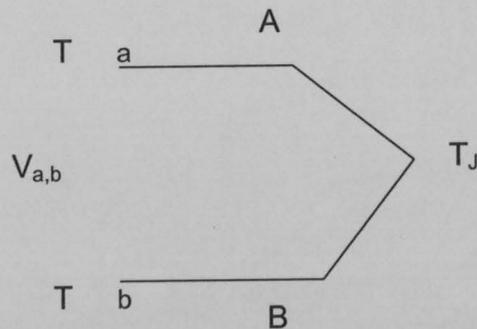


Figura 4 – Termopar em circuito aberto

¹ Apenas no caso do termopar tipo K o coeficiente de Seebeck pode ser considerado aproximadamente constante na gama de temperaturas entre 0 e 1000°C.



$$V_{ab} = \int_a^J -S_A \cdot dT + \int_J^b -S_B \cdot dT$$

$$V_{ab} = (S_A - S_B) \cdot (T - T_J)$$

Para que esta tensão permita a medição da temperatura a que se encontra a junção de medição, então é essencial que T seja uma temperatura de referência que está normalizada como sendo $T=0^\circ\text{C}$.

Actualmente os aparelhos de aquisição de dados contam com um sistema electrónico para compensação da junta fria e permitem a leitura de T_J , independentemente do valor da temperatura T.

Isso só é possível pois é possível somar diferenças de potencial. Se para um termopar A,B as suas junções se encontram às temperaturas T_1 e T_2 , aparece uma tensão V_{12} . Se entretanto as suas junções se encontrarem às temperaturas T_2 e T_3 , aparecerá uma tensão V_{23} . Quando este termopar tiver as suas junções às temperatura T_1 e T_3 a tensão V_{13} por si gerada será igual à soma de V_{12} com V_{23} . Ou seja, sabendo a temperatura a que está a junção fria do termopar (por ex.: temperatura ambiente) pode-se determinar a temperatura de medição, T_3 a partir do valor associado a V_{23} .

A variação da temperatura ao longo do termopar entre a sua junção de medição e de referência, não altera o valor da diferença de potencial em circuito aberto.

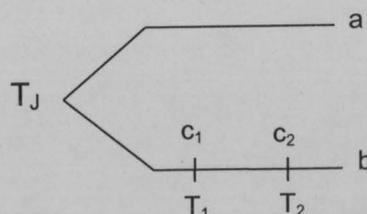


Figura 5 – Variação da temperatura ao longo do termopar

$$V_{ab} = \int_a^J -S_A \cdot dT + \int_J^{c_1} -S_B \cdot dT + \int_{c_1}^{c_2} -S_B \cdot dT + \int_{c_2}^b -S_B \cdot dT$$



$$V_{ab} = (S_A - S_B) \cdot (T_J - T)$$

É de referir ainda que a força electromotriz não será afectada se em qualquer ponto do circuito for inserido um terceiro metal, desde que as suas junções sejam mantidas à mesma temperatura. Esta propriedade é chamada por alguns autores de “Lei dos Metais Intermédios”.

Também a composição da junção não afecta a característica de funcionamento do termopar, desde que a temperatura da junção seja uniforme.

Cabos compensados

Na indústria, em grande parte dos casos, o termopar é utilizado para medir temperaturas bastante altas e há portanto a necessidade de ter o equipamento de aquisição de dados afastado do termopar. Para o efeito utilizam-se cabos compensados como uma extensão do termopar. Estes cabos, tal como os termopares, podem ser encontrados no mercado facilmente.

Existem duas questões às quais deve ser dada atenção. Em primeiro lugar é necessário utilizar cabos compensados do mesmo tipo do termopar e por outro lado a polaridade deve ser respeitada pois de outra forma estaríamos a trocar os fios do cabo compensado que, tal como o termopar, são de materiais diferentes.

No caso de se utilizarem fios comuns em vez de cabos compensados estaríamos a adulterar os resultados. Olhando para a figura seguinte, podemos observar que nesse caso o sinal lido seria proporcional a T_1, T_2 e não a T_1, T_3 . Assim o equipamento de aquisição do sinal iria compensar a junta fria para a temperatura T_3 enquanto o sinal estava relacionado com a temperatura T_2 .

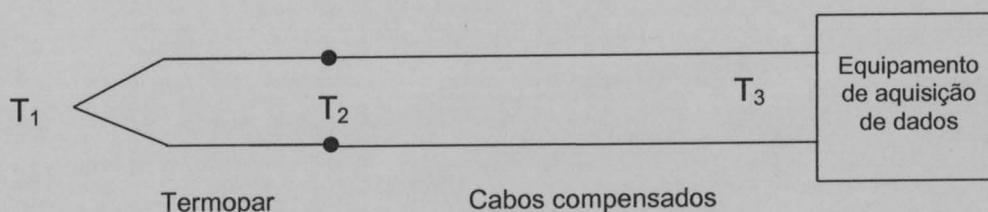


Figura 6 – Termopar com cabos compensados



Precisão dos termopares

Após pesquisa bibliográfica, e para os termopares tipo K que são utilizados neste projecto o erro nas medições pode ir até 2,2°C para temperaturas entre os 0 e os 277°C e até 0,75% para temperaturas entre os 277 e os 1260°C.

Terão ainda de ser considerados os erros impostos pela imprecisão dos cabos compensados, do equipamento de aquisição de dados e ainda pela compensação da junta fria.

Vantagens e desvantagens

Vantagens:

- Permite adquirir dados contínuos (apenas limitado pelo intervalo mínimo do equipamento de aquisição de dados);
- Fácil instalação num molde, no caso de o molde estar preparado de raiz;
- Sensores económicos;
- Fácil substituição no caso de avaria.

Desvantagens:

- Aplicação muito dispendiosa e morosa em moldes temperados que não estejam preparados para receber os termopares;
- Necessidade de um equipamento de aquisição de dados que permite registar os valores de diversos termopares em intervalos de tempo muito reduzidos;
- Facilmente danificáveis (termopar ou cabo compensado) no transporte do molde ou mesmo na abertura e fecho do mesmo;
- Podem danificar-se rapidamente quando são sujeitos aos ciclos produtivos normais para um molde de fundição injectada.



Equipamento de aquisição de dados dos termopares

O equipamento de aquisição de dados da Buhler permite a leitura das temperaturas medidas com os termopares. Inicialmente estava previsto que o equipamento permitisse ligar seis termopares mas o seu custo elevado ficava fora do orçamento disponível para este trabalho e optou-se pela solução de um único termopar.

A cadeia de medição deste equipamento é composta por um termopar tipo K ligado a um cabo compensado do mesmo tipo que gera uma força

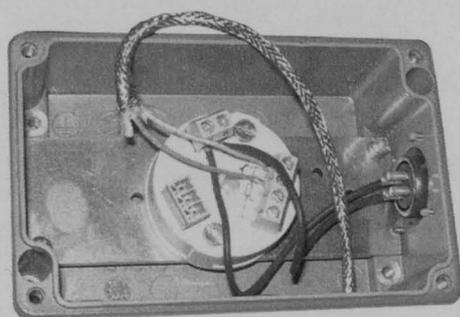


Figura 7 – Amplificador de sinal

electromotriz devido à temperatura. Este sinal é amplificado por um amplificador de sinal e enviado até à carta de aquisição de dados da máquina de injectar. O conversor tem como entrada uma variação em mV e envia um sinal com 24V DC para a carta com uma corrente de 4 a 20mA.

A carta faz depois a conversão do sinal analógico para digital de forma a que o mesmo seja convertido e mostrado no ecrã da máquina como um valor numérico.

O equipamento que foi encomendado destinava-se à medição da temperatura da cavidade mas por engano foi-nos enviado o equipamento de medição da temperatura da estrutura. O grande problema deste equipamento é não permitir o registo dos dados de forma contínua. Será necessário portanto observar o ecrã da máquina para tentar registar manualmente a temperatura máxima e mínima.

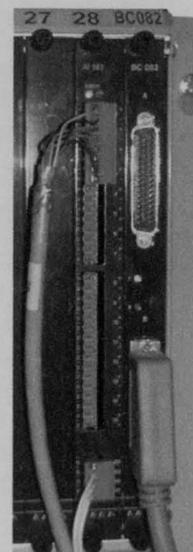


Figura 8 – Carta de aquisição de dados



Raio X

Os raios X são radiações electromagnéticas penetrantes com um comprimento de onda menor do que o da luz visível e foram descobertos de forma accidental por Wilhelm Conrad Roentgen em 1895. Os raios X têm um comprimento de onda que vai desde uns 10nm até a uns 0.001nm (1nm equivale a 10^{-9} m). Quanto menos é o comprimento de onda maior é a sua energia e poder de penetração.



Figura 9 – Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923)

Enquanto Roentgen estudava o fenómeno dos raios catódicos através da condução de electricidade através de um tubo de Crookes notou que se projectava uma inesperada luminosidade numa tela coberta com platinocianeto de bário que se encontrava junto ao tubo, resultante da fluorescência do material. Roentgen girou a tela, de modo que a face sem o material fluorescente ficasse de frente para o tubo de Crookes; ainda assim ele observou a fluorescência. Foi então que resolveu colocar

sua mão na frente do tubo, vendo seus ossos projectados na tela. Roentgen observava, pela primeira vez, aquilo que passou a ser denominado raios X.

Interacção dos raios X com a matéria

Na interacção dos raios X com a matéria existem três mecanismos pelos quais os raios X são absorvidos.

O primeiro mecanismo é o efeito fotoeléctrico e dá-se quando um fóton correspondente à zona de raio X do espectro electromagnético choca com um electrão de uma camada interna e o expulsa do átomo. Se o fóton tem mais energia do que a necessária para expulsar o electrão essa vai ser transferida sob a forma de energia cinética. O efeito fotoeléctrico dá-se sobretudo na absorção de raios X de baixa intensidade.

O efeito Compton, descoberto em 1923 pelo físico e professor Arthur Holly Compton, é uma manifestação importante da absorção de raio X de menor comprimento de onda. Quando um fóton de alta energia choca com um



electrão, ambas as partículas podem ser desviadas formando um ângulo com a trajectória da radiação incidente de raio X. O fóton cede parte da sua energia ao electrão para o retirar do átomo e sai do material com um comprimento de onda maior. Estes desvios combinados com a alteração do comprimento de onda são conhecidos como dispersão de Compton.

O terceiro tipo de absorção observa-se principalmente quando se irradiam elementos de massa atómica elevada com raios X de energia elevada. Quando um fóton de energia elevada penetra até junto do núcleo do átomo dá-se a formação de um par em que um elemento tem carga negativa e o outro tem carga positiva. A produção de pares é um exemplo da conversão de energia em massa. Se o fóton incidente tem energia superior à necessária para a produção do par esse excesso de energia é cedido ao par sob a forma de energia cinética. As trajectórias das partículas são divergentes.

Aplicações do raio X

Os raios X utilizam-se actualmente em três grandes áreas como sejam a investigação, a indústria e a medicina. Embora o conceito base e a origem seja a mesma os equipamentos são substancialmente diferentes.

Na investigação o raio X permitiu confirmar experimentalmente as teorias cristalográficas. Utilizando métodos de difracção de raios X é possível identificar as substâncias cristalinas e observar a sua estrutura.

Na indústria os raios X são de extrema utilidade. Os raios X permitem ver o interior das peças sem que as mesmas sejam destruídas. Na indústria são utilizados equipamentos de raio X ou equipamentos de raios gama. As imagens de raio X em placas fotográficas mostram a existência de falhas mas a desvantagem deste processo é que o equipamento é volumoso e caro. Por isso, em alguns casos utilizam-se radioisótopos que emitem raios gama de alta penetração em vez de equipamentos de raio X. Estas fontes de isótopos podem ser enclausurados em contentores compactos e blindados. Em aplicações industriais é usual utilizar o cobalto 60 e o cézio 137. Em algumas aplicações médicas e industriais já se utilizou o Túlio 70 em protectores isotópicos pequenos e cómodos de usar.



Também na medicina se utilizam os raios X. Existem duas vertentes para os raios X na medicina. São utilizados maioritariamente para visualizar o interior do corpo humano, tal como na indústria, sem ser necessária qualquer acção destrutiva e são ainda utilizados em radioterapia como forma de combate ao cancro. Inicialmente as radiografias não permitiam mais do que ver a presença de corpos estranhos no interior do corpo humano como por exemplo uma bala. Posteriormente a utilização dos raios X foi sendo desenvolvida e começou a ser possível detectar alterações nos tecidos dos órgãos internos utilizando líquidos de contraste, embora estes tivessem efeitos secundários. Actualmente já se utilizam equipamento que não necessitam de líquidos de contraste mas mesmo assim é desaconselhado o uso de raio X por hábito.



Procedimento

No início deste projecto foi criado um procedimento para a sua execução com prazos previstos. A ideia inicial era seguir esse procedimento até final mas esse intento não foi possível devido a diversos atrasos. Inicialmente existiu um atraso com a disponibilidade do molde para se efectuar o trabalho. Posteriormente foi necessário equacionar qual a melhor solução para a aquisição dos dados recolhidos com os termopares. Também esse processo foi mais moroso do que o inicialmente previsto e houve necessidade de negociações com o fornecedor do equipamento para que o mesmo estivesse dentro do orçamento disponível. Durante esta fase foram executadas algumas tarefas que não estavam dependentes das anteriores. Também foram efectuadas algumas actividades em paralelo, com interesse directo e/ou indirecto para o âmbito deste projecto, mas que podem vir a ser úteis para o futuro. A observação de um ensaio de um novo molde ou a participação na montagem e desmontagem de um molde ajuda a entender melhor o processo e os tempos envolvidos neste tipo de operações. Também o desenvolvimento de uma base de dados para registo pormenorizado dos ensaios efectuados permitiu o melhor conhecimento das variáveis envolvidas no processo.

Quando tivemos o molde disponível procedeu-se à sua montagem na máquina mas houve necessidade de proceder a várias reparações. Estas reparações à ferramenta atrasaram um pouco mais o trabalho e serão descritas pormenorizadamente mais à frente.

Já mais para o final do projecto houve a oportunidade ainda da participação no curso de formação em “Programação de Máquinas de Fundição Injectada” leccionado por um formador da Buhler, o qual permitiu um mais pormenorizado conhecimento da máquina de injectar disponível e do seu manuseamento.

Finalmente, já com um atraso considerável, pode-se proceder à execução dos ensaios.

O procedimento adoptado para o estudo da influência da temperatura na sanidade das peças foi o seguinte:

1. Adaptar o molde disponível à máquina de injectar.



2. Estudar a homogeneidade da temperatura no forno de manutenção.
3. Estudar as perdas de calor da liga entre o forno de manutenção e a camisa de injeção.
4. Estudar a geometria das peças a injectar e identificar e analisar os pontos que poderão vir a ser críticos.
5. Colocar termopares junto aos pontos críticos.
6. Estudo do comportamento térmico do molde.
7. Ajuste do ciclo de injeção (condições padrão).
8. Variar as seguintes variáveis mantendo todas as outras nos valores padrão fazendo algumas injeções com as condições estabilizadas:
 - i. Variar a temperatura da termoregulação
 - ii. Variar a temperatura da liga
 - iii. Variar a velocidade de injeção
9. Análise de diversas peças ao Raio X.
10. Corte, polimento e análise dos poros das zonas críticas de uma peça representativa de cada grupo.
11. Interpretação dos resultados obtidos em função das variáveis alteradas.
12. Optimização do processo e redução do tempo de ciclo.



Adaptação do molde à máquina de injectar

Antes de iniciar este trabalho foi necessário efectuar a adaptação do molde à máquina de injectar disponível. A máquina de injectar é uma Buhler Evolution 42D. O molde, sendo já antigo, não estava preparado para a máquina de injectar em questão. Foi necessário portanto fazer algumas alterações. As características principais do molde podem ser vistas no anexo 1.

Iniciámos esse processo calculando a localização do molde na máquina tendo em conta a zona de aperto da extracção. O molde foi então colocado a uma cota de -100mm e as quatro colunas da extracção da máquina irão apertar em furos que distam do centro 75mm em xx' e em yy' , de acordo com a figura seguinte.

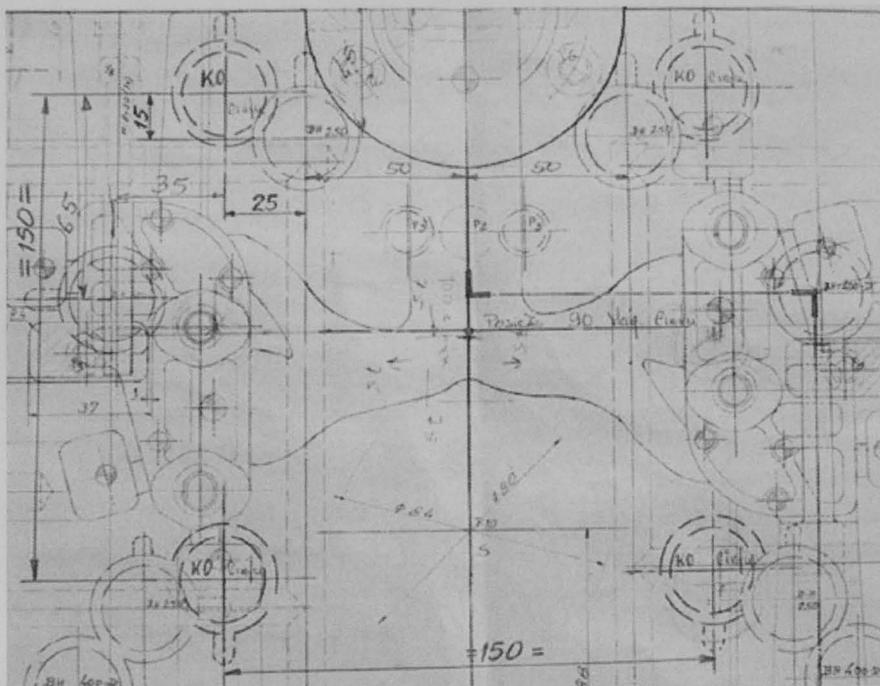


Figura 10 – Colocação dos KO's para aperto da extracção

Foi também necessário executar um casquilho para adaptar a camisa de injeção ao prato fixo da máquina. A camisa de injeção tem dimensões diferentes das camisas utilizadas no CINFU actualmente. O furo do prato da máquina tem diâmetros de 169mm e 150mm enquanto que os diâmetros externos da camisa são de 126mm e 112mm. O comprimento da gola com



diâmetro superior também é diferente, sendo de 15mm no prato da máquina e de 20mm na camisa.

O casquilho foi projectado e executado o seu desenho com cotagem para posterior maquinagem como se mostra na figura seguinte.

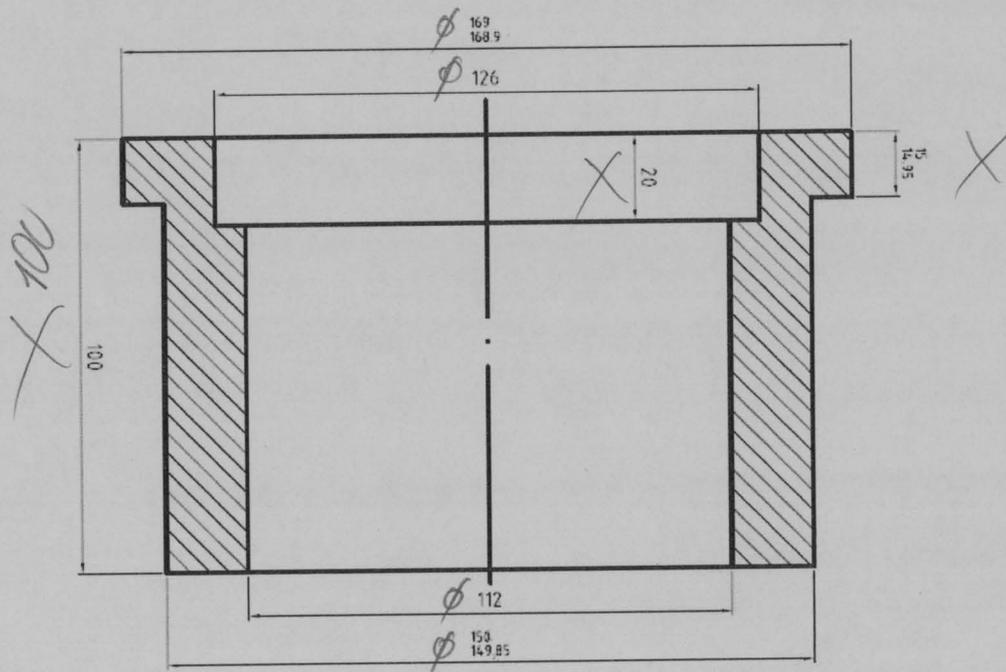


Figura 11 – Casquilho de adaptação da camisa à máquina de injectar

O comprimento da camisa em causa é também inferior ao comprimento utilizado usualmente e foi necessário adaptar o comprimento da haste para compensar esta diferença. Inicialmente existiam duas soluções para aumentar o comprimento da haste. Num primeiro momento pensou-se em cortar a haste e utilizar alongadores intermédios que poderiam ter vários tamanhos, aumentando assim a versatilidade da haste. No entanto esta solução obrigava a possuir vários tubos de refrigeração com os diversos comprimentos. Optou-se então pela solução mais barata que consiste na maquinagem de um taco com um comprimento maior na retaguarda da haste, permitindo assim utilizar o tubo de refrigeração original e evitando fragilizar a haste inserindo ligações roscadas.

Para qualquer das soluções anteriores seria necessário saber quanto se deveria aumentar ao comprimento da haste para que esta funcione bem com a camisa deste molde.



A camisa deste molde é 50mm mais curta que a camisa utilizada anteriormente, logo será necessário adicionar esta cota ao comprimento da haste. No entanto, esta camisa tem também uma gola na zona de entrada do pistão com 15mm de profundidade e é necessário garantir que o pistão na sua cota zero está dentro da camisa (figura 12).

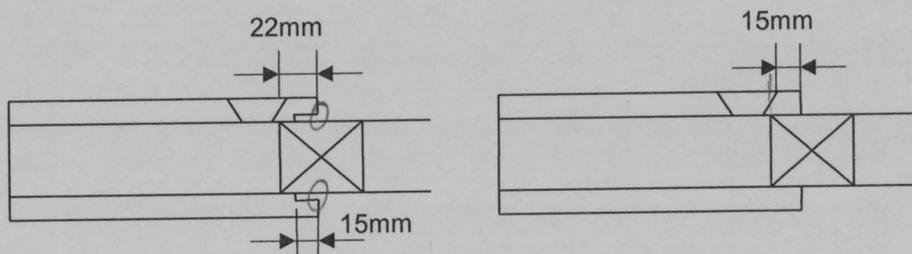


Figura 12 – Esquema da posição do pistão na camisa de injeção

Assim sendo o comprimento que se deve acrescentar à haste é igual a:

$$L = 80 + 50 + 7$$

$$L = 137$$

Os 80mm são a dimensão do corpo do taco existente e os 50mm vêm da diferença de comprimentos das camisas. Geralmente são utilizadas camisas com 315mm de comprimento mas neste caso a camisa tem apenas 265mm. Os 7mm adicionais vêm da necessidade de garantir que o pistão está completamente dentro da camisa em



Figura 13 – Camisa de injeção

qualquer instante. Na camisa que estava montada anteriormente, com a mesma haste, o pistão ficava 15mm no interior da camisa. Neste caso era necessário que ficasse 22mm no interior da camisa pois a mesma tem uma gola de 15mm de profundidade como se mostra na figura 13.

Feitos estes cálculos, chegamos às dimensões finais do taco como se mostra na figura 14.

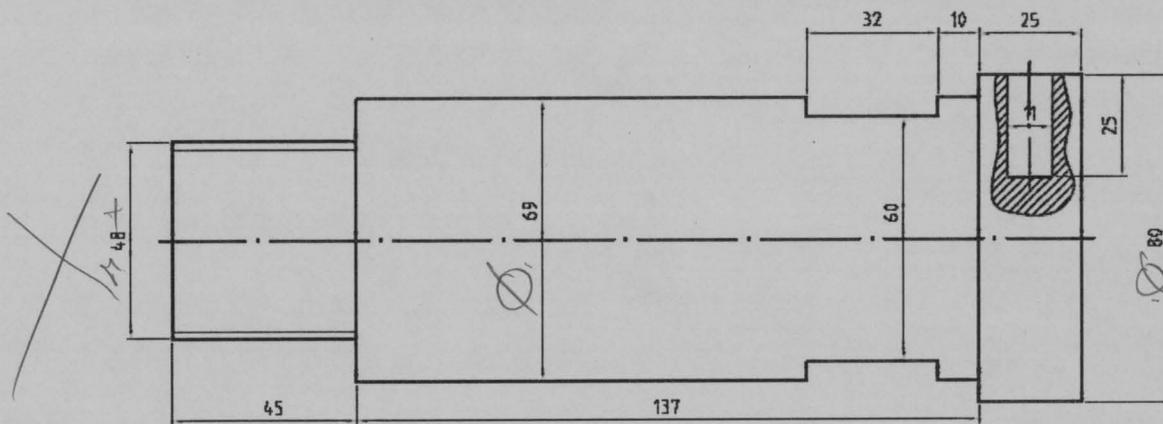


Figura 14 – Taco alongador

A outra solução equacionada que consistia numa haste com alongadores intermédios e está demonstrada na figura 15. O corpo do elemento onde é acoplado o pistão teria um comprimento de 200mm e o elemento onde actua o hidráulico da máquina teria um comprimento de 185mm. O elemento intermédio teria um comprimento de 210mm para a haste com o seu comprimento original ou um comprimento de 267mm utilização com o molde em estudo.

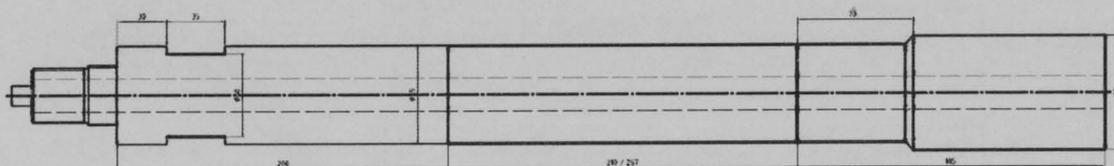


Figura 15 – Esquema da haste com alongadores intermédios

Quando já se esperava que o molde estivesse completamente funcional, surgiu a necessidade de uma última alteração. Após a montagem da camisa de injeção no molde fixo verificou-se que a furação da refrigeração da camisa não coincidia com a furação da estrutura. Neste caso foi necessário alargar os furos na estrutura para que os alongadores da refrigeração com água pudessem ser apertados na camisa. Ao contrário das situações anteriores, não se tratou de uma adaptação do molde à máquina de injectar mas de uma adaptação da estrutura do molde à camisa. Pode-se dizer portanto que esta camisa nunca trabalhou com este molde, ou pelo menos que nunca trabalhou utilizando refrigeração.



Reparações efectuadas no molde

Após a montagem do molde na máquina surgiram diversos problemas que obrigaram a uma intervenção que durou vários dias para reparação do molde. De forma a resolver estes problemas o mais rapidamente possível as reparações, sempre que possível, foram efectuadas no Cinfu com o auxílio do equipamento da secção de CNC.

Reparação das fugas do sistema hidráulico das gavetas

O sistema hidráulico das gavetas foi o primeiro a ser reparado. As mangueiras fornecidas com o molde estavam muito degradadas e as ligações roscadas já não permitiam uma correcta vedação. Foram adquiridas novas mangueiras e novas ligações de forma a eliminar as várias fugas que este sistema hidráulico tinha.

Fugas de água

Quando se procedia à montagem do molde e se ligavam todos os acessórios verificou-se que os tubos de água que apertam no casquilho da camisa tinham muita folga e não vedavam. Tentou-se resolver o problema com uma maior quantidade de *Teflon* e com a camisa fora do molde como se mostra na figura 16 mas a fuga de água continuava.

A fuga era inaceitável e houve necessidade de alargar os furos de 1/4 GAS para uma nova rosca de 3/8 GAS. Este problema foi assim resolvido ao longe de uma tarde pois obrigou ainda à aquisição de uma broca HSS 15.25 indicada para o macho de 3/8 GAS.

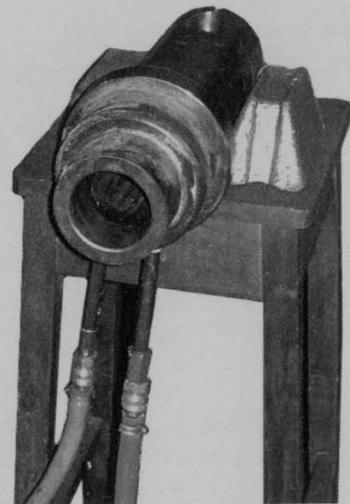


Figura 16 – Fugas de água

Tube de termoregulação partido



Ao mesmo tempo surgiu outro problema com a quebra de um tubo da termoregulação dentro de uma inserção do lado móvel. Esta quebra do tubo a meio da rosca pode explicar-se pelo estado degradado dos acessórios já com várias horas de uso.

Foram utilizados métodos tradicionais para remover o tubo partido de dentro da inserção como um tubo cilíndrico maciço maquinado com 4 faces com uma ligeira conicidade. Não obtendo sucesso procedeu-se à compra de um jogo de saca pernos, que consiste em machos cónicos de rosca esquerda que deveriam apertar no tubo partido e obriga-lo a desapertar-se da rosca da inserção. No entanto, esta solução também não resultou talvez por ter sido criada alguma deformação plástica nas tentativas anteriores de remoção do tubo partido. A

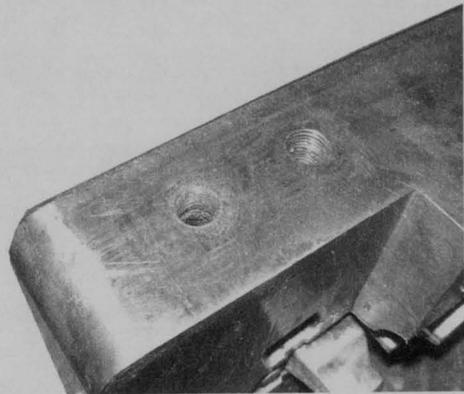


Figura 17 – Rosca danificada

única solução seria a remoção da inserção. Foi então necessário remover o lado móvel do molde da máquina e proceder à sua desmontagem para possibilitar a remoção da inserção. Já com a inserção fora da estrutura pôde ver-se pela primeira vez o estado do furo roscado, uma vez que com o molde montado o furo roscado apenas é visível através de um furo passante da estrutura. Foram equacionadas duas possibilidades para resolver este problema. Em primeiro lugar tentamos recuperar a rosca existente e se esta solução não tivesse sucesso iria ser necessário abrir uma caixa por electroerosão e utilizar um inserto roscado e posteriormente um cordão de solda para garantir estanquicidade.

A recuperação da rosca foi feita garantindo que o centro do furo estava alinhado com a árvore da máquina de furar e utilizando uma broca com o diâmetro interno da rosca. Desta forma eliminou-se parte do tubo partido. Ficaram apenas alguns resíduos do tubo dentro dos vales da rosca que foram facilmente removidos. A rosca foi depois avivada pela passagem de um macho de 1/4 GAS. Não foi portanto proceder a uma solução mais trabalhosa e mais demorada da instalação de um inserto.



Reparação da folga nos KO's

Quando se ensaiava o molde verificou-se que ao movimentar a extracção existia uma folga nos KO's que haviam sido modificados para a nossa máquina de injectar. Quando se detectou esta folga não estava previsto que a mesma fosse reparada antes do final deste trabalho mas a necessidade de desmontar o lado móvel para a remoção do tubo de termoregulação partido permitiu solucionar este problema.

A folga existente não permitia recuar a placa extractora até aos batentes e desta forma os pernos de retorno não recuavam o suficiente e dificultavam o fecho correcto do molde. Esta situação gerava "espirros" frequentes de alumínio. Esta situação passou a ser esporádica após a reparação desta avaria.

Reparação do circuito eléctrico dos fins de curso das gavetas

O circuito eléctrico dos fins de curso das gavetas também se encontrava bastante degradado e com alguns resíduos de alumínio. Os fins de curso foram limpos e a instalação eléctrica foi integralmente revista. Procedeu-se à substituição dos fios eléctricos por outros novos e apenas de aproveitou o tubo em malha metálica para protecção dos mesmos.

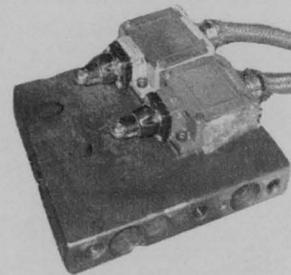


Figura 18 – Fins de curso das gavetas hidráulicas

Reparação de um pino de uma gaveta

Com o molde aparentemente pronto a começar a injectar procedeu-se à primeira injeção. No entanto, logo na segunda injeção, o pino de uma das gavetas desceu da sua posição. Na altura da injeção a cabeça do pino, que deveria moldar a face junto ao furo, deu origem a uma caixa na peça e quando a extracção avançou o pino não saiu completamente do furo da peça e a

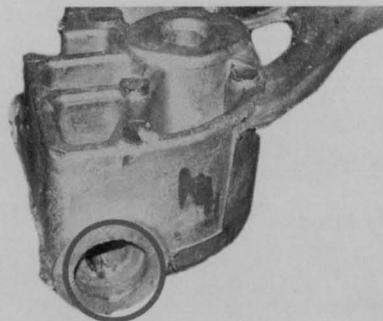


Figura 19 – Caixa criada pelo mau posicionamento do perno moldante



mesma empenou o pino.

Foi necessário tornear um novo pino de substituição e averiguar o que se terá passado de forma a evitar que esta situação se repetisse.

Inicialmente pensava-se que esta situação devesse apenas a um mau aperto do pino à zona guia da gaveta mas posteriormente verificou-se que o parafuso era demasiado comprido e por isso não fixava o perno na guia da gaveta. Tentou-se substituir o parafuso por um de comprimento inferior mas as medidas disponíveis eram demasiado pequenas Assim, procedeu-se ao corte do parafuso. Montada a gaveta no molde retomaram-se as injecções.



Figura 20 – Perno moldante danificado

Este perno não recebeu qualquer tratamento térmico e não deverá ter uma vida muito prolongada. Foram encomendados pernos de substituição temperados para substituições futuras. Este perno não foi para temperar apenas por uma questão de falta de tempo.



Homogeneidade da temperatura no forno de manutenção

Com o objectivo de verificar a homogeneidade da temperatura do alumínio no forno foram efectuadas várias medições em pontos diferentes do forno de manutenção.

Antes de mais convém referir que na empresa em causa o alumínio não é fundido no forno de fusão mas sim no de manutenção. Os fornos existentes são ambos de cadinho e, geralmente, o forno de fusão apenas é utilizado quando há a necessidade de uma grande quantidade de alumínio diária. Este facto pode ser explicado pelo número reduzido de injeções que se fazem regularmente. Assim o alumínio é mantido fundido e acrescentam-se lingotes e/ou sucatas para manter o nível do material pronto a ser injectado. As grandes desvantagens deste método são o superior custo energético de manter o forno sempre ligado e a formação de maior quantidade de escória no forno de manutenção.

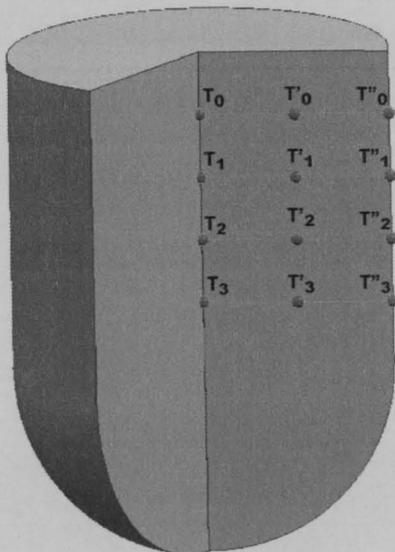


Figura 22 – Zonas de medição de temperatura

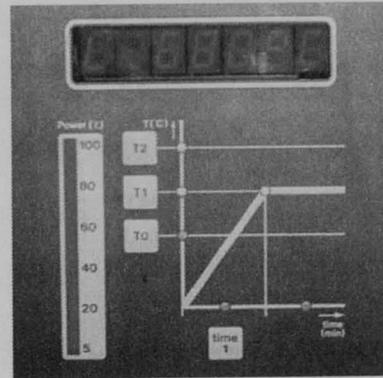


Figura 21 – Temperatura do forno de

O forno de manutenção está regulado para manter o alumínio a uma temperatura de trabalho de 685°C. A temperatura estabelecida para a manutenção da liga fundida é de 650°C e o limite máximo para a temperatura da câmara do forno está programado para os 800°C (figura 21).

Foram medidas as temperaturas em diversas zonas e em 4 profundidades diferentes conforme se mostra na figura 22. As medições foram repetidas 5 vezes em intervalos de 30 minutos.



Para o efeito foi utilizado um pirómetro de imersão portátil (figura 23) com uma bainha de 60cm de comprimento e todo o equipamento de segurança necessário tendo a conta a temperatura do alumínio fundido.

Para proteger a bainha do pirómetro foi utilizada uma pintura de grafite. Esta pintura obriga a esperar alguns minutos até à secagem da mesma, até mesmo para não levar qualquer água para o banho de fusão.

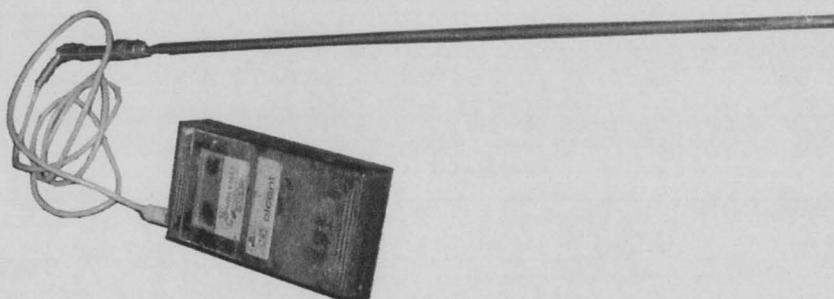


Figura 23 – Pirómetro de imersão portátil

O tempo de secagem e o tempo necessário ao arrefecimento da bainha para possibilitar a pintura foram determinantes para o intervalo entre as várias medições. Assim sendo, foram feitas 5 medições com 30 minutos de intervalo.

O pirómetro utilizado permite a medição de temperaturas num intervalo desde a temperatura ambiente até temperaturas superiores a 1000°C o que nos permite trabalhar longe dos seus limites.

Os valores obtidos apresentam-se de seguida na tabela 1. Estes valores foram substancialmente mais baixos do que o que seria de esperar. A

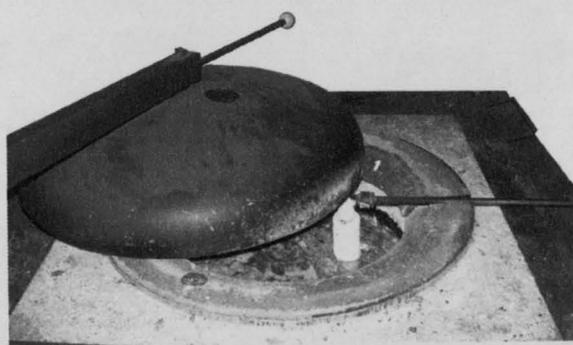


Figura 24 – Pirómetro do forno

temperatura medida pelo pirómetro do forno é sempre superior à temperatura medida pelo pirómetro portátil, mesmo estando os dois na mesma zona. Foi também utilizado um outro aparelho para medir a temperatura do alumínio junto à superfície que nos deu valores

aproximados dos valores lidos no mostrador do forno. No entanto este último pirómetro não nos permitia fazer medições em profundidade. De qualquer forma o interesse principal deste estudo é verificar as variações de temperatura e não os seus valores absolutos.



É de salientar que o desvio padrão máximo das medições feitas à mesma hora em diversas zonas do cadinho é de $2,8^{\circ}\text{C}$ e a diferença máxima entre as temperaturas máxima e mínima é de 7°C .

O ponto T_0 (figura 22) é o ponto que apresenta uma maior variabilidade de temperatura, sendo o seu desvio padrão de $3,74^{\circ}\text{C}$. Do lado oposto o ponto T''_3 é o ponto com menor variabilidade de temperatura com um desvio padrão de $2,51^{\circ}\text{C}$.

1ª medição Hora: 15h00
 $T_{\text{forno}} = 684^{\circ}\text{C}$

| Nível (cm) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | | |
|------------|------------------------------------|-----|-----|
| | T | T | T'' |
| 10 | 674 | 674 | 673 |
| 20 | 676 | 676 | 676 |
| 30 | 680 | 680 | 679 |
| 40 | 680 | 680 | 680 |

2ª medição Hora: 15h30
 $T_{\text{forno}} = 691^{\circ}\text{C}$

| Nível (cm) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | | |
|------------|------------------------------------|-----|-----|
| | T | T | T'' |
| 10 | 680 | 679 | 679 |
| 20 | 679 | 679 | 678 |
| 30 | 680 | 679 | 679 |
| 40 | 680 | 680 | 680 |

3ª medição Hora: 16h00
 $T_{\text{forno}} = 684^{\circ}\text{C}$

| Nível (cm) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | | |
|------------|------------------------------------|-----|-----|
| | T | T | T'' |
| 10 | 674 | 674 | 673 |
| 20 | 673 | 673 | 673 |
| 30 | 676 | 676 | 676 |
| 40 | 678 | 678 | 679 |

4ª medição Hora: 16h30
 $T_{\text{forno}} = 691^{\circ}\text{C}$

| Nível (cm) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | | |
|------------|------------------------------------|-----|-----|
| | T | T | T'' |
| 10 | 682 | 681 | 680 |
| 20 | 680 | 679 | 680 |
| 30 | 682 | 681 | 682 |
| 40 | 683 | 683 | 683 |

5ª medição Hora: 17h00
 $T_{\text{forno}} = 681^{\circ}\text{C}$

| Nível (cm) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | | |
|------------|------------------------------------|-----|-----|
| | T | T | T'' |
| 10 | 675 | 675 | 674 |
| 20 | 674 | 674 | 673 |
| 30 | 675 | 674 | 674 |
| 40 | 676 | 676 | 676 |

Tabela 1 – Valores obtidos na medição da temperatura em diversos pontos do forno

Num ambiente industrial será também importante a variação da temperatura do banho de fusão ao longo do tempo e não apenas em diversas zonas do cadinho no mesmo instante. Ao longo do tempo, na mesma zona do forno, em diferentes profundidades, o desvio padrão máximo das temperaturas médias é de $1,8^{\circ}\text{C}$ enquanto que à mesma profundidade as variações com a



zona do forno são ainda menores com um desvio padrão máximo das temperaturas médias de $0,61^{\circ}\text{C}$.

Pode-se portanto dizer que as variações máximas da temperatura ao longo do tempo e em diferentes zonas do forno de manutenção não ultrapassam os 1,5% o que é um valor bastante aceitável. Esta variação máxima de temperatura de 10°C mantém o banho de fusão no intervalo pretendido.

Fica assim a ideia de que a temperatura dentro do forno é suficientemente homogénea no mesmo instante ao longo do banho, para a ordem dos valores em questão. Existe portanto uma ligeira tendência para um aumento da temperatura à medida que se desce no forno, a qual deverá ser mais perceptível quando o forno está na fase de aquecimento do banho de fusão.



Variação da temperatura entre o forno de manutenção e a camisa de injeção

Para se dar início ao estudo da variação da temperatura do alumínio entre o forno de manutenção e a camisa de injeção foram simuladas as condições de produção contínua. Foram portanto feitas algumas injeções para que a camisa aquecesse até à sua temperatura de trabalho. A temperatura da liga estava regulada para os 685°C.

Para verificar a queda de temperatura do alumínio entre o forno de manutenção e a camisa de injeção foi utilizado o mesmo pirómetro portátil utilizado na verificação da homogeneidade de temperatura do forno de manutenção descrito no capítulo anterior.

O procedimento utilizado consistiu em 5 medições consecutivas. Em primeiro lugar foi medida a temperatura do forno de manutenção. O alumínio depois de retirado do forno de manutenção pela colher é vazado para a caleira que o levará ao interior da camisa (figura 25). O pirómetro portátil foi então mergulhado no alumínio já dentro da camisa de injeção e foram registados os valores lidos. O curso do pistão foi limitado a 10mm para que o mesmo não danificasse o pirómetro.

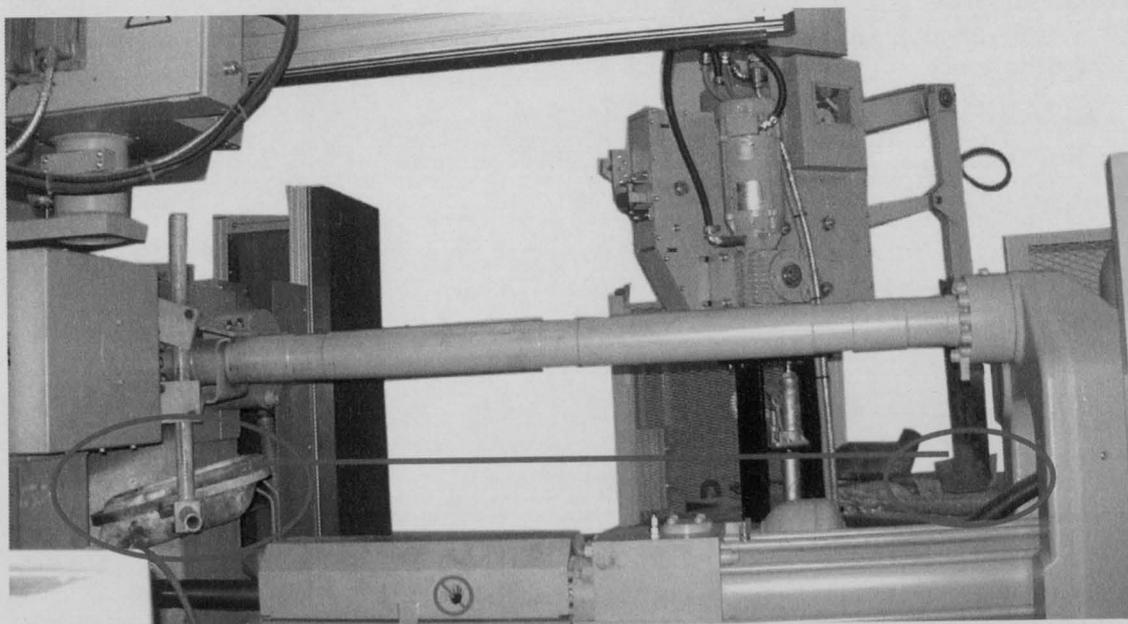


Figura 25 – Transporte do alumínio do forno de manutenção até à camisa de injeção



| | T _{forno} [°C] | T _{camisa} [°C] |
|---|-------------------------|--------------------------|
| 1 | 678 | 538 |
| 2 | 678 | 544 |
| 3 | 677 | 538 |
| 4 | 677 | 555 |
| 5 | 676 | 558 |

Tabela 2 – Valores obtidos na medição da temperatura no forno de manutenção e camisa

Tal como já se tinha referido no capítulo anterior este pirómetro dá valores ligeiramente mais baixos para a temperatura da liga dentro do forno de manutenção do que os valores das temperaturas lidas com o pirómetro do forno. No entanto, e como aqui só se estuda a variação de temperaturas, esse facto não é muito relevante.

A conclusão a que chegamos é que o alumínio perde bastante calor para o ar enquanto é transportado e para a camisa até ser injectado. Obtivemos quedas entre 118°C e 140°C e entre o forno de manutenção e a camisa de injeção, o que é bastante significativo. De salientar que a variação máxima da temperatura do alumínio no forno de manutenção foi de 2°C enquanto que a variação máxima da temperatura do alumínio na camisa foi de 20°C. Esta diferença pode ser explicada por apenas alguns segundos de diferença no vazamento do alumínio para a camisa e pela necessidade de retirar o pirómetro do banho antes que o mesmo solidifique. A partir do momento em que a colher retira o alumínio no forno este começa a perder calor. Dependendo do tempo que a colher espera junto à caleira até fazer o vazamento o alumínio chegará à camisa mais ou menos quente. Depois são necessários alguns segundos para que o pirómetro estabilize e durante este tempo o alumínio continua a arrefecer. As leituras da temperatura do alumínio na camisa foram todas retiradas no momento em que o pistão inicia o seu movimento de avanço o qual injectaria a peça em produção.



Estudo da geometria da peça

A geometria da peça em causa foi estudada com vista à localização de possíveis pontos críticos. Foram analisadas zonas de maior espessura e a zona da gaveta moldante.

É de salientar que esta peça é de pequenas dimensões e apresenta diversas nervuras e uma espessura praticamente constante. Assim sendo, o ponto mais crítico será junto à gaveta onde irá existir porosidade. Este é ainda o ponto mais distante dos ataques.

Cada peça é extraída por intermédio de 8 extractores e contêm 3 furos moldados, sendo um deles moldado por uma gaveta hidráulica por ter a sua direcção perpendicular aos restantes.

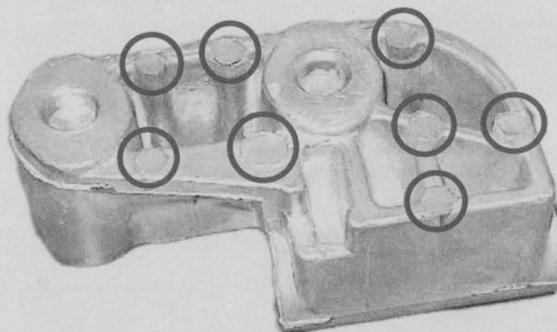


Figura 26 – Localização das marcas dos extractores

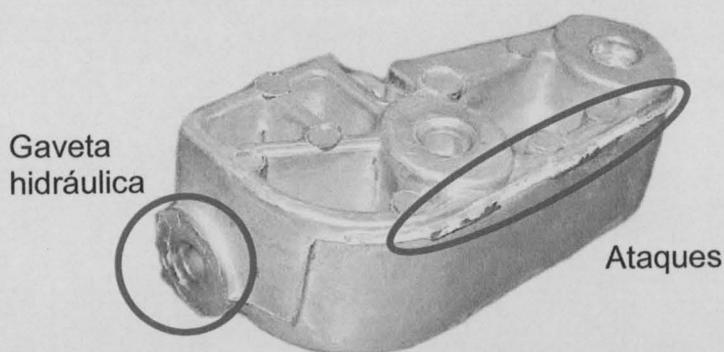


Figura 27 – Localização do furo moldado pela gaveta hidráulica e dos ataques



Colocação dos termopares no molde e na camisa de injecção

Para medição da temperatura ao longo do ciclo de injecção usaram-se termopares tipo K. A sua instalação foi projectada para medir as temperaturas em diferentes posições da cavidade do molde e monitorizar a sua evolução durante o ciclo de injecção. Para este efeito, estudou-se a peça com vista à identificação de possíveis pontos críticos com turbulência do metal injectado e/ou zonas de sobre-espessura. É também aconselhável colocar termopares no gito.

Após consulta de diversa bibliografia foi escolhida uma distância de 5mm para a colocação dos termopares em relação ao alumínio fundido. Esta distância influencia as leituras obtidas com os termopares de duas formas. À medida que nos afastamos do alumínio, por um lado a temperatura irá baixando pois o molde está sempre mais frio do que o alumínio fundido e por outro lado vamos ter um atraso na leitura das temperaturas pois o calor trazido pelo alumínio vai-se propagando por condução através do aço. Estas duas tendências podem-se ver na figura seguinte. Convém ainda assegurar que os termopares fiquem mais próximos da zona moldante do que dos canais de refrigeração pois estes irão influenciar as medições.

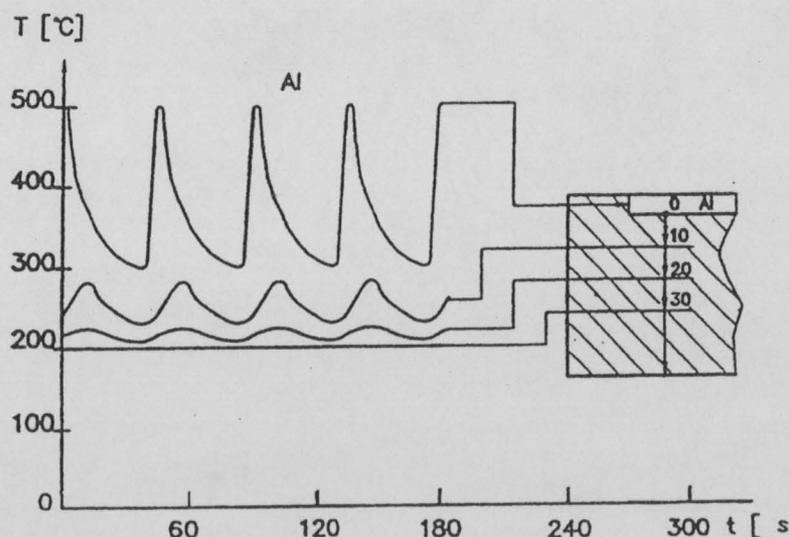


Figura 28 – Amplitude térmica para diferentes distâncias da superfície moldante



De salientar que a perda de calor à medida que nos afastamos da zona moldante é mais notória do que o atraso na condução do calor pelo aço.

A colocação dos termopares foi feita da seguinte forma:

1. Termopar na camisa de injeção (5mm do alumínio)

Objectivo: conhecer a temperatura do alumínio antes de este ser injectado.

2. Termopar no taco (lado móvel a 5mm do alumínio)

Objectivo: conhecer a temperatura no molde junto à bolacha e controlar o tempo de solidificação.

3. Termopar no alimentador (5mm do alumínio)

Objectivo: verificar a evolução da temperatura do alumínio entre a camisa de injeção e a peça.

4. Termopar na direcção do alimentador mas mais afastado (25mm do alumínio)

Objectivo: verificar a condutividade térmica do aço e a consequente propagação do calor gerado pela injeção ao longo do molde e consequente influência na peça.

5. Termopar na peça – ponto 1a (lado móvel a 5mm do alumínio)

Objectivo: verificar a temperatura na zona da gaveta hidráulica onde é gerada alguma porosidade.

6. Termopar na peça – ponto 1b (lado fixo a 5mm do alumínio)

Objectivo: verificar a temperatura na mesma zona da peça que estamos a medir com o termopar 5 mas no outro meio molde.

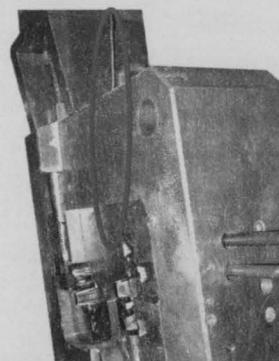


Figura 29 – Termopar nº3

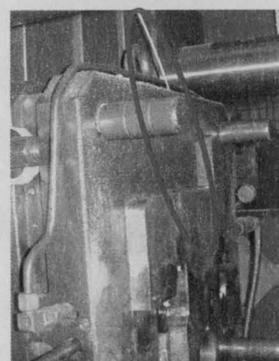


Figura 30 – Termopar nº 4

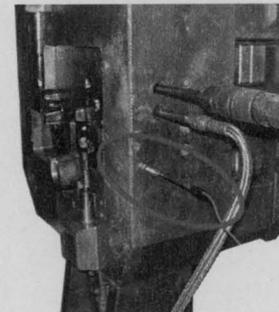


Figura 31 – Termopar nº 5

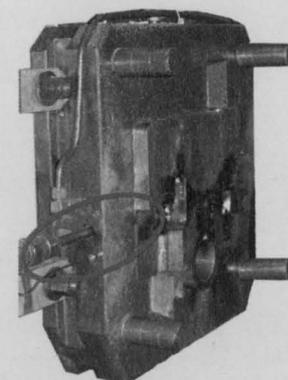


Figura 32 – Termopar nº 6



Optou-se por colocar os termopares 5 e 6 na cavidade 2 por ser a que deveria originar peças com maiores problemas. Esta ideia ficou depois de analisar o fluxo que o alumínio terá de seguir nos canais. É também nesta cavidade que existe um masselote sem extractor.

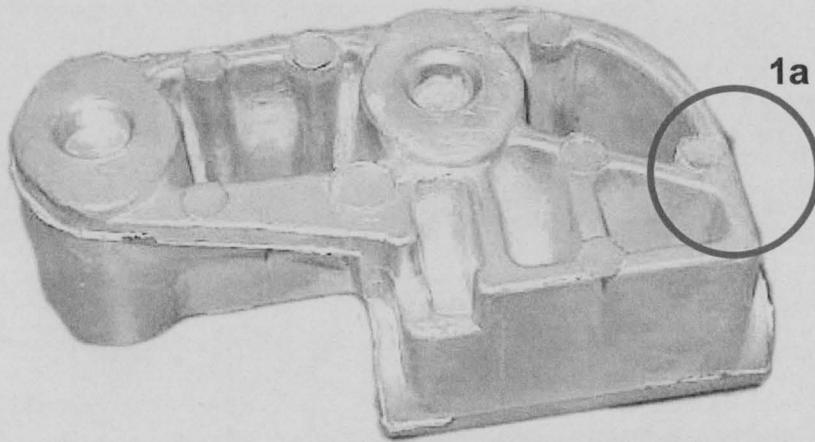


Figura 33 – Ponto de medição da temperatura junto à peça: lado móvel

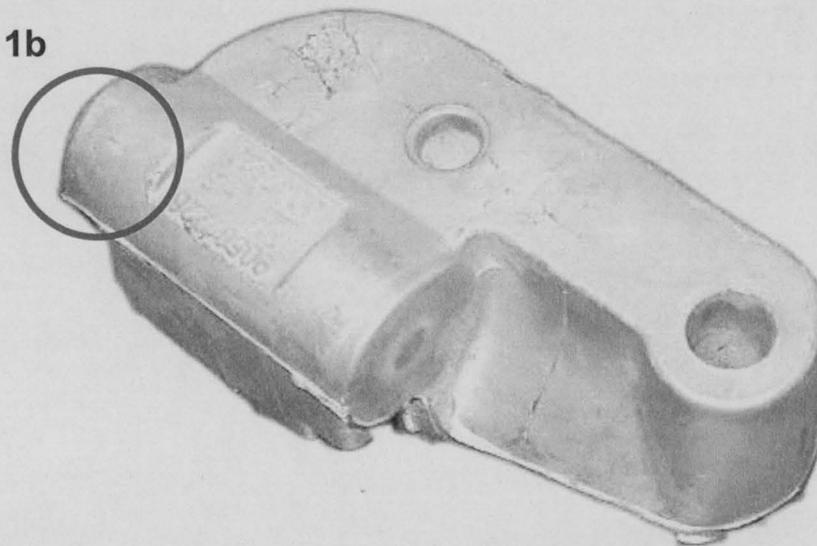


Figura 34 – Ponto de medição da temperatura junto à peça: lado fixo



Estudo do comportamento térmico do molde

Para o estudo do comportamento térmico do molde foi calculada teoricamente a quantidade de calor trazida pelo alumínio e a quantidade de calor que o molde liberta por convecção, radiação e condução.

Para o cálculo da quantidade de calor trazida pelo alumínio foi estimada uma produção de 70 peças por hora. Sabendo que a quantidade de energia que o alumínio transmite ao molde por hora é de 607kJ e que em cada jito são injectados 1.04Kg foi calculada a quantidade de calor por hora.

$$Q_{Al} = c.N.ml \quad \Leftrightarrow \quad Q_{Al} = 44189.6 \text{ kJ/h}$$

É, portanto, necessário que a quantidade de calor retirada ao molde seja igual ou superior à quantidade trazida pelo alumínio.

Começando então por calcular as perdas de calor por convecção utilizaram-se valores tabelados por centímetro de canal válidos para um intervalo de diâmetros.

| lado | cavidade | canal [mm] | comprimento [cm] | Q/cm [kJ/(h.cm)] | Q [kJ/h] |
|--------|----------|------------|------------------|------------------|----------|
| móvel | 1 | 11 | 48,2 | 188 | 9061,6 |
| | 2 | 11 | 48,2 | 188 | 9061,6 |
| | taco | 11 | 9,6 | 377 | 3619,2 |
| fixo | 1 | 11 | 54,7 | 188 | 10283,6 |
| | 2 | 11 | 54,7 | 188 | 10283,6 |
| | camisa | 11 | 9,6 | 377 | 3619,2 |
| Total= | | | | | 45928,8 |

Tabela 3 – Calor retirado do molde por convecção (água e óleo)

Este resultado significa que apenas com a refrigeração do taco e da camisa com água e com a termoregulação é possível controlar a temperatura do molde de forma a compensar o calor introduzido pelo alumínio.

De seguida foram consideradas as perdas de calor por radiação para o meio ambiente. Considerando o molde fechado, existem 4 faces que trocam calor com o meio ambiente e portanto essas são as áreas que entram em conta neste cálculo. Sendo o molde já antigo e estando muito oxidado, considerou-se



$\epsilon=0.8$ e considerou-se um coeficiente $Cs=5.77W/m^2K^4$. Considerou-se uma temperatura ambiente de $20^\circ C$ e uma temperatura média do molde de $140^\circ C$.

$$Q_{RAD} = A.\epsilon.Cs.(T_{molde} - T_{ambiente}) \quad \Leftrightarrow \quad Q_{RAD} = 1048kJ$$

Pode-se portanto concluir que as perdas de calor por radiação são muito pouco relevantes quando comparadas com a quantidade de calor retirada pelos canais de refrigeração.

Existe ainda mais um meio de transferência de calor que consiste na perda de calor do molde para os pratos da máquina. Neste caso considerou-se uma temperatura de $130^\circ C$ para o lado fixo e de $160^\circ C$ para o lado móvel enquanto que o óleo está a $120^\circ C$. Considerou-se uma temperatura de $50^\circ C$ para o prato fixo e uma temperatura de $70^\circ C$ para o prato móvel. O coeficiente da condutividade térmica para o aço é de $\beta=100W/m^2K$.

$$Q_{COND} = A.\beta.(T_{molde} - T_{prato}) \quad \Leftrightarrow \quad Q_{COND} = 5068kJ$$

É necessário ter em atenção que estes cálculos teóricos apenas permitem uma ideia da transferência de calor no molde. Na realidade não é possível, por exemplo, saber com exactidão a temperatura média de um molde pois para isso seria necessário saber a temperatura do mesmo em todos os pontos.



Análise das peças

Ao longo deste trabalho será necessário verificar a qualidade interna das peças injectadas. Para tal serão utilizados dois tipos de análises: a análise não destrutiva ao raio X e a análise destrutiva por corte e polimento.

Análise não destrutiva das peças ao Raio X

As análises não destrutivas consistem na utilização de raio X para verificar a porosidade interna das peças. Este tipo de análise tem a grande vantagem de mostrar todo o interior da peça em várias direcções permitindo localizar com alguma precisão os poros não destruindo a mesma. A análise não destrutiva das peças ao raio X foi utilizada durante a optimização do ciclo

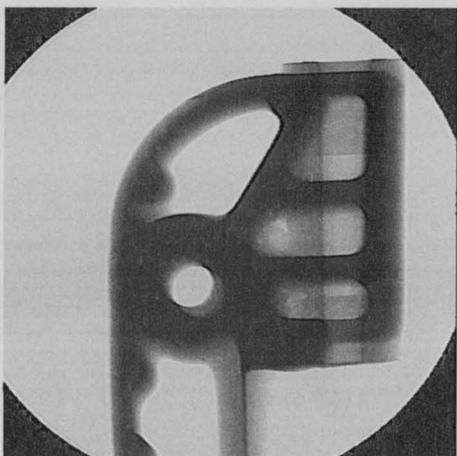


Figura 35 – Exemplo de uma peça vista ao raio X

de injeção e na posterior variação dos parâmetros da injeção. Neste estudo não há grande importância em manter as peças utilizáveis mas na indústria o raio X é fundamental e por vezes pode ser utilizado em todas as peças de um determinado cliente que assim o exija.

De salientar que foram utilizados dois equipamentos de raio X distinto ao longo deste trabalho. Como o CINFU não dispõe de qualquer aparelho de raio X foi necessário recorrer ao equipamento da Sonafi ou ao equipamento da Küpper & Schmidt. Por uma questão de logística recorreremos mais vezes à Sonafi. O equipamento da Sonafi tem ainda a vantagem de permitir a recolha das imagens para disquete.

Análise destrutiva das peças

O outro tipo de análise efectuada consiste no corte e polimento da peça e é portanto uma análise destrutiva.



Esta solução embora seja bastante mais demorada do que a anterior tem outras vantagens. Este processo foi muito utilizado durante este trabalho na fase de optimização do ciclo de injeção. Este tipo de análise pôde ser feita no Cinfu e permitiu realizar a parte final da optimização do ciclo mais rapidamente. Desta forma não foi necessário realizar algumas injeções e interromper o trabalho para ir ver as peças ao raio X, algo sempre demorado e dependente da disponibilidade de terceiros.

Com este processo é possível ver realmente os poros o que é sempre mais elucidativo do que as manchas que aparecem no raio X. No entanto, é necessária especial atenção ao local e direcção em que se vai cortar a peça e neste ponto é fundamental ter visto algumas peças ao raio X. Conhecendo as zonas onde é frequente o aparecimento da porosidade é mais fácil proceder ao corte e polimento de forma a serem detectados os poros.

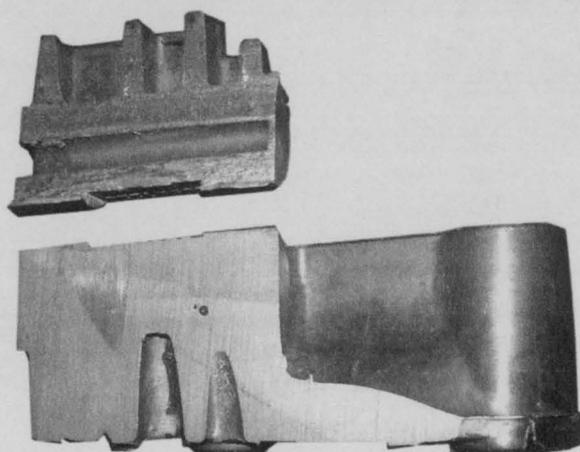


Figura 36 – Peça cortada

Este tipo de análise seguiu sempre o mesmo procedimento. Depois de identificada a zona onde a porosidade era de dimensões consideráveis, foi construído um gabari para fixação da peça no serrote mecânico. Desta forma garantiu-se que o corte fosse efectuado sempre no mesmo local. O posterior polimento foi sendo efectuado

alternado com a verificação visual da porosidade para que fossem detectados alguns pequenos poros e se conseguisse garantir o tamanho dos poros de maiores dimensões.



Ajuste do ciclo de injeção

Para ser possível verificar os efeitos da variação de certas variáveis na qualidade das peças finais foi necessário estabelecer um conjunto de variáveis padrão que se mantenham inalteradas durante as várias experiências.

Foi desenvolvida uma base de dados que permita registar toda a informação relevante sobre cada ensaio feito que será posteriormente utilizada pelo CINFU. Este programa foi desenvolvido tendo em atenção principalmente as necessidades do CINFU e utilizado pela primeira vez neste projecto.

O lubrificador automático Wollin e o extractor automático de peças PickMat não foram utilizados, não sendo portanto possível garantir condições idênticas nas diversas injeções. O lubrificador automático não pôde ser utilizado porque o equipamento do Cinfu apenas trabalha no eixo vertical e o mesmo colidia com a gaveta hidráulica superior quando o molde fechava. O extractor de peças também não pôde ser utilizado pois iria colidir com a gaveta hidráulica inferior. Isto acontece porque o molde foi projectado para uma máquina com o extractor do lado esquerdo e o extractor de peças do Cinfu está do lado direito.



Figura 37 – Lubrificação e extracção manual

Foram efectuados cálculos teóricos para alguns dos parâmetros da injeção mas a teoria não se confirmou na prática originando peças de má qualidade. Os cálculos teóricos só foram utilizados portanto como ponto de partida. O ajuste do ciclo de injeção foi um processo de tentativa erro até que se atingissem peças aceitáveis, utilizando para tal o conhecimento do processo em peças semelhantes injectadas na mesma máquina. Esses parâmetros foram então mantidos nas próximas etapas deste projecto (ver anexo 2).

Cálculos teóricos

Para ser possível efectuar os cálculos teóricos são necessários alguns dados sobre o jito em causa e sobre o pistão e comprimento da camisa.



| Pesos: | | |
|----------------------|--------|---|
| 1 peça= | 275 | g |
| 2 peças= | 550 | g |
| 1 masselote= | 8,9 | g |
| 6 masselotes= | 53,4 | g |
| Peça sem masselotes= | 988 | g |
| Peso jito= | 1041,4 | g |

| Outros dados: | | |
|------------------------|-------|-------------------|
| r_{Al} = | 2,7 | g/cm ³ |
| Volume do jito= | 385,7 | cm ³ |
| Volume da camisa= | 975,5 | cm ³ |
| Comprimento da camisa= | 34,5 | cm |

- Cálculo da velocidade de 1ª fase

Para o cálculo da velocidade consideramos a seguinte fórmula:

$$csss = \frac{K \times (100\% - \%enchimento) \times Dp^{0.5}}{100\%}$$

em que:

$$K = 22.8 \text{ [in}^{0.5}\text{/seg]}$$

Dp = diâmetro do pistão [in]

$\%$ enchimento = taxa de enchimento [%]

$$csss = \frac{22.8 \times (100\% - 39.5\%) \times 2.36}{100\%}$$

$$csss = 21.2 \text{ in/s} \Leftrightarrow csss = 0.538 \text{ m/s}$$

- Cálculo da velocidade de injeção máxima (2ª fase).

Para o cálculo da velocidade consideramos uma velocidade otimizada de 40m/s no ataque. O caudal necessário no ataque é então calculado da seguinte forma:

$$Q = V_{ataque} \times A_{ataque} \text{ onde } A_{ataque} = 245 \text{ mm}^2$$

$$Q = 0.0098 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Obedecendo então ao principio da conservação da massa o caudal no ataque terá de ser igual ao caudal na camisa de injeção. Sendo a área dos ataques inferior à área do pistão temos uma velocidade inferior do pistão que pode ser calculada pela seguinte fórmula:



$$v_{\text{pistão}} = \frac{Q}{A_{\text{pistão}}} \text{ onde } A_{\text{pistão}} = \frac{\pi \times 60^2}{4}$$

Chegamos então ao valor da velocidade de injeção máxima:

$$v_{\text{pistão}} = 3.5 \text{ m/s}$$

- Cálculo do ponto de comutação da velocidade de 1ª para 2ª fase

Neste caso é necessário saber o volume total do jito a injectar. Na peça em estudo o volume total da peça é igual a $V_{\text{jito}} = 385.7 \text{ cm}^3$.

$$V_{\text{cilindro}} = A_{\text{pistão}} \times H_{\text{cilindro}}$$

em que:

V_{cilindro} = volume da camisa de injeção à frente do pistão [cm^3]

$A_{\text{pistão}}$ = área do pistão [cm^2]

H_{cilindro} = comprimento do pistão até ao final da camisa de injeção [cm]

Fazendo $V_{\text{cilindro}} = V_{\text{jito}}$ garantimos que o alumínio enche a 100% o comprimento H_{cilindro} da camisa.

$$H_{\text{cilindro}} = \frac{385}{\frac{\pi \times 6^2}{4}} \text{ cm} \Leftrightarrow H_{\text{cilindro}} = 13.64 \text{ cm}$$

Para obter-mos a cota em que se deve ter a transição da velocidade da 1ª fase para a velocidade de 2ª fase basta subtrair ao comprimento útil da camisa o valor de H_{cilindro} .

$$FSL = L_{\text{camisa}} - H_{\text{cilindro}}$$

$$FSL = 208 \text{ mm}$$



Ensaio da 1ª fase

Esta optimização começou pela escolha da velocidade da 1ª fase. Nesta fase o pistão parte da sua posição zero e do repouso. O pistão vai acelerando até uma determinada zona da camisa onde se dá a comutação da velocidade de 1ª fase para a velocidade de 2ª fase. É necessário muito cuidado na optimização desta fase pois uma velocidade demasiado alta do pistão poderá criar turbulência no escoamento do alumínio e aprisionar ar dentro do material que irá ser injectado.

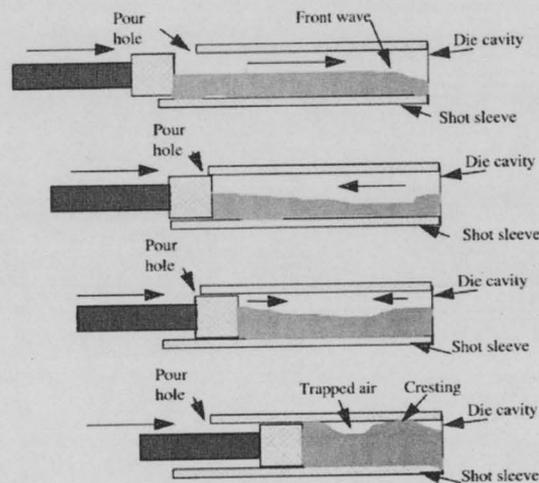


Figura 38 – Diferentes formações de onda em máquinas de injectar de câmara fria

Foram utilizadas várias soluções como se apresentam nas tabelas seguintes.

1ª solução

| Ponto na camisa [mm] | Velocidade [m/s] |
|----------------------|------------------|
| 200 | 0.30 |
| 240 | 0.54 |

2ª solução

| Ponto na camisa [mm] | Velocidade [m/s] |
|----------------------|------------------|
| 185 | 0.25 |
| 240 | 0.54 |

Tabela 4 – Pontos da curva da velocidade de 1ª fase



Em ambas as soluções o pistão parava nos 200mm e o alumínio solidificava na sua grande maioria dentro da camisa de injeção. A velocidade de 0.54m/s foi o resultado obtido através dos cálculos teóricos.

Os diversos “tarugos” foram vistos ao raio X para verificar qual a solução que gerava menos porosidade. Chegou-se à conclusão que ambas as soluções criavam “tarugos” semelhantes e optou-se por uma velocidade de 0.30m/s para os ensaios seguintes.

1º Ensaio de 2ª fase

Passou-se então ao ajuste da velocidade de 2ª fase utilizando a velocidade de 1ª fase que melhores resultados nos deu. As curvas teóricas de velocidade de 2ª fase e de pressão de compactação foram ajustadas de forma a serem o mais próximas possível das curvas reais.

Chegados a uma solução aparentemente otimizada injectamos várias peças a velocidades de 2ª fase diferentes. Foram feitas 5 injeções para cada velocidade de 2ª fase diferente e foram utilizadas as velocidades de 2.5m/s, 3.0m/s e 3.5m/s. De salientar que estas injeções são todas sem pré-enchimento.

Todas as peças foram analisadas ao raio X e em cada um dos três grupos escolheu-se a melhor e a pior peça. Foi guardada a imagem do raio X dessas 6 peças para posterior análise.

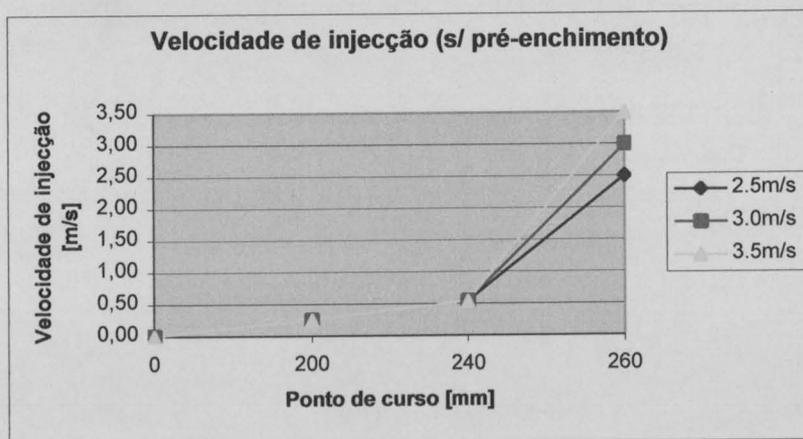


Gráfico 1 – Velocidades de injeção utilizadas no 1º ensaio

Todas as peças apresentavam porosidade ao longo do furo moldado pela gaveta hidráulica mas o maior problema eram poros de grandes dimensões na



zona de maior massa da peça. Procedeu-se então ao corte de algumas peças para visualização dos poros de maior dimensão.

Foi necessário portanto efectuar alterações nas variáveis escolhidas para tentar eliminar ou pelo menos reduzir ao mínimo a porosidade existente, quer em tamanho quer em quantidade.

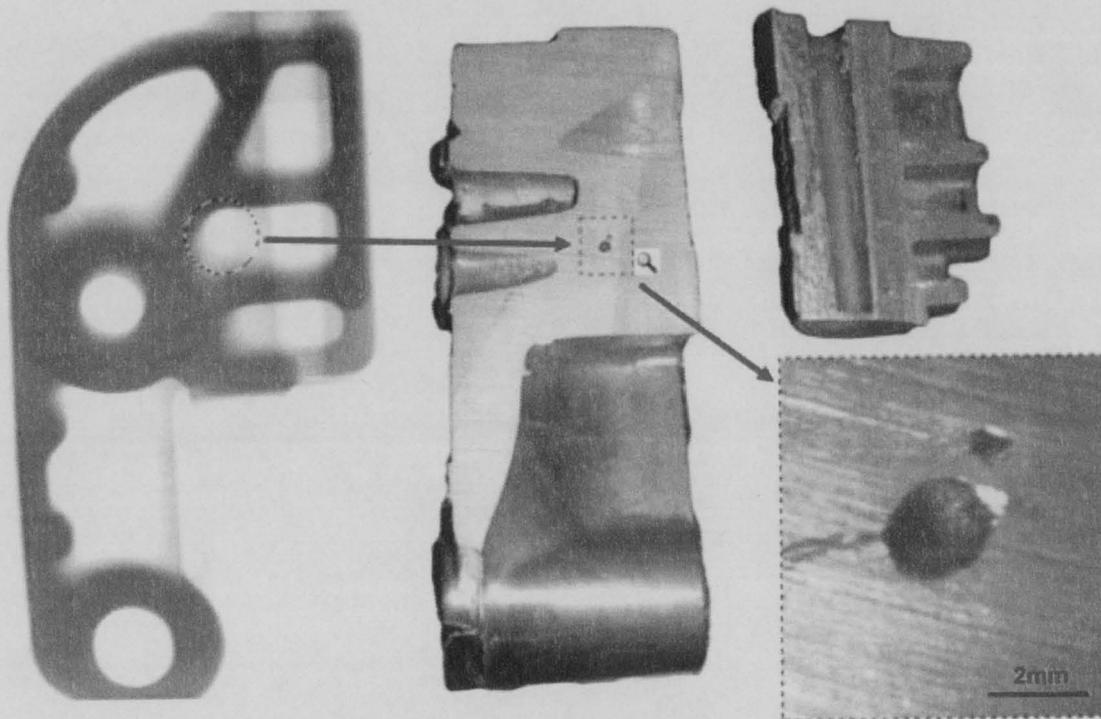


Figura 39 – Raio X e corte de uma peça injectada a 2.5m/s

É também de referir que a reprodutibilidade do processo não é a melhor. Além das, já referidas anteriormente, extracção, lubrificação e aplicação de desmoldante serem manuais, há ainda outros factores decorrentes da idade avançada do molde. Existem dois masselotes que costumam partir da peça e ficam no molde. Na cavidade 1 o masselote é extraído mas fica colado ao extractor. Este facto deve-se ao desgaste excessivo da cabeça do extractor que permite que o alumínio entre no furo e envolva todo o perno ficando colado ao mesmo. Quando isto ocorre o masselote volta ao seu local no molde assim que a extracção recua e obstrui a saída do ar por essa ventilação. Esta situação torna-se mais preocupante quando esporadicamente o masselote é extraído com a peça. Já na cavidade 2 um dos masselotes não tem extractor e portanto fica colado ao lado móvel do molde na grande maioria das injecções.



No entanto, e tal como no caso do masselote da cavidade 1, por vezes este masselote é extraído com a peça ou cai por gravidade.

O problema dos poros de grandes dimensões (figura 39) pode portanto ser agravado pela obstrução das saídas de ar pelos masselotes. Outra explicação possível para estes poros pode ser a baixa taxa de enchimento da camisa de injeção de 39.5%. O que poderá estar a acontecer é que a onda formada à frente do pistão bater no taco e ser reflectida para trás aprisionando ar dentro do alumínio fundido, algo que seria mais fácil de resolver se o alumínio tivesse a um nível superior na camisa de injeção. Outra situação que poderá dar origem aos poros de grandes dimensões é a solidificação do ataque muito cedo e que não permite a compactação adequada da peça. Esta questão surgiu na sequência da análise da sanidade do canal. Verificou-se que existiam canais praticamente sem poros e as peças correspondentes mantinham o nível de porosidade.

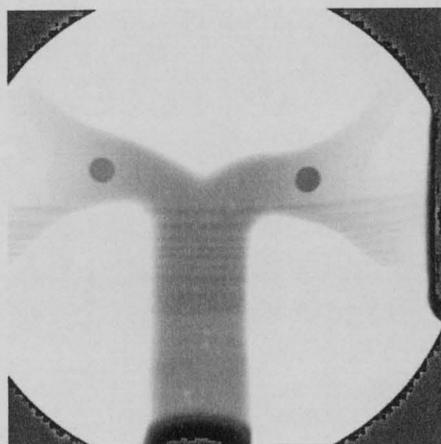


Figura 40 – Raio X do canal de alimentação de uma injeção a 2.5m/s

2º ensaio de 2ª fase

Após a análise dos resultados do 1º ensaio de segunda fase verificamos que a velocidade de 2.5m/s é a que apresenta piores resultados. Foi utilizado um pré-enchimento pois mesmo utilizando velocidade mais elevadas o resultado não foi satisfatório. Assim, alteraram-se algumas variáveis como seja o ponto de comutação velocidade/pressão e alguns pontos da curva de velocidade e de compactação da peça. Procuramos perceber se realmente um aumento da velocidade leva a uma melhoria da peça. Foram novamente



injectadas peças a 2.5m/s, 3.0m/s e 3.5m/s como se pode ver no gráfico seguinte.

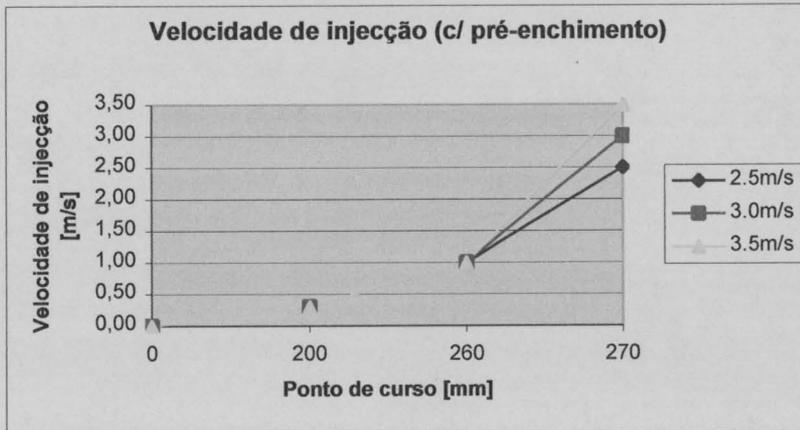


Gráfico 2 – Velocidades de injeção utilizadas no 2º ensaio

Neste ensaio foi possível concluir que realmente a velocidade de 3.5m/s é a que dá origem às peças de melhor qualidade. As peças injectadas a 3.5m/s não têm quase nenhuma porosidade no furo moldado pela gaveta ao contrário das peças injectadas a 2.5m/s e mesmo o poro de grandes dimensões parece ser menor ao raio X.

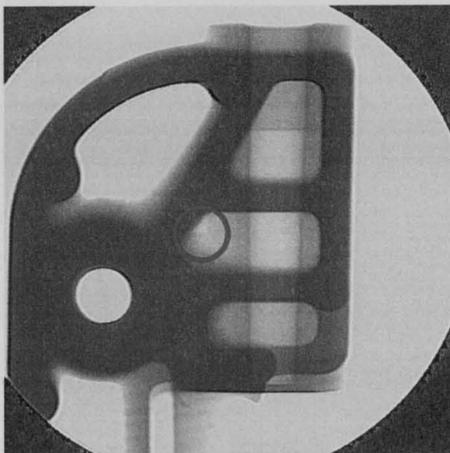


Figura 41 – Peça injectada a 3.5m/s

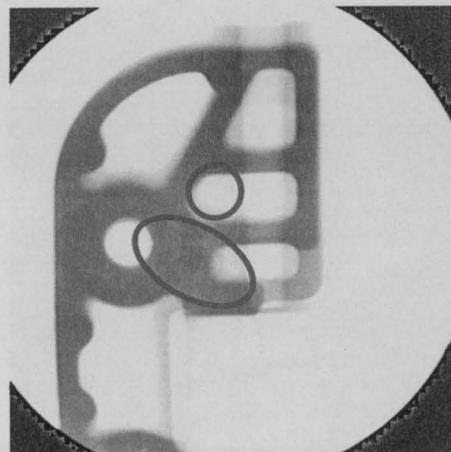


Figura 42 – Peça injectada a 2.5m/s

3º ensaio de 2ª fase

Para este ensaio efectuou-se uma pequena alteração na curva de compactação (gráfico 3). Esta alteração tinha como principal objectivo uma aproximação da curva real à curva programada e uma compactação mais cedo numa altura em que o alumínio está mais quente. Desta forma verificou-se a influência da compactação na sanidade das peças.



Neste ensaio foram injectadas peças a 3.0m/s e 3.5m/s (gráfico 4). Não se injectaram peças a 2.5m/s por serem as que piores resultados tinham dado nos ensaios anteriores.

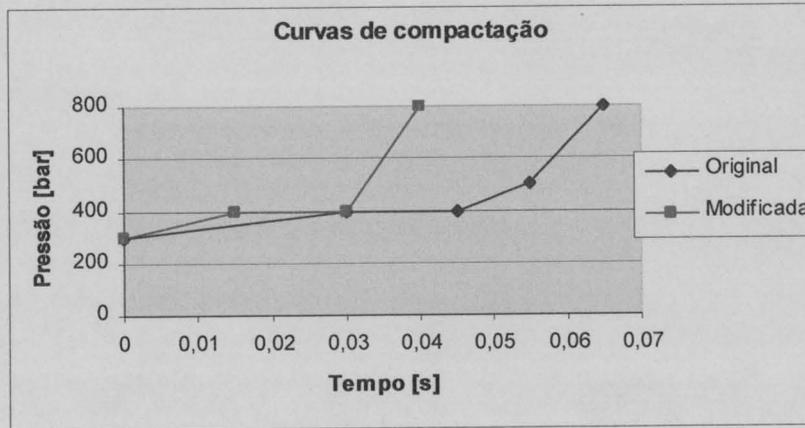


Gráfico 3 – Curvas de compactação

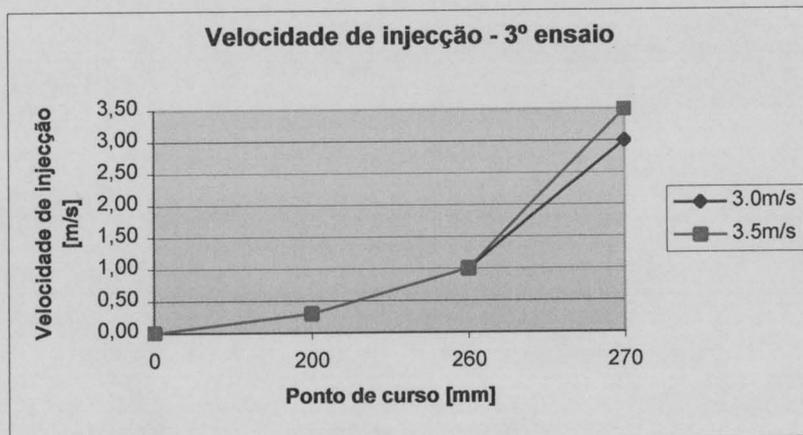


Gráfico 4 – Velocidades de injeção utilizadas no 3º ensaio

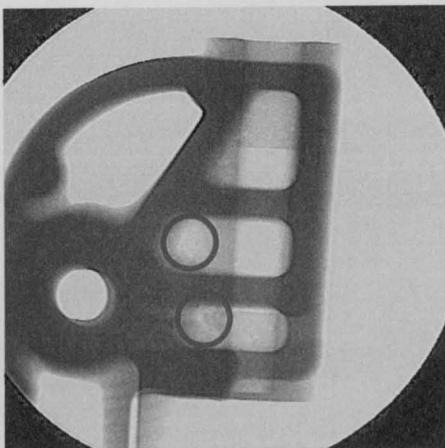


Figura 43 – Peça injectada a 3.0m/s

Após a visualização de todas as peças ao raio X chegou-se à conclusão de que esta nova curva de compactação deu origem a peças de melhor qualidade quando injectadas a 3.0m/s do as peças injectadas à mesma velocidade mas com a curva de compactação anterior. Já as peças injectadas a 3.5m/s com a curva modificada têm pior qualidade do que as peças injectadas a 3.0m/s deste ensaio e



piores do que as peças injectadas à mesma velocidade mas com a curva de compactação anterior. Chegamos então à conclusão que as peças de melhor qualidade são as de 3.0m/s com a curva de compactação modificada e as peças de 3.5m/s com a curva de compactação original. Embora todas as peças deste ensaio tivessem uma sanidade aceitável para produção optámos por utilizar a velocidade de injeção máxima de 3.0m/s e a curva de compactação modificada pois estes parâmetros geram peças de boa qualidade com desgaste das ferramentas menores. O tempo de ciclo médio com estes parâmetros² foi de 58.6 segundos, os quais foram mantidos durante os ensaios seguintes.

² Os parâmetros encontram-se descritos de uma forma mais pormenorizada no anexo 2.



Variações dos parâmetros de injeção

Após o ajuste do ciclo de injeção e já com o equipamento de aquisição de temperaturas a funcionar deu-se início à variação de alguns parâmetros que influenciam directa ou indirectamente a temperatura do molde. Para parâmetros como a temperatura da liga no forno de manutenção, que não são constantes ao longo do tempo, estabeleceram-se tolerâncias em relação ao valor obtido na fase de ajuste do processo e apenas se consideraram peças injectadas com valores dentro das tolerâncias.

Neste processo apenas vamos observar as peças da cavidade nº2 do molde, a cavidade onde estão colocados os 2 termopares. Nos ensaios retiraram-se os masselotes quando estes partiam. As interrupções por menores que fossem foram sempre compensadas por injeções até se retomarem as condições de produção e se dar continuidade ao ensaio.

A comparação entre a qualidade das peças foi feita através das imagens raio X. Para que seja possível comparar melhor as peças foram mantidas sempre as mesmas condições no raio X. A peça ficou colocada sempre à mesma distância da zona por onde incidem os raios X e utilizou-se sempre os valores de 160kV e 1.6mA com o zoom de 3x.

A variação da temperatura do óleo da termoregulação foi o primeiro parâmetro a ser variado. Este parâmetro faz variar directamente a temperatura do molde. De seguida, e utilizando a temperatura da termoregulação que melhores peças originou, variou-se a temperatura da liga. Este parâmetro faz variar a temperatura do molde ao trazer uma maior quantidade de calor por injeção para o interior do molde. Para finalizar foi ainda variada a velocidade máxima de injeção utilizando os parâmetros que melhores resultados deram nos ensaios anteriores.

Variação da temperatura da termoregulação

O primeiro ensaio consistiu na variação da temperatura do molde utilizando para o efeito a termoregulação. Partindo dos 120°C que se tinham



utilizado no ajuste do ciclo efectuou-se uma variação de $\pm 20^{\circ}\text{C}$. De modo a que a temperatura do molde fosse o mais homogénea possível e o ajuste na temperatura da termoregulação fosse perceptível esperou-se 30 minutos após se efectuar cada variação deste parâmetro. Como já foi referido anteriormente, neste projecto foram sempre asseguradas condições de produção. Para o efeito foram sempre efectuadas 10 injeções iniciais para aquecer o molde e estabiliza-lo à temperatura de produção.

Os termopares utilizados foram apenas quatro. Este facto deveu-se à limitação do equipamento de aquisição de dados de ler apenas um termopar. Assim, houve a necessidade de trocar os termopares para obter medições em pontos diferentes do molde. Fizeram-se 4 injeções para cada ponto de medição o que deu origem a 16 jitos por conjunto de parâmetros. As temperaturas máximas e mínimas lidas com os termopares em cada ciclo foram registadas.

De seguida repetiu-se o procedimento mas com a temperatura da termoregulação de 140°C e de 100°C .

Foram vistas 4 peças de cada grupo ao raio X, sendo uma de cada ponto de medição diferente, e de seguida efectuou-se o corte e polimento de uma peça de cada grupo. Após a visualização das peças ao raio X chegou-se à conclusão de que as peças de melhor qualidade eram as do grupo de 120°C . Também as peças do grupo de 140°C tinham uma qualidade aceitável apresentando menor porosidade distribuída do que as do grupo de 100°C .

Com o intuito de procurar a temperatura ideal diminuiu-se o intervalo de temperaturas e injectou-se com a temperatura da termoregulação a 130°C . Estas peças, embora muito parecidas às do grupo 120°C , não trouxeram nenhuma melhoria em termos de sanidade global da peça. Os poros de maiores dimensões na zona de maior massa são menores quando injectados com a termoregulação a 130°C mas pode-se encontrar alguma porosidade junto a um furo que será maquinado (perpendicular ao plano da foto). Isto significa que a temperatura ideal deverá estar no intervalo de 120°C a 130°C . Dever-se-ia portanto efectuar mais um ensaio intermédio a 125°C para confirmar se a temperatura óptima é a de 120°C ou se será um valor ligeiramente superior. No entanto a combinação das limitações existentes no tempo disponível para a realização dos ensaios com a necessidade de uma



deslocação ao exterior para poder analisar as peças ao raio X foram determinantes para que o ensaio não fosse mais prolongado.

Considerou-se como temperatura ideal para a termoregulação a de 120°C pois sendo mais baixa permite-nos obter um tempo de ciclo mais curto, originando peças equivalentes. Esta temperatura irá ser utilizada na variação dos próximos parâmetros.

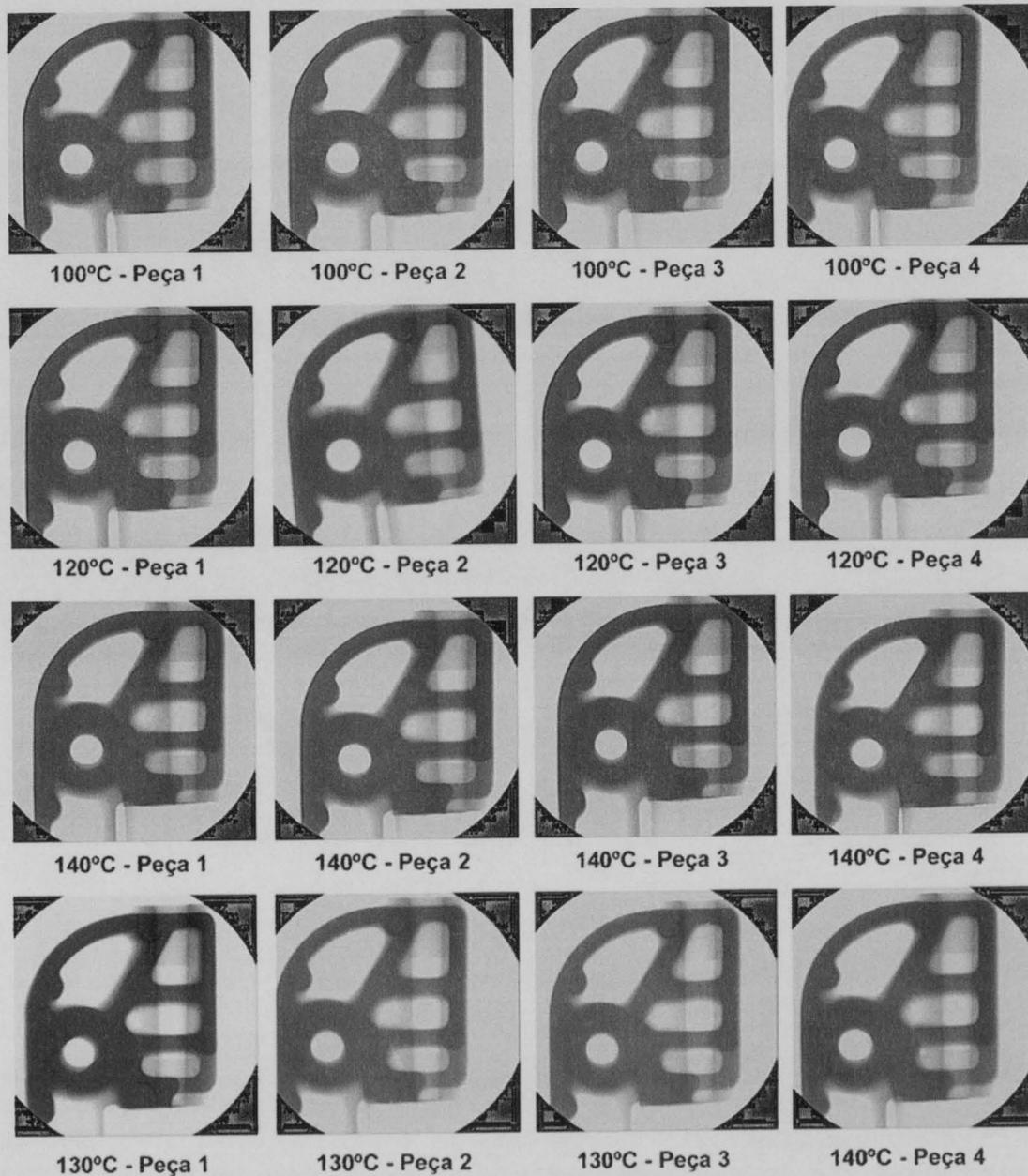


Figura 44 – Raios X das peças injectadas com variação da temperatura da termoregulação



Variação da temperatura da liga

O procedimento utilizado neste ensaio foi semelhante ao utilizado no ensaio anterior. A temperatura da liga padrão utilizada anteriormente foi de 680°C. Neste ensaio pretende-se variar a temperatura para os 720°C e para os 640°C. Durante este ensaio deu-se uma tolerância de $\pm 10^\circ\text{C}$ pois a temperatura do forno não é constante ao longo do tempo. Esta tolerância é superior à variação da temperatura ao longo do forno calculado num capítulo anterior.

Foram injectadas 16 peças para cada uma das temperaturas da liga as quais permitiram 4 leituras em cada um dos quatro pontos de medição utilizados. Foram registados os valores das temperaturas máximas e mínimas em cada ciclo de injeção. Durante este ensaio um espirro do molde levou alumínio até ao interior do furo do termopar do canal (termopar nº3). Este termopar teve então de ser eliminado devido à remoção do alumínio ser demasiado difícil e demorada.

Após visualização das 4 peças seleccionadas aleatoriamente ao raio X chegou-se à conclusão que as peças de melhor qualidade são as injectadas com a liga a 680°C. Tanto nas peças do grupo de 640° como nas do 720°C a porosidade espalhada é bastante superior às peças do grupo de 680°C. Neste grupo, os poros aparecem geralmente localizados na zona de maior massa da peça mas não existe porosidade distribuída. Aliás, no grupo de 680°C, a única peça a apresentar porosidade distribuída é a peça 3 (figura 45). Já nos outros grupos a porosidade distribuída aparece em todas as peças. Embora os poros concentrados sejam menores do que no grupo de 680°C, estes não têm grande influência para o bom funcionamento da peça. A porosidade ao longo do furo moldado pela gaveta hidráulica (vertical nas fotos) e junto ao furo perpendicular ao anterior pode ser problemática devido à maquinagem a efectuar posteriormente.

Dada a dificuldade em distinguir os grupos de 640°C e de 720°C optou-se por considerar a temperatura de 680°C como a temperatura ideal embora se devesse apertar mais o intervalo fazendo agora novos ensaios com temperaturas da liga de 660°C e 700°C por exemplo. Este processo, tal como no caso anterior, é iterativo e consiste na escolha dos dois grupos consecutivos



que dão origem a melhores peças e de seguida a novos ensaios com valores intermédios. Estes ensaios não foram feitos devido à escassez de tempo para finalizar o projecto. A temperatura de 680°C foi portanto utilizada para o ensaio seguinte.



Figura 45 – Raios X das peças injectadas com variação da temperatura da liga

Varição da velocidade de injeção

Neste ensaio utilizaram-se somente os dois termopares junto à peça. Foram injectadas apenas 8 peças em condições de produção tendo sido registadas 4 leituras em cada termopar, como nos ensaios anteriores.

A variação de velocidade já tinha sido efectuada na fase de ajuste do ciclo e portanto já tínhamos uma ideia do que a variação de velocidade iria originar. Nessa fase a velocidade que originava melhores peças era a de 3.0m/s



seguida de perto pela velocidade de 3.5m/s. Neste ensaio variamos apenas a velocidade de injeção máxima de 3.0m/s para 2.75m/s e para 3.25m/s.

Como já era previsto as peças injectadas a 2.75m/s têm pior sanidade do que as peças injectadas a 3.0m/s. Já as peças de 3.25m/s poderiam ser melhores ou piores do que as injectadas a 3.0m/s. Neste caso verificamos uma ligeira melhoria das peças em relação às peças obtidas com as condições padrão. Nas imagens das peças injectadas a 3.25m/s pode-se observar que a mancha branca relativa aos poros de maiores dimensões são menos nítidas que as mesmas manchas das peças injectadas a 3.0m/s o que indica que os poros deverão uma dimensão mais pequena. É de salientar ainda que na figura 46 se pode observar a imagem raio X da peça número 4 do grupo de 3.25m/s que é a peça de melhor sanidade de todas as que foram vistas ao raio X durante este projecto.

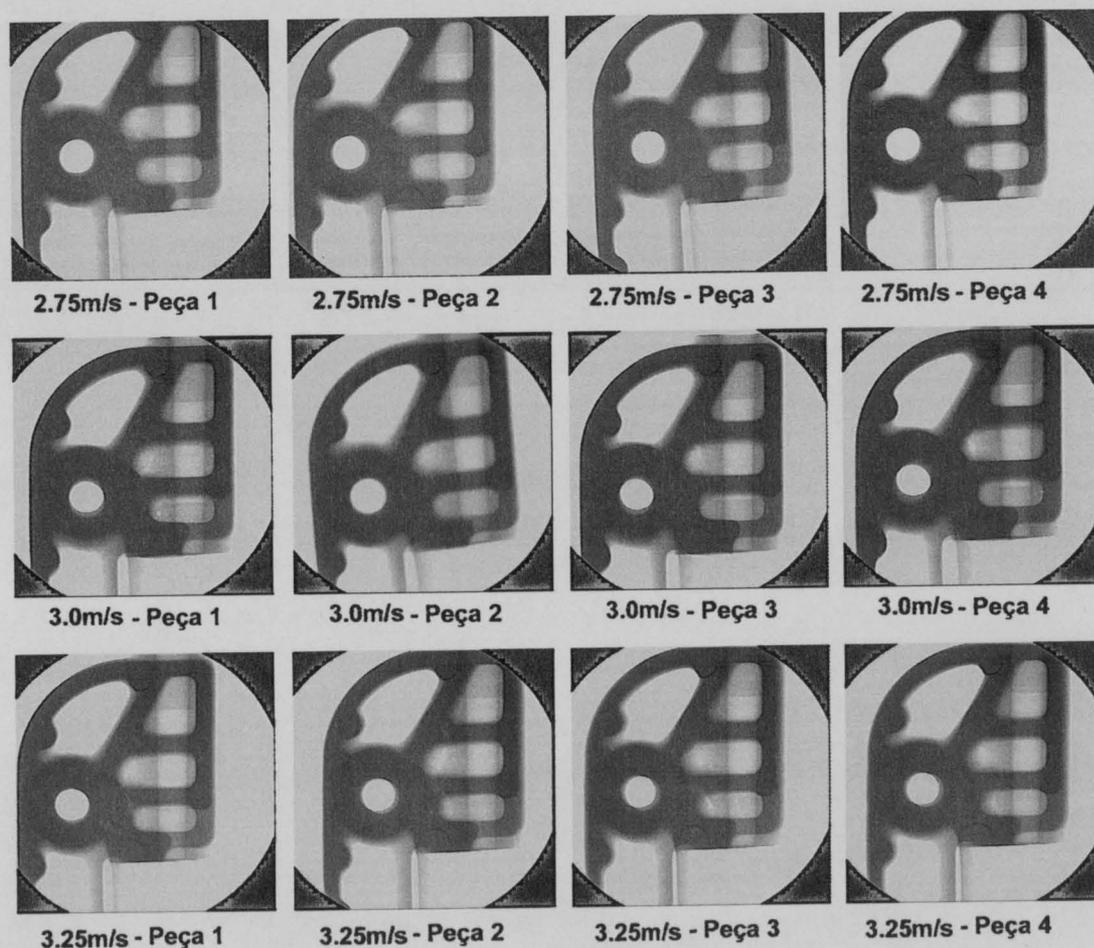


Figura 46 – Raios X das peças injectadas com variação da velocidade de injeção



Interpretação dos valores das temperaturas obtidas

Varição da temperatura da termoregulação

Em primeiro lugar separamos os valores obtidos com os termopares entre peça (lado fixo e lado móvel) e canal (junto ao canal e afastado). No caso da variação da temperatura da termoregulação é esperada uma maior influência nas temperaturas medidas com os termopares junto à peça.

À medida que aumentamos a temperatura da termoregulação nota-se uma clara subida nas temperaturas lidas com os termopares e uma diminuição da amplitude dessas temperaturas (ver anexo 3). Isto pode ser explicado pela maior remoção do calor quando se utilizam temperaturas da termoregulação mais baixas. Com o molde mais quente as variações são mais reduzidas devido à menor capacidade de retirar calor por parte da termoregulação.

No caso em que o molde está mais frio a porosidade espalhada deverá ser fruto de uma solidificação precoce do alumínio no ataque e que não permite que a pressão de compactação actue nas peças. Poderá também existir porosidade devida à permanência de água na cavidade que não terá secado após a aplicação do desmoldante.

Com o molde demasiado quente o que deverá acontecer para originar a porosidade distribuída (menor do que com o molde frio) é o aparecimento de rechupes na zona de maior massa. Isto acontece por esta demorar mais tempo a solidificar em comparação com a zona do ataque, o que mais uma vez impede que a compactação tenha qualquer efeito na zona fundida da peça.

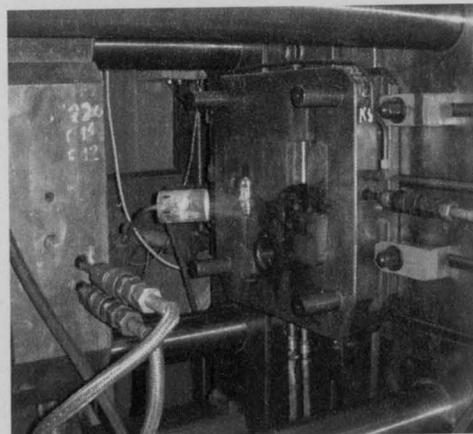


Figura 47 – Peça “gripada” do lado fixo

É necessário ter atenção que com o molde demasiado frio podemos ter problema dimensionais e de má aderência do desmoldante que irá escorrer na superfície moldante. Com o molde demasiado quente existe também o problema da estabilidade dimensional. No entanto o principal problema consiste na vaporização do desmoldante



formando uma camada de vapor junto à superfície moldante o que irá impedir a formação de uma película de desmoldante. Neste caso poderá dar-se a “gripagem” das peças (figura 47).

Variação da temperatura da liga

A tendência observada com a da temperatura da liga é a de termos variações maiores para a temperatura de 680°C e variações menores para 640°C e 720°C (ver anexo 4).

Com a liga a uma temperatura de 640°C o fenómeno que gera a porosidade distribuída deverá ser uma solidificação precoce do metal no ataque pois a sua temperatura não é suficientemente elevada para manter a fluidez necessária até ao completo enchimento da peça. A compactação deverá portanto estar limitada ao canal de alimentação. Esta situação deverá ser idêntica à que ocorre no caso em que o molde está frio.

Para temperaturas da liga de 720°C a termoregulação não é tão eficiente na remoção do calor e vamos ter o molde a temperaturas superiores. Esta ineficiência pode ser verificada pelas menores variações obtidas.

Este aumento na temperatura dificultará a solidificação do alumínio, principalmente nas zonas de maior massa. Os poros ao longo do furo moldado pela gaveta deverão ser então rechupes. Neste caso, e como o tempo de ciclo se manteve constante nos nossos ensaios, o que poderá estar a acontecer é a obstrução do ataque e o rechupe aparecer posteriormente.

Variação da velocidade de injeção

A variação da velocidade de injeção tem um papel importante no processo da fundição injectada. O alumínio, desde que sai do forno de manutenção, está constantemente a perder calor para os meios envolventes. Este fenómeno de transferência de calor é dependente do tempo. A velocidade de injeção influencia portanto a temperatura a que o alumínio chega a cada ponto da moldação. Uma velocidade mais elevada faz com que as peças sejam injectadas mais rapidamente e a temperatura seja mais elevada quando



termina o enchimento da cavidade. Uma velocidade mais baixa faz com que a liga vá perdendo mais calor durante o enchimento e que a mesma esteja a uma temperatura mais baixa quando se dá o fim do enchimento.

Antes de partir para uma interpretação dos resultados convém relembrar que neste ensaio apenas foram utilizados os termopares junto à peça (termopar nº5 e nº6).

Apesar de se esperar uma variação na temperatura com a variação da velocidade de injeção, tal não aconteceu. As variações da temperatura são muito baixas para se poder retirar qualquer conclusão (ver anexo 5). Esta situação deverá decorrer da variação da velocidade também ser reduzida. No entanto a velocidade de 3.25m/s originou peças de qualidade superior às obtidas anteriormente, embora esse facto não tenha explicação nas temperaturas medidas no molde.

O facto de se terem escolhido os termopares junto à peça no lado fixo e no lado móvel permitiu-nos observar a evolução da temperatura no lado fixo e no lado móvel do molde. As temperaturas observadas do lado móvel são mais altas do que as observadas do lado fixo. Foi observada uma maior variação da temperatura do lado móvel do que do lado fixo. Durante o ensaio foram utilizadas sempre temperaturas de termoregulação idênticas para os dois meios moldes. As diferenças de temperatura devem advir da configuração das superfícies. As saliências que existem do lado móvel deverão absorver mais calor do que a superfície mais plana do lado fixo. Além disto o taco, que deverá ser a zona mais quente do molde, está também no lado fixo.

Optimização do ciclo de injeção

Após a execução destes últimos ensaios, tendo partido do conjunto de parâmetros escolhidos na fase de ajuste, chegamos à conclusão de que apenas a variação da velocidade de injeção para 3.25m/s nos leva a ter peças melhores sem que haja um aumento do tempo de ciclo. A única desvantagem seria um desgaste ligeiramente superior das ferramentas, o qual seria apenas perceptível depois de milhares de injeções com estas condições.



Conclusão

Finalizado este projecto, a principal conclusão a retirar é que o processo da fundição injectada ainda não é totalmente controlado. As variáveis em jogo são bastantes e estão de tal forma interligadas que o processo não pode ainda ser previsto e simulado e só com ensaios se consegue ajusta-lo. Isto significa ainda que não existem soluções únicas para dar origem a peças semelhantes e que mesmo utilizando os mesmos dados programados por vezes se obtêm peças não aceitáveis a meio de uma produção. E se mesmo em produção, utilizando lubrificador e extractor de peças automáticos, é difícil obter uma reprodutibilidade a 100% a situação piora quando se utiliza aplicação de desmoldante e extracção manual. A utilização de um lubrificador e de um extractor de peças permitiria obter resultados mais fiáveis. Sendo estas operações manuais não há possibilidade de manter constante a quantidade de desmoldante além da variação do tempo de ciclo, o que também vai introduzir variações na temperatura do molde.

Neste projecto apenas se estudou a porosidade e não se verificou a estabilidade dimensional e geométrica das peças. O aspecto superficial foi sempre aceitável, mesmo que as peças posteriormente não passem por um processo de granalhagem para eliminar a rebarba e os ataques da alimentação e masselotes e estes sejam eliminados apenas por corte.

Ao longo do projecto verificou-se que temperaturas demasiado altas provocam “gripagem” das peças devido à má aderência do desmoldante à superfície moldante. Esta má aderência dá-se devido ao desmoldante se vaporizar quando entra em contacto com a superfície demasiado quente. No molde utilizado neste projecto é necessário especial atenção à lubrificação e aplicação de desmoldante pois de cada vez que uma peça “gripava” do lado fixo do molde o perno da gaveta empenava e havia a necessidade de o substituir.

A utilização dos termopares permitiu verificar que a temperatura adjacente às superfícies das cavidades do molde aumentam até ao seu ponto máximo após cada injeção e o seu ponto mínimo após o jito ter sido extraído. Foi



evidente que a temperatura do fluído refrigerante é muito importante na estabilização térmica do processo.

Para concluir este trabalho serve apenas para observar tendências da evolução das temperaturas. Seriam necessários mais ensaios, em termos de quantidade de leitura por termopar e em gamas de variação dos parâmetros, para confirmar essas tendências e melhor conhecer o processo. Os diversos problemas associados à execução deste trabalho levaram a que o tempo efectivo de ensaios fosse relativamente curto.



Bibliografia

E. A. Herman

Heat Flow in the Die Casting Industry,

NADCA Publications

Illinois(USA)

E. A. Herman

Designing Die Casting Dies,

NADCA Publications

Illinois(USA)

CINFU- Centro da Fundição

Apontamentos sobre fundição injectada,

Porto (Portugal)

John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V

A Heat Transfer Textbook (Third Edition)

PHLOGISTON Press

Cambridge, Massachusetts

Encarta Enciclopédia 2004

Microsoft ®



ANEXOS

Anexo 1

Características do molde

| | | |
|------------------|-----|----|
| Molde | | |
| largura | 546 | mm |
| comprimento | 546 | mm |
| altura | 487 | mm |
| nº cavidades | 2 | |
| diâmetro guias | 50 | mm |
| diâmetro bolacha | 50 | mm |

| | | |
|-----------------|-----|----|
| Inserção | | |
| largura | 246 | mm |
| comprimento | 370 | mm |
| altura | 136 | mm |

| | | |
|---------------|-----|----|
| Calços | | |
| comprimento | 496 | mm |
| espessura | 120 | mm |
| altura | 126 | mm |

| | | |
|------------------|-----|----|
| Extracção | | |
| largura | 256 | mm |
| comprimento | 446 | mm |
| espessura | 62 | mm |

| | | |
|--------------------|-----|----|
| Espessuras: | | |
| Lado fixo | | |
| Placa fixa | 120 | mm |
| Placa de encosto | - | mm |
| Lado móvel | | |
| Placa móvel | 195 | mm |
| Placa extractora | 26 | mm |
| Placa de retenção | 36 | mm |
| Placa de encosto | 46 | mm |

| | | |
|------------------------|------|----|
| Refrigeração | | |
| nº canais | 2 | |
| comprimento dos canais | 1094 | mm |
| nº canais | 2 | |
| comprimento dos canais | 964 | mm |

| | | |
|------------------------|----|----|
| camisa | | |
| comprimento dos canais | 96 | mm |

| | | |
|----------------------|----|--|
| Extracção | | |
| nº extractores | 17 | |
| nº pernos de retorno | 4 | |

Anexo 2

Parâmetro utilizados para os ensaios após ajuste do ciclo
de injeção

3 VIGILANCIA TOLERANCIA

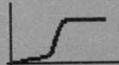
18314156

09-07-2004 15:17:12

| lista dos parâmetros vigiados | | | real | prog | -tol | +tol |
|-------------------------------|---------------------------|-------|------|------|------|------|
| s Ffin | final enchimento molde | [mm] | 0 | 319 | 20 | 20 |
| s Ifin | final do curso de injeção | [mm] | 0 | 326 | 20 | 20 |
| p IMmax | p máx. metal fase compact | [bar] | 0 | 800 | 50 | 100 |
| t Cyc | tempo de ciclo | [s] | 0.0 | 58.6 | 5.0 | 5.0 |
| F Lctr | força de fechamento (+/-) | [kN] | 0 | 4200 | 100 | 100 |
| l B | espessura bolacha | [mm] | 0 | 20 | 5 | 5 |

1



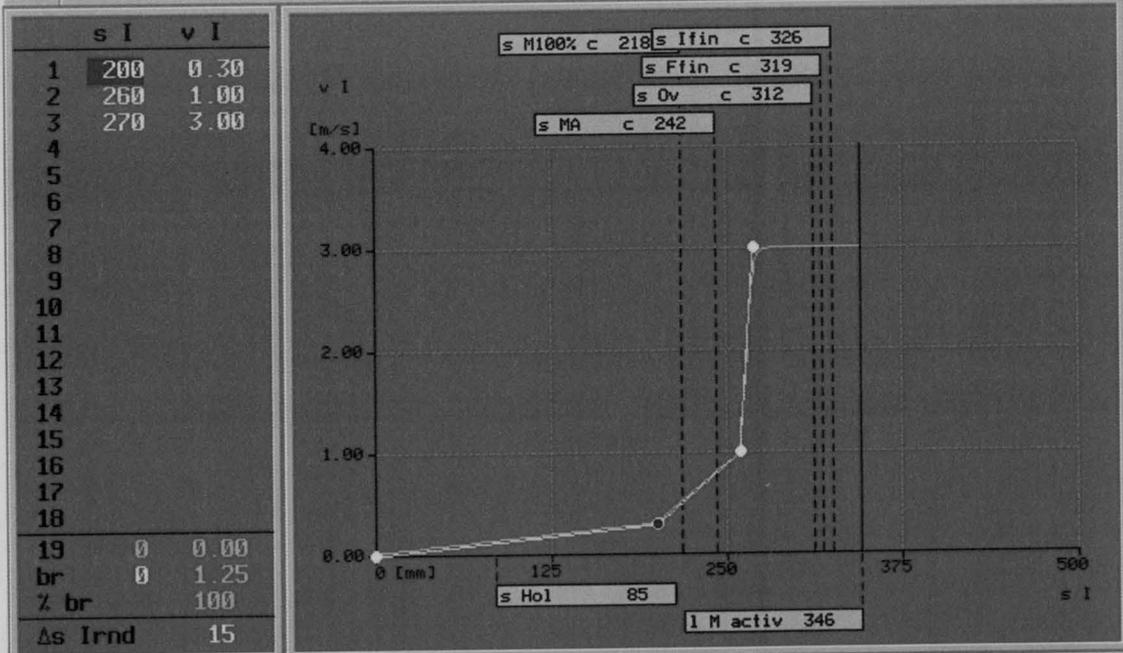



?   GRAFICO DE TENDENCIA  +/- REAL -> VALOR PROGR PARAMETRO SELECIONAR

3 ENCHER

18314156

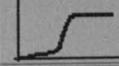
09-07-2004 15:12:53

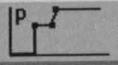


KP 1: fase de enchimento

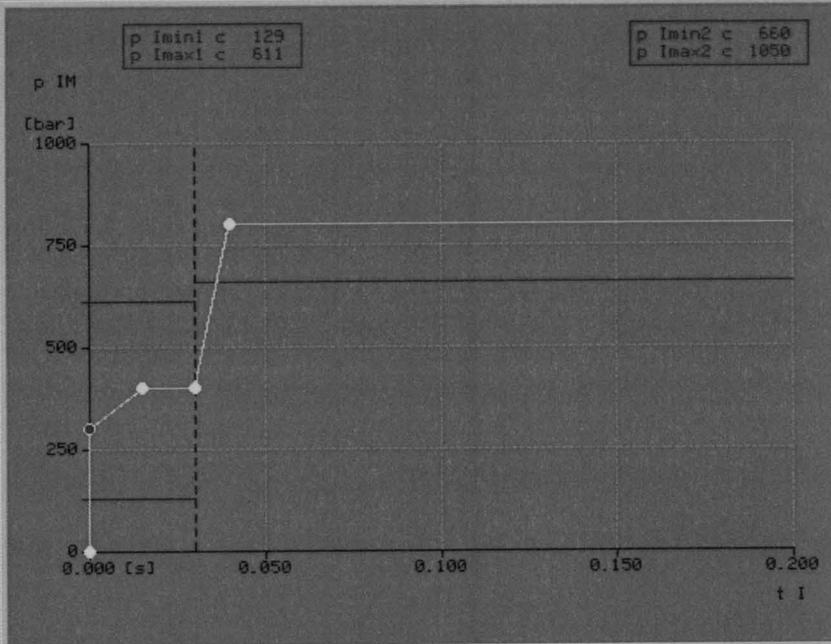
1






?   v>p PONTO CURVA NOVO PONTO CURVA APAGAR CURVA TESTAR CURVA ACEITAR

| | t I | p IM |
|----|-------|------|
| 1 | 0.000 | 300 |
| 2 | 0.015 | 400 |
| 3 | 0.030 | 400 |
| 4 | 0.040 | 800 |
| 5 | | |
| 6 | | |
| 7 | | |
| 8 | | |
| 9 | | |
| 10 | | |
| 11 | | |
| 12 | | |
| 13 | | |
| 14 | | |
| 15 | | |
| 16 | | |
| 17 | | |
| 18 | | |
| 19 | | |
| 20 | | |

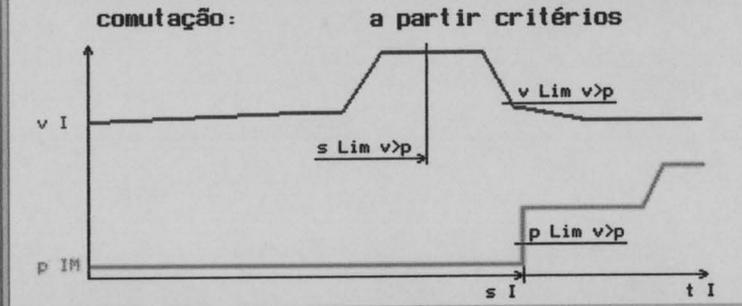


KP 1: fase compactação

1

? v > p PUNTO CURVA NOVO PUNTO CURVA APAGAR CURVA TESTAR CURVA ACEITAR

| | |
|-----------|------------|
| Tr v>p * | indefinido |
| s Tr v>p* | 0 |
| s Ffin * | 0 |
| s Ifin * | 0 |
| s Ffin c | 319 |
| s Ifin c | 326 |
| s S1 c | 319 |
| s S1ifinc | 7 |
| p IM1 | 300 |
| l B * | 0 |



| S: | Tr v>p | escolha: comutação v>p | a partir critérios |
|----|---------|---------------------------------|--------------------|
| s | Tr v>p | critério comutação (s I) [mm] | 290 |
| v | Lim v>p | critério comutação (v I) [%] | 999 |
| p | Lim v>p | critério comutação (p IM) [bar] | 300 |
| S: | Sn v>p | sensor FI para comutação | S1 |
| s | Tr v>p | comutação v>p [mm] | 313 |
| s | S1 | metal no sensor FI S1 [mm] | 94 0 |
| % | S1 Lim | val. limiar sensor FI S1 [%] | 50 |
| s | S2 | metal no sensor FI S2 [mm] | 140 0 |
| p | S2 Lim | val. limiar sensor FI S2 [bar] | 400 |

escolha: comutação v>p

1

? v > p

| JOGO DE INJECAO | | | val.prog | valor calculado |
|------------------|---------------------------|----------|----------|-----------------|
| d M | dímetro pistão injeção | [mm] | 60 0 | |
| l M activ | comprim. bucha inj. ativa | [mm] | 346 | |
| l B pr | progr. espessura bolacha | [mm] | 20 | |
| s Hol | final abertura enchimento | [mm] | 85 | |
| DADOS DE INJECTA | | | | |
| CP-Ident | denominação pç fundida | | KS_226 | |
| Σ P/I | número pçs fund./amostra | [número] | 2 | |
| M Ident | liga | | AL 226D | |
| Rho Msol | densidade metal solido | [g/cm3] | 2.75 | |
| K Rho | fator densid.: Rho M liq | [fator] | 0.95 | |
| A IM | area de ruptura | [cm2] | 212 | |
| S A | seção de alimentação | [mm2] | 245 | |
| S Air | seção de saída de ar | [mm2] | 87 | |
| m I | peso injectado | [g] | 983 | |
| m A | peso após alimentação | [g] | 599 | |
| m Ov | peso após saída de ar | [g] | 55 | |
| m S1 | peso após sensor FI S1 | [g] | 0 | |
| m 100%cor | correção peso p. s M100% | [g] | 35 | |
| m ΣP/I c | peso pç(s) fundida(s) | [g] | | 544 |

diámetro pistão injeção

1

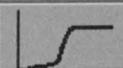


?

TECNOLOGIA
VALORES /cTECNOLOGIA
VALORES /*

| | | | |
|-----------|-----------------------------|-------|-------|
| s M100% c | bucha injeção 100% cheia | [mm] | 218 |
| s MA c | metal na alimentação | | 242 |
| s F c | curso de enchimento | | 77 |
| s Ov c | metal na saída de ar | | 312 |
| s Ffin c | final enchimento molde | | 319 |
| s Premaxc | compactação máxima | | 7 |
| s Ifin c | final curso injeção | | 326 |
| v Imed c | velocidade média P (s F) | [m/s] | 1.79 |
| v MAmed c | veloc.média na alimentaç. | | 21 |
| v Air c | veloc.média de ventilação | | 58 |
| v Imax c | velocidade máx. (p N Acc) | | 9.66 |
| v Imax0 c | velocidade máx. (p N Acc0) | | 9.95 |
| p IM op c | pressão ruptura metal | [bar] | 1981 |
| p Imax1 c | compactação máx. (p N Acc) | | 611 |
| p Imax0 c | compactação máx. (p N Acc0) | | 703 |
| p Imax2 c | compactação máx. (p N Mul) | | 1050 |
| t F c | tempo de enchimento | [s] | 0.043 |
| % F c | bucha inj-grau enchimento | [%] | 38 |
| % F Hol c | abertura enchim. fechada | | 51 |

1



?

TECNOLOGIA
VALORES /cTECNOLOGIA
VALORES /*

Anexo 3

Valores das temperaturas obtidos com os termopares após
variação da temperatura da termoregulação

Medições registadas com o termopar junto ao canal (termopar nº 3)

| | 100°C | | | 120°C | | | 130°C | | | 140°C | | |
|---|--------|--------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|------------|
| | mínimo | máximo | ΔT |
| 1 | 168 | | | 169 | | | 168 | | | 171 | | |
| | 240 | 72 | | 240 | 71 | | 245 | 77 | | 248 | 77 | |
| 2 | 167 | | | 174 | | | 175 | | | 175 | | |
| | 238 | 71 | | 241 | 67 | | 246 | 71 | | 250 | 75 | |
| 3 | 169 | | | 170 | | | 173 | | | 173 | | |
| | 242 | 73 | | 242 | 72 | | 240 | 67 | | 249 | 76 | |
| 4 | 169 | | | 176 | | | 170 | | | 174 | | |
| | 242 | 73 | | 249 | 73 | | 240 | 70 | | 251 | 77 | |

Medições registadas com o termopar mais afastado do canal (termopar nº 4)

| | 100° | | | 120° | | | 130° | | | 140° | | |
|---|--------|--------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|------------|
| | mínimo | máximo | ΔT |
| 1 | 111 | | | 125 | | | 135 | | | 142 | | |
| | 124 | 13 | | 128 | 3 | | 138 | 3 | | 146 | 4 | |
| 2 | 117 | | | 128 | | | 138 | | | 142 | | |
| | 128 | 11 | | 133 | 5 | | 140 | 2 | | 145 | 3 | |
| 3 | 120 | | | 135 | | | 140 | | | 143 | | |
| | 130 | 10 | | 138 | 3 | | 142 | 2 | | 145 | 2 | |
| 4 | 121 | | | 138 | | | 141 | | | 142 | | |
| | 242 | 10 | | 249 | 1 | | 240 | 1 | | 251 | 3 | |

Medições registadas com o termopar junto à peça no lado móvel (termopar nº5)

| | 100° | | | 120° | | | 130° | | | 140° | | |
|---|--------|--------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|------------|
| | mínimo | máximo | ΔT |
| 1 | 132 | | | 142 | | | 145 | | | 146 | | |
| | 154 | 22 | | 164 | 22 | | 167 | 22 | | 165 | 19 | |
| 2 | 139 | | | 141 | | | 144 | | | 145 | | |
| | 160 | 21 | | 164 | 23 | | 167 | 23 | | 167 | 22 | |
| 3 | 135 | | | 145 | | | 146 | | | 147 | | |
| | 158 | 23 | | 168 | 23 | | 168 | 22 | | 168 | 21 | |
| 4 | 140 | | | 147 | | | 147 | | | 145 | | |
| | 162 | 22 | | 169 | 22 | | 169 | 22 | | 166 | 21 | |

Medições registadas com o termopar junto à peça no lado fixo (termopar nº6)

| | 100° | | | 120° | | | 130° | | | 140° | | |
|---|--------|--------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|------------|
| | mínimo | máximo | ΔT |
| 1 | 124 | | | 128 | | | 132 | | | 133 | | |
| | 134 | 10 | | 141 | 13 | | 146 | 14 | | 146 | 13 | |
| 2 | 122 | | | 132 | | | 134 | | | 135 | | |
| | 130 | 8 | | 144 | 12 | | 139 | 5 | | 141 | 6 | |
| 3 | 118 | | | 124 | | | 134 | | | 136 | | |
| | 128 | 10 | | 134 | 10 | | 150 | 16 | | 141 | 5 | |
| 4 | 120 | | | 124 | | | 135 | | | 134 | | |
| | 162 | 9 | | 169 | 11 | | 169 | 15 | | 166 | 5 | |

Anexo 4

Valores das temperaturas obtidos com os termopares após
variação da temperatura da liga

Medições registadas com o termopar mais afastado do canal (termopar nº 4)

| | 640°C | | | 680°C | | | 720°C | | |
|---|--------|--------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|------------|
| | mínimo | máximo | ΔT | mínimo | máximo | ΔT | mínimo | máximo | ΔT |
| 1 | 120 | | | 125 | | | 136 | | |
| | 123 | 3 | | 128 | 3 | | 139 | 3 | |
| 2 | 120 | | | 128 | | | 138 | | |
| | 123 | 3 | | 133 | 5 | | 141 | 3 | |
| 3 | 121 | | | 135 | | | 141 | | |
| | 123 | 2 | | 138 | 3 | | 143 | 2 | |
| 4 | 122 | | | 138 | | | 142 | | |
| | 124 | 2 | | 139 | 1 | | 143 | 1 | |

Medições registadas com o termopar junto à peça no lado móvel (termopar nº5)

| | 640°C | | | 680°C | | | 720°C | | |
|---|--------|--------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|------------|
| | mínimo | máximo | ΔT | mínimo | máximo | ΔT | mínimo | máximo | ΔT |
| 1 | 124 | | | 142 | | | 153 | | |
| | 140 | 16 | | 164 | 22 | | 167 | 14 | |
| 2 | 122 | | | 141 | | | 155 | | |
| | 140 | 18 | | 164 | 23 | | 170 | 15 | |
| 3 | 123 | | | 145 | | | 156 | | |
| | 141 | 18 | | 168 | 23 | | 171 | 15 | |
| 4 | 124 | | | 147 | | | 157 | | |
| | 143 | 19 | | 169 | 22 | | 173 | 16 | |

Medições registadas com o termopar junto à peça no lado fixo (termopar nº6)

| | 640°C | | | 680°C | | | 720°C | | |
|---|--------|--------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|------------|
| | mínimo | máximo | ΔT | mínimo | máximo | ΔT | mínimo | máximo | ΔT |
| 1 | 122 | | | 128 | | | 132 | | |
| | 135 | 13 | | 141 | 13 | | 143 | 11 | |
| 2 | 120 | | | 132 | | | 132 | | |
| | 134 | 14 | | 144 | 12 | | 143 | 11 | |
| 3 | 125 | | | 124 | | | 129 | | |
| | 137 | 12 | | 134 | 10 | | 144 | 15 | |
| 4 | 127 | | | 124 | | | 130 | | |
| | 138 | 11 | | 135 | 11 | | 146 | 16 | |

Anexo 5

Valores das temperaturas obtidos com os termopares após
variação da velocidade de injeção

Medições registadas com o termopar junto à peça no lado móvel (termopar nº5)

| | 2.75m/s | | | 3.0m/s | | | 3.25m/s | | |
|---|---------|--------|------------|--------|--------|------------|---------|--------|------------|
| | mínimo | máximo | ΔT | mínimo | máximo | ΔT | mínimo | máximo | ΔT |
| 1 | 145 | | | 142 | | | 145 | | |
| | 167 | 22 | | 164 | 22 | | 168 | 23 | |
| 2 | 146 | | | 141 | | | 149 | | |
| | 168 | 22 | | 164 | 23 | | 172 | 23 | |
| 3 | 147 | | | 145 | | | 152 | | |
| | 169 | 22 | | 168 | 23 | | 175 | 23 | |
| 4 | 151 | | | 147 | | | 152 | | |
| | 173 | 22 | | 169 | 22 | | 175 | 23 | |

Medições registadas com o termopar junto à peça no lado fixo (termopar nº6)

| | 2.75m/s | | | 3.0m/s | | | 3.25m/s | | |
|---|---------|--------|------------|--------|--------|------------|---------|--------|------------|
| | mínimo | máximo | ΔT | mínimo | máximo | ΔT | mínimo | máximo | ΔT |
| 1 | 123 | | | 128 | | | 126 | | |
| | 130 | 7 | | 141 | 13 | | 144 | 18 | |
| 2 | 125 | | | 132 | | | 130 | | |
| | 133 | 8 | | 144 | 12 | | 148 | 18 | |
| 3 | 126 | | | 124 | | | 132 | | |
| | 134 | 8 | | 134 | 10 | | 150 | 18 | |
| 4 | 128 | | | 124 | | | 135 | | |
| | 136 | 8 | | 135 | 11 | | 152 | 17 | |





FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



000088459