

Estudo das Variáveis Críticas do Processo de Micro Injeção de Zamak e o seu Efeito no Produto Final

João Paulo Costa Ferreira

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Teresa Margarida Guerra Pereira Duarte

Coorientador na FEUP: Prof. Rui Jorge de Lemos Neto

Orientador na Empresa: Eng. Abel Filipe Guerra Pereira



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho 2017

Resumo

No âmbito da unidade curricular de Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), foi desenvolvido em parceria com o Grupo PR® o estudo das variáveis críticas do processo de micro injeção de zamak e o seu efeito no produto final.

Esta dissertação tem como objetivo primário aumentar o conhecimento da empresa sobre a qualidade das peças injetadas na máquina ZM3, concebida e comercializada pela PR Metal®. O objetivo do estudo recairá não só sobre o estudo dos parâmetros de injeção na máquina como a pressão, velocidade, temperaturas do metal no banho de fusão, temperaturas da resistência elétrica do bico de injeção e das moldações, mas também da conceção de moldações, dos componentes da máquina ZM3 e ainda do banho de fusão da máquina.

Serão também debatidas questões relacionadas com as propriedades mecânicas reais das peças obtidas pela máquina em utilização, e ainda feitos estudos acerca da porosidade das peças regularmente lá produzidas. Para além disto, serão ainda projetadas pelo autor desta dissertação duas moldações para os ensaios necessários ao estudo das variáveis do processo.

Como principais conclusões destacam-se a falta de capacidade da bomba antiga na injeção para peças com massa superior a cerca de 17 g, o efeito de redução da porosidade com o aumento da pressão de injeção e a redução da sanidade das peças com a diminuição das temperaturas do banho de fusão. Salienta-se, ainda, as mais baixas tensões de rotura (menos 23% do valor prescrito nas normas) e extensão após rotura (menos 75% do valor prescrito nas normas) das peças injetadas comparadas com os valores teóricos. Conclui-se ainda que o aumento do tamanho dos sistemas de gitagem reduz gradualmente as porosidades e o aparecimento de mal cheios nas peças produzidas. No entanto, a redução de porosidade verificada com o aumento dos sistemas de gitagem tende a estabilizar a partir de um certo valor de aumento, não compensando economicamente aumentar mais o tamanho dos gitos.

Palavras-chave: Zamak, Fundição injetada, Porosidades, Sistemas de gitagem, Pressões, Temperaturas, Bombas de injeção, Tensões de rotura, Defeitos de fundição.

Abstract

In context of the subject Dissertation of Integrated Master in Mechanical Engineering of Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), in partnership with Grupo PR®, a study was developed on the critical variables of micro zamak die casting process and its effect on the final product.

The main goal of this dissertation is to increase Grupo PR's knowledge on the quality of die casting parts produced on ZM3. This machine was projected and developed by PR metal®. The study will not be restricted to die casting parameters as pressure, velocity, molten metal temperature, electrical resistance temperature of nuzzle and die temperature. It also contemplates the study of the influence of die project, ZM3's components and molten metal ambient interactions on the product's quality.

Mechanical properties and porosity of ZM3's products will be also determined on this dissertation. Furthermore, two dies necessary to achieve the goals of this dissertation will be projected by the author of this document.

As main conclusions, It stands out the lack of capacity of the old injection bomb to part pieces with more than 17 g, the reduction effect detected with the increase of injection pressure and the reduction of quality of ZM3's die casting part pieces with the reduction of molten metal temperature. It also stands out the lowest tensile strength and elongation comparing with the values prescribed in standards (reductions of 23% and 75 % respectively). It is also concluded that the increase of gating systems reduces the porosity of parts and the presence of not completely filled parts. However, the reduction of porosity with the increase of gating systems dimensions tends to stabilize, not being economical to make increases of this systems from a certain value.

Keywords: Zamak, Die casting, Porosity, Gating systems, Pressures, Temperatures, Injection pumps, Tensile strength, Casting defects

Agradecimentos

Agradeço ao Grupo PR[®] que, pela mão do Eng. Abel Pereira, meu orientador na empresa, me concedeu a oportunidade de fazer esta dissertação em ambiente industrial e por todas as condições oferecidas ao longo da sua realização.

Um agradecimento ao Eng. Mário Cardoso da PR Metal[®] pelo apoio prestado na produção das moldações. Um agradecimento também ao Eng. Luís Leal, à Elisabete Silva, ao Luís Nóvoa e ao Bruno Lima pela disponibilidade e ajuda na realização dos ensaios na máquina ZM3 da PR Injeção[®].

Um agradecimento ainda a Emília Soares, responsável pelo laboratório de materiografia do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP, pela atenção e ajuda prestada. Ao Eng. Ricardo Carbas, ao Eng. Rui Silva e ao Eng. Miguel Figueiredo pelo auxílio e pelo esclarecimento dúvidas na execução dos ensaios de tração.

Um agradecimento especial ao desenhador Gabriel Cunha que me apoiou durante o tempo passado na PR Injeção[®], discutindo ideias, prestando informações relevantes sobre o funcionamento da ZM3, ajudando-me na conceção das moldações e auxiliando-me na resolução dos muitos problemas tidos nas injeções dos provetes.

Agradeço ainda pelo grande apoio prestado pelos meus orientadores, Prof. Teresa Duarte e Prof. Rui Neto, por toda a disponibilidade e toda a ajuda prestada na elaboração desta dissertação, desde os incentivos dados ao longo do trabalho aos pertinentes debates de ideias. Deixo ainda um profundo sentimento de admiração pelo vosso trabalho e sabedoria.

Um grande agradecimento também ao Diogo Santos, colega de curso, que me acompanhou na PR Injeção[®], por todo o companheirismo, espírito crítico e amizade.

Agradeço do fundo do coração aos meus pais e irmã, que estiveram comigo em todos os momentos durante curso e que me possibilitaram a sua realização. Muito obrigado pelo apoio, afeto, preocupação, confiança e conselhos que me deram ao longo de todos estes anos.

Por fim, agradeço ao projeto NORTE-01-0145-FEDER-000022 - SciTech - Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries, co-financiado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

Índice de Conteúdos

1.	Introdução	1
1.1.	Enquadramento do projeto	1
1.2.	Apresentação do Grupo PR	1
1.3.	Âmbito e objetivos do projeto.....	2
1.4.	Estrutura da dissertação	3
1ª Parte:	Pesquisa Bibliográfica	5
2.	Estado da Arte	5
2.1.	Fundição	5
2.2.	Fundição Injetada	6
2.2.1.	Vantagens e desvantagens	6
2.2.2.	Processo.....	7
2.2.3.	Máquinas de fundição injetada	9
2.2.4.	Ciclo de injeção	11
2.2.5.	Fundição injetada em vácuo.....	13
2.2.6.	Regras de conceção de sistemas de gitagem e <i>venting</i>	15
2.3.	Ligas de Zinco.....	18
2.3.1.	Diagrama de fases Zn-Al	18
2.3.2.	Composição e propriedades	19
2.3.3.	Microestrutura da liga zamak 3 e 5	21
2.3.4.	Fundição injetada de Zamak.....	22
2.3.5.	Defeitos na fundição injetada de Zamak	24
2.3.6.	Banho de fusão de uma liga de Zamak	27
2.4.	Métodos de caracterização de peças em fundição injetada	30
2.4.1.	Métodos de medição de porosidade.....	30
2.4.2.	Determinação de propriedades mecânicas	34
2ª Parte:	Trabalho experimental, análise de resultados e sua discussão	37
3.	Introdução ao trabalho experimental	37

3.1.	Objetivos do estudo	37
3.2.	Objetos de estudo	38
3.2.1.	Porta-chaves MIEM – Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica	38
3.2.2.	Provetes de tração	40
3.2.3.	Outras moldações	42
4.	Estudo da máquina ZM3	43
4.1.	Máquina de injeção ZM3.....	43
4.1.1.	Parâmetros da máquina ZM3.....	46
4.1.2.	Forno de fusão da máquina.....	46
4.2.	Análise da composição química do lingote	47
5.	Estudo inicial do processo na ZM3.....	51
5.1.	Medição de porosidade de peças fabricadas pela ZM3.....	51
5.2.	Sistemas de gitagem das peças.....	54
6.	Estudo do efeito da modificação da bomba de injeção no produto final.....	56
6.1.	Estudo experimental da influência da bomba nova na porosidade das peças produzidas	57
7.	Análise dos sistemas de gitagem.....	62
7.1.	Avaliação de um sistema de gitagem com um ataque.....	62
7.2.	Sistema de gitagem de dois ataques.....	65
8.	Influência dos parâmetros de injeção no produto final.....	70
8.1.	Considerações sobre os ensaios de tração realizados e tamanhos de amostragem	70
8.2.	Influência da pressão de injeção no enchimento e qualidade das peças	72
8.3.	Influência da temperatura do metal no banho de fusão e da resistência elétrica do bico de injeção no enchimento e qualidade das peças.....	75
8.4.	Influência das temperaturas das moldações na porosidade das peças.....	79
9.	Influência da espessura de parede no processo e propriedades das peças.	83
10.	Propriedades mecânicas das peças produzidas na ZM3	87
11.	Conclusões e perspectivas de trabalho futuro	90
11.1.	Conclusões.....	90

11.2. Perspetivas de trabalhos futuros.....	92
Referências.....	94
Anexo A: Procedimento experimental da medição de porosidades por princípio de Arquimedes	97
Anexo B: Desenhos técnicos dos postigos móveis e fixos para porta-chaves e provetes.....	99
Anexo C: Porosidades medidas para o estudo inicial do processo na ZM3	104
Anexo D: Porosidades medidas para o estudo do efeito da modificação da bomba de injeção no produto final.....	105
Anexo E: Análises metalográficas de cortes na porca yammi	107
Anexo F: Dimensões dos sistemas de gitagem dos porta-chaves e provetes, segundo o seu rácio	110
Anexo G: Registo de ensaios nas moldações dos provetes e porta-chaves.....	111
Anexo H: Registo de medições de porosidade em porta-chaves.....	116
Anexo I: Registo de medições de porosidades e valores de ensaio de tração em provetes	119
Anexo J: Curvas força-deformação obtidas nos ensaios de tração.....	123
Anexo K: Registo de medições de porosidades para análise da influência da temperatura das moldações no produto final	126

Siglas

Sigla	Descrição
Al	Símbolo químico do Alumínio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BA	Bomba Antiga
BN	Bomba Nova
CEMUP	Centro de Materiais da Universidade do Porto
Fe	Símbolo químico do Ferro
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
g	Aceleração da gravidade: $9,81 \text{ ms}^{-1}$
LDHI	<i>Lever Door Handle Inner</i>
LDHO	<i>Lever Door Handle Outer</i>
LDS	<i>Lever Door Stop</i>
MIEM	Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
NADCA	<i>North American Die Casting Association</i>
P.F.	Processo de Fabrico
PY	Porca <i>Yämmi</i>
PC	Porta-chaves
PROV	Provetes
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i>
Zn	Símbolo químico do Zinco
ZM1	<i>Zamak Machine 1</i>
ZM2	<i>Zamak Machine 2</i>
ZM3	<i>Zamak Machine 3</i>
ρ	Massa específica

Índice de Figuras

Figura 1 - Diagrama de Ishikawa dos parâmetros e variáveis que influenciam uma peça produzida por fundição injetada (Braga 2015).....	2
Figura 2 - Peças produzidas por fundição injetada de zamak pela PR Injeção®.	6
Figura 3 - Esquema das várias fases do processo de fundição injetada em câmara fria (Amaro 2009).....	8
Figura 4 - Esquema base de uma máquina de fundição injetada (Amaro 2009).	9
Figura 5 - Esquema de uma máquina de fundição injetada em câmara quente (Amaro 2009).	10
Figura 6 - Esquema de uma máquina de fundição injetada em câmara fria (Amaro 2009).	11
Figura 7 - Variação da velocidade e pressão durante um ciclo de injeção numa máquina de fundição injetada de câmara fria (de Lima, Freitas, e Magalhães 2003).	13
Figura 8 - Esquema representativo do princípio do processo de fundição injetada assistido por vácuo. (Niu et al. 2000). a) Esquema no início da fase injeção, b) Esquema na fase de enchimento da cavidade.....	14
Figura 9 - Microestrutura de uma peça em fundição injetada da liga Al-18%Si sem e com aplicação do sistema de vácuo (respetivamente microestrutura (a) e (b)) (Niu et al. 2000).	14
Figura 10 - Exemplos de vents utilizados na fundição injetada com vácuo (VDS 2008).	15
Figura 11 - Diferentes formatos de secções para os canais do sistema de gitagem. (Ramnath et al. 2014).....	17
Figura 12 - Esquema de um sistema de gitagem em fundição injetada (Höök).....	17
Figura 13 - Representação do angulo entre o canal de gitagem e o ataque (NADCA 2006).	17
Figura 14 - Diagrama de equilíbrio Zn-Al (Silva, Alves, e Marques 2013).	19
Figura 15 - Microestruturas das ligas zamak 3 (à esquerda) e zamak 5 (à direita) (ASM International 2004).....	22
Figura 16 - Peça de fundição injetada com porosidades (Eastern Alloys Inc. 2012).....	25
Figura 17 - Exemplo da forma de um rechupe numa peça fundida (Eastern Alloys Inc. 2012)..	25
Figura 18 - Esquema de marcas de fluxo numa peça de fundição injetada. (Eastern Alloys Inc. 2012).....	26
Figura 19 - Diagrama de Ellingham (Chivall 2004).....	28
Figura 20 - Curvas da pressão de vapor de vários elementos e compostos químicos (Vac Aero 2008).....	29
Figura 21 - Montagens de peças em resinas epóxida (à esquerda) e fenólica (à direita).....	34
Figura 22 - Curva tensão-deformação convertida de um ensaio de tração (Brito 2015).....	35

Figura 23 - Esboços do porta-chaves MIEM. À esquerda a versão enviada pela instituição e à direita a versão alterada segundo as regras de traçado para fundição.....	39
Figura 24 - Vista de trás do porta-chaves do MIEM da versão alterada segundo as regras de traçado para fundição.	39
Figura 25 - Meias moldações móvel (à esquerda) e fixa (à direita) para o porta-chaves.....	40
Figura 26 - Desenho técnico do provete utilizado na dissertação.....	40
Figura 27 - Desenho tridimensional das moldações e placas extradoras da moldação dos provetes	41
Figura 28 - Desenhos CAD 3D das meias moldações móvel (à esquerda) e fixa (à direita) para produção de provetes.....	41
Figura 29 - Moldações de peças usadas nesta dissertação de clientes da PR Injeção®. À esquerda a meia moldação móvel da porca yämmi e à direita a meia moldação móvel do lever door stop.	42
Figura 30 - Esquema do pescoço de ganso utilizado na ZM3.	43
Figura 31 - Fotografia do sistema de alavancas na ZM3.....	44
Figura 32 - Esquema de um postigo e respetiva estrutura da máquina em estudo.....	45
Figura 33 - Observações no microscópio eletrónico de varrimento do lingote de zamak.	48
Figura 34 - Representação numa observação ao microscópio das três diferentes fases presentes no lingote de zamak.	48
Figura 35 - Espetros de difração de raio x recolhidos das zonas Z1 (em cima) e Z2 (em baixo).	49
Figura 36 - Espectro de difração de raio x da zona Z3.....	50
Figura 37 - Espectro de difração de raio x global do lingote.	50
Figura 38 - Esquema da linha de corte e do posicionamento dos ataques utilizados na porca Yammi.....	53
Figura 39 - Zonas observadas ao microscópio ótico dos cortes efetuados na porca Yämmi.	53
Figura 40 - Observação ao microscópio de um corte na porca Yammi.	54
Figura 41 - Comparativo das peças injetadas com a bomba antiga (à esquerda) e com a bomba nova (à direita).	56
Figura 42 - Gráfico comparativo da porosidade de peças injetadas com a bomba antiga e com a nova bomba.....	58
Figura 43 - Secções de porcas yämmi injetada com a bomba antiga (à esquerda) e com a bomba nova (à direita).	60
Figura 44 - Porta-chaves do MIEM preso na moldação fixa após injeção.	62
Figura 45 - Gráfico da evolução da porosidade com o tamanho do gito dos porta-chaves do MIEM.....	64

Figura 46 - Provetes injetados com sistemas de gitagem de rácios 1,80 (à esquerda) e 2,50 (à direita).	66
Figura 47 - Evolução da porosidade dos provetes com o tamanho do gito.....	67
Figura 48 - Detalhe da curva de direcionamento do fluxo de metal na moldação dos provetes.	69
Figura 49 - Ensaio de tração realizado a provete de 2,5 mm injetado na ZM3.	71
Figura 50 - Gráfico com a distribuição da porosidade segundo as pressões de ar comprimido de 2,5, 4,5 e 6 bar.	73
Figura 51 - Gráfico com as tensões de rotura dos provetes Injetados a diferentes pressões de ar comprimido.	74
Figura 52 - Porosidades dos provetes injetados a diferentes temperaturas. Condições de ensaio presentes ta Tabela 9.	77
Figura 53 - Tensão de rotura dos provetes injetados a diferentes temperaturas.	78
Figura 54 - Gráfico da evolução da porosidade segundo a temperatura da moldação.	80
Figura 55 - Aspeto da peça LDHI à saída da máquina de injeção (à esquerda) e depois de granhalhada (à direita).	82
Figura 56 - Gráfico com a porosidade entre provetes de 2,5 mm e 1,5 mm de espessura para diferentes condições de injeção.....	84
Figura 57 - Gráfico com a tensão de rotura em provetes de espessura diferente.	85
Figura 58 - Efeito da espessura nos provetes de zamak num ensaio de tração (Association 2017).	85

Índice de tabelas

Tabela 1 - Propriedades das ligas de zinco mais comuns em fundição segundo a norma ASTM B86-09 (ASTM 2009).	20
Tabela 2 - Composição química das principais ligas de zinco para fundição segundo a norma ASTM B86-09 (ASTM 2009).	21
Tabela 3 - Gama dos parâmetros de fundição injetada ideais e da ZM3 (ASM International 2008).	46
Tabela 4 - Porosidade e densidade médias de peças produzidas pela ZM3.....	52
Tabela 5 - Área de ataque e quociente entre o volume médio e a área de ataque para peças produzidas na ZM3.	55
Tabela 6 - Resultados das medições de peças injetadas com a bomba nova numa balança hidrostática.	58
Tabela 7 - Densidades, volumes, massas e porosidades dos porta-chaves injetados com diferentes sistemas de gitagem	63
Tabela 8 - Porosidades, percentagem de mal cheios e tensões de rotura de provetes injetados a diferentes pressões.	72
Tabela 9 - Porosidades, percentagens de mal cheios e tensões de rotura de provetes injetados a diferentes temperaturas do metal no banho de fusão e da resistência do bico de injeção.	76
Tabela 10 - Porosidade média de peças injetadas a diferentes temperaturas da moldação.....	80
Tabela 11 - Porosidade, tensão de rotura e extensão após rotura de todos os provetes ensaiados.	88

1. Introdução

Em contexto industrial, a produção de bens e a prestação de serviços por parte de uma empresa só será competitiva se apresentar uma boa relação entre qualidade e custo. Deste modo, é por vezes necessário reunir esforços para aumentar o conhecimento científico nas áreas de negócio nas quais uma empresa compete. Aperfeiçoar processos, conhecer os principais parâmetros de influência nestes e perceber as suas limitações podem ser a chave para um aumento da qualidade da produção e da competitividade da empresa.

1.1. Enquadramento do projeto

O projeto em estudo nesta dissertação surge na sequência da evolução da área de negócios do Grupo PR®, responsável pelo projeto e conceção de máquinas de fundição injetada em zamak. Estas apresentavam como principal finalidade a produção de peças sobre injetadas em cabos para a indústria automóvel. Contudo, a produção de peças soltas para outras aplicações, através do mesmo processo, revela-se um nicho de mercado a explorar.

A produção deste tipo de peças já é uma realidade no grupo, que conta com uma empresa dedicada a este fim, a PR Injeção®. No entanto, esta acredita que é ainda possível aumentar o seu conhecimento sobre o processo de modo a conseguir evoluir para a produção de peças mais complexas, com melhor qualidade e de uma forma menos iterativa que a verificada atualmente.

1.2. Apresentação do Grupo PR

A história do Grupo PR® tem origem em 1989 aquando da fundação da Tornipeças®, empresa dedicada à produção de peças maquinadas. Contudo, só em 2009 nasce o grupo propriamente dito aquando da aquisição da Molcotex® e respetiva mudança do nome desta para PR Metal®. Esta empresa faz incidir a sua atividade no desenvolvimento e produção de equipamentos e maquinaria industrial (Grupo PR 2017).

Hoje, o grupo é constituído por 6 empresas, sendo que às duas anteriormente já referidas se acrescenta a PR Plásticos®, de produção de perfis extrudidos de plástico, a Croporto®, de tratamentos de superfície de peças, a VR Motors®, dedicada à produção de motores elétricos e a PR Injeção®, responsável pela produção de peças através de fundição injetada. É nesta última que incidirá o

trabalho desta dissertação, através da utilização da máquina ZM3 – Zamak Machine 3, em colaboração com a PR Metal® que a desenvolveu e concebeu (Grupo PR 2017).

A indústria automóvel é um dos grandes clientes do grupo, inclusive na comercialização de peças em fundição injetada em zamak, sendo que o grupo também trabalha com empresas na área retalhista, de vestuário e armamento. No que se refere à localização das empresas, estas situam-se na sua totalidade no concelho da Maia (Grupo PR 2017).

1.3. Âmbito e objetivos do projeto

O projeto aqui apresentado visa, conforme já referido, tentar aumentar o conhecimento da empresa sobre o processo de fundição injetada de zamak.

Na verdade, a melhoria da qualidade deste processo não se pode resumir apenas ao tratamento de questões relacionadas com a parametrização da máquina. O processo de fundição injetada é amplamente condicionado pelo formato da peça, pela parametrização dos equipamentos, pela boa conceção de ferramentas e também pelo tipo de acabamentos e aspeto que se pretende dar a uma determinada peça. Para além disso, é ainda condicionado pelo próprio equipamento de injeção, como pelos materiais utilizados, capacidades e dimensões, bem como pelas interações com o meio ambiente. A Figura 1 apresenta um diagrama de *Ishikawa* com alguns dos parâmetros e variáveis que influenciam a qualidade e a executabilidade de uma determinada peça de fundição injetada.

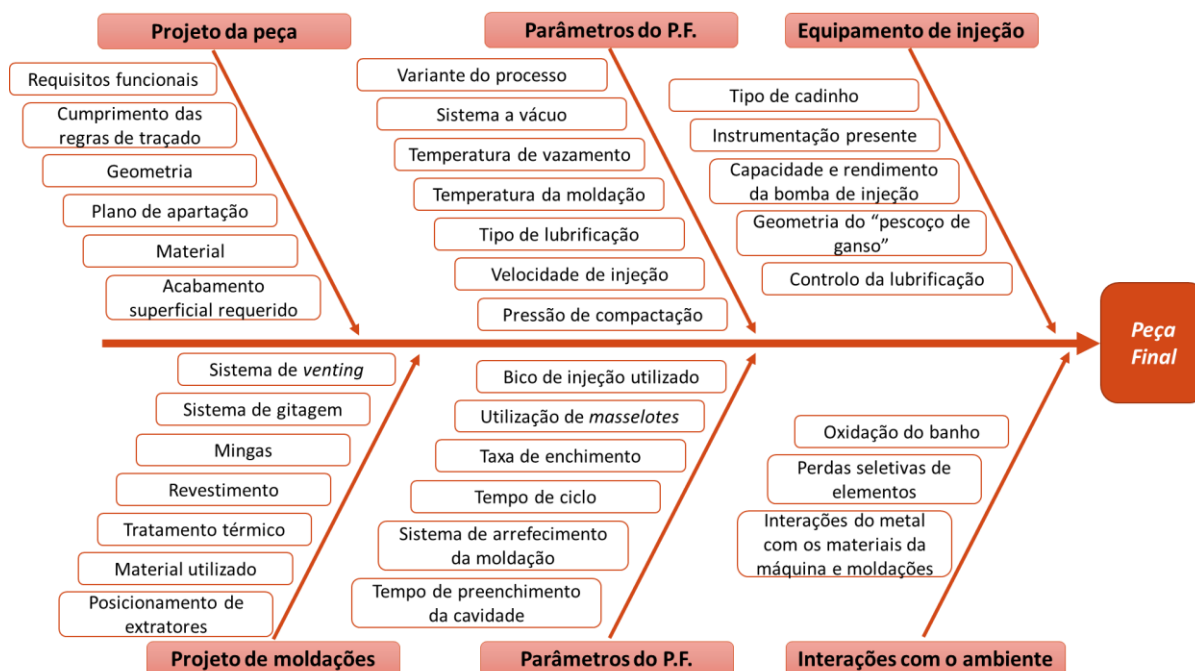


Figura 1 - Diagrama de Ishikawa dos parâmetros e variáveis que influenciam uma peça produzida por fundição injetada (Braga 2015).

Assim, o trabalho a realizar terá como objetivos:

- Entender a influência dos parâmetros da fundição injetada no produto final;
- Analisar o estado atual do processo;
- Identificar as principais causas dos defeitos detetados;
- Perceber a influência das interações do metal com o meio ambiente e a necessidade de aplicação de tratamentos no banho de fusão;
- Compreender as limitações e possíveis melhorias da máquina de injeção ZM3;
- Estudar e esquematizar possíveis melhoramentos no projeto de moldações feito por parte da PR Metal®;

1.4. Estrutura da dissertação

Tendo em conta os objetivos enunciados anteriormente, a estrutura desta dissertação apresentará um capítulo inicial de revisão bibliográfica sobre o processo de fundição injetada, ligas de zinco, interações do meio ambiente com o metal fundido e práticas normalmente adotadas na conceção de sistemas de gitagem e respiros.

Posteriormente, é apresentada a segunda parte da dissertação referente ao trabalho experimental, análise de resultados e sua discussão. Aqui é realizada uma análise à máquina de injeção em utilização e ainda uma verificação inicial do estado do processo com a medição de porosidades de peças em produção. Segue-se uma análise comparativa de peças injetadas com duas bombas de injeção diferentes e uma análise aos tamanhos “ideais” dos sistemas de gitagem para duas moldações concebidas pelo autor da dissertação. De seguida é apresentada a influência da pressão de injeção, da temperatura do metal no banho de fusão, da temperatura do bico de injeção e da temperatura das moldações na qualidade das peças produzidas. São ainda feitas análises às tensões de rotura e extensão após rotura de provetes injetados na ZM3 comparativamente aos valores teóricos e observada a influência da espessura no enchimento, porosidades e tensões de rotura neste processo.

1ª Parte: Pesquisa Bibliográfica

2. Estado da Arte

2.1. Fundição

Por fundição entende-se o processo de fabrico onde um metal fundido é vazado numa cavidade de uma moldação que possui a forma do produto desejado. Com a solidificação, o metal assume a forma da cavidade, tendo no entanto de se considerar a contração resultante deste fenómeno físico (Callister 2008).

A fundição é utilizada quando a geometria da peça a fabricar é complexa ou de grande porte pelo que seria difícil ou dispendioso obter por outro processo. É também utilizada para ligas de baixa ductilidade onde a conformação por trabalho a quente ou frio apresentaria dificuldades acrescidas. Para além disso, o processo de fundição pode ser um processo bastante económico para o fabrico de peças em série (Callister 2008).

Quanto às moldações, estas podem ser, por exemplo, em areia ou barbotinas cerâmicas, que são destruídas aquando de cada vazamento, ou em ligas metálicas ou grafite que são utilizadas para um elevado número de ciclos de fundição. Desta forma, é usual dividir-se as várias técnicas de fundição como fundição em moldações não permanentes e em moldações permanentes, respetivamente (Callister 2008; Silva, Alves, e Marques 2013).

Quanto às suas variantes, destacam-se a fundição em areia, fundição em coquilha, fundição por cera perdida ou ainda a fundição injetada que será o alvo de estudo nesta dissertação (Silva, Alves, e Marques 2013).

2.2. Fundição Injetada

Por fundição injetada define-se a injeção, para uma moldação permanente a altas pressões e velocidades, de ligas metálicas fundidas. Utilizam-se neste processo sobretudo ligas não ferrosas como alumínio, zinco, magnésio e cobre (Coniex 2016).

O facto de o metal líquido ser injetado a alta velocidade e as moldações serem permanentes, permite elevadas taxas de produtividade. Assim, dependendo do tamanho e tipo da peça a fabricar é possível produzir centenas ou milhares de peças por hora (Amaro 2009).

Os primeiros registos de utilização de técnicas de fundição injetada datam de 1849 na patente da empresa *Sturges*[®] pela primeira máquina de injeção de caracteres para impressão, ainda operada manualmente. Este processo esteve limitado a esta aplicação durante um período de 20 anos, tendo um grande desenvolvimento para outros formatos até ao final do século XIX. Desde então estas tecnologias tiveram um grande desenvolvimento com a automação das máquinas, sendo bastante utilizada nos dias de hoje na conceção de peças comerciais (Ferreira 2006).

No que se refere às aplicações desta tecnologia, é possível encontrar-se peças na indústria automóvel, em produtos de lazer, em aplicações domésticas, em brinquedos e equipamentos elétricos, entre outros. Em termos quantitativos, o processo de fundição injetada representa um dos mais volumosos processos de conceção de peças metálicas (Ferreira 2006). Na Figura 2 mostram-se algumas peças produzidas por fundição injetada.

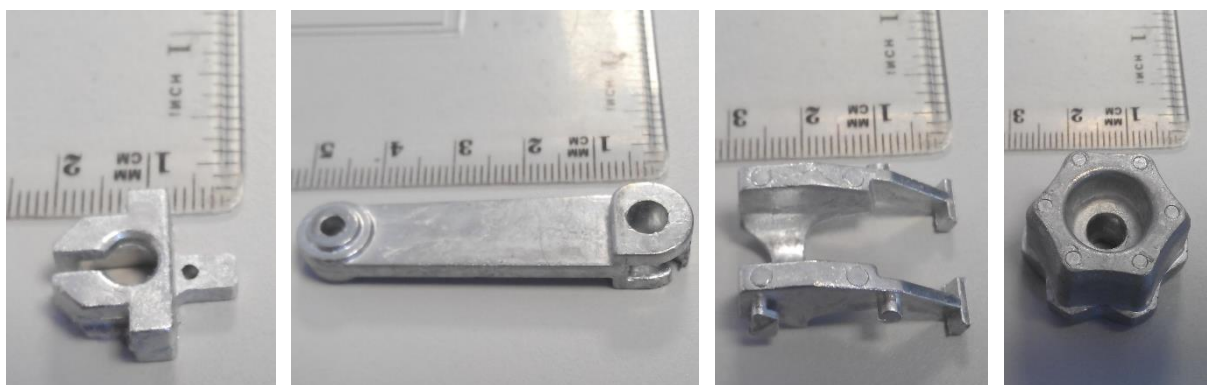


Figura 2 - Peças produzidas por fundição injetada de zamak pela PR Injeção[®].

2.2.1. Vantagens e desvantagens

Quanto às vantagens e desvantagens do processo de fundição injetada, destacam-se as seguintes (Amaro 2009; de Lima, Freitas, e Magalhães 2003):

Vantagens:

- Elevada precisão dimensional;
- Excelente qualidade superficial (rugosidades de 0,4 a 3,2 μm);
- Possibilidade de obtenção de espessuras mais finas que outros processos (tipicamente 0,5mm – ligas de zinco; 0,8mm – ligas de alumínio; 1,5mm – ligas de cobre);
- Elevada produtividade;
- Pouca necessidade de maquinagem nas peças produzidas;
- Reprodução de detalhes com elevada qualidade;
- Boas propriedades de resistência mecânica;
- Operações de rebarbagem geralmente desnecessárias.

Desvantagens:

- Processo complexo e dispendioso no fabrico de moldações;
- Complexidade das peças limitada de modo a permitir a desmoldação;
- Processo com elevado investimento inicial na compra de maquinaria e moldações;
- Economicamente viável apenas para grandes séries de produção;
- Reduzido número de ligas que podem ser vazadas no processo (limitado a ligas de baixo ponto de fusão);
- Elevadas porosidades e micro porosidades internas nas peças fundidas;
- Baixa tenacidade e ductilidade nas peças produzidas.

2.2.2. Processo

O processo de fundição injetada, tal como nas outras técnicas de fundição, começa pela fusão da liga a vazar num forno. É necessário chegar-se a uma temperatura superior à do ponto de fusão da liga, sendo habitual aplicar-se tratamentos às ligas depois de fundidas para minimizar as impurezas e gases dissolvidos. É recorrente nas empresas o forno de fusão ser independente das máquinas, transportando-se, de seguida, a liga através de cadinhos refratários para fornos de manutenção incorporados nas máquinas de injeção (Amaro 2009; de Castro 2013).

De seguida, a máquina de injeção é alimentada com metal para se proceder à injeção. No entanto, existem duas formas de se admitir metal na câmara de injeção: por câmara fria ou câmara quente que serão exploradas mais à frente nesta pesquisa bibliográfica (Amaro 2009; de Castro 2013).

Ainda antes da injeção, as moldações são devidamente fechadas e assim devem permanecer até que o metal solidifique no seu interior. É, assim, vital que as máquinas apresentem uma força de fecho

tal que consigam compensar a pressão que é aplicada no processo de enchimento da moldação e compactação do material. As máquinas de injeção podem variar na sua capacidade entre as 100 e 2000 toneladas de força de fecho. De realçar que a força necessária da máquina depende ainda da dimensão das peças injetadas. É necessário que esta força seja superior ao produto da área projetada da peça e do sistema de gitagem na direção perpendicular ao plano de apartação pela pressão máxima exercida no processo (de Castro 2013).

Na primeira etapa de injeção, o pistão avança lentamente até que o metal encha o sistema de gitagem na moldação, segue-se uma fase de injeção a grande velocidade para preencher a cavidade com o metal fundido. As velocidades e a aceleração da injeção são controladas de forma a otimizar o fluxo do material no enchimento da moldação. O metal arrefece e solidifica em poucos segundos, devido à transferência de calor para a moldação metálica. De notar que durante a solidificação o pistão continua a exercer pressão, dando-se uma fase de compactação (a terceira fase) que permite obter tolerâncias apertadas, espessuras finas, formas complexas, menores porosidades e menos rechupes. Quando todo o metal está solidificado, abrem-se as moldações e corta-se o gito, separando a peça do sistema de alimentação, respiros e bolsas de lavagem (Amaro 2009; de Castro 2013).

A cada ciclo de injeção aplica-se normalmente lubrificante na moldação de modo a arrefecer a superfície desta e deixá-la antiaderente, permitindo uma extração fácil da peça no ciclo seguinte. A Figura 3 apresenta um esquema de todo o processo de injeção (Amaro 2009).

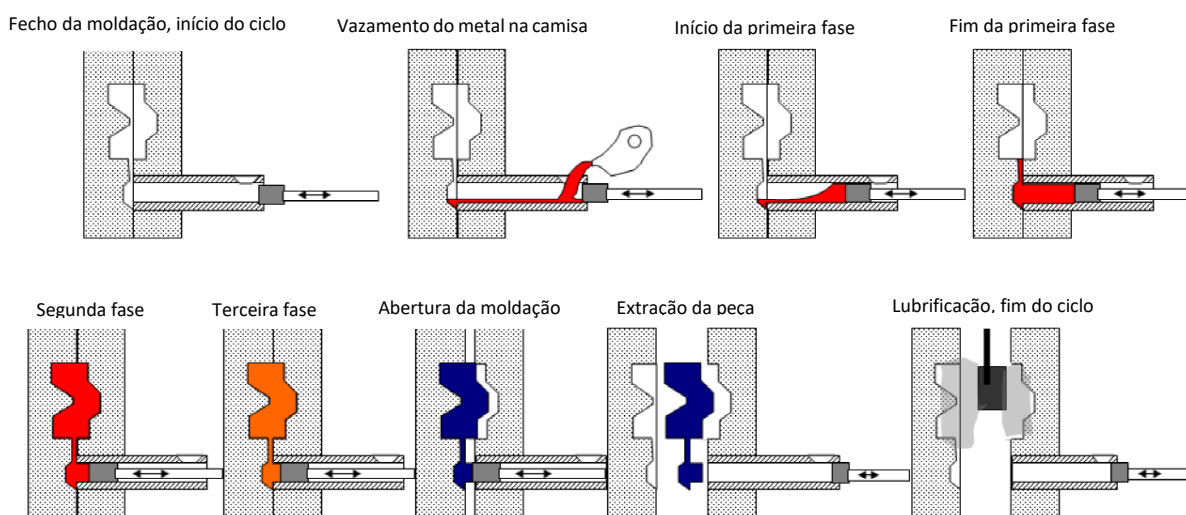


Figura 3 - Esquema das várias fases do processo de fundição injetada em câmara fria (Amaro 2009).

2.2.3. Máquinas de fundição injetada

De uma forma geral, pode-se caracterizar uma máquina de fundição injetada como uma prensa que contém dois pratos, um fixo e outro móvel, cada um com metade de uma moldação (Amaro 2009).

A Figura 4 apresenta a nomenclatura básica de uma máquina de injeção, podendo, no entanto, existir variações ao esquema apresentado (Amaro 2009).

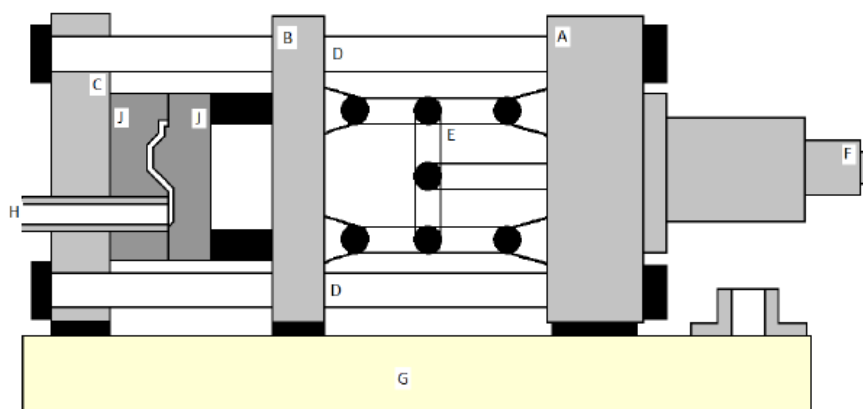


Figura 4 - Esquema base de uma máquina de fundição injetada (Amaro 2009).

A - Placa impulsora	D – Tirantes	G - Base da máquina
B - Placa móvel	E - Sistema de alavancas	H - Sistema de injeção
C - Placa fixa	F - Braço de fecho	J – Moldação

Quanto ao sistema de fecho da máquina, este realiza-se com o auxílio de uma fonte de pressão, de um cilindro e de um sistema de alavancas, também denominado de "tesouras". As forças de fecho das moldações têm de ser suficientes para não permitirem que o metal escape (Amaro 2009).

No esquema da Figura 4 não é possível observar-se, mas normalmente as máquinas de injeção são complementadas com um forno de manutenção ou de fusão com metal fundido para alimentação. Estas podem também apresentar um sistema de extração de peças baseado com pinos de extração situados na meia moldação móvel da máquina complementado com um robot para retirar as peças da zona das moldações. Depois de retirada a peça, é normalmente aplicado novamente um desmoldante à moldação que pode apresentar um sistema automático de pulverização (Amaro 2009).

Os componentes da máquina de fundição injetada e do seu sistema de injeção são de ferro fundido e aço. Uma vez que existem algumas ligas agressivas para estes componentes, como o caso

das ligas de alumínio e de cobre às temperaturas em que o processo se desenrola, é necessário minimizar o contacto destes materiais com a máquina. Deste modo, existem dois processos distintos na injeção: em câmara fria e em câmara quente (Amaro 2009).

Máquinas de câmara quente

As máquinas de câmara quente (Figura 5) são assim designadas devido à bomba de injeção, pistão e manga de enchimento, também designada de “pescoço de ganso”, se encontrarem submersos no banho metálico, dentro da máquina de injeção. Neste tipo de máquinas existe, assim, uma obrigatoriedade de o forno ser parte integrante destas (Amaro 2009; Braga 2015).

Este tipo de configuração apresenta a vantagem de a exposição ao ar do metal fundido ser reduzida o que minimiza os problemas relacionados com turbulência na injeção comparativamente com as máquinas de câmara fria (Amaro 2009).

Uma vez que o sistema de injeção está constantemente em contacto com o metal, este processo é indicado para ligas de mais baixo ponto de fusão e que não dissolvam o aço ou ferro fundido. De uma forma geral, injetam-se nestas máquinas ligas de zinco e magnésio, que não atacam quimicamente os pistões e bombas de injeção das máquinas (de Castro 2013).

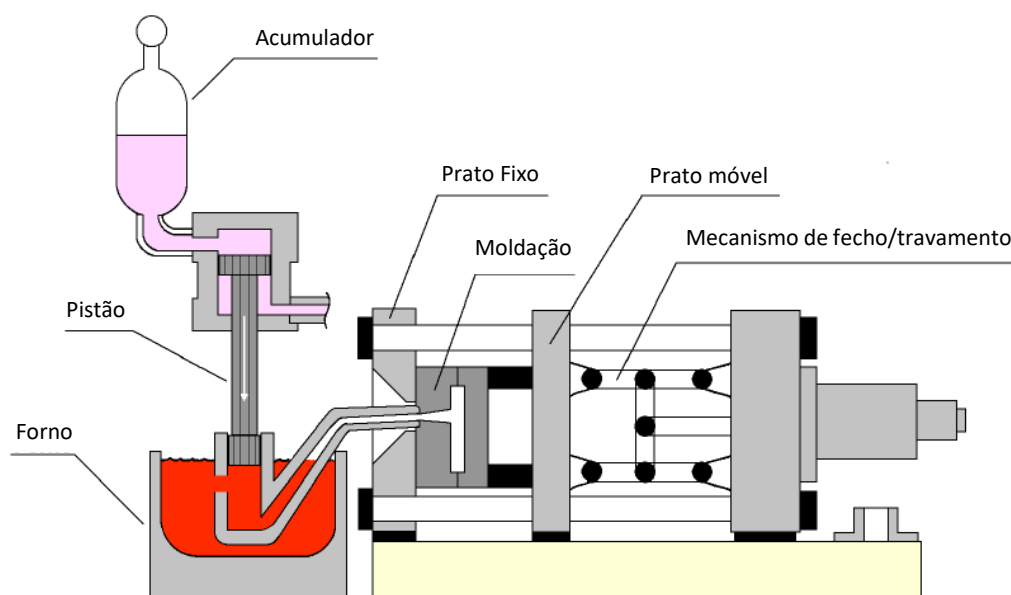


Figura 5 - Esquema de uma máquina de fundição injetada em câmara quente (Amaro 2009).

Máquinas de câmara fria

As máquinas de câmara fria (Figura 6) apresentam como principal diferença o facto de o pistão e o cilindro não se encontrarem em contacto permanente com o metal fundido. O forno é

independente da máquina de injeção e o metal é transportado por uma colher de metal refratário. O transporte pode ser automático (mecânico) ou manual (Amaro 2009; Braga 2015).

Nestas máquinas é comum que o pistão realize um movimento de cerca de dois terços do percurso total do canal do cilindro. Deste modo, é característica destas máquinas a formação de uma porção de material solidificado não pertencente à peça chamada de “bolacha” (Braga 2015).

A grande vantagem destas máquinas é a possibilidade de se usar ligas de mais alto ponto de fusão. No entanto, nas máquinas de injeção de câmara fria, existe uma maior exposição ao ar do metal fundido, e existe mesmo a probabilidade de aparecimento de porosidades internas nas peças devido ao aprisionamento de ar no enchimento da moldação. (Amaro 2009).

Para além disso, as cadências das máquinas de câmara fria são menores que as de câmara quente, muito devido ao transporte de material. Salienta-se ainda que as pressões utilizadas neste tipo de máquina são superiores às anteriores, sendo a construção destas máquinas mais robusta (de Castro 2013).

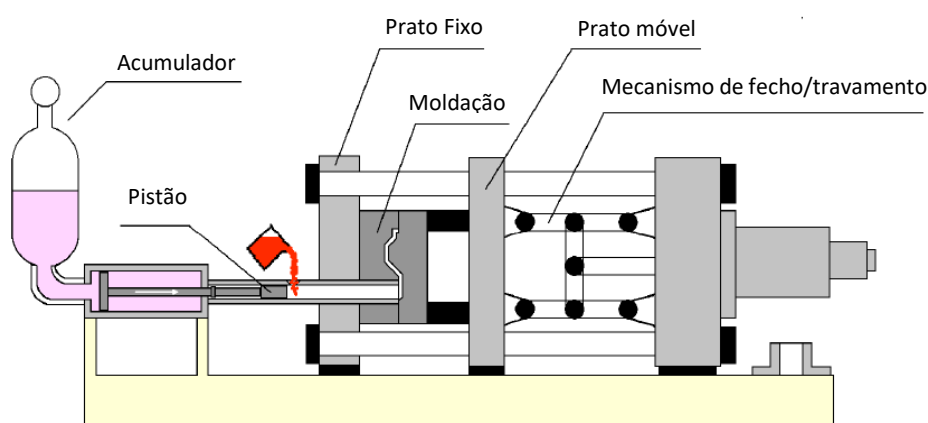


Figura 6 - Esquema de uma máquina de fundição injetada em câmara fria (Amaro 2009).

2.2.4. Ciclo de injeção

Entende-se por ciclo de injeção o conjunto de operações que decorrem entre duas aberturas consecutivas da moldação, durante as quais há injeção com aquecimento e posterior arrefecimento da moldação (Amaro 2009). Há que referir que o ciclo pode diferir de máquina para máquina, consoante as suas características e programação, bem como pelo tipo de câmara utilizada (Braga 2015).

O ciclo de injeção em câmara fria está dividido em 3 fases: primeira fase – aproximação e enchimento do cilindro e dos ataques; segunda fase – enchimento das cavidades da moldação e terceira fase – compactação (Amaro 2009).

A primeira fase compreende, assim, o enchimento do cilindro e dos ataques com metal fundido, expulsão do ar nela presente e um avanço lento do pistão que empurra o metal pelos canais de gitagem até que este alcance a entrada da cavidade moldante. Esta fase é efetuada a baixa pressão e deve ser o mais curta possível para evitar uma acentuada diminuição de temperatura e a oxidação do metal, mas suficientemente lenta para arrastar bolhas de ar (Amaro 2009).

A segunda fase refere-se ao movimento de avanço rápido do pistão que visa encher a alta velocidade, até 10 ms^{-1} no pistão, a cavidade moldante. Nesta fase, ocorre um aumento da pressão de injeção comparando com a fase anterior. De notar que nesta fase a energia cinética do metal resultante do movimento do pistão pode levar a uma abertura da moldação indevida, que pode levar a acidentes de trabalho (Amaro 2009; Neto 2007).

Sempre que possível, deve-se controlar a entrada de metal na cavidade moldante atuando sobre a forma, localização e orientação dos ataques, de modo a permitir uma maior qualidade das peças e durabilidade da moldação. Assim, o processo deve ser feito de modo a que o primeiro metal que entra nas cavidades vá para os *masselotes* (bolsas de lavagem), caso estes existam, para evitar defeitos. A direção de entrada do material não deve incidir diretamente na superfície moldante, minimizando a erosão (Amaro 2009).

A última fase diz respeito à compactação do material injetado até ao valor máximo do ciclo. A velocidade a que o pistão se move é bastante reduzida e próxima de 0 m/s. A subida de pressão entre a fase dois e a três deve ser a mais rápida possível para melhorar a qualidade das peças a nível estrutural. O facto de se utilizarem pressões de compactação elevadas permite melhorar o enchimento de zonas difíceis, colmatar posteriores contrações, reduzir dimensão de bolhas aprisionadas e reduzir o tamanho de grão, melhorando as características mecânicas da peça (Amaro 2009). As pressões de compactação podem chegar até aos 1000 bar (Neto 2007).

A Figura 7 descreve a evolução da velocidade e da pressão ao longo das várias fases de um ciclo de injeção numa máquina de fundição injetada de câmara fria.

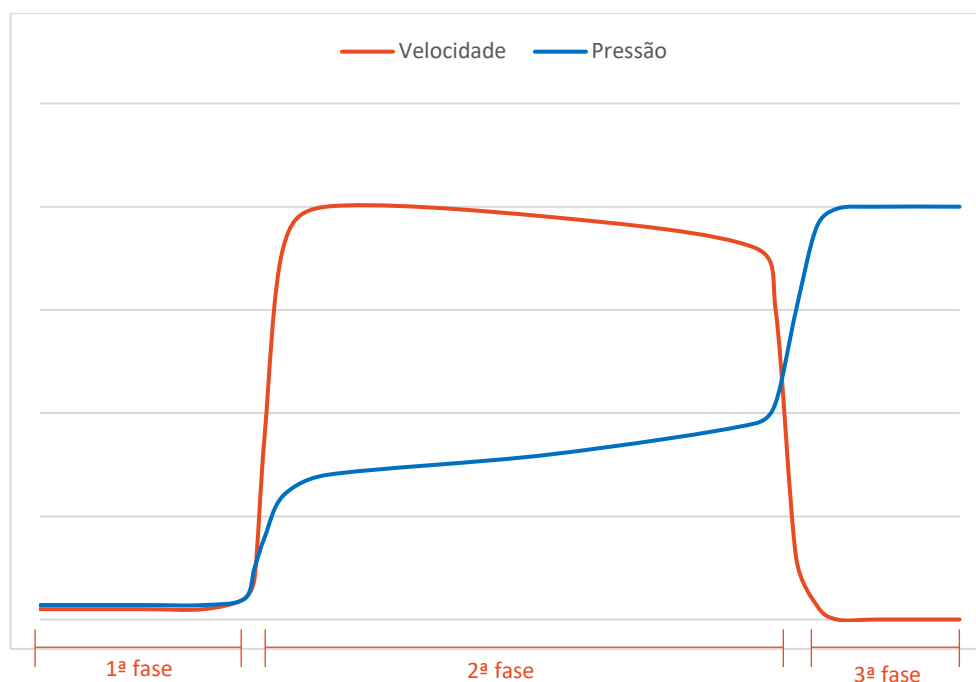


Figura 7 - Variação da velocidade e pressão durante um ciclo de injeção numa máquina de fundição injetada de câmara fria (de Lima, Freitas, e Magalhães 2003).

Nas máquinas de câmara quente, como o pistão se encontra mergulhado no banho de metal fundido não há necessidade da primeira fase de enchimento da câmara de injeção. Desta forma, o ciclo reduz-se às duas seguintes ou faz-se num único avanço até à pressão máxima final de compactação (Braga 2015).

2.2.5. Fundição injetada em vácuo

A injeção de metal em fundição apresenta usualmente problemas associados à porosidade da estrutura devido ao aprisionamento do ar na moldação. Isto acontece devido ao facto de serem utilizadas grandes velocidades de injeção de metal. Desse modo, as aplicações de, por exemplo, ligas de alumínio, ficam limitadas a componentes não estruturais, uma vez que o ar colapsado afeta as propriedades mecânicas das peças fundidas, mesmo que compactado. A utilização de vácuo pode diminuir este efeito (Niu et al. 2000).

No entanto, a utilização de vácuo não se limita à obtenção de peças de melhores propriedades mecânicas. É recorrente as peças obtidas por fundição injetada serem complementadas por operações de acabamento como a pintura, niquelagem, cromagem, entre outras. O seu aspeto visual é afetado pelo acabamento superficial das peças à saída da máquina de injeção. Assim, pode ser uma mais-valia a aplicação de sistemas a vácuo com a finalidade de se obter melhores acabamentos superficiais, já que estes sistemas auxiliam na redução de poros e *blisters* à superfície da peça. O abaixamento da contrapressão no enchimento produzido pelo vácuo ajuda, ainda, a encher peças mais finas (Dubay e Winkler 2005).

Existem duas formas de aplicar o sistema de vácuo:

- Sistema de vácuo completo: todo o sistema de injeção, incluindo o forno, a câmara de injeção e a moldação estão selados e em vácuo. Neste caso, o metal chega à câmara de injeção por um tubo de alimentação. No entanto, este método é complexo e necessita de muito rigor no sistema de selagem (Niu et al. 2000).
- Sistema assistido por vácuo (Figura 8): apresenta-se como um método mais barato e de fácil aplicação, pois não requer grandes alterações na estrutura das máquinas. Neste sistema, a válvula de vácuo está posicionada última parte a encher da cavidade, retirando o ar desta (Niu et al. 2000).

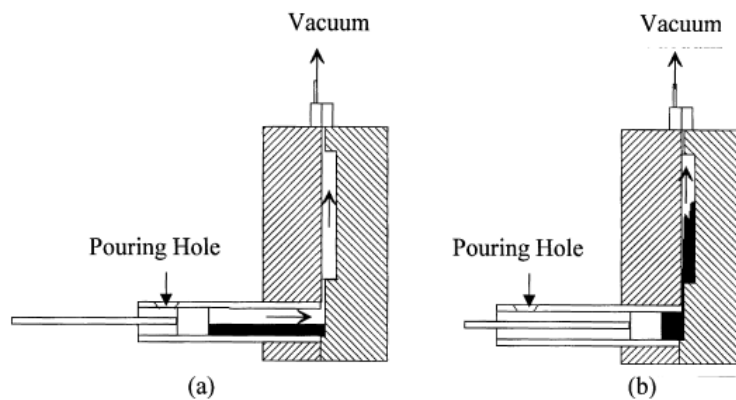


Figura 8 - Esquema representativo do princípio do processo de fundição injetada assistido por vácuo. (Niu et al. 2000). a) Esquema no início da fase injeção, b) Esquema na fase de enchimento da cavidade.

A aplicação de vácuo permite reduzir significativamente a quantidade de poros existentes nas peças, aumentando assim a sua tensão de rotura, tensão limite elástico, extensão após rotura e dureza destas. Como consequência desta redução de porosidades, as peças fundidas com sistemas de vácuo apresentam também maior densidade (Niu et al. 2000).

Na Figura 9 é possível observar ao microscópio o efeito da aplicação de vácuo numa peça de fundição injetada. A liga usada nesta microestrutura foi a Al-18%Si (Niu et al. 2000).

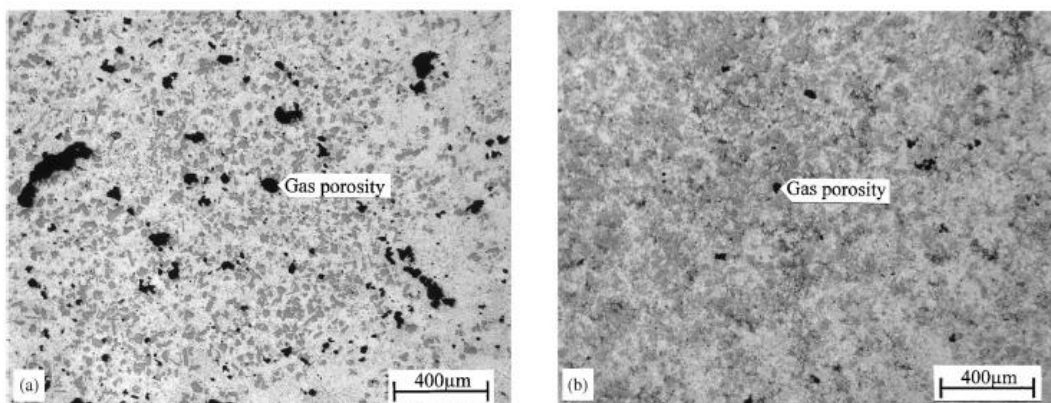


Figura 9 - Microestrutura de uma peça em fundição injetada da liga Al-18%Si sem e com aplicação do sistema de vácuo (respetivamente microestrutura (a) e (b)) (Niu et al. 2000).

É de realçar que nos sistemas a vácuo, a porosidade formada devido à contração das peças não é eliminada (denominada de rechupes). Estes sistemas visam apenas a remoção de ar contido na cavidade da moldação e sistema de injeção, bem como o gás produzido pelo aquecimento dos lubrificantes aplicados (Dubay e Winkler 2005).

Deve ainda referir-se que, para não entupir os sistemas de vácuo, são utilizados elementos *standard* (Figura 10) que promovem a solidificação do metal antes de chegar às válvulas de vácuo. É comum que estes sejam fabricados em materiais mais condutores que as moldações, como o cobre, para promover a solidificação do metal nos seus canais e tenham sistemas de arrefecimento incorporados sobredimensionados e bastante eficientes (Dubay e Winkler 2005).



Figura 10 - Exemplos de vents utilizados na fundição injetada com vácuo (VDS 2008).

2.2.6. Regras de conceção de sistemas de gitagem e *venting*

Um dos elementos a ter em atenção na conceção das moldações são os ataques à peça. Estes influenciam o tempo de enchimento das moldações e devem ser posicionados afastados dos machos e de paredes verticais para limitar a erosão. Idealmente devem-se localizar nas zonas mais espessas da peça. Se possível, deverão também ser evitadas situações de encontros de dois fluxos provenientes de ataques diferentes durante o enchimento. O seu dimensionamento depende do valor da velocidade requerida no enchimento da peça (NADCA 2006).

Numa máquina que opera sob a forma de fonte de pressão, a única variável que permite o controlo da velocidade é a pressão a que o metal estará sujeito durante a etapa de injeção. É assim feito um controlo indireto da velocidade, que se deve manter dentro dos limites recomendados. Estes valores serão apresentados mais à frente neste relatório, no capítulo destinado à fundição injetada de zamak. A expressão seguidamente apresentada permite relacionar a velocidade nos ataques, v_g , consoante a pressão aplicada ao metal, P_m (NADCA 2006),

$$P_m = \left(\frac{\rho}{2g} \right) * \left(\frac{v_g}{C_d} \right)^2 \quad (1)$$

sendo C_d o coeficiente de descarga que normalmente se situa entre 0,45 e 0,5 nas máquinas de fundição injetada, ρ a massa volúmica do metal a injetar e g a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ ms}^{-2}$). No entanto, o seu valor é variável, dependendo das perdas de carga existentes nos canais do pescoço de ganso e no sistema de gitagem (NADCA 2006).

A pressão do metal é calculada com base na conservação da força exercida pelo acumulador até ao pistão. Assim, a pressão do metal (P_m) será dada por:

$$P_m = (P_1 * A_1 - P_2 * A_2) / A_p \quad (2)$$

onde P_1 representa a pressão exercida no cilindro pelo ar comprimido e A_1 a respetiva área de atuação, P_2 a pressão resistente na saída de ar no lado oposto do cilindro pneumático e A_2 a respetiva área onde essa pressão é atuada. Por A_p representa-se a área do pistão de injeção na bomba (NADCA 2006).

Calculada a velocidade no ataque, e conhecendo-se os tempo de preenchimento da cavidade (t_{en}), pode-se então retirar a área necessárias para os ataques da peça A_{ataque} (NADCA 2006):

$$A_{ataque} = \frac{V_{corpo} + V_{masselotes}}{v_g * t_{en}} \quad (3)$$

onde V_{corpo} significa o volume da peça a injetar, $V_{masselotes}$ o volume total de masselotes incluídos na moldação e v_g a velocidade do metal nos ataques. Note-se que o cálculo dos tempos de preenchimento da cavidade depende do material a injetar e é explorado mais à frente no tópico destinado à fundição injetada de zamak.

Contudo, a área não é suficiente para definir o ataque. É necessário definir-se a espessura e a largura deste para o definir completamente. Na prática, para o zamak 5, são adotadas espessuras entre 0,5 a 1,2 mm nos ataques. Para além disso, a seleção da espessura deve respeitar, se possível, a expressão seguinte (NADCA 2006):

$$v_g^{1,707} * t_{ataque} * \rho \geq J \quad (4)$$

onde t_{ataque} simboliza a espessura do ataque e J uma constante definida como 998 000 para as ligas de alumínio, magnésio e zinco, v_g a velocidade do metal nos ataques e ρ a massa volúmica do metal a injetar. A largura do ataque é definida pela área do ataque calculada, dividida pela espessura adotada (NADCA 2006; Ramnath et al. 2014).

Quanto à forma dos canais de gitagem, estes podem ter várias geometrias na sua secção, como as apresentadas na Figura 11. A eficiência de um determinado canal de gitagem será maior quanto menor for a área de contacto com a moldação, em relação ao volume do canal. Para além disso, deve permitir a sua fácil extração das moldações (Ramnath et al. 2014).

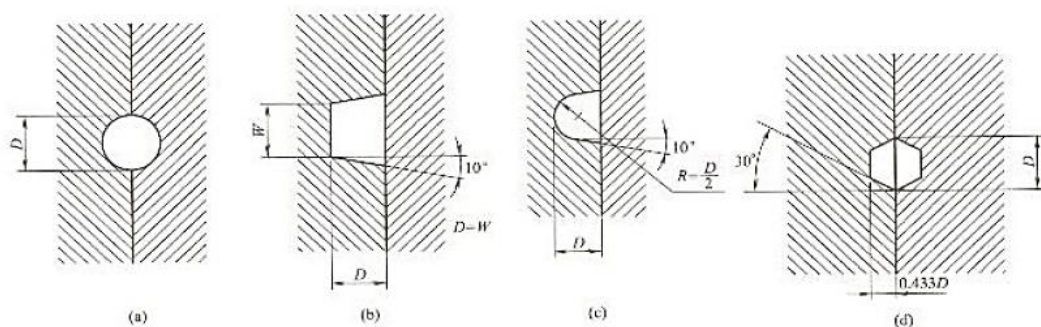


Figura 11 - Diferentes formatos de secções para os canais do sistema de gitagem. (Ramnath et al. 2014)

Dentro destes formatos, a geometria trapezoidal é a mais recomendada para os sistemas de canais de gitagem. Esta apresenta um ângulo de saída de 10° , à semelhança do esquematizado na Figura 12, e apresenta normalmente rácios entre altura (h_r) e largura média (W_r) de 1:1 a 1:3, sendo comum a utilização de um rácio de 1:2. No que se refere à sua área, esta deve ser superior à área dos ataques, sendo recomendado um aumento até 15% de área para as ligas de zinco. No entanto, quanto mais pequenas são as peças, maior este rácio terá de ser para produzir bons resultados práticos no enchimento. Assim, poderá ser necessário aumentos maiores em alguns casos específicos (Höök).

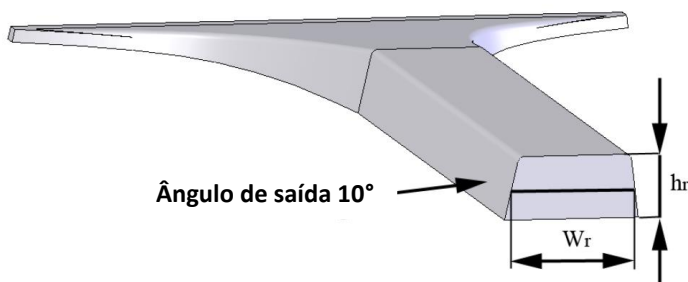


Figura 12 - Esquema de um sistema de gitagem em fundição injetada (Höök).

De notar que, se vários ramos convergirem num único canal de gitagem, este último deve ser aumentado na sua área de 5 a 30 %. De realçar também que o tamanho da secção do canal de enchimento principal deve ser menor ou igual ao diâmetro do *sprue* (elemento de geometria cônica que faz chegar o metal do bico de injeção aos canais de gitagem nas moldações) (Höök).

Outro parâmetro a ter em consideração é o ângulo de fluxo entre o canal de gitagem e o ataque. Este deve estar compreendido entre os 10° a 45° , sendo que acima dos 45° são considerados não práticos. Este ângulo (ϕ) é medido entre uma linha perpendicular ao ataque situada a $\frac{1}{4}$ da largura desse mesmo e uma linha que passa na dimensão limite do ataque conforme se pode visualizar Figura 13 (NADCA 2006).

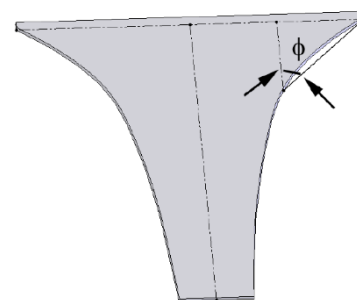


Figura 13 - Representação do ângulo entre o canal de gitagem e o ataque (NADCA 2006).

De realçar que a geometria dos canais de gitagem não deve apresentar zonas de convergência ou divergência bruscas nem zonas de mudança de direção de fluxo perpendiculares, devido ao risco de conduzir a fluxos demasiado turbulentos que aprisionem ar (Braga 2015).

Para além do sistema de gitagem, são por vezes adicionados sistemas de *venting* (também conhecidos como respiros ou de escape de gases) para auxiliar a retirada do ar preso nas moldações e gases originados pelos lubrificantes (Dubay e Winkler 2005). Estes devem ser colocados afastados dos ataques à peça e de preferência nas zonas onde será previsível o metal chegar em último lugar. Podem-se dimensionar os respiros como um quarto da área da secção dos ataques. Normalmente, para as ligas de zinco são usadas espessuras neste tipo de elementos de 0,06 a 0,10 mm (Höök; NADCA 2006).

2.3. Ligas de Zinco

As ligas de zinco são ligas metálicas constituídas maioritariamente por zinco e têm como principal elemento de liga o alumínio. Destinam-se sobretudo à fundição, especialmente a fundição injetada, mas também a fundição em coquilha, areia, de cera perdida, entre outros (ASM International 1990; Silva, Alves, e Marques 2013).

No caso da fundição injetada, as ligas de zinco são usadas há mais de 60 anos. Tradicionalmente, estas ligas baseavam-se numa composição hipo-eutética do diagrama de Zn-Al (apresentado na Figura 14), com percentagens de alumínio próximas dos 4%. Isto porque estas ligas com teor próximo de 5% de alumínio apresentam muito baixa tenacidade ao choque, ficando assim limitada a uma percentagem até 4,3%. As ligas com cerca de 5 % de alumínio representam a liga eutética do diagrama Zn-Al que é bastante frágil e por esse motivo é referida como sendo evitável (ASM International 1990; Silva, Alves, e Marques 2013).

Contudo, recentemente, uma família de ligas de zinco com composição hipereutética (> 5,1% de Al) tem começado a ser utilizada como liga de fundição em coquilha, possuindo resistência mecânica mais elevada que as ligas hipo-eutéticas (ASM International 1990).

2.3.1. Diagrama de fases Zn-Al

Apresenta-se de seguida, na Figura 14, o diagrama de equilíbrio Zn-Al. Nele é possível observar as fases e transformações de estruturas cristalinas, segundo a temperatura e as percentagens dos constituintes.

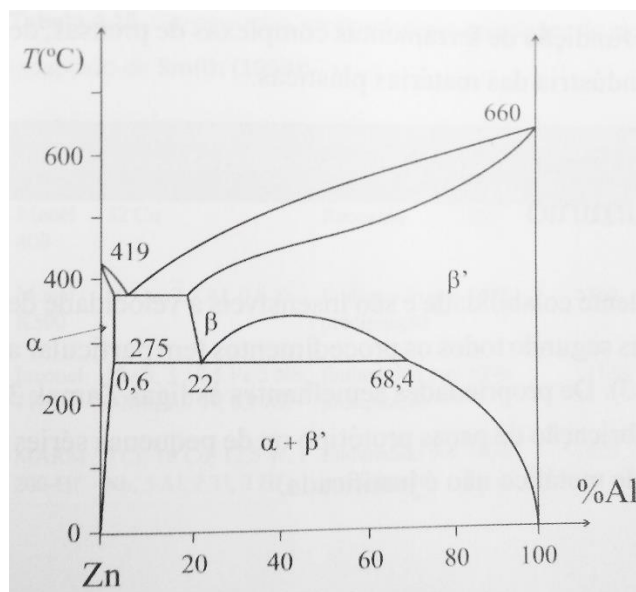
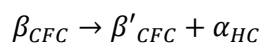


Figura 14 - Diagrama de equilíbrio Zn-Al (Silva, Alves, e Marques 2013).

É possível verificar-se um ponto eutético a 5,1% de Al a 382 °C. Para além disso, é apresentada a fase α constituída sobretudo por Zn, sendo que a percentagem de Al ronda os 1,15% a 382 °C e apenas 0,05% de Al à temperatura ambiente. A estrutura cristalina desta fase é hexagonal compacta (HC). A fase β apresenta uma constituição de 22% de Al e um estrutura cúbica de faces centradas (CFC) a 275 °C. Há que realçar ainda a transformação monotectóide a 275 °C:



onde a fase β' apresenta 68,4% de Al e uma estrutura cúbica de faces centradas. De notar que esta última transformação influencia a estabilidade dimensional da liga (Silva, Alves, e Marques 2013).

2.3.2. Composição e propriedades

As ligas hipo-eutéticas do diagrama Zn-Al são normalmente denominadas de zamak, sendo este nome derivado da composição dos principais elementos presentes na sua constituição. Estas ligas apresentam Zinco, Alumínio, Magnésio e Kopper (cobre) (ASTM 2009).

Nestas ligas, o alumínio melhora a fluidez e a colabilidade da liga, bem como a tensão de rotura, tensão limite elástico e tensão limite de fadiga. Reduz também o tamanho de grão, baixa a densidade da liga e diminui a tendência de o zinco se dissolver no ferro. No entanto, reduz a ductilidade e a resistência ao impacto (ASM International 2008; Braga 2015; Silva, Alves, e Marques 2013).

O magnésio tem um papel endurecedor na liga, compensa os efeitos das impurezas metálicas presentes e diminui a corrosão intergranular. Contudo, diminui a colabilidade da liga e provoca uma pequena perda de ductilidade (Braga 2015; Silva, Alves, e Marques 2013).

Já o cobre melhora a dureza e a tensão de rotura da liga, bem como a resistência à fluência e à corrosão. No entanto, devido a um fenómeno de endurecimento estrutural que leva a variações dimensionais acentuadas nas peças, a percentagem de cobre é normalmente limitada a 1,25%. A adição de cobre na liga prejudica ainda a ductilidade (Braga 2015; Silva, Alves, e Marques 2013).

Há ainda outros elementos químicos com influência nas propriedades e características do zamak. O ferro é nocivo para estas ligas já que tem tendência a formar compostos duros de ferro-alumínio que complicam possíveis operações de maquinagem. O cádmio, o chumbo e o estanho promovem fissurações e distorções nas peças sendo que os dois últimos ainda podem promover corrosão no interior das peças. Desta forma, estes elementos são limitados na sua quantidade (ASM International 2008).

Na Tabela 1 apresentam-se as propriedades das ligas de zinco mais comuns em fundição. Note-se que as propriedades seguidamente expressas podem não apresentar os valores normalmente obtidos por fundição, já que não se considera uma boa prática de engenharia apresentar-se propriedades de provetes obtidos por este processo (ASTM 2009).

Tabela 1 - Propriedades das ligas de zinco mais comuns em fundição segundo a norma ASTM B86-09 (ASTM 2009).

Designação corrente		Zamak 2	Zamak 3	Zamak 5	Zamak 7	ZA-8	ZA-12	ZA-27
Designação UNS		Z35541	Z33520	Z35531	Z33523	Z35636	Z35631	Z35841
Tensão de rotura	MPa	359	283	328	283	374	404	425
Tensão limite elástico	MPa	--	221	228	221	290	320	376
Extensão após rotura	%	7	10	7	13	6-10	4-7	1-3
Dureza	Escala Brinell	100	82	91	80	103	100	119
Tenacidade	J	47	58	65	58	42	--	12,8
Módulo de elasticidade	GPa	85,5	85,5	85,5	85,5	85,5	82,7	77,9
Massa específica	gcm ⁻³	6,60	6,60	6,60	6,60	6,3	6,03	5,00
Temperatura de fusão	°C	379 – 390	381 – 387	380 – 386	381 – 387	375 – 404	377 – 432	375 – 487
Coeficiente de expansão térmico	mm/m /°C	27,7	27,4	27,4	27,4	23,3	24,2	26,0
Contração na solidificação	%	1,25	1,17	1,17	1,17	1,1	1,3	1,3
Mingas em fundição (<i>die casting</i>)	mm/mm	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,0075	0,008

No que respeita às composições químicas destas ligas, o quadro seguinte (Tabela 2) apresenta os intervalos das percentagens de cada elemento de liga (ASTM 2009).

Tabela 2 - Composição química das principais ligas de zinco para fundição segundo a norma ASTM B86-09 (ASTM 2009).

Designação corrente		Zamak 2	Zamak 3	Zamak 5	Zamak 7	ZA-8	ZA-12	ZA-27
Designação UNS		Z35541	Z33520	Z35531	Z33523	Z35636	Z35631	Z35841
Alumínio	%	3,5 – 4,3	3,5 – 4,3	3,5 – 4,3	3,5 – 4,3	8,0 – 8,8	10,5 – 11,5	25,0 – 28,0
Magnésio	%	0,020 – 0,050	0,020 – 0,050	0,03 – 0,08	0,005 – 0,020	0,015 – 0,030	0,015 – 0,030	0,015 – 0,030
Cobre	%	2,5 – 3,0	0,25 máx	0,75 – 1,25	0,25 máx	0,8 – 1,3	0,5 – 1,2	2,0 – 2,5
Ferro, máx	%	0,100	0,100	0,100	0,075	0,075	0,075	0,075
Chumbo, máx	%	0,005	0,005	0,005	0,003	0,006	0,006	0,006
Cádmio, máx	%	0,004	0,004	0,004	0,0020	0,006	0,006	0,006
Estanho, máx	%	0,003	0,003	0,003	0,0010	0,003	0,003	0,003
Níquel	%	--	--	--	0,005 – 0,020	--	--	--
Zinco		Restante	Restante	Restante	Restante	Restante	Restante	Restante

De entre as ligas apresentadas, o zamak 3 e 5 são as mais comuns em fundição (Silva, Alves, e Marques 2013).

No que diz respeito às aplicações, as ligas de zinco são muito utilizadas pela indústria automóvel, sendo uma das maiores consumidoras. No entanto, estas são também muito usadas para ferragens, material bélico, equipamentos eletrónicos, eletrodomésticos, joalharia, equipamento de escritório, brinquedos, entre outros (Braga 2015).

Os principais atrativos destas ligas devem-se à sua boa resistência à corrosão, tração, choque, desgaste e baixo ponto de fusão. Apresentam boas propriedades para fundição, o que possibilita a obtenção de peças complexas com acabamentos superficiais de alta qualidade, baixa quantidade de defeitos e de baixas espessuras. Destaque ainda para o facto de, no processo de fundição injetada, estas ligas desgastarem pouco as moldações e outros componentes da máquina (Braga 2015).

2.3.3. Microestrutura da liga zamak 3 e 5

Tal como já foi referido, a maior parte das ligas de zinco para fundição apresentam 4% de Al, como é o caso do zamak 3 e 5.

Durante a solidificação destas ligas de 4% de Al, a primeira fase a solidificar é a α rica em zinco, tal como apresentado no diagrama de fases Zn-Al. De seguida, a fase β precipitará a partir dos 382 °C, sendo esta apenas estável acima dos 275 °C. Abaixo desta temperatura, esta transforma-se num constituinte eutectóide de fases $\alpha + \beta'$. Isto pode ser observado nas microestruturas seguintes (Figura 15) de zamak 3 e 5 (ASM International 2004).

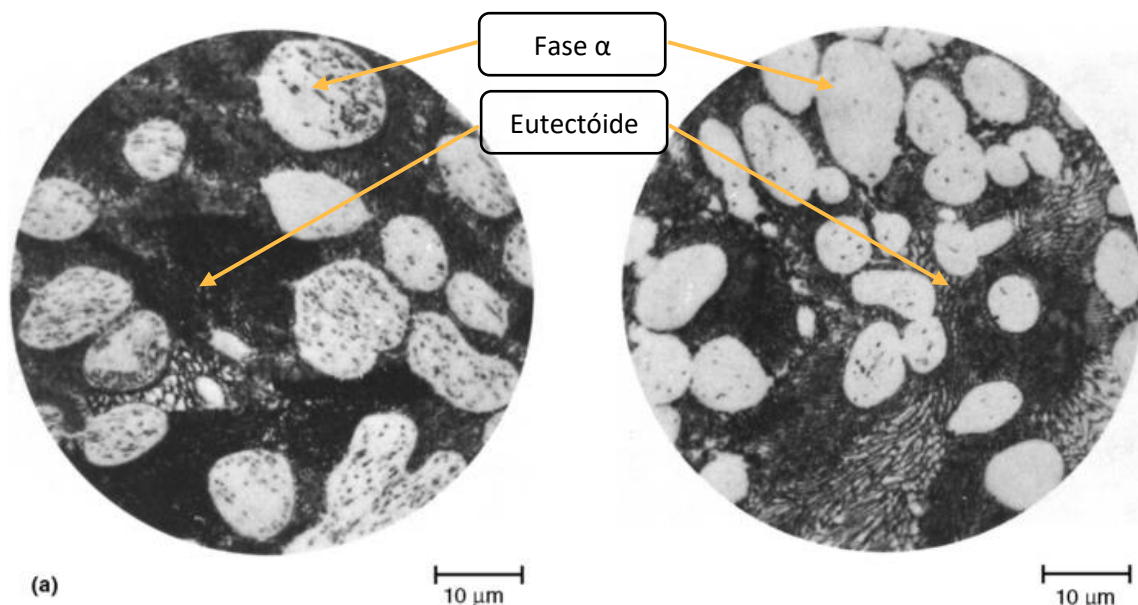


Figura 15 - Microestruturas das ligas zamak 3 (à esquerda) e zamak 5 (à direita) (ASM International 2004).

O alumínio atua como refinador de grão nas ligas de zinco fundido. Isto conciliado com o rápido arrefecimento característico da fundição injetada resulta numa estrutura de grão bastante fino, responsável pela resistência, ductilidade e tenacidade das peças fundidas em ligas de zinco (ASM International 2004).

Realça-se o facto de o zamak 5 apresentar uma percentagem de cobre superior ao zamak 3 pelo que podem aparecer fases existentes no diagrama ternário Zn-Al-Cu, não presentes no diagrama binário Zn-Al.

2.3.4. Fundição injetada de Zamak

Neste tópico pretende-se apresentar alguns dos parâmetros críticos do processo de fundição injetada para o caso das ligas de zamak. Para além disso, são referidas algumas considerações que devem ser usadas no processamento deste material.

Na injeção de ligas de zinco, utiliza-se habitualmente pressões de injeção entre os 10,3 a 20,6 MPa (103 a 206 bar), sendo o valor mínimo usado para peças mais simples e o limite superior para peças mais complexas. Acrescenta-se ainda que os 10,3 MPa correspondentes ao valor mínimo são

essenciais para a obtenção de aceitáveis acabamentos superficiais e propriedades mecânicas e boa sanidade das peças (ASM International 2008).

No que se refere às temperaturas nos fornos de fusão, estas situam-se normalmente entre os 400 a 440 °C. Na prática, o valor adotado ronda os 415 °C, dependendo, no entanto, das espessuras das peças vazadas. Para peças mais finas, podem ser necessárias temperaturas mais altas e para peças mais grossas poderão ser usadas temperaturas mais baixas. Contudo, chegar à temperatura ótima de vazamento requer experimentação (ASM International 2008).

Sobre o tempo de preenchimento da cavidade da moldação, é sabido que deve ser o menor possível para se obter menores porosidade e melhores acabamentos superficiais. Para o caso das ligas de zinco, existem regras práticas que indicam que o tempo máximo para o preenchimento da cavidade deve ser $6T + 7$ ms para o caso de querer uma superfície posteriormente cromada ou $7T + 13$ ms caso a superfície possa ser de mais baixa qualidade. T significa a espessura média das paredes da peça em milímetros (Allsop e Kennedy 1982). No entanto, uma das melhores fórmulas de cálculo do tempo de preenchimento da cavidade é a equação da NADCA – *North American Die Casting Association*. Contudo, esta exige o conhecimento de mais parâmetros do processo.

$$t = K \left(\frac{T_i - T_l + SZ}{T_f - T_d} \right) T \quad (5)$$

t – tempo máximo de preenchimento da cavidade | K – constante relacionada com o material da moldação | T_i – Temperatura do metal no ataque | T_l – Temperatura de liquidus | T_d – Temperatura da moldação depois da injeção | T_f – Temperatura de fusão | T – espessura média das paredes da peça | S – percentagem solidificada no fim do enchimento | Z – fator de conversão da percentagem solidificada (NADCA 2006).

A velocidade registada no orifício de ataque à peça é também um dos parâmetros a ter em atenção. Para ligas de zinco, é recomendada uma gama de 5 a 40 ms⁻¹ neste parâmetro. Note-se que este parâmetro está relacionado com o anterior, sendo que quanto maior for a velocidade no ataque, menor é o tempo de preenchimento da cavidade (Allsop e Kennedy 1982).

Outro parâmetro a ter em conta é a taxa de enchimento das cavidades das moldações. A taxa de enchimento é designada pela relação entre a velocidade do pistão e a velocidade de enchimento (velocidade de entrada do metal nas cavidades moldantes). Este parâmetro tem grande importância, pois um dos principais problemas da fundição injetada é a evacuação do ar durante a injeção. Taxas de enchimento baixas correspondem a maior quantidade de ar na cavidade da moldação, sendo uma situação a evitar. O valor da taxa de enchimento deve variar entre 60 e 80% (de Castro 2013).

Quanto às moldações, estas são, por norma, produzidas em aços pré-tratados. Como as ligas de zinco apresentam uma temperatura de vazamento relativamente baixa, nem sempre são usados aços de trabalho a quente. Contudo, para séries de peças longas, o aço de ferramentas H13 pode ser uma boa solução com grande durabilidade associada. A dureza típica dos aços usados para ligas de zinco ronda os 29 a 34 HRC. Nota-se ainda que o vazamento de ligas de zinco pode ser feito em moldações preparadas para o vazamento de ligas com maior temperatura de fusão como o alumínio, mas o inverso nem sempre é possível. Isto porque o zinco permite espessuras mais finas e menor raios que estes materiais (ASM International 2008).

Quanto às temperaturas das moldações, para estas ligas, deve-se ter valores entre os 160 a 245 °C. De realçar que temperaturas demasiado baixas nas moldações podem conduzir a maior porosidade, mal cheios, fraco acabamento e a marcas de fluxo visíveis. Já temperaturas demasiado elevadas podem resultar em erosão acelerada da moldação, contrações, soldagem, entre outros problemas. A regulação da temperatura da moldação pode ser efetuada com ajustes no sistema de refrigeração das mesmas (ASM International 2008).

No que se refere à lubrificação, esta só será ótima se carbonizar ou evaporar à temperatura de operação. A utilização de lubrificantes visa a criação de uma película de desmoldante que tem como função facilitar a extração da peça e arrefecer a moldação metálica a cada ciclo de produção. Assim, a utilização de lubrificantes evita a adesão do metal às moldações, reduz a sua erosão, promove um melhor fluxo de preenchimento da cavidade e evita mal cheios. Lubrificantes à base de óleo e grafite são usados de forma comum nestas aplicações, sendo que vêm a ser substituídos por lubrificantes à base de água. Estes últimos são mais seguros e melhores em termos ambientais, sendo formulados para auxiliar o arrefecimento das moldações e a extração das peças (ASM International 2008; de Castro 2013; de Lima, Freitas, e Magalhães 2003).

Para além destes aspetos aqui referidos, o cumprimento das regras de traçado ajuda na prevenção de defeitos de fundição e evita problemas na extração. Saídas de 1º a 2º, usar raios mínimos de 0,4 mm (comum usar 1,5 mm) nas esquinas da peça e cumprir as espessuras mínimas recomendadas são essenciais no processo (ASM International 2008).

2.3.5. Defeitos na fundição injetada de Zamak

Neste tópico, pretende-se explorar os defeitos mais comuns na fundição injetada de peças em zamak. Embora se tenha por base esta liga, muitos dos defeitos que seguidamente serão apresentados estão mais associados a defeitos comuns no processo e não à utilização da liga em si.

Porosidade e micro porosidade

A porosidade nas peças de zamak pode ter várias origens. Entre elas podem estar: ar devido à turbulência no enchimento da cavidade, má expulsão do ar da cavidade moldante ou devido aos lubrificantes e desmoldantes usados. É de salientar que os poros resultantes destas causas se apresentam sob a forma de cavidades com paredes lisas, sensivelmente esferoidais, sem comunicação para o exterior, como se pode observar na Figura 16 (Wang, Turnley, e Savage 2011).



Figura 16 - Peça de fundição injetada com porosidades (Eastern Alloys Inc. 2012).

A porosidade pode ser controlada com a modificação da temperatura de vazamento do zamak, da velocidade de injeção, da pressão utilizada pela regulação da temperatura das moldações, pela utilização de diferentes desmoldantes e em diferentes quantidades e por um bom projeto do escape de ar nas moldações. Podem ainda ser usados sistemas de vácuo ou *masselotes* em casos em que seja necessário ter um melhor controlo deste defeito (de Castro 2013; Neto 2007; Wang, Turnley, e Savage 2011).

Rechupes e micro rechupes

Os rechupes são outros dos defeitos possíveis de encontrar e formam-se devido à contrações de volume do metal durante a solidificação. Estes tendem a aparecer mais frequentemente nas zonas mais espessas da peça. Na Figura 17 é possível ver um exemplo de um rechupe numa peça fundida (Braga Jr; de Lima, Freitas, e Magalhães 2003).

Os rechupes podem ser solucionados com um melhor projeto da peça fundida, do sistema de gagem e das zonas de alimentação. Por outro lado, é de notar que, mesmo que estes rechupes macroscópicos sejam evitados, a contração origina sempre micro rechupes que afetam as propriedades mecânicas. No entanto, estes são, muitas vezes, difíceis de eliminar ou diminuir. A pressão de compactação no final do ciclo de injeção pode no entanto reduzir a influência da contração do metal. É comum referir-se aos micro rechupes como porosidade devido à contração (Amaro 2009; de Lima, Freitas, e Magalhães 2003).



Figura 17 - Exemplo da forma de um rechupe numa peça fundida (Eastern Alloys Inc. 2012).

Juntas frias ou mal ligado

É outro dos defeitos comuns em fundição e podem aparecer sobretudo devido ao mau projeto do sistema de gagem, à baixa colabilidade da liga, a uma baixa temperatura de vazamento do metal e a uma baixa velocidade de injeção. As juntas frias aparecem quando duas frentes de metal oxidado solidificam antes de se encontrarem. Têm a aparência de uma fenda e dependem na sua forma do grau

de oxidação e da temperatura da liga na junta. Podem ser denominados de pontos frios ou fluxos mal unidos (de Lima, Freitas, e Magalhães 2003; Neto 2007).

Mal Cheios

Os mal cheios pertencem à classe de defeitos de forma, sendo, como o próprio nome indica, referente a um não total enchimento da cavidade da moldação. A elevada condutividade térmica das moldações contribui para o aparecimento destes defeitos, bem como os fatores referidos para as juntas frias. Os mal cheios podem ser identificados pela existência de esquinas boleadas ou na falta de material nas secções mais finas da peça. Pode ser solucionado pelo aumento da temperatura de vazamento, recorrendo a isolamentos nas zonas mais críticas das moldações e pelo cumprimento das regras de traçado no projeto da peça (Braga Jr; de Lima, Freitas, e Magalhães 2003).

Inclusões

São defeitos caracterizados pelo aparecimento de partículas metálicas ou não metálicas nas peças fundidas finais. Podem ser originárias das moldações ou dos materiais refratários do cadinho ou de impurezas da liga e escória. Podem afetar as propriedades mecânicas das peças e dificultar a maquinagem (de Lima, Freitas, e Magalhães 2003; Neto 2007).

Marcas de fluxo

Por vezes, são visíveis nas peças, à superfície, vórtices, salpicos ou zonas laminadas no metal, como representado na Figura 18. É um defeito característico deste processo, sendo que estas marcas são consequência do trajeto do metal no enchimento da cavidade. Este pode ser minimizado pelo controlo da temperatura da moldação, redução do tempo de enchimento e usando revestimentos na moldação para reduzir a condutividade desta (Eastern Alloys Inc. 2012).

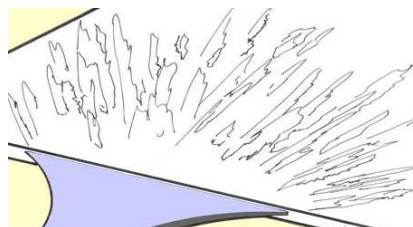


Figura 18 - Esquema de marcas de fluxo numa peça de fundição injetada. (Eastern Alloys Inc. 2012)

Fissuras

A fissuração das peças pode ocorrer devido à conjugação da contração das peças com tensões residuais que ultrapassam, a determinada temperatura, a tensão de rotura, devido a problemas na remoção das peças das moldações ou em operações pós injeção como o corte. As fissuras podem influenciar as propriedades mecânicas das peças, acelerar a corrosão e trazer problemas de estanquicidade (Eastern Alloys Inc. 2012).

2.3.6. Banho de fusão de uma liga de Zamak

Embora as percentagens de elementos nocivos à liga estejam bem delineadas nas normas das ligas (Tabela 2), o controlo da composição química dos lingotes deve ser efetuado pelas empresas, de modo a aferir a verdadeira qualidade do processo. Mesmo que as percentagens de elementos químicos nocivos da liga não sejam superiores ao recomendado, podem ocorrer fenómenos de segregação com formação de fases indesejadas aquando da solidificação e desvios da composição química da liga. O aparecimento de fases devido a concentrações anormais de elementos danosos nas ligas de zinco pode conduzir a zonas de maior fragilidade, difícil maquinagem ou aceleração da degradação das peças, com o passar do tempo (ASM International 2008).

Porém, os lingotes não são a única fonte de variação de propriedades de um banho de fusão. À superfície do banho metálico do forno de fusão, o contacto do metal com a atmosfera promove a criação seletiva de óxidos metálicos. Estes óxidos podem ser nocivos para as propriedades mecânicas das peças, como por exemplo a ductilidade, e influenciar a maquinabilidade desta (ASM International 2008).

No entanto, estes não são os únicos problemas resultantes da formação de óxidos. Devido às diferenças de energias livres de formação de óxidos dos vários elementos constituintes das ligas, a formação de óxidos pode provocar ligeiras alterações nas composições destas mesmas ligas. Utilizando o caso das ligas de zamak, principalmente constituídas por zinco, alumínio, magnésio e cobre, estude-se o diagrama de *Ellingham* (Figura 19) para se perceber o efeito que a criação de óxidos pode ter na liga (Soares 2000).

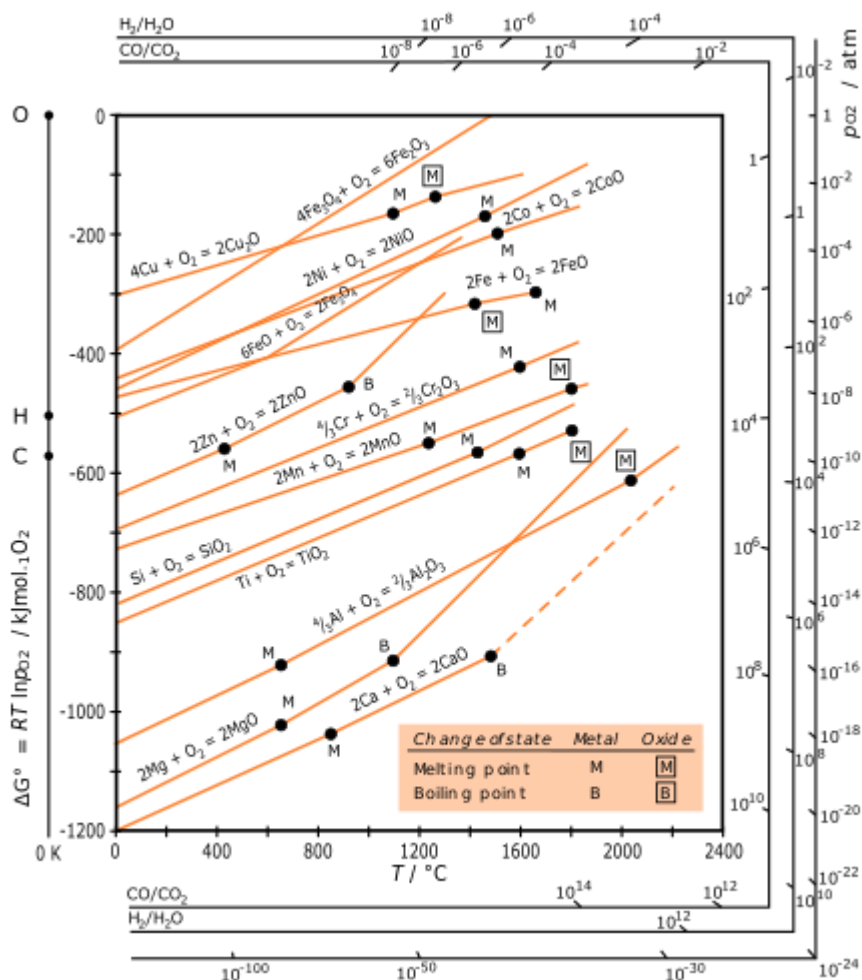


Figura 19 - Diagrama de Ellingham (Chivall 2004).

Como se pode observar no diagrama apresentado, dos elementos constituintes do Zamak, o magnésio e o alumínio são os que apresentam a menor energia livre de formação de óxidos, para qualquer temperatura, comparando com o zinco e o cobre. Como a formação de óxidos será mais fácil quanto menor for o valor desta energia, pode-se dizer que no banho metálico encontrar-se-ão predominantemente óxidos de magnésio e alumínio. Isto porque aquando da formação de óxidos de zinco e cobre, haverá tendência para que estes forneçam o oxigénio ao alumínio e magnésio. Assim sendo, a liga pode variar um pouco a sua composição durante a estadia no forno de fusão, podendo-se perder alguma da influência que estes elementos têm na liga. A utilização de sucata no processo pode também não ser aconselhada porque poderá apresentar este efeito na sua composição, devido a já ter sido fundida previamente (Chivall 2004; Soares 2000).

Outro parâmetro de influência na composição do zamak é a volatilização dos elementos. Pode-se dizer que um elemento é mais volátil quanto maior for a sua pressão de vapor (FCTUC e FEUP 2007).

A pressão de vapor é por definição a pressão à qual se está, perante um estado de equilíbrio dinâmico, onde a quantidade de líquido que se evapora é igual à quantidade de gás que condensa. Na

Figura 20 apresenta-se a pressão de vapor de vários elementos químicos, com destaque para os constituintes do zamak (FCTUC e FEUP 2007).

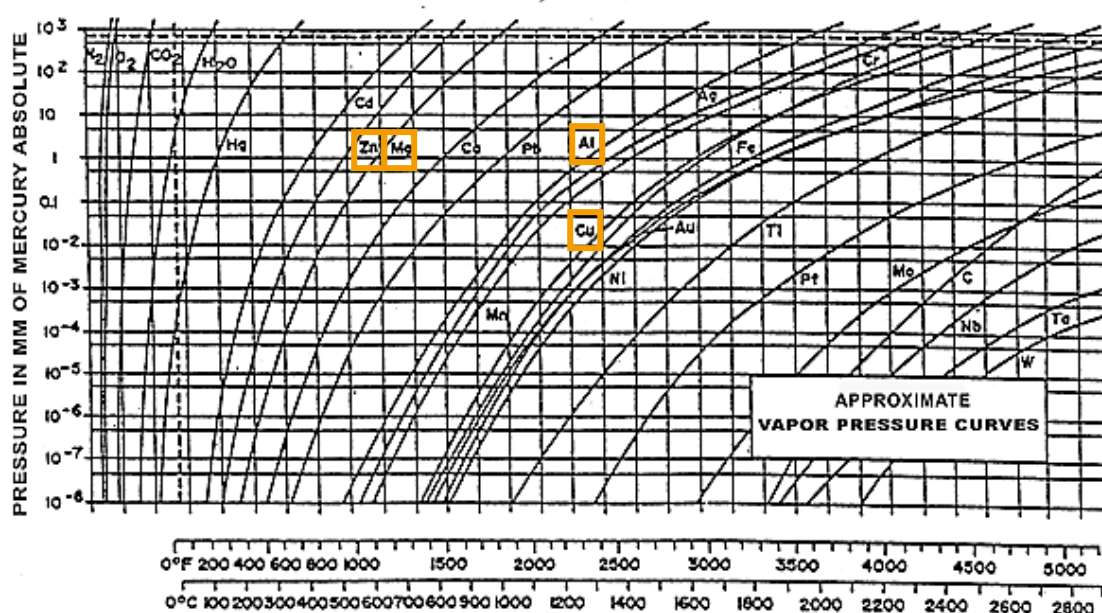


Figura 20 - Curvas da pressão de vapor de vários elementos e compostos químicos (Vac Aero 2008).

Como se pode observar, para a gama de temperaturas naturais num forno de zamak (entre os 400 e 450 °C), o zinco e o magnésio são quem tem maiores pressões de vapor, pelo que serão, desta forma, os compostos mais voláteis e que mais se perderão durante a estadia no forno de fusão (Soares 2000; Vac Aero 2008).

Estes fenómenos de oxidação e volatilização de elementos no banho de fusão alteram, assim, a composição química do banho. Todavia, não é habitual usar-se tratamentos especiais nos banhos de fusão de zamak, aquando de utilização única de lingotes no banho de fusão. Ainda assim recomenda-se ter em atenção que se for aplicada uma agitação do banho, esta deve ser mínima, de modo a evitar a oxidação acelerada. Se for feito retorno de sucata, é recomendado que não exceda uma proporção de 50%, sendo que devem ser utilizados de 1,4 a 2,3 kg de fluxos de cloro ou fluor por cada 450 kg de sucata (ASM International 2008).

O controlo da composição química dos banhos de fusão é assim, naturalmente, um processo a considerar.

2.4. Métodos de caracterização de peças em fundição injetada

No trabalho experimental desta dissertação serão debatidos os efeitos da alteração de parâmetros e condições na qualidade das peças injetadas. Assim, interessa conhecer as soluções que permitam caracterizar uma peça em relação a outra, de forma a retirar-se conclusões válidas. Seguidamente, são apresentados vários métodos para caracterização de uma peça produzida por fundição injetada.

2.4.1. Métodos de medição de porosidade

Um das caracterizações mais utilizadas nas peças de fundição injetada é a medição de porosidades, um dos defeitos mais comuns nestas peças. De uma forma geral, pode-se dizer que um método de medição de porosidades deve obedecer aos seguintes requisitos: ser reprodutível, ser, de forma preferível, não destrutível, deve conseguir permitir identificar as características da porosidade e também a sua influência e, por último, deve ser de mais baixo custo possível (Pedreño 2005).

Dividindo os métodos em destrutivos e não destrutivos, destacam-se as seguintes possibilidades:

Métodos não destrutivos

Inspeção visual superficial

Conforme o nome indica, apresenta a desvantagem de apenas ser possível retirar informação sobre o exterior da peça. É, assim, um método limitado, já que a porosidade manifesta-se por toda a peça e não só no exterior, onde, normalmente, até é menor. No entanto, é um método simples e pode ser útil para peças em que o acabamento superficial é a característica essencial (Pedreño 2005).

Inspeção por raio X

Os raios X, quer sob a forma de chapas quer sob a forma de radioscopia, estão bastante implementadas na indústria de fundição, sendo que permitem visualizar vários tipos de defeitos. No que se refere à porosidade, através deste método, é possível identificar as zonas de maior incidência desta, mas o seu carácter bidimensional não permite a quantificação correta desta (Pedreño 2005). Contudo, o limite de deteção de defeitos por este método é da ordem de 0,5 mm (Neto 2007).

Tomografia computadorizada

Este sistema permite obter informação tridimensional da porosidade da peça através de uma grande quantidade de imagens 2D capturadas por um sistema de raio X. A vantagem é que pode recolher imagens de várias secções da peça e não de forma concentrada como a radiografia. É possível

neste método recolher uma valorização da porosidade e densidade da peça, mas é bastante dispendioso (Pedreño 2005).

Ultrassons

A deteção de porosidade através de ultrassons pode ser aplicada de forma qualitativa e com alguma incerteza. No entanto, existem estudos, atualmente, que tentam melhorar métodos de obtenção de informação referente a defeitos de fundição por esta via (Pedreño 2005).

Gravimetria

Através do princípio de Arquimedes, é possível conhecer-se a densidade de um determinado objeto. Assim, com recurso à densidade teórica do metal usado na fundição, é possível aferir a quantidade de porosidade de uma peça. Este é o método mais utilizado para o cálculo de porosidade (Pedreño 2005).

Métodos destrutivos

Caracterização metalográfica

Este método consiste no seccionamento da peça e posterior polimento e observação ao microscópio de modo a detetar a porosidade. Este método apresenta a vantagem de se poder retirar informações quanto ao formato da porosidade, podendo-se extrapolar a sua origem. Com programas de tratamento de imagem, é ainda possível obter-se a percentagem de porosidade da secção. No entanto, a porosidade não é normalmente uniforme na peça, pelo que este método não apresentará um valor correto da porosidade média da peça de estudo. Porém, permite analisar com precisão a porosidade local. De relevar que é um processo muito dispendioso (Pedreño 2005).

Fusão em vácuo

O objetivo deste método é obter-se a quantidade de gás aprisionado na peça aquando da fusão da mesma. Neste processo o volume, a pressão e a temperatura são controladas, sendo a base para o cálculo da quantidade de ar libertada (Pedreño 2005).

Dos métodos aqui referidos, devido à sua utilidade, adequabilidade e à disponibilidade de equipamentos, serão utilizadas, nesta dissertação, medições de porosidade por caracterização metalográfica da peça ao microscópio e por gravimetria, usando o princípio de Arquimedes.

Princípio de Arquimedes

O princípio de Arquimedes enuncia que se um corpo estiver imerso num fluido, numa situação de equilíbrio, fica sob ação de uma força vertical ascendente aplicada por esse mesmo fluido. Esta

força denomina-se por impulsão e a sua intensidade é dependente do volume de fluido deslocado pelo corpo (Cunha).

Considerando V_d o volume de fluido deslocado pelo corpo, pode-se retirar que a massa deslocada de fluido m_d , é dada por (Cunha):

$$m_d = V_d * \rho_f \quad (6)$$

sendo ρ_f a massa volúmica do fluido.

É com base neste princípio que se consegue, através de uma balança hidrostática, chegar-se à densidade de um objeto. A massa volúmica de um corpo (ρ_{corpo}) é dada pela massa do objeto (m_{corpo}) sobre o volume que este ocupa (V_{corpo}), ou seja:

$$\rho_{corpo} = \frac{m_{corpo}}{V_{corpo}} \quad (7)$$

Assim, medindo numa balança hidrostática a peça suspensa, a massa do corpo será dada pela massa do objeto seco suspenso por um fio W_D , subtraída pela massa do próprio fio W_s (Alves 2001).

Quanto ao volume de fluido deslocado (V_d), recorrendo ao enunciado do princípio de Arquimedes, equação (6), apresenta a seguinte expressão (Alves 2001):

$$V_d = \frac{m_d}{\rho_f} = \frac{W_D - W_i}{\rho_f} \quad (8)$$

com W_i a tomar o valor da massa da amostra imersa no fluido, incluindo a massa do fio, W_D a massa do objeto seco suspenso por um fio, ρ_f a massa volúmica do fluido e m_d a massa deslocada de fluido.

No entanto, há que ter em consideração que o fluido, devido à sua natureza, pode entrar na porosidade aberta do corpo. Assim, há que considerar o volume ocupado pelo fluido nos poros da peça (V_p) dado por (Alves 2001):

$$V_p = \frac{W_w - W_D}{\rho_f} \quad (9)$$

sendo W_w a massa da amostra molhada, mas não imersa, que inclui a massa do fio, W_D a massa do objeto seco suspenso por um fio e ρ_f a massa volúmica do fluido.

Conciliando as equações (8) e (9) de forma a obter-se o valor do volume total da amostra fica-se com (Alves 2001):

$$V_{corpo} = V_d + V_p = \frac{W_D - W_i + W_w - W_D}{\rho_f} = \frac{W_w - W_i}{\rho_f} \quad (10)$$

Conhecida a formulação para o cálculo da massa do corpo e do seu volume, é possível retirar-se que a densidade do objeto, através do princípio de Arquimedes, usando uma balança hidrostática, é dada por (Alves 2001):

$$\rho_{corpo} = \frac{m_{corpo}}{V_{corpo}} = \frac{W_D - W_s}{(W_w - W_i)/\rho_f} = \frac{W_D - W_s}{W_w - W_i} * \rho_f \quad (11)$$

com ρ_{corpo} como a massa volúmica da amostra, m_{corpo} como a massa do corpo, V_{corpo} como o volume do corpo, W_D como a massa do objeto seco suspenso por um fio, W_s como a massa do fio usado nas pesagens, W_i como a massa da amostra imersa no fluido com o fio, W_w como a massa da amostra molhada, mas não imersa, que inclui a massa do fio e ρ_f como a massa volúmica do fluido utilizado.

Considerado, por fim, que a massa de ar contida na peça é desprezável comparando com a massa de metal medida na balança, pode-se dizer que o volume da porosidade (V_{poros}) é dado por:

$$V_{poros} = V_{Total} - V_{teórico} = m_{corpo} \left[\frac{1}{\rho_{corpo}} - \frac{1}{\rho_{teo_material}} \right] \quad (12)$$

com V_{Total} como o volume total real da amostra, $V_{teórico}$ como o volume teórico que a peça teria à massa volúmica teórica do material, m_{corpo} como a massa real do corpo e ρ_{corpo} como a massa volúmica real da amostra. Como valor de $\rho_{teo_material}$ (massa volúmica teórica do material) nos cálculos da porosidade das peças, será utilizado $6,7 \text{ gcm}^{-3}$, correspondente à massa volúmica do zamak 5 (Granta 2016).

Análises metalográficas

A análise metalográfica insere-se no método de determinação de porosidade por caracterização metalográfica de secções da peça.

O procedimento para esta análise consiste, numa primeira fase, no secionamento da peça através de uma operação de corte. Posteriormente, são efetuados polimentos da amostra de forma a conseguir uma superfície uniforme, sem presença de “riscos” e brilhante. Para alcançar este estado, são efetuados polimentos sucessivos em lixas de carboneto de silício de grão consecutivamente mais fino. Nestas lixas é usada refrigeração a água de forma a arrefecer as superfícies de contacto e lubrificar o processo.

Contudo, para se obter o aspeto requerido ainda é necessário usar-se passagens em dois panos rotativos com partículas de diamante de $3 \mu\text{m}$ e $1 \mu\text{m}$, respetivamente. No final, é esperada uma superfície muito pouco rugosa e sem presença de “riscos” e deformação plástica característicos da operação de corte.

Caso seja difícil de manipular a amostra com a mão devido à sua dimensão pode-se realizar uma montagem da peça numa resina epóxida ou fenólica, à semelhança do representado na Figura 21. Sendo necessária a observação das fases presentes na amostra ao microscópio, como a superfície se apresentará bastante brilhante, é necessário usar um ataque químico de contrastação, realçando as diferentes fases umas em relação às outras. Amostras preparadas desta forma podem ainda ser analisadas por *softwares* de análise de imagens para quantificar a presença de porosidade. Como exemplo destes *softwares* tem-se o *Image J*®, que será utilizado nesta dissertação.

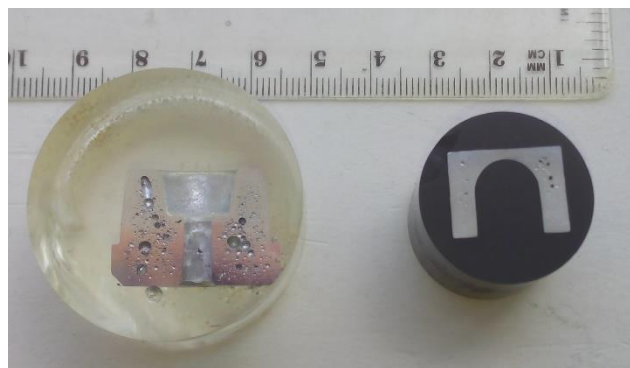


Figura 21 - Montagens de peças em resinas epóxida (à esquerda) e fenólica (à direita).

2.4.2. Determinação de propriedades mecânicas

Outra possibilidade para a averiguação da qualidade das peças injetadas é utilizar um ensaio para determinação das suas propriedades mecânicas. Um dos ensaios possíveis para este efeito é o ensaio de tração, que necessita, no entanto, de provetes para a sua realização.

Ensaio de tração

Os ensaios de tração são classificados com ensaios mecânicos e têm como finalidade perceber como os materiais se comportam quando lhes são aplicados esforços de tração. São ensaios destrutivos e no âmbito industrial são muito usados de forma a controlar a qualidade de um produto (Coutinho 2006).

O procedimento deste ensaio está normalizado, tornando-se num ensaio reproduzível em qualquer parte do mundo. Em termos de solicitação, este ensaio submete um provete a uma força de tração uniaxial continuamente crescente, até à rotura (Coutinho 2006).

O objetivo dos ensaios de tração é obter a curva força-deslocamento de um provete. A força é medida através de células de cargas posicionadas numa máquina de ensaios enquanto o deslocamento deve ser medido por intermédio de extensómetros. Quando não é possível a utilização de

extensómetros, pode-se usar a medição do afastamento das amarras da máquina, tratando-se de uma medição mais imprecisa devido ao escorregamento entre as amarras e o provete (Coutinho 2006).

As curvas força-deslocamento podem ser convertidas em curvas tensão-deformação, como a representada na Figura 22, dividindo-se a força medida pela área da secção inicial da zona de ensaio e dividindo-se a variação de comprimento registada pelo extensómetro pelo comprimento de base do extensómetro (Coutinho 2006).

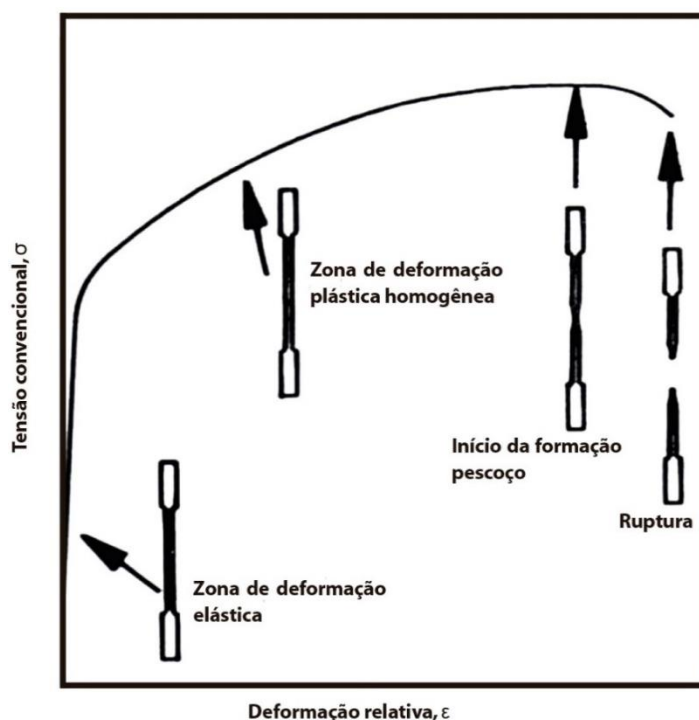


Figura 22 - Curva tensão-deformação convertida de um ensaio de tração (Brito 2015).

Obtida a curva tensão-deformação, podem-se retirar propriedades mecânicas úteis para a caracterização de peças como a tensão limite elástica, tensão de rotura, tenacidade, extensão após rotura, módulo de elasticidade, entre outras (Coutinho 2006).

2ª Parte: Trabalho experimental, análise de resultados e sua discussão

3. Introdução ao trabalho experimental

O trabalho experimental desta dissertação recairá num estudo de peças produzidas na máquina de fundição injetada de zamak ZM3 comercializada pela PR Metal®.

3.1. Objetivos do estudo

O objetivo desta dissertação visa o estudo dos parâmetros da máquina ZM3 da PR Metal®, bem como o projeto de moldações para fundição injetada de Zamak e a influência da bomba de injeção nas peças finais.

Numa primeira fase, interessa avaliar a máquina ZM3, identificando as principais diferenças no seu funcionamento em relação àquilo que é recomendado na bibliografia e se o seu efeito poderá ser benéfico ou prejudicial. Este estudo não se deverá resumir à análise dos parâmetros de injeção utilizados na máquina, devendo incluir análises à concepção de moldações e ao banho de fusão.

De seguida, serão averiguados os efeitos das mudanças de parâmetros na qualidade das peças, entre os quais a pressão, temperatura do metal no banho de fusão e a temperatura da resistência do bico de injeção. Serão incluídas ainda análises do efeito das dimensões do sistema de gitagem nas propriedades das peças bem como da presença ou não de respiros nas moldações.

Para além disso, a PR Injeção® relata que existem dúvidas acerca da capacidade real da bomba de injeção usada, pelo que deve ser um aspeto a ter em consideração. Assim, será comparada a porosidade de peças injetadas com duas bombas, com capacidades teoricamente diferentes.

Assim, os objetivos deste estudo experimental serão os seguintes:

- Conhecer o funcionamento da máquina ZM3;
- Comparar os parâmetros da máquina ZM3 com o que é normalmente recomendado para esta aplicação;
- Relatar a qualidade das peças produzidas na ZM3 em termos de porosidade;
- Perceber a influência de sistemas de *venting* na qualidade das peças;
- Estudar a influência das dimensões dos sistemas de gitagem;
- Entender o efeito da regulação da temperatura da moldação nas peças e no enchimento;
- Analisar os valores de pressão e temperatura do banho de fusão normalmente utilizados;
- Estudar a capacidade e a adequação da bomba de injeção no processo;
- Observar a influência da espessura nas propriedades das peças injetadas pela ZM3.

3.2. Objetos de estudo

De modo a atingir os objetivos aqui apresentados, serão objeto de estudo duas moldações, uma para um porta-chaves e outra para provetes de ensaio de tração, projetadas pelo autor da dissertação. Para além destas, serão ainda utilizadas moldações já existentes na empresa.

Na moldação do porta-chaves, o objetivo será avaliar um sistema de gitagem com apenas um ataque. Esta é a situação mais comum nas peças da empresa, sendo assim interessante averiguar uma formulação para um tamanho do sistema de gitagem “ideal” na conceção das ferramentas.

Na moldação dos provetes, pretende-se averiguar a influência dos parâmetros nas propriedades mecânicas das peças. O objetivo será executar ensaios de tração de modo a entender como estas evoluem com a mudança desses mesmos parâmetros. De referir que nesta moldação será possível injetar dois provetes com espessuras diferentes. O sistema de gitagem apresentará dois ataques em cada um dos provetes.

3.2.1. Porta-chaves MIEM – Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Esta peça foi idealizada por um aluno da própria instituição, tendo sofrido algumas modificações, de forma a poder ser concebida por este processo. Numa primeira fase, foi necessário alterar o desenho de modo a que o esboço cumprisse as regras de traçado da melhor forma possível. Assim, foi necessário adicionar saídas e arredondar as esquinas vivas da peça. Para além disso, houve necessidade de modificar alguns detalhes no *design* da peça, que não iriam ser possíveis de realizar na injeção de zamak. As letras frontais “mecânica” apresentavam espessuras de cerca de 0,1 mm, pelo que seriam muito difíceis de se obter. Para além disso, a peça apresentava espessuras muito variáveis,

pelo que foram reduzidas algumas zonas massivas. Algumas das alterações realizadas podem ser observadas na Figura 23:

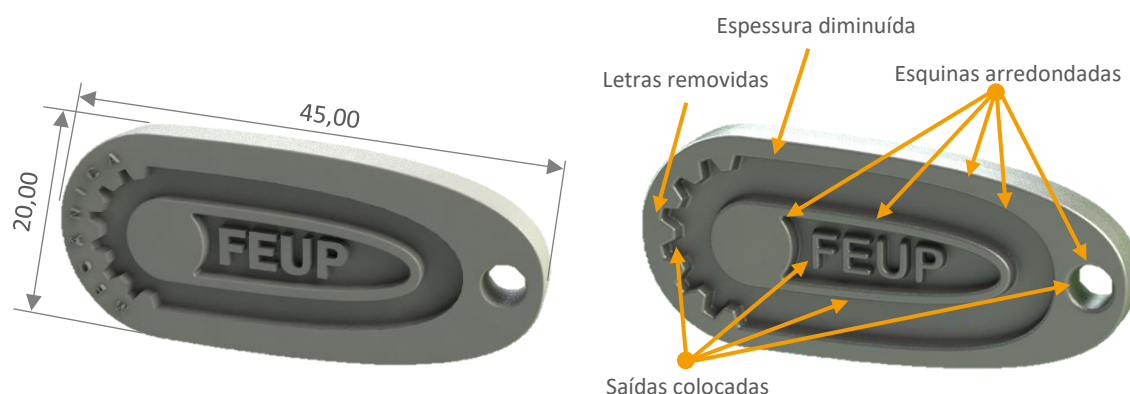


Figura 23 - Esboços do porta-chaves MIEM. À esquerda a versão enviada pela instituição e à direita a versão alterada segundo as regras de traçado para fundição.

No entanto, por questões de *design* e de forma a manter a especificação do curso que representa o porta-chaves, no lado inverso foi proposta a colocação da designação “mecânica”, resultando no esboço da Figura 24.



Figura 24 - Vista de trás do porta-chaves do MIEM da versão alterada segundo as regras de traçado para fundição.

Posto isto, foi feito o CAD 3D para a moldação do porta-chaves, definindo-se o plano de separação na peça e confirmou-se a existência de saídas em todas as paredes verticais da peça e se existia alguma contra saída e pudesse prejudicar a extração da peça. Posicionou-se, de seguida, a cavidade pretendida no postigo (moldação), criou-se o cone do *sprue* e o sistema de gítagem da peça. Por fim, foram ainda posicionados os furos dos extratores na peça e concebida a respetiva placa extratora e extratores. Na Figura 25 pode ser observado o desenho 3D do postigo móvel e fixo dos porta-chaves. De realçar que as cavidades destas moldação, sistema de gítagem e o cone do *sprue* foram produzidos com recurso à eletroerosão.

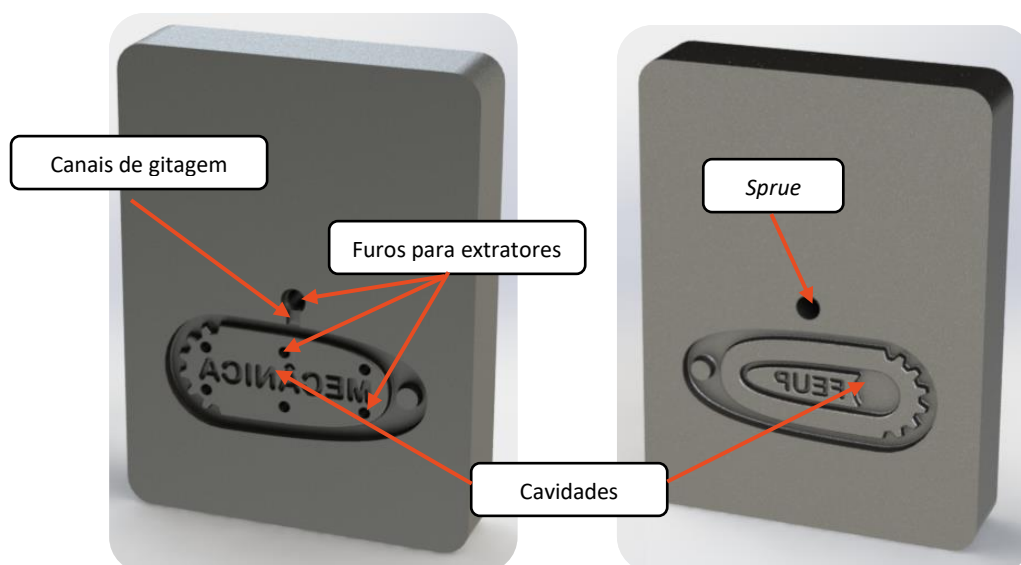


Figura 25 - Meias moldações móvel (à esquerda) e fixa (à direita) para o porta-chaves.

Os desenhos 2D destas moldações podem ser consultados no Anexo B desta dissertação.

3.2.2. Provetes de tração

Os provetes de ensaio serão injetados nas moldações da máquina ZM3, sendo baseados na norma ASTM – E8/E8M – 09. No entanto, devido a restrições do tamanho da moldação da ZM3, é impossível injetar os provetes de ensaio específicos para fundição injetada de acordo com a norma. Estes provetes teriam de apresentar um comprimento total de 230 mm, sendo que a cota máxima do postigo da moldação é de 80 mm (ASTM 2010).

Deste modo, optou-se pela adaptação de um provete do tipo plano. O provete usado foi então baseado no provete de tração retangular *subsize specimen* com um comprimento da zona útil de 25 mm da norma ASTM – E8/E8M – 09, valor correspondente ao extensómetro de menor dimensão disponível. Contudo, este provete apresentava ainda um comprimento maior que o permitido pela moldação. Assim, foi necessário fazer-se algumas alterações à sua geometria. A zona destinada à colocação do provete nas amarras da máquina foi reduzida de 300 mm² para 240 mm², sendo que ainda se teve de optar por uma geometria mais larga e menos comprida. O resultado final encontra-se esquematizado na Figura 26 (ASTM 2010).

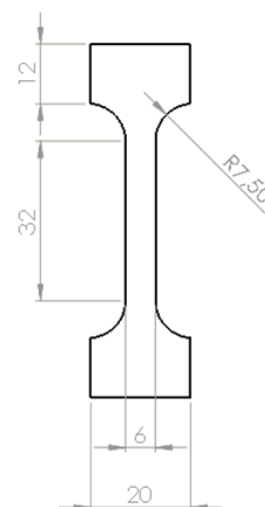


Figura 26 - Desenho técnico do provete utilizado na dissertação.

Quanto à moldação para a sua injeção, incluiu-se dois provetes de forma a conseguir injetar-se, nas mesmas condições, provetes com espessuras diferentes, e assim avaliar se existe algum influência deste

parâmetro. As espessuras dos provetes foram definidas com base em algumas das espessuras típicas das peças produzidas pela empresa. Um dos provetes terá uma espessura de 1,5 mm e o outro de 2,5 mm.

De modo a não influenciar a zona de ensaio com fissuras devido a corte de gito e para não haver qualquer tipo de variação de espessura que desvirtue os resultados, os ataques e os extratores serão colocados na zona da cabeça de ensaio. Assim, o conjunto da moldação para os provetes de ensaio e da placa extratora terá uma forma idêntica à apresentada na Figura 27.

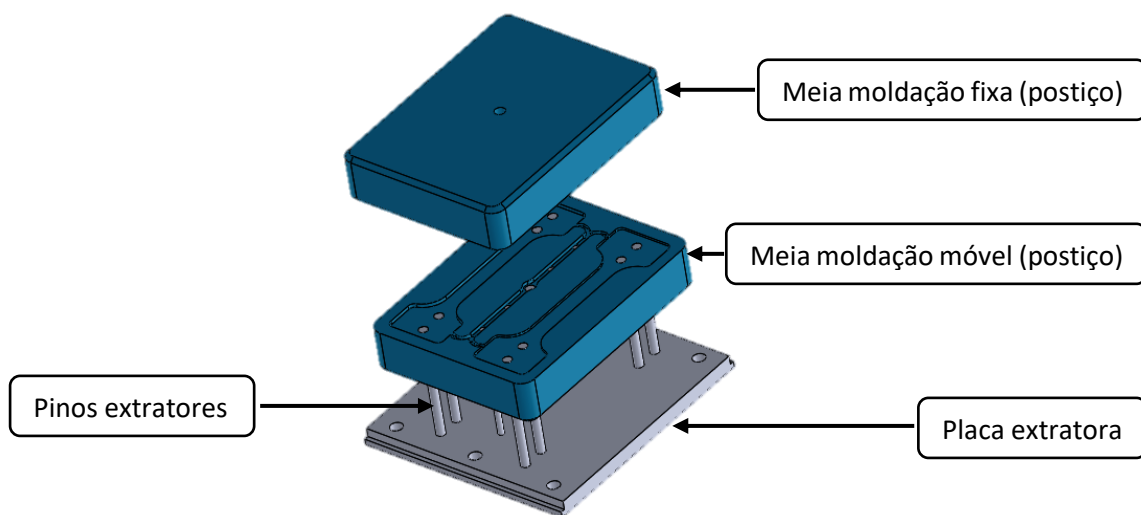


Figura 27 - Desenho tridimensional das moldações e placas extratoras da moldação dos provetes

Tal como o feito para a moldação dos porta-chaves, apresenta-se, agora, os desenhos CAD 3D dos postigos para a produção dos provetes. Foram novamente dadas pequenas saídas nos provetes para facilitar a extração e projetados os canais de gitagem e colocado o cone de *sprue*. O resultado final pode ser consultado na Figura 28. Note-se que esta moldação foi produzida com recurso a maquinagem, à exceção do cone do *sprue* que foi produzida por eletroerosão.

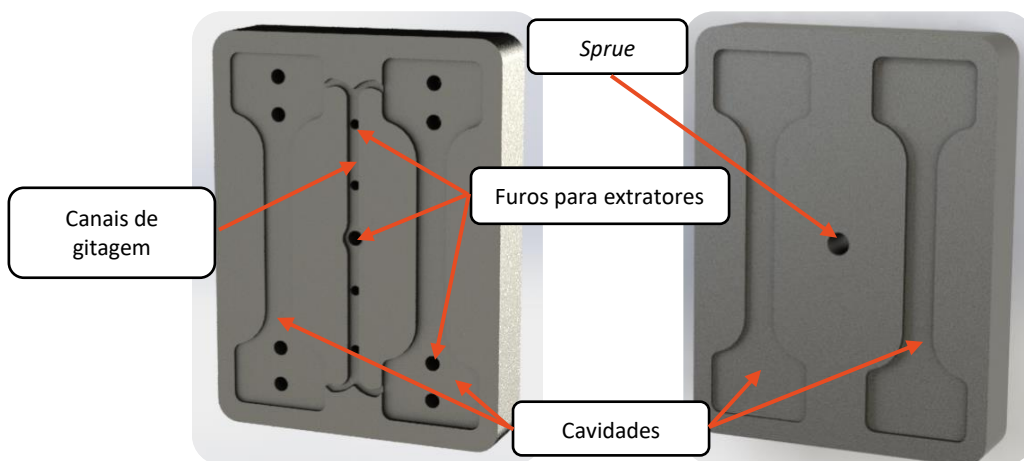


Figura 28 - Desenhos CAD 3D das meias moldações móvel (à esquerda) e fixa (à direita) para produção de provetes.

Os desenhos 2D destas moldações podem ser consultados no Anexo B desta dissertação.

3.2.3. Outras moldações

Como últimos objetos de estudo, serão também utilizadas outras moldações de peças atualmente em produção na máquina ZM3. Quanto ao projeto e fabrico destas moldações, estes são normalmente realizados pela PR Metal® sendo que, por vezes, são subcontratadas empresas do setor dos moldes de forma a aliviar a carga de trabalho desta empresa. Na Figura 29 apresentam-se imagens de algumas das moldações que serão utilizadas nos estudos realizados.

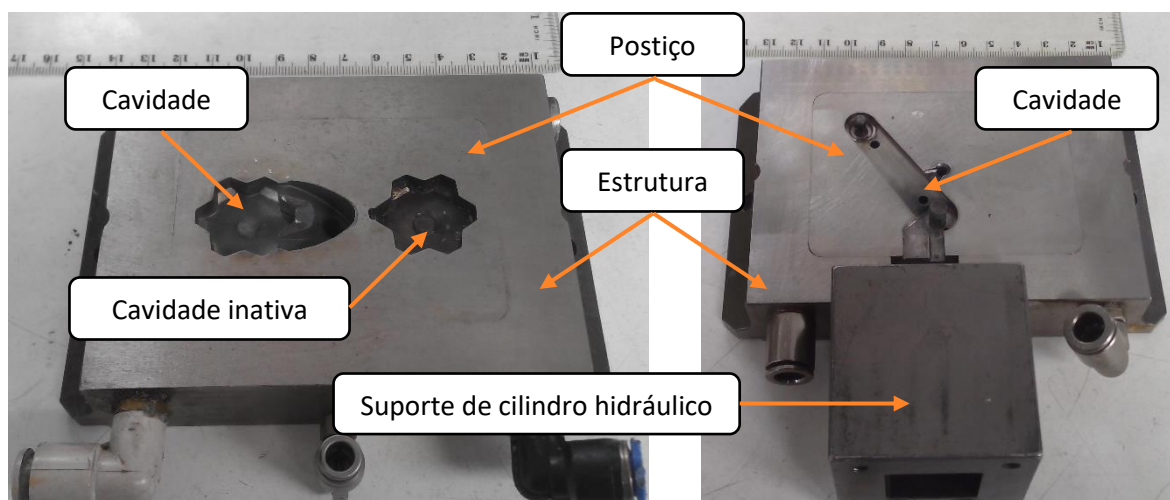


Figura 29 - Moldações de peças usadas nesta dissertação de clientes da PR Injeção®. À esquerda a meia moldação móvel da porca yãmmi e à direita a meia moldação móvel do lever door stop.

4. Estudo da máquina ZM3

4.1. Máquina de injeção ZM3

A máquina de fundição injetada de zamak ZM3, projetada e realizada pela PR metal®, será a máquina utilizada nesta dissertação para os ensaios experimentais.

O seu esquema de funcionamento é idêntico ao habitual nas máquinas de câmara quente. Existe uma estrutura em forma de “pescoço de ganso” mergulhada no banho metálico, onde se situa o próprio pistão de injeção. É o movimento deste pistão que faz deslocar o metal no canal existente no “pescoço de ganso”. De seguida, o metal chega ao bico de injeção, que já se encontra fora do banho, sendo este o elemento que faz a ligação entre o sistema de injeção e a moldação. É apresentado na Figura 30 o esquema destes componentes.

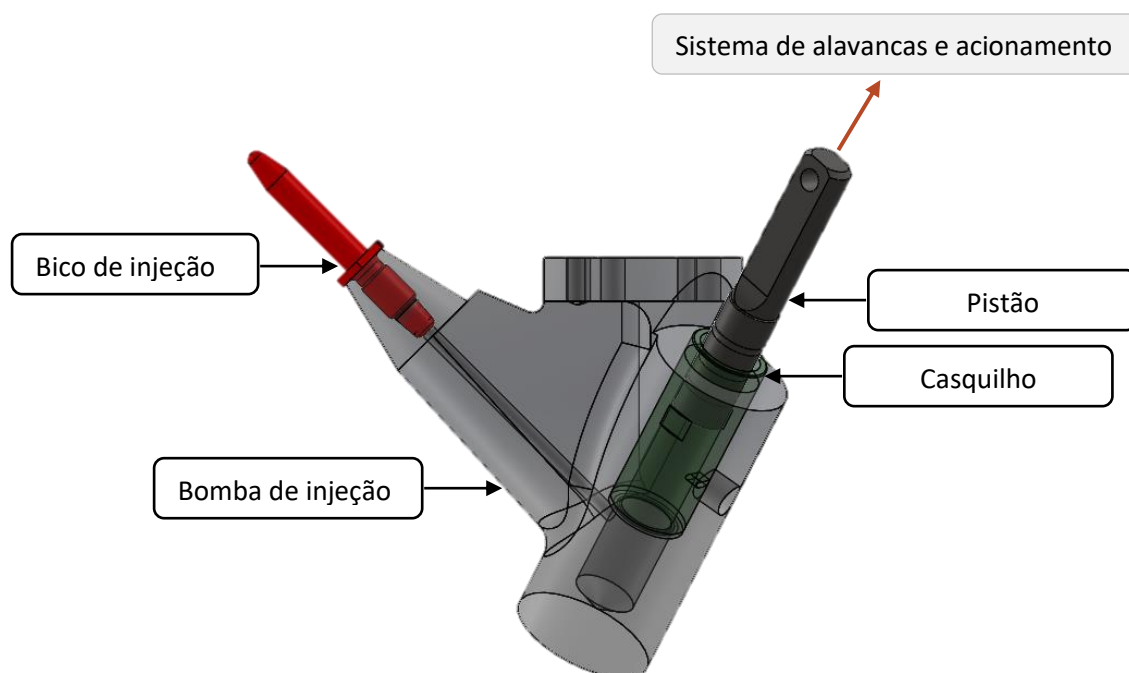


Figura 30 - Esquema do pescoço de ganso utilizado na ZM3.

Na empresa, são utilizadas atualmente na ZM3 duas bombas de injeção de diferentes configurações. Uma delas apresenta um diâmetro de pistão de 26 mm (doravante denominada de bomba antiga) e a outra de 32 mm (doravante denominada de bomba nova). No entanto, a capacidade e o rendimento real destas é desconhecida. Contudo, o aumento do diâmetro do pistão teve como intuito aumentar a capacidade de metal a injetar nas cavidades. Note-se que, como já referido no

capítulo 2.2.6, o diâmetro do pistão influencia também a pressão do metal na injeção através da variável A_p (área do pistão). O sistema de acionamento da bomba é a ar comprimido, funcionando sobre a forma de fonte de pressão, sendo que não existe possibilidade de controlo direto de velocidade na ZM3. O cilindro pneumático que serve de acionamento à bomba de injeção utiliza uma gama de pressões de 0,5 a 6 bar. De realçar que o acionamento do pistão não é direto, existindo um sistema de alavancas entre este e o cilindro pneumático.

O mecanismo de fecho das moldações recorre a um sistema de alavancas denominado de “tesouras”, sendo acionado por um sistema pneumático. As ZM3 apresentam ainda um sistema independente de movimento para a placa extratora, acionada por um sistema também ele pneumático. No entanto, os machos móveis, que por vezes são necessários para a conceção de algumas peças, recorrem a um sistema hidráulico no acionamento, devido à necessidade de uma maior força durante o movimento.

De notar que esta máquina apresenta o sistema de alavancas e de posicionamento das moldações inclinado como se pode observar na Figura 31. Isto não acontecia nas versões anteriores da máquina, ZM1 e ZM2, onde este sistema estava na vertical. Esta inclinação possibilita que a injeção se faça na perpendicular ao plano de apartação da peça, na meia moldação fixa, e facilita a extração das peças por gravidade. Nas máquinas ZM1 e ZM2, depois de atuada a placa extratora, era necessário um sopro de ar comprimido para remover a peça da zona das moldações. A remoção do sopro para extração das máquinas ZM3 trouxe também benefícios para os operários, reduzindo o ruído.



Figura 31 - Fotografia do sistema de alavancas na ZM3.

O sistema de abastecimento do forno é feito através de lingotes, não sendo aproveitado qualquer tipo de sucata das peças, o que reduz alguns dos problemas referidos no capítulo 2.3.6. O lingote é mergulhado no banho metálico parcialmente, sendo desta forma fundido, abastecendo o forno da máquina. A alimentação é feita de forma automática, sendo que um sensor presente no

banho metálico é acionado quando o nível de metal atinge um determinado valor mínimo previamente definido, fazendo com que o lingote desça faseadamente para dentro do banho metálico.

As meias moldações são normalmente compostas por duas partes: um postigo (assim denominado na empresa), onde é erodida a cavidade moldante da peça, e uma peça exterior onde é colocado o postigo, denominada na empresa por estrutura, que apresenta o formato indicado para ser encaixada nos pratos da máquina (Figura 32). O objetivo desta decomposição da moldação é reduzir os custos na conceção de ferramentas, dando para aproveitar a mesma base com diferentes postigos. De referir que é nesta base que são colocados os canais de refrigeração da moldação. Como líquido de refrigeração, é usado um fluido à base de água aditivado.

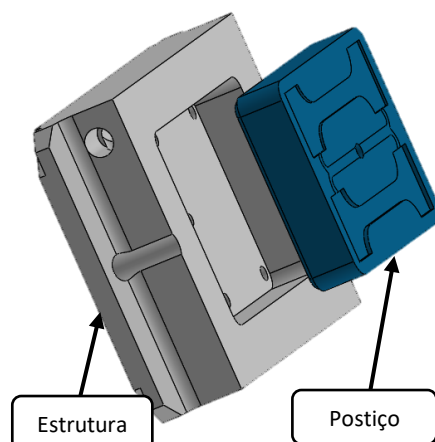


Figura 32 - Esquema de um postigo e respetiva estrutura da máquina em estudo.

Os postigos são concebidos em aço rápido DIN HS6-5-2C dentro da própria empresa ou subcontratados, sendo usada eletroerosão e fresagem como processo de fabrico. Estes apresentam como dimensões de entroncamento 80 x 60 x 15 mm e não lhes é colocado qualquer tipo de revestimento. De notar que a injeção de metal é feita na zona central dos postigos fixos na máquina ZM3.

No que se refere ao sistema de monitorização da ZM3, este não apresenta transdutores de medição de temperaturas das moldações, sendo, no entanto, controlada a temperatura do banho metálico através de um termopar. Existe também um termopar colocado na zona do bico de injeção, mas que não faz a leitura da temperatura do metal ou do próprio bico, mas sim da sua resistência de aquecimento.

A lubrificação da moldação e extratores é feita através de um *spray* de um desmoldante aquando da abertura da moldação, em todos os ciclos de injeção. O desmoldante utilizado é o DL 6300 da Marbo®, comercializado pela Coniex®, à base de água e específico para este tipo de aplicação (Marbo 2016).

A ZM3 apresenta ainda diversos mecanismos de segurança que evitam que esta injete quando alguma peça não foi retirada da meia moldação ou quando não fechadas completamente as meias moldações. Apresenta ainda um escudo de proteção com a finalidade de proteger os operários se algum metal sair da moldação durante a injeção.

Como parâmetros de controlo, a máquina permite definir uma pressão e a sua duração de atuação, o tempo de extração, o tempo de sopro do *spray* de lubrificante e o tempo de arrefecimento.

4.1.1. Parâmetros da máquina ZM3

Seguidamente apresenta-se a Tabela 3 com informações relativas aos parâmetros ideais na fundição injetada de zamak e os valores utilizados na máquina ZM3.

Tabela 3 - Gama dos parâmetros de fundição injetada ideais e da ZM3 (ASM International 2008).

Parâmetro	Unidade	Valores ideais		Valores da ZM3
		min	Max	
Pressão de injeção	MPa	10,3	20,6	5,86 ^{BN*} – 8,87 ^{BA*}
Velocidade de injeção	m/s	5	40	Não controlado
Tempo de enchimento das cavidades	s	Dependente da peça		Controlado tempo de atuação das pressões
Temperatura do banho de fusão	°C	400	440	430
Temperaturas das moldações	°C	160	245	Não medido
Temperatura do líquido de refrigeração	°C	Dependente da temperatura da moldação		Não medido
Caudal do líquido de refrigeração	m³/s	Dependente da temperatura da moldação		Não medido
Temperatura do metal no bico de injeção	°C	400	440	Medida a temperatura da resistência

* Pressão obtida indiretamente, considerando não existir perdas na transmissão de movimento | ^{BA} Bomba Antiga
^{BN} Bomba Nova

Como é possível verificar, existe falta de monitorização de parâmetros na máquina ZM3. No entanto, a temperatura do metal no banho de fusão está dentro dos limites recomendados, sendo que o mesmo não acontece com a pressão máxima exercida pela bomba.

4.1.2. Forno de fusão da máquina

No que se refere ao forno de fusão, este é do tipo cadinho com aquecimento por resistências elétricas. Este tipo de forma é restrito à utilização de ligas não ferrosas, de baixo ponto de fusão, sendo habitual usar-se em fornos de manutenção (Soares 2000).

Este tipo de fornos não é muito utilizado, sendo que necessita de um cadinho bastante condutor para que o seu rendimento seja mais elevado. No entanto, tem a vantagem de não utilizar qualquer fonte de energia fóssil no seu aquecimento, não havendo assim contacto do metal com os produtos de combustão e de ser mais compacto. Para além disso, apresenta um arranque fácil comparado com outros tipos de fornos, sendo fácil de operar e não necessita de operários com elevada experiência.

Neste forno, é possível deixar o metal solidificar no seu interior, sendo que para o fundir outra vez é apenas necessário ligar as resistências (Magalhães 2006; Silva 2016).

Na empresa, a resistência do forno de fusão da máquina ZM3 é desligada no fim do turno de trabalho, sendo ligada nos dias de operação antes do início do turno, automaticamente, para permitir que a produção de peças comece logo ao início do horário laboral.

O cadinho do forno foi fabricado em aço para moldes AISI H13 *premium*, através de fundição. No geral, os cadinhos necessitam de apresentar alta condutividade térmica, alta refratariedade, boa resistência química à escória e à atmosfera e ainda uma boa resistência a choques térmicos. O mais comum neste tipo de aplicações é encontrar-se cadinhos de materiais cerâmicos de elevada condutividade como a grafite ou carboneto de silício, entre outras opções. No entanto, para ligas com pouca tendência a reagir com o ferro e de baixo ponto de fusão, são por vezes adotados aços ou ferros fundidos como cadinho, como acontece na ZM3 (Magalhães 2006).

No que se refere a tratamentos do banho, não são aplicados de momento na empresa, sendo algo habitual nas ligas de zinco, mas é feita periodicamente uma remoção de escória superficial pelos funcionários (Soares 2000).

4.2. Análise da composição química do lingote

Um dos parâmetros analisados para controlo da qualidade do processo foi a medição das percentagens de elementos químicos no lingote usado na ZM3.

Foi recolhida uma amostra de um lingote, fez-se um polimento e foram feitas observações no microscópio eletrónico de varrimento que permite a microanálise por Raios X e análise de padrões de difração de eletrões retrodificados, Quanta 400FEG ESEM / EDAX Genesis X4M para determinação das percentagens dos elementos. Porém, devido à proximidade do número atómico do zinco e do cobre, não será possível obter-se informações relativas à percentagem de cobre na liga. As observações foram efetuadas no CEMUP – Centro de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP).

No que se refere aos resultados, foram recolhidas imagens de uma zona mais superior do lingote e de uma secção mais interna, não se registando diferenças notórias entre as imagens. Isto sugere uma composição homogénea do lingote, sem concentrações de elementos em zonas específicas. As observações apresentam-se na Figura 33.

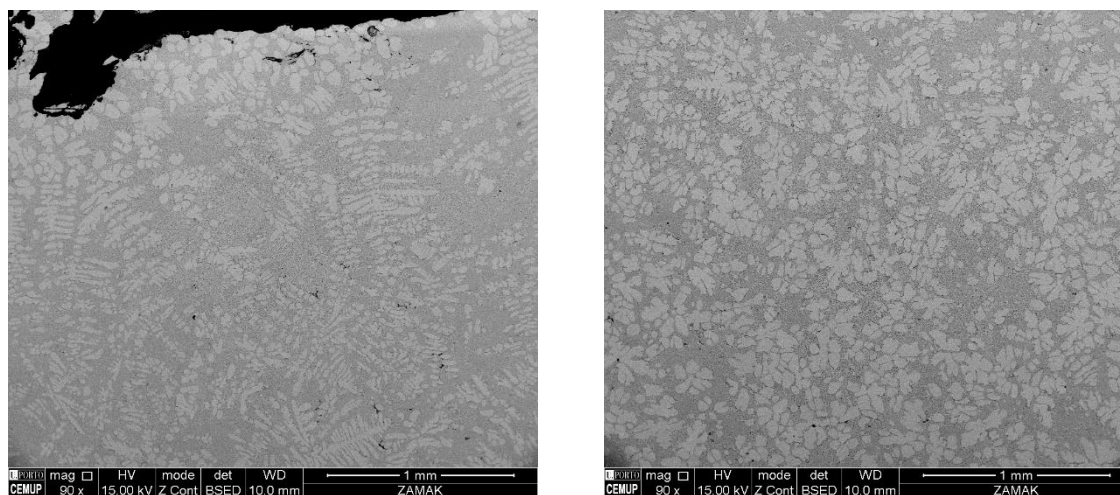


Figura 33 - Observações no microscópio eletrónico de varrimento do lingote de zamak.

Conforme é possível verificar, nota-se a presença de três fases nas microestruturas anteriores. Estas zonas estão assinaladas na Figura 34 como Z1, Z2 e Z3. Segundo a revisão bibliográfica, é de esperar à temperatura ambiente o aparecimento de uma fase α de baixo teor de alumínio em zinco, e uma fase resultante da transformação monotectóide existente no diagrama binário Zn-Al de maior teor de alumínio em zinco (Silva, Alves, e Marques 2013).

Os resultados obtidos no microscópio eletrónico de varrimento nestas zonas mostram este tipo de composição nas zonas Z1 e Z2. A zona Z1 apresenta 1,10% de Al, sendo o restante zinco, e a zona Z2 apresenta uma solução sólida de 21,31 % de Al no zinco. Assim, a zona Z1 deverá corresponder à fase α do diagrama de equilíbrio Zn-Al e a zona Z2 ao eutético formado a 382 °C. Estas percentagens estão de acordo com o esperado para as fases em questão (Silva, Alves, e Marques 2013). De realçar, ainda, que dentro do eutético detetado poderá ter ocorrido a transformação monotectóide descrita no capítulo 2.3.1, mesmo não sendo possível a sua identificação nas imagens recolhidas. Os espectros de difração de raio x recolhidos para as zonas Z1 e Z2 podem ser observados na Figura 35.

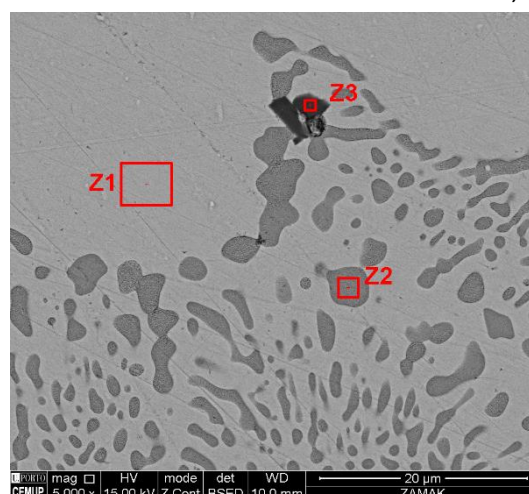


Figura 34 - Representação numa observação ao microscópio das três diferentes fases presentes no lingote de zamak.

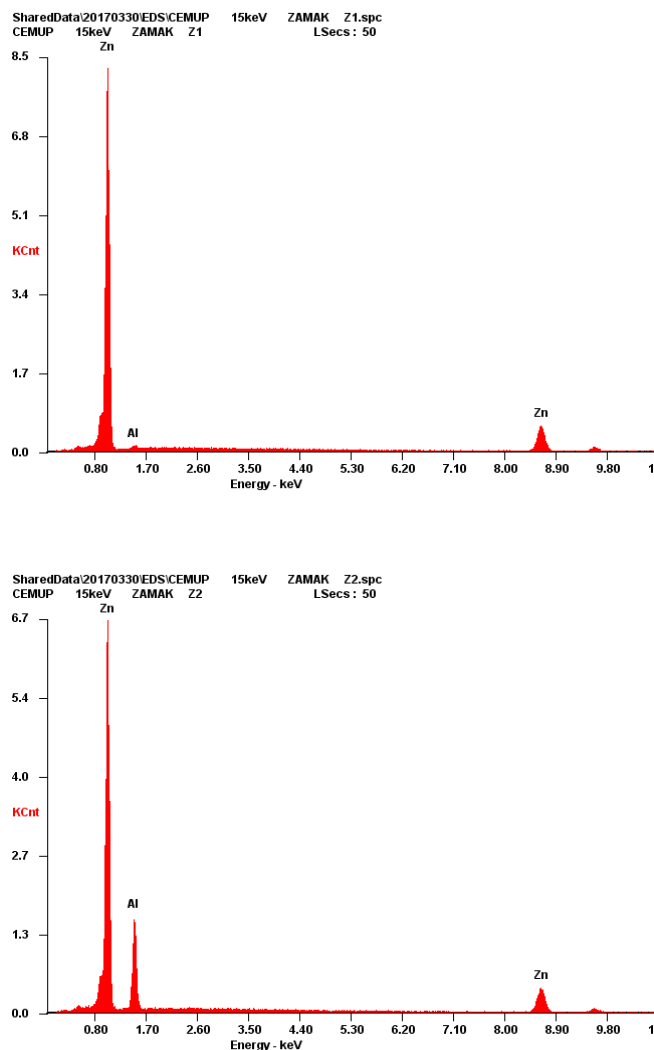


Figura 35 - Espectros de difração de raio x recolhidos das zonas Z1 (em cima) e Z2 (em baixo).

Já no que se refere à zona Z3, os resultados obtidos apresentam outros elementos para além do zinco e do alumínio. Esta apresenta uma composição de 50,64% de Al, 0,83% de Si, 27,03% de Fe e 21,50% de Zn. Tem-se assim uma zona rica em ferro, um dos elementos nocivos da liga, apresentando ainda silício. O silício é um elemento que pode aparecer até uma percentagem global na liga de 0,035%, sendo que não há evidências de efeitos nocivos deste elemento desde que não ultrapasse esta percentagem na liga. Outros elementos que podem aparecer nas composições e que não apresentam evidências de nocividade são o níquel, cromo e manganês (ASTM 2009). Na Figura 36 pode-se visualizar o espectro de difração de raio x recolhido para a zona Z3.

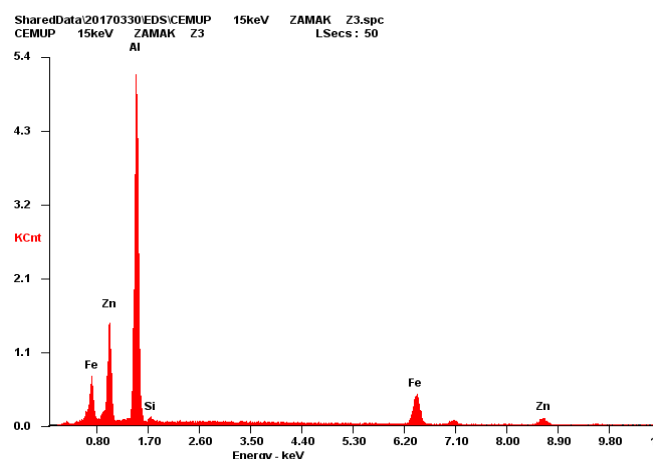


Figura 36 - Espectro de difração de raio x da zona Z3.

A presença deste tipo de zonas na composição das ligas de zinco é referido na literatura como normal, uma vez que, a partir de uma percentagem de 0,001% de ferro no zinco, este tende a precipitar como um composto intermetálico. No entanto, em ligas Zn-Al é comum que se formem partículas de FeAl_3 , o que explica a grande percentagem de alumínio na zona Z3 (ASM International 2004).

Já no que se refere à composição global da amostra, apenas são apresentados valores para o zinco e alumínio pelo que é possível que os restantes elementos apresentem uma percentagem muito diminuta, conforme desejado. No entanto, é apresentada uma percentagem de 5,30% de Al, o que é cerca de 1% superior ao limite máximo para este elemento. Conforme foi dito na revisão bibliográfica, percentagens de alumínio superiores a 5% conduzem a ligas com baixa tenacidade ao choque, pelo que se a percentagem medida estiver correta, pode significar que o lingote usado não apresentará a qualidade desejada. Porém, há que realçar que neste tipo de análises ao microscópio eletrónico, está a considerar-se apenas uma pequena região da amostra, pelo que pode não representar a globalidade do lingote (ASTM 2009; Silva, Alves, e Marques 2013). O espectro de difração de raio x global do lingote pode ser observado na Figura 37. Não foi possível efetuar outro tipo de análise mais precisa do lingote por falta de meios de ensaio, mas para melhor averiguação da composição química do lingote deveria ter sido realizada uma espectroscopia de emissão.

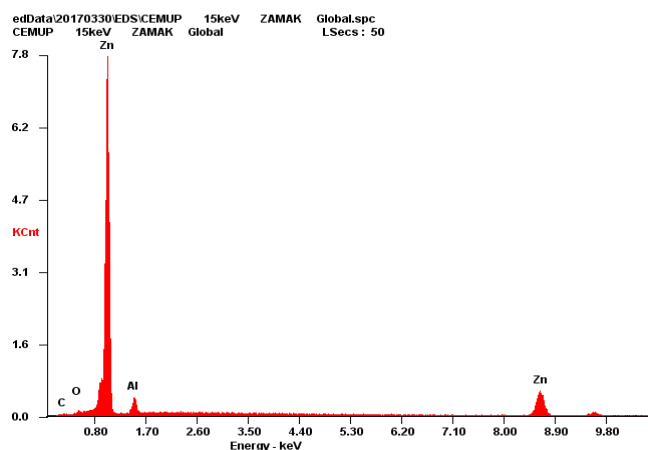


Figura 37 - Espectro de difração de raio x global do lingote.

5. Estudo inicial do processo na ZM3

Atualmente, na ZM3 são injetadas peças quer para encomendas, quer para produtos comercializados pelo próprio grupo. De uma maneira geral, as peças concebidas não necessitam de obedecer a especificações técnicas apertadas em termos de propriedades mecânicas, sendo no entanto, exigido um valor limite de porosidade, em algumas peças. Assim, numa etapa inicial do estudo do processo serão avaliadas as peças quanto à sua porosidade.

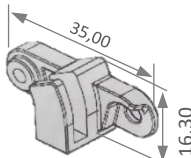
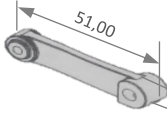
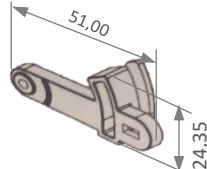
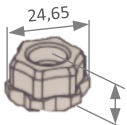
5.1. Medição de porosidade de peças fabricadas pela ZM3

O estudo do estado do processo atual recaiu sobre quatro peças recentemente fabricadas na máquina em estudo. O cálculo da porosidade foi realizado através do princípio de Arquimedes com recurso a uma balança hidrostática de resolução de 0,0001 g. No Anexo A encontra-se o procedimento utilizado para a medição de porosidade por este método.

Na Tabela 4 apresentam-se os resultados médios obtidos nas medições. Os cálculos efetuados foram realizados com base numa amostra de cinco unidades de cada peça aleatoriamente recolhidas. As medições de cada amostra e os parâmetros de ensaio podem ser consultados no Anexo C a esta dissertação.

Todas as peças analisadas apresentavam um único ponto de ataque exceto a porca *yämmi* que tinha dois pontos de ataque. No entanto, todas as peças foram apenas injetadas numa cavidade para uma só peça. De realçar também que nenhuma das moldações possuía sistemas de *venting* e/ou masselotes ou sistemas equivalentes. Foram utilizadas pressões de injeção de 6 bar no cilindro pneumático de acionamento do pistão da bomba, correspondentes a 8,87 MPa (88,7 bar) de pressão de metal, e uma temperatura do banho de fusão de 430 °C, em todas as injeções.

Tabela 4 - Porosidade e densidade médias de peças produzidas pela ZM3.

Peça	Esquema	Código de ensaio	Massa média medida [g]	Densidade média real [g/cm ³]	Volume médio calculado [cm ³]	Porosidade média [%]
Lever Door Handle Inner		BALDI 600705	11,6305 (0,0484)*	6,2752 (0,0671)*	1,8537 (0,0247)*	6,34 (1,00)*
Lever Door Stop		BALDS 600605	12,8791 (0,2150)*	6,4792 (0,1007)*	1,9865 (0,0184)*	3,30 (1,50)*
Lever Door Handle Outer		BALDO 601106	17,4986 (0,2704)*	6,1993 (0,1214)*	2,8243 (0,0877)*	7,47 (1,81)*
Porca Yämmi		BAPY 600913	26,9018 (0,1393)*	5,2710 (0,0286)*	5,1038 (0,0227)*	21,33 (0,43)*

*desvio padrão da amostra

Observando os resultados obtidos, é possível constatar que existe uma pequena tendência para o aumento da porosidade quanto maior é o volume e massa das peças. A exceção é o *Lever Door Stop* que apresenta a menor porosidade, mas também uma geometria mais simples.

Tendo em conta a situação ideal de obtenção de 0% de porosidade no processo, há que apontar que como principais causas destes valores poderão estar a não existência de sistemas de respiro e lavagem de fluxos, bem como o não controlo da temperatura da moldação e do fraco controlo da lubrificação pela máquina. O facto das pressões máximas disponibilizadas pelas bombas não atingirem o limite mínimo recomendado, também poderá explicar a porosidade observada. Há ainda a possibilidade de existir falta de capacidade da bomba de injeção no enchimento de peças com maior massa.

É de realçar a elevada porosidade obtida na porca *Yämmi* comparativamente às restantes peças. Esta peça, segundo a empresa, apresentou alguns problemas até se conseguir um enchimento completo, tendo sido aumentada a secção dos canais de alimentação repetidamente para se corrigir os mal cheios. De forma a averiguar melhor a possível origem da porosidade, foram realizadas observações ao microscópio de cortes na peça.

As amostras foram seccionadas segundo a linha de corte representada na Figura 38, sendo que foi tida em conta a posição dos ataques na peça. Assim, o corte foi realizado de modo a obter-se a secção da zona mais afastada dos ataques à peça e também uma secção próxima destes, de modo a averiguar-se quais as zonas com mais problemas.

As secções obtidas foram de seguida polidas e observadas no microscópio ótico do laboratório de Materiologia do departamento de Engenharia Mecânica da FEUP e recolhidas imagens. Por fim, com auxílio do programa *Image J*® foi retirado o valor da porosidade local das amostras.

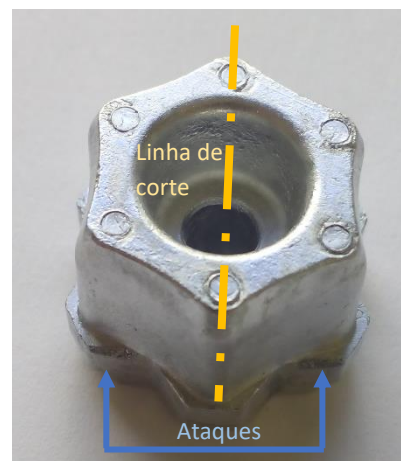


Figura 38 - Esquema da linha de corte e do posicionamento dos ataques utilizados na porca Yammi.

Note-se que as imagens ao microscópio foram recolhidas com a menor ampliação permitida (5x) de modo a obter-se a maior área possível para a determinação da porosidade local. No entanto, esta ampliação não possibilita recolher a totalidade da secção, tendo sido definidas duas zonas na secção, de onde se recolheram as imagens nas cinco amostras consideradas. Essas zonas estão esquematizadas na Figura 39.

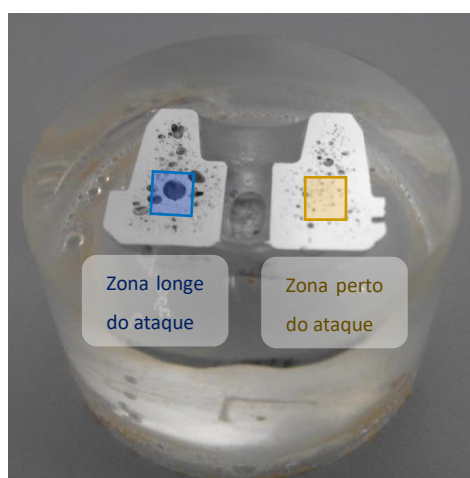


Figura 39 - Zonas observadas ao microscópio ótico dos cortes efetuados na porca Yämmi.

A porosidade local é um parâmetro interessante em termos de projeto de peça, na medida em que, assim, é possível conhecer-se a porosidade real existente nas zonas mais suscetíveis a problemas. Isto é importante, porque se as zonas críticas da peça apresentarem um valor de porosidade superior à média, estar-se-á perante uma situação ainda mais problemática, pois a resistência neste local é ainda mais baixa. No entanto, esta medida é bastante dependente da área considerada para a medição, pelo menos neste método de observação ao microscópio.

Primariamente, é possível retirar-se das imagens recolhidas (Figura 40) que a forma dos poros é, na sua globalidade, esferoidal, sem comunicação com o exterior da peça e de paredes lisas (ver Anexo E). Este formato indica que se está perante poros de origem em gases que ficaram retidos nas peças e não perante rechupes ou peça parcialmente oca (Wang, Turnley, e Savage 2011). Como as moldações destas peças não apresentavam nenhum tipo de sistema de respiros, a origem destes poros deverá ser, em grande parte, derivada da má expulsão de ar da cavidade da moldação.

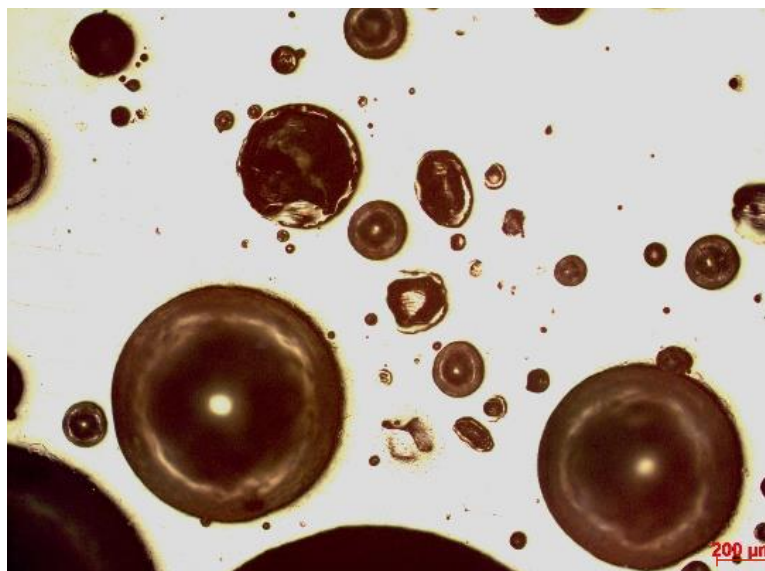


Figura 40 - Observação ao microscópio de um corte na porca Yammi.

Já no que se refere aos valores de porosidade local, obteve-se uma média de 28% na zona mais próxima dos ataques e 41% na zona mais afastada destes. Este efeito era o esperado já que o ar terá tendência a ser empurrado para as zonas de união de fluxos na peça. Assim, é esperado que nas zonas mais afastadas dos ataques se acumule mais ar. De realçar que estes valores são os dois superiores aos obtidos para a porosidade média, o que pode ser justificado pela medição ter sido feita numa zona maciça e afastada da superfície que aparenta apresentar menores percentagens de poros, como se pode ver na Figura 39.

5.2. Sistemas de gitagem das peças

Uma das questões levantadas pela empresa refere-se ao número de tentativas às quais normalmente têm de recorrer para conseguir injetar uma peça sem presença de mal cheios.

Tal como já enunciado anteriormente o tamanho dos ataques depende de três fatores: volume da peça, velocidade de enchimento e tempo de enchimento. Contudo, estes dois últimos parâmetros variam com as espessuras médias e mínimas da peça, com as temperaturas das moldações e do metal

no banho de fusão, a pressão aplicada, entre outras. É, assim, difícil avaliar a qualidade do sistema de gitagem devido à pouca informação sobre os parâmetros reais na máquina (NADCA 2006).

Contudo, é possível retirar o valor do produto entre a velocidade de injeção e o tempo de injeção para cada uma das peças dividindo o volume desta pela área do ataque. Considerando que a velocidade é um parâmetro resultante sobretudo da pressão aplicada e que esta foi a mesma para todas as peças em análise, a área de ataque será sobretudo dependente do tempo de enchimento. A Tabela 5 apresenta os valores para o quociente entre o volume médio e a área de ataque para cada peça.

Tabela 5 - Área de ataque e quociente entre o volume médio e a área de ataque para peças produzidas na ZM3.

Peça (Tabela 4)	Área ataque [mm ²]	(Volume médio) / (Área de ataque) [mm]
<i>Lever Door Handle Inner</i>	6,62	280,2
<i>Lever Door Stop</i>	4,93	406,5
<i>Lever Door Handle Outer</i>	3,98	709,0
<i>Porca Yämmi</i>	7,22	706,4

Conforme é possível visualizar, as três primeiras peças apresentam valores para este quociente diferentes, o que não seria de esperar já que o tempo de enchimento depende em grande medida da espessura das peças e estas apresentam espessuras similares. É possível verificar ainda que a porca *Yämmi* apresenta um quociente idêntico ao do *lever door handle outer*, mesmo apresentando espessuras superiores. Isto significaria que, se o valor da velocidade no ataque for idêntica nos dois casos, que o tempo de enchimento previsto é idêntico nos dois casos, o que não seria expectável devido às grandes diferenças de espessuras entre as duas peças. Estes valores podem ser consequência da falta de uniformização na conceção dos sistemas de gitagem por parte da empresa.

É possível que os gitos do *lever door handle inner* e do *Lever door stop* possam estar um pouco sobredimensionados devido ao baixo quociente volume – área de ataque que apresenta comparado com o *lever door handle outer* que apresenta espessuras similares. Note-se que maiores gitos conduzem a maiores perdas de material para a sucata e consequentemente a menores rendimentos metalúrgicos. No entanto, há que referir que o *lever door handle outer* é um pouco mais poroso.

O gito da porca *Yämmi* é bastante maciço e apresenta uma grande área de ataque, mas como já referido, foi a solução encontrada pela empresa para corrigir os mal cheios.

6. Estudo do efeito da modificação da bomba de injeção no produto final

Um dos objetivos do estudo da máquina ZM3 é estudar a capacidade das bombas de injeção utilizadas e entender as diferenças provocadas pelas bombas de injeção na qualidade das peças finais.

Na máquina ZM3 foi incorporada uma nova bomba, com um diâmetro de pistão de 32 mm, que é superior ao da bomba anteriormente utilizada. Esta bomba foi incorporada na máquina devido à dificuldade de enchimento de uma moldação de duas cavidades de uma peça encomendada à empresa. O objetivo desta troca de bomba visava combater os mal cheios registados no enchimento com uma maior quantidade de metal disponibilizada na bomba.

Seguidamente, na Figura 41, é possível visualizar o efeito da troca de bombas na peça com problemas de enchimento. Relewa-se que os problemas de enchimento foram resolvidos com a utilização da nova bomba.

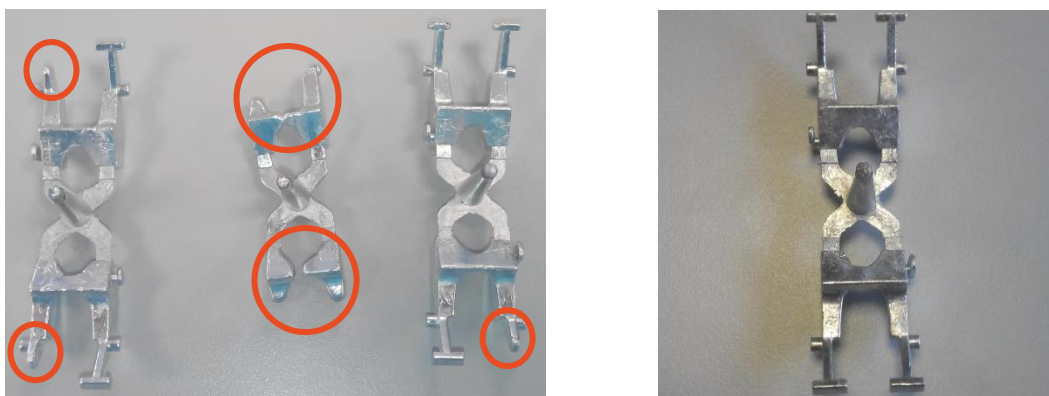


Figura 41 - Comparativo das peças injetadas com a bomba antiga (à esquerda) e com a bomba nova (à direita).

O diâmetro da bomba nova para a máquina ZM3 traz, para além de uma maior quantidade de metal disponível para a injeção, uma modificação no parâmetro da pressão de metal durante a injeção. Conforme já referido nos capítulos anteriores, o diâmetro da bomba de injeção influencia a pressão de metal na injeção, na medida em que quanto maior for este diâmetro, menor será a pressão de metal, para a mesma força aplicada pelo cilindro pneumático (NADCA 2006). Assim, a 6 bar, valor máximo de pressão de ar comprimido no cilindro pneumático, a pressão de metal será de 5,86 MPa (58,6 bar), o que se apresenta aquém do mínimo recomendado de pressão para a fundição injetada de ligas de zinco (ASM International 2008).

Deste modo, como a mudança de bomba provoca a alteração de um dos parâmetros críticos na injeção, a pressão, apresentar-se-á um novo estudo de porosidades de algumas peças produzidas regularmente pela PR Injeção®. Os resultados obtidos serão depois comparados com os anteriormente revelados no capítulo do estudo do processo atual na ZM3 tendo como objetivo perceber-se a influência da bomba nova na sanidade das peças.

Note-se que a bomba que antigamente estava incorporada na máquina ZM3 apresentava um diâmetro de 26 mm, que proporcionava, teoricamente, uma pressão de metal a 6 bar aplicados no cilindro pneumático de 8,87 MPa. Este valor já era inferior ao limite mínimo recomendado de pressão.

6.1. Estudo experimental da influência da bomba nova na porosidade das peças produzidas

Tal como no estudo inicial do processo na ZM3, foram consideradas as peças *lever door handle inner*, *lever door stop*, *lever door handle outer*, bem como a porca *yämmi* neste estudo. Note-se que com a bomba nova não se está a utilizar a pressão máxima no cilindro pneumático na maior parte destas peças devido a um excesso de rebarba que se estava a registar na sua injeção.

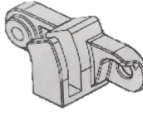
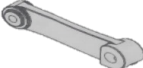
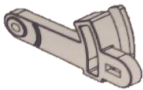
A peça *lever door handle inner* foi injetada a 4,0 bar, a *lever door stop* a 4,5 bar e a *lever door handle outer* a 5,0 bar. Em termos de pressão de metal, estes valores de pressão de ar comprimido correspondem, com a bomba nova, a 3,91 MPa, 4,40 MPa e 4,89 MPa, respetivamente. No estudo anterior, todas elas foram teoricamente injetadas a 8,87 MPa, com a bomba antiga.

No caso da porca *yämmi*, para este estudo, foram realizadas injeções a 6 bar, 4,5 bar e 3,0 bar com a bomba nova. O objetivo destas injeções é comprovar a influência da alteração da pressão na qualidade das peças. Refere-se que com 3 bar de pressão de ar comprimido na bomba nova, tem-se teoricamente uma pressão de metal de 2,93 MPa.

Apresentação de resultados

Para a medição de porosidade foi novamente usado o princípio de Arquimedes através de uma balança hidrostática. Os resultados médios das medições estão apresentados na Tabela 6. Os valores detalhados das porosidades das amostras e os parâmetros de injeção podem ser consultados no Anexo D a esta dissertação.

Tabela 6 - Resultados das medições de peças injetadas com a bomba nova numa balança hidrostática.

Peça	Esquema	Código de ensaio	Massa média medida [g]	Densidade média real [g/cm ³]	Volume médio calculado [cm ³]	Porosidade média [%]
Lever Door Handle Inner (LDHI)		BNLDI 400507	11,4600 (0,0267)*	6,3298 (0,1145)*	1,8110 (0,0319)*	5,53 (1,71)*
Lever Door Stop (LDS)		BNLDS 450405	12,5752 (0,0197)*	6,3364 (0,0419)*	1,9825 (0,0116)*	5,43 (0,63)*
Lever Door Handle Outer (LDHO)		BNLDO 500907	17,7653 (0,0225)*	6,4439 (0,0356)*	2,7570 (0,0125)*	3,82 (0,53)*
Porca Yämmi (PY)		BNPY 300912	32,0075 (0,5255)*	6,2220 (0,0695)*	5,1440 (0,0320)*	7,14 (1,04)*
		BNPY 450912	31,7881 (0,0796)*	6,2134 (0,0135)*	5,1188 (0,0048)*	7,26 (0,20)*
		BNPY 600912	32,4790 (0,0772)*	6,3247 (0,0306)*	5,1354 (0,0265)*	5,60 (0,46)*

*Desvio Padrão da Amostra

Análise de resultados

Face a estes resultados, desde logo é possível constatar que a porosidade na porca *yämmi* baixou em grande medida. No entanto, para melhor averiguar a influência da nova bomba na porosidade, observe-se o gráfico da Figura 42 com os resultados da porosidade obtidos com a bomba antiga e com a bomba nova.

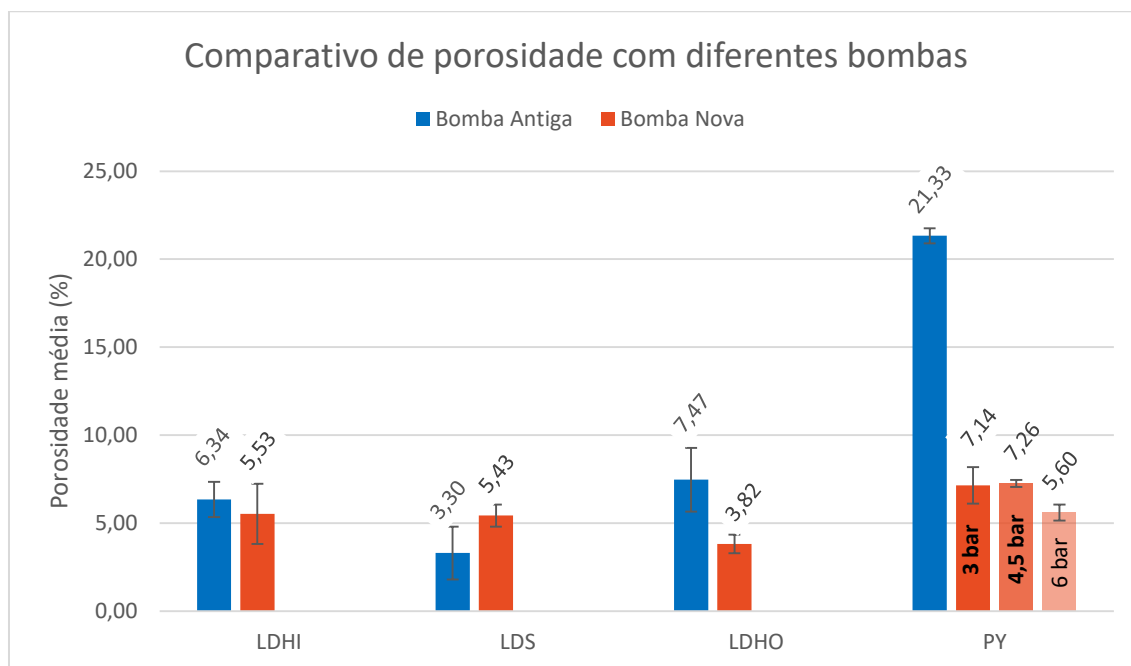


Figura 42 - Gráfico comparativo da porosidade de peças injetadas com a bomba antiga e com a nova bomba

É possível, assim, perceber que no caso do LDHI, o valor de porosidade obtido com a bomba nova não foi significativamente diferente do obtido com a bomba antiga (apresenta-se dentro dos limites do desvio padrão). No entanto, há um pequeno decréscimo do seu valor, mas também uma maior variabilidade dos resultados.

No caso do LDS, a porosidade da peça aumentou e de forma significativa. Isto poderá ser explicado com base na diminuição da pressão de compactação devido à troca de bomba e pela utilização de apenas 4,5 bar no cilindro pneumático. Deste modo, pode-se concluir que, para esta peça, a alteração de bomba terá sido prejudicial.

Nas peças LDHO e na PY, para qualquer pressão, o resultado que se obtém é de uma diminuição bastante relevante dos valores de porosidade utilizando-se a bomba nova. Este poderia ser um efeito não esperado devido à diminuição da pressão de compactação. Contudo, existe a suspeita na empresa que possam existir problemas de capacidade ou rendimento da bomba antiga, fazendo com que os resultados para as peças mais maciças fossem piores em termos de sanidade. As peças LDHI e LDS apresentam massas de 11,4600 g e 12,5752 g, respetivamente, em média. Já a LDHO apresenta massa de 17,7653 g e a PY de cerca de 32 g (dependente da pressão utilizada). Assim, pode-se concluir que as diminuições significativas de porosidades aconteceram nas peças com maior massa.

Isto pode indicar que a nova bomba trará vantagens no enchimento de peças com massas dentro dos valores que o LDHO e a PY apresentam, mesmo com a redução de pressão que esta acarreta. Na realidade, se a bomba antiga não apresentar a capacidade de metal necessária para encher as peças mais maciças, a pressão de metal mais elevada da bomba antiga não será efetiva. Isto porque não havendo metal suficiente a injetar, também não se consegue empregar na cavidade a pressão desejada.

Tal como foi feito no capítulo do estudo inicial de peças em produção na PR Injeção®, foram realizados cortes nas amostras da porca yämmi (injetadas a 6 bar de pressão de ar comprimido) de forma a averiguar a porosidade local. O procedimento de corte, polimento e cálculo da porosidade realizado para estas amostras foi o mesmo que o efetuado nesse capítulo, sendo que desta vez, obteve-se 5,9 % de poros para a zona perto do ataque e para a zona mais afastada dos ataques 10,3 % de porosidade (ver Anexo E). Estes valores mostram a clara redução de poros nas secções, estando de acordo com a porosidade total medida pelo princípio de Arquimedes. Esta diminuição é bastante pronunciada, sendo que é também facilmente detetável através de uma observação a olho nu das amostras, como se pode observar na Figura 43.

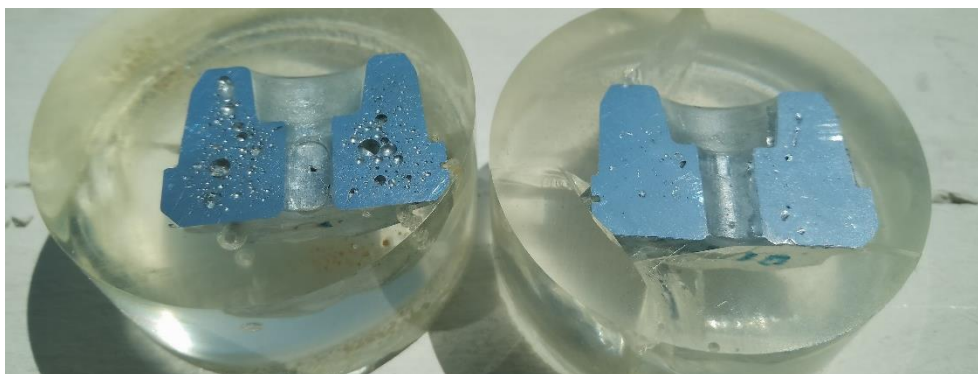


Figura 43 - Secções de porcas yämmi injetada com a bomba antiga (à esquerda) e com a bomba nova (à direita).

Focando agora na alteração de pressão nos vários ensaios com a porca *yämmi*, há que ter em conta na análise destes resultados que como a máquina trabalha sobre a forma de fonte de pressão, ao modificar-se esta variável também se está a mudar a velocidade do metal nos ataques da peça.

Se utilizada a fórmula teórica de perda de carga (equação (1)) para o cálculo da velocidade nos ataques, é necessário empregar-se, com a bomba nova, uma pressão entre os 0,1 e os 2,8 bar de ar comprimido para que esta se encontre dentro da gama de velocidades recomendadas. Assim, teoricamente, a 3 bar de pressão de ar comprimido tem-se uma velocidade de 41 ms^{-1} nos ataques, ou seja, próxima do limite máximo recomendado de 40 ms^{-1} . Já os ensaios a 4,5 bar e 6 bar apresentam teoricamente velocidades nos ataques de 51 ms^{-1} e 59 ms^{-1} , respetivamente. Note-se que velocidades demasiado elevadas podem levar a fluxos demasiado turbulentos e maior porosidade (Braga 2015).

Tendo em conta os ensaios realizados, os melhores resultados em termos de porosidade foram obtidos para 6 bar de pressão de ar comprimido. Deste modo, a utilização de uma maior pressão apresentou melhores resultados, que em injeções a menores pressões e, consequentemente, menor velocidade. Tem-se assim que é preferível utilizar-se um fluxo de enchimento mais turbulento, mas com uma maior pressão de compactação do que uma pressão que providencie uma velocidade de enchimento próxima do limite recomendado.

No entanto, é de realçar que à pressão de 3 bar e 4,5 bar os resultados obtidos foram similares. Isto pode ser consequência de a pressão de compactação não ter sido substancialmente diferente de forma a compensar o aumento da turbulência pelo aumento da velocidade nos ataques.

É de referir que, conforme foi referenciado na pesquisa bibliográfica, por vezes são programadas várias fases no ciclo de injeção de modo aplicar-se valores de pressão e velocidade diferentes durante a injeção da peça. No caso das máquinas de câmara quente, podem ser usadas duas fases, de modo a, numa primeira etapa, reduzir a turbulência do fluxo de metal no enchimento da cavidade da moldação, e de seguida empregar uma pressão superior para compactar o material (Amaro 2009).

Contudo, no caso concreto da ZM3, o ciclo de produção encontra-se atualmente apenas programado para uma fase durante o ciclo.

Conclusões

Em conclusão, a utilização da bomba nova terá efeitos benéficos em termos de porosidade a partir de uma determinada massa situada entre as 12,5 e as 17,5 g. Para peças com massa inferior a esse limite, há a suspeita que a perda de pressão com a nova bomba possa deteriorar a qualidade da peça, não tendo sido comprovada na totalidade. Contudo, a pressão é um parâmetro influente na qualidade das peças e deve ser utilizada a mais próxima possível dos valores recomendados. Nos ensaios a pressões diferentes com a porca *yämmi* foi ainda possível perceber que nos ciclos de produção com apenas uma fase, a utilização da pressão máxima parece melhorar os resultados, mesmo que esta implique velocidades de enchimento fora dos valores recomendados.

7. Análise dos sistemas de gitagem

Um dos pressupostos deste trabalho é auxiliar a empresa na conceção do tamanho dos sistemas de gitagem, experienciando o efeito da modificação do seu tamanho.

Assim, será utilizado um processo de aumento sucessivo dos sistemas de gitagem nas moldações para o porta-chaves e provetes. No Anexo G estão expressos todos os registos de ensaios dos porta-chaves, incluindo informações relativas aos parâmetros usados na máquina e outras observações.

7.1. Avaliação de um sistema de gitagem com um ataque

O sistema de gitagem na moldação do porta-chaves foi realizado num ataque único, situação usada na maioria dos casos das peças soltas injetadas na empresa. O dimensionamento do tamanho das várias secções do gito foram projetadas com base na fórmula da perda de carga apresentada no capítulo 2.2.6, associado à regra prática para o tempo de enchimento $6T + 7$ ms apresentada no capítulo 2.3.4. Com base nos valores obtidos, foram ensaiados para esta moldação rácios entre 0,60 e 2,09, entre o tamanho das secções utilizadas e o tamanho ideal teoricamente calculado. Os tamanhos das secções utilizadas podem ser consultados no Anexo F desta dissertação.

O objetivo desta experiência visa, assim, avaliar o aspeto, o enchimento e a porosidade das peças produzidas nas várias iterações realizadas de forma a chegar a uma boa regra para a conceção de sistemas de gitagem com ataque simples.

Todavia, antes das injeções, foi necessário modificar um pouco a moldação para que esta pudesse entrar em regime permanente de operação. As moldações tal como foram projetadas não providenciaram a que a peça ficasse presa na moldação móvel, mas sim na moldação fixa, como se pode observar na Figura 44. Isto provocou a necessidade de que a cada injeção se tivesse de tirar a moldação fixa da máquina de forma a extrair a peça. Lembra-se que o sistema de extração é colocado na meia moldação móvel. A principal causa para esta ocorrência deverá residir no facto de no *sprue* existir alguma rebarba de material entre o bico de injeção e a estrutura, provocando uma contra saída na moldação fixa. De forma a solucionar



Figura 44 - Porta-chaves do MIEM preso na moldação fixa após injeção.

esta ocorrência foram suavizadas algumas saídas na meia moldação móvel e dadas pequenas contra saídas na zona de extração do *sprue*.

Apresentação de resultados

Como tem sido prática ao longo desta dissertação, foi novamente usado o princípio de Arquimedes para determinar a porosidade das peças. Os resultados aqui expressos referem-se a injeções a 3,5 bar e 6 bar de ar comprimido no cilindro pneumático. Note-se que com maior pressão também se atingem, teoricamente, maiores velocidades no ataque e, consequentemente, menores tempos de enchimento das peças. Assim, para o mesmo sistema de gitagem, os rácios de secções reais/teóricas serão superiores para os 6 bar, já que as secções teóricas serão inferiores às calculadas para 3,5 bar. Os resultados médios das medições encontram-se na Tabela 7. No Anexo H podem ser consultadas todas as medições efetuadas por princípio de Arquimedes para os porta-chaves.

Tabela 7 - Densidades, volumes, massas e porosidades dos porta-chaves injetados com diferentes sistemas de gitagem

Peça	Rácio secção usada / secção teórica	Pressão de ar comprimido [bar]	Código de ensaio	Massa média medida [g]	Densidade média real [g/cm ³]	Volume médio calculado [cm ³]	Porosidade média [%]
Porta-Chaves	0,60	3,5	60BNPC 350404	11,3377 (0,0763)*	6,1452 (0,0441)*	1,8450 (0,0100)*	8,28 (0,66)*
Porta-Chaves	0,75	3,5	75BNPC 350404	11,5507 (0,0610)*	6,2342 (0,0448)*	1,8528 (0,0120)*	6,95 (0,67)*
Porta-Chaves	0,96	3,5	96BNPC 350404	11,5895 (0,0356)*	6,2725 (0,0285)*	1,8477 (0,0052)*	6,38 (0,42)*
Porta-Chaves	1,15	3,5	115BNPC 350404	11,6057 (0,0382)*	6,3102 (0,0285)*	1,8392 (0,0058)*	5,82 (0,23)*
Porta-Chaves	1,41	3,5	141BNPC 350404	11,7609 (0,0514)*	6,4103 (0,0371)*	1,8347 (0,0094)*	4,32 (0,55)*
Porta-Chaves	1,60	3,5	160BNPC 350404	11,7743 (0,0514)*	6,4269 (0,0433)*	1,8321 (0,0070)*	4,08 (0,65)*
Porta-Chaves	1,50	6,0	150BNPC 600404	11,7687 (0,0922)*	6,4242 (0,0556)*	1,8319 (0,0065)*	4,12 (0,83)*
Porta-Chaves	1,85	6,0	185BNPC 600404	11,8007 (0,1054)*	6,4415 (0,0730)*	1,8320 (0,0057)*	3,86 (1,09)*
Porta-Chaves	2,09	6,0	209BNPC 600404	11,8003 (0,0992)*	6,4418 (0,0485)*	1,8318 (0,0098)*	3,85 (0,72)*

*Desvio Padrão da Amostra

Análise de resultados

Apresenta-se de seguida na Figura 45 um gráfico com a evolução da porosidade com o aumento dos canais de enchimento.

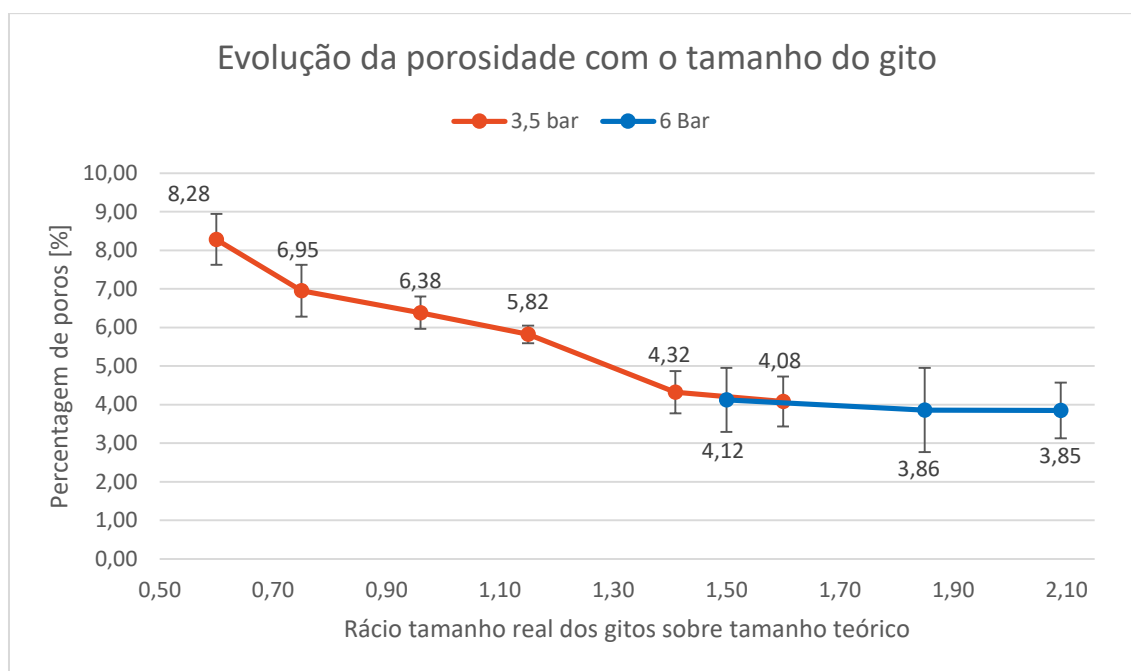


Figura 45 - Gráfico da evolução da porosidade com o tamanho do gito dos porta-chaves do MIEM.

No que se refere ao enchimento, com os tamanhos de gitos utilizados, todas as peças apresentaram um enchimento completo da cavidade. No entanto, ressalva-se que, para temperaturas de moldação muito baixas, o enchimento seja dificultado, existindo algumas peças com mal cheios. Esta situação é característica das primeiras injeções feitas na máquina já que a moldação não é pré-aquecida. No entanto, depois de injetadas algumas peças, a situação é regularizada.

Em termos de aspeto, destaca-se que as marcas de fluxo das peças são mais visíveis para o rácio de 0,60. Os restantes rácios apresentam aspetos relativamente similares tanto no enchimento das letras (espessuras finas) como em termos de marcas. Ressalva-se que o rácio de 0,60 apresenta um tempo de enchimento teórico de 21,8 ms, que é ligeiramente superior ao calculado pela regra $7T + 13$ ms ($T = 1$ mm $\Rightarrow$ 20 ms), que dita o tempo máximo de enchimento para peças de baixa qualidade superficial. É assim um resultado esperado. Destaque ainda para a não existência de um aspeto significativamente melhor para tempos de enchimento inferiores aos dados pela regra $6T + 7$ ms ($T = 1$ mm $\Rightarrow$ 13 ms). Durante os ensaios, foi ainda possível constatar que se aumentada a lubrificação da moldação, útil para facilitar a extração das peças, o aspeto das peças injetadas piorava.

Tal como é possível observar, existe uma tendência de redução da porosidade das peças com o aumento do gito. Isto era o efeito esperado, porque maiores gitos providenciam menores tempos de enchimento da peça. Assim, pode-se concluir que os resultados práticos coincidem com as informações recolhidas no capítulo do Estado da Arte.

De uma forma geral, pode-se referir que esta diminuição foi sendo significativa nas injeções a 3,5 bar até ao rácio 1,41. O rácio de 1,60 apresentou um valor bastante similar ao que se observou para o rácio de 1,41, encontrando-se inclusivé dentro da gama de desvios padrão calculados.

Nos ensaios a 6 bar, nenhum dos resultados foi significativamente diferente. No entanto, só foram recolhidas amostras para rácios superiores a 1,50. Assim, e conciliando estes resultados com os observados a 3,5 bar, pode-se concluir que aumentos no sistema de gitagem superiores a rácios de 1,41 a 1,50 não apresentam diferenças significativas nos valores da porosidade, pelo que não será compensatório fazê-lo.

Note-se que se o sistema de gitagem for maior, maior será também o desperdício de material no processo. Este pode não ser significativo aquando de pequenas séries, mas sendo o processo de fundição injetada característico para grandes séries de produção, pode significar uma poupança, mantendo os sistemas de gitagem o mais pequenos possível desde que este não prejudique a qualidade do produto.

Conclusões

Através da análise aqui realizada, foi possível concluir que as dimensões do sistema de gitagem influenciam a porosidade e o enchimento das peças. De uma forma geral, quanto maior forem os gitos, menos porosa e mais fácil de encher serão as peças. Todavia, a porosidade tende a estabilizar a partir de um certo valor de dimensões do gito. Na moldação dos porta-chaves, a partir dos rácios de 1,41 a 1,50 entre o tamanho real e os obtidos pela fórmula de perda de carga apresentada no capítulo 2.2.6, o valor de porosidade parece estabilizar, não compensando que este seja superior devido ao desperdício de material. O aspeto das peças também pode ser influenciado pelo tamanho do gito, tendo sido detetados piores resultados nas injeções de porta-chaves com tempos de enchimento superiores aos dados pela regra $6T + 7 \text{ ms}$.

7.2. Sistema de gitagem de dois ataques

Ao contrário da moldação dos porta-chaves, a moldação dos provetes apresenta um duplo ataque e duas cavidades em vez de uma. Os ataques estão posicionados de acordo com as recomendações de se encontrarem nas zonas mais maciças da peça, ou seja na cabeça dos provetes. Este posicionamento provoca ainda que a zona de ensaio não seja afetada com o corte de gito, mas apresentará uma zona de união de fluxos. Esta condição não é a ideal, no entanto, permite testar a peça no ensaio de tração para um caso mais crítico devido à presença desta zona de mais baixa qualidade de material.

Tal como na moldação do porta-chaves, serão testados várias dimensões de secções de gitagem. Todavia, como se trata de um gito mais longo e com várias mudanças de direção, será expectável que este tenha de ser, em percentagem, superior ao usado nessa moldação. Assim, como primeiro sistema de gitagem, foi testado um sistema com um aumento de 35% em relação ao teórico.

Nesta moldação, foi ainda necessário dar algumas contra saídas para que o metal ficasse agarrado à moldação móvel na abertura, como foi feito para a moldação dos porta-chaves.

Apresentação de resultados

Ao contrário do que sucedeu com a moldação dos porta-chaves, os mal cheios foram bastante evidentes nas primeiras tentativas de injeção. Com os rácios de 1,35; 1,80; 2,50 e 4,5 não se conseguiu o preenchimento completo das duas cavidades, como se pode observar nos exemplos da Figura 46.

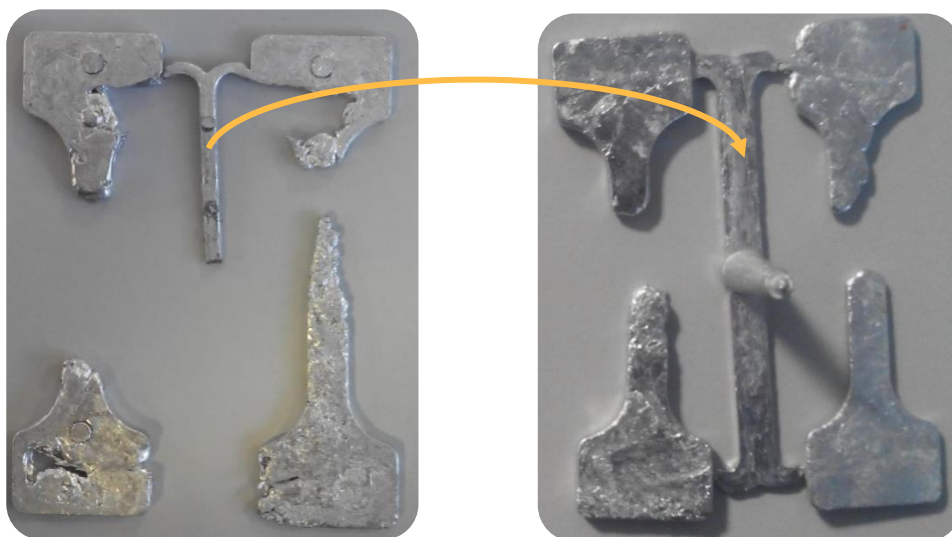


Figura 46 - Provetes injetados com sistemas de gitagem de rácios 1,80 (à esquerda) e 2,50 (à direita).

Em relação ao sistema de gitagem da moldação do porta-chaves, o metal atravessa mais zonas de perdas de carga devido às mudanças de direção e do comprimento do canal de gitagem. Na verdade, isto conciliado com o arrefecimento do metal devido à transferência de calor para a moldação enquanto este percorre os canais de gitagem, provoca um entupimento, não sendo possível preencher a cavidade requerida. É, assim, natural que sejam necessários aumentos superiores aos que se verificaram no caso apresentado anteriormente.

Uma das formas de contornar esta situação seria colocar um terceiro ataque para auxiliar o enchimento na zona central do provete. No entanto, esta solução foi evitada para não afetar a zona de ensaio com fissuras resultantes do corte do gito. Assim, continuou-se as tentativas sucessivas de aumento do tamanho do sistema de gitagem atual.

Os primeiros resultados satisfatórios apareceram para o rácio de 6 em relação ao tamanho teórico. Nestes ensaios, todos os provetes de 2,5 mm tiveram um preenchimento completo da sua cavidade, sendo que o mesmo não se verificou para a cavidade do provete de 1,5 mm de espessura, já que em sete injeções, um deles apresentou-se mal cheio.

Note-se que os sistemas de gitagem foram concebidos à escala de volume dos provetes. Assim, é possível que o não enchimento da cavidade do provete de 1,5 mm de espessura indique que a dificuldade de enchimento de peças mais finas possa ser maior. Contudo, este será um aspeto avaliado mais à frente nesta dissertação.

Em termos de porosidades, neste ensaio obteve-se 3,41% para os sete provetes de 2,5 mm de espessura e 2,69% nos seis provetes de 1,5 mm disponíveis. Os desvios padrão foram respetivamente 0,49% e 0,33%.

Análise de resultados

Tal como feito para os porta-chaves, apresenta-se um gráfico, na Figura 47, com a evolução da porosidade com os diferentes tamanhos do sistema de gitagem testados. Note-se que os ensaios onde não foi possível encher as cavidades estão assinalados com uma cruz a 0% de porosidade, não representado, porém, o valor real de poros nesses ensaios. É, assim, uma representação unicamente simbólica.

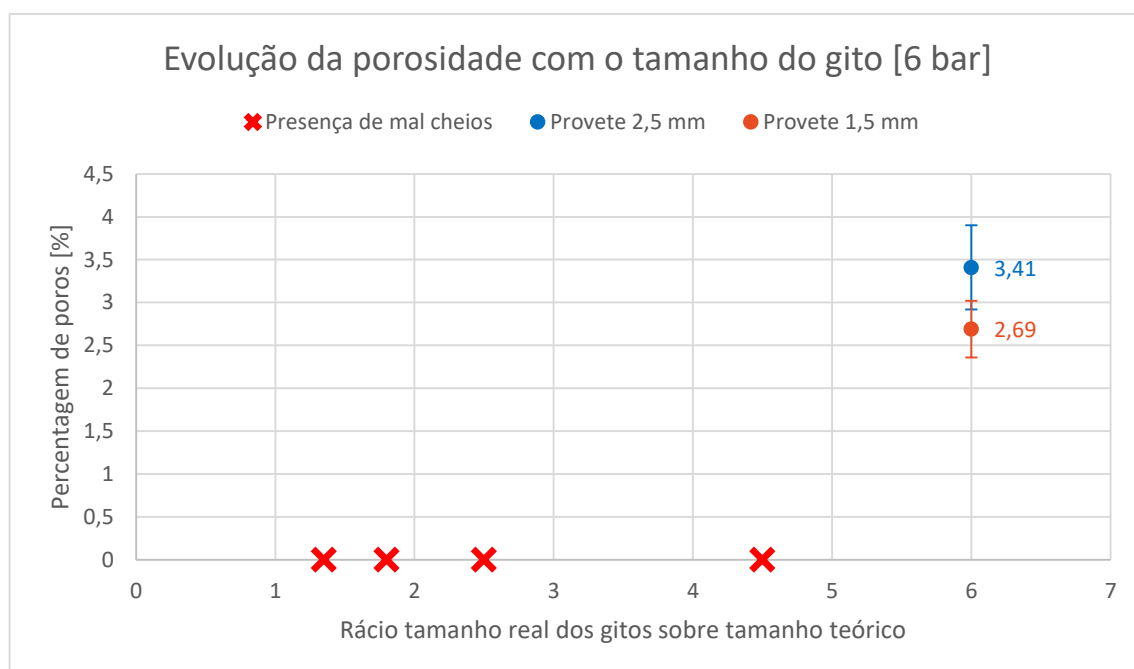


Figura 47 - Evolução da porosidade dos provetes com o tamanho do gito.

Tal como se pode observar, não foi feita mais nenhuma tentativa de aumento posterior ao rácio de 6, por limitações de tempo, já que seria necessário maquinar novamente a moldação. No entanto, os valores obtidos em termos de porosidade não são distantes do que recorrentemente se mede para as peças injetadas nestas máquinas, pelo que os resultados obtidos nos ensaios de tração com estas peças possam ser representativos das peças produzidas pela empresa. O valor de 3,41% de porosidade obtido para os provetes de 2,5 mm de espessura é inclusive próximo e não significativamente diferente dos obtidos para os porta-chaves na estabilização de valores.

Desse modo, serão usados provetes com o rácio de 6 na determinação de propriedades mecânicas e para a comparação da influência dos parâmetros de injeção posteriormente apresentada nesta dissertação.

De realçar ainda que um aumento de 500% do sistema de gitagem em relação ao valor teórico parece demasiado grande, pelo que a fórmula teórica não deverá ser adequada para este tipo de gito. Uma alteração substancial do valor do coeficiente de carga usado poderia aproximar os resultados. No entanto, seria de considerar usar simulações em computador, caso as limitações das peças provoquem a necessidade de um gito mais complexo como é o deste caso.

Porém, há situações que poderiam ajudar no enchimento destas cavidade como a manutenção do formato trapezoidal dos canais de gitagem com um rácio entre a altura e a largura média de 1:2. Este rácio não foi mantido nos aumentos do sistema de gitagem devido à necessidade de ajuste do sistema de extração caso se aumentasse a altura do perfil dos canais de gitagem. Contudo, a manutenção deste rácio poderia ter ajudado o fluxo de metal no seu trajeto já que diminuiria o contacto deste com as paredes da moldação, reduzindo a transmissão de calor.

Para além disso, no projeto desta moldação, tentou-se direcionar o fluxo de metal de forma a que este chegasse mais facilmente à zona útil do provete através de uma curva no canal de gitagem antes do ataque, como se pode visualizar na Figura 48. Contudo, esta solução não pareceu ter muitos resultados, julgando pela forma de enchimento dos provetes com mal cheios, já que a zona permanentemente afetada foi a zona útil do provete. Esta solução poderá até ter tido efeitos prejudiciais no fluxo de metal já que as mudanças de direção bruscas no fluxo de metal impõem maiores perdas de carga.

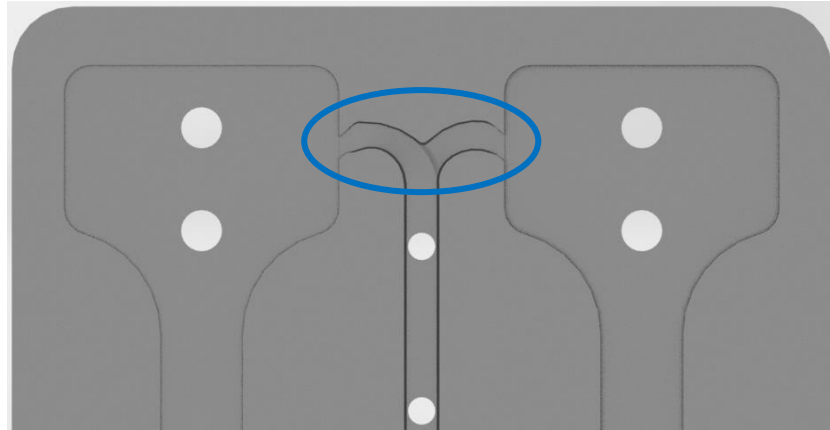


Figura 48 - Detalhe da curva de direcionamento do fluxo de metal na moldagem dos provetes.

Conclusões

Ao contrário dos resultados obtidos para os porta-chaves, devido ao sistema de gitagem mais complexo, com maiores zonas de perda de carga e contacto do metal com a moldação, o enchimento da moldação dos provetes foi mais difícil. Os resultados satisfatórios, em termos de enchimento, foram apenas obtidos para aumentos de 500%, face aos calculados teoricamente. Contudo, ressalva-se que há algumas escolhas no projeto que podem ter dificultado este enchimento, como a curva de direcionamento do fluxo de metal perto dos ataques ou a não manutenção dos rácios de altura e largura dos perfis trapezoidais nos canais de gitagem aquando dos aumentos realizados. No entanto, as porosidades obtidas nos provetes parecem corresponder às normalmente encontradas nas peças da empresa, pelo que o valor retirado dos ensaios mecânicos será representativo do processo.

8. Influência dos parâmetros de injeção no produto final

Pretende-se, neste tópico, debater a influência dos parâmetros de injeção nas propriedades das peças, quer mecânicas quer em termos de porosidade. Assim, serão utilizados, neste capítulo, provetes injetados na ZM3, pelo que antes da apresentação de quaisquer resultados serão referidas algumas considerações tidas em conta na elaboração dos ensaios de tração e na escolha dos tamanhos da amostragem. Os parâmetros em estudo neste capítulo serão a pressão de injeção, a temperatura do banho de fusão, a temperatura do bico de injeção e a temperatura da cavidade das moldações.

8.1. Considerações sobre os ensaios de tração realizados e tamanhos de amostragem

A injeção de provetes na máquina ZM3, apesar de considerada satisfatória no rácio de 6, não providenciou que todos os provetes recolhidos estivessem livres de mal cheios. Apesar de os provetes de 2,5 mm não apresentarem este defeito, nos provetes de espessura de 1,5 mm, eles manifestaram-se para todas as condições de ensaio. A percentagem de provetes mal cheios variou dependendo das condições de injeção escolhidas.

Foram recolhidas amostras de sete a oito injeções, sendo que a cada injeção são recolhidos dois provetes de diferentes espessuras (2,5 mm e 1,5 mm). Todos os provetes que não apresentarem mal cheios serão utilizados na medição de porosidades por princípio de Arquimedes, pelo que o tamanho da amostragem pode variar de condição para condição. Todas as informações sobre a presença de defeitos nas peças e porosidades podem ser consultadas no Anexo I deste relatório.

Nos ensaios de tração, foram utilizados tamanhos de amostragem mais reduzidos devido a limitações de tempo na utilização dos equipamentos de ensaios. Foram, assim, apenas utilizadas três amostras de cada condição para os provetes de 2,5 mm e para os provetes de 1,5 mm apenas foram realizados ensaios de tração nos provetes de código AF600BNPROV60. É de relevar que, segundo a experiência do engenheiro responsável pelo equipamento, três provetes é o número mais usual nos ensaios de tração realizados, sendo normalmente suficiente para retirar resultados.

Os ensaios foram realizados com uma velocidade de ensaio de 1 mm/min de afastamento das amarras.

Num primeiro teste com provetes numa máquina de ensaio de tração, foi possível verificar que a curva tensão-deformação não evidenciou o formato esperado. Esta não permitia a determinação da tensão limite elástico através de uma reta paralela à parte linear para 0,2 % de deformação, uma vez que esta cruzava a curva tensão-deformação depois da tensão de rotura. Assim sendo, o material entrou em rotura antes de atingir a zona de passagem do regime elástico para plástico. Consequentemente, a ductilidade do material apresentou-se inferior ao esperado, tendo a sua rotura neste caso acontecido antes dos 1% de deformação. Note-se que este ensaio foi realizado com um extensómetro de 25 mm. A curva tensão-deformação obtida pode-se observar na Figura 49.

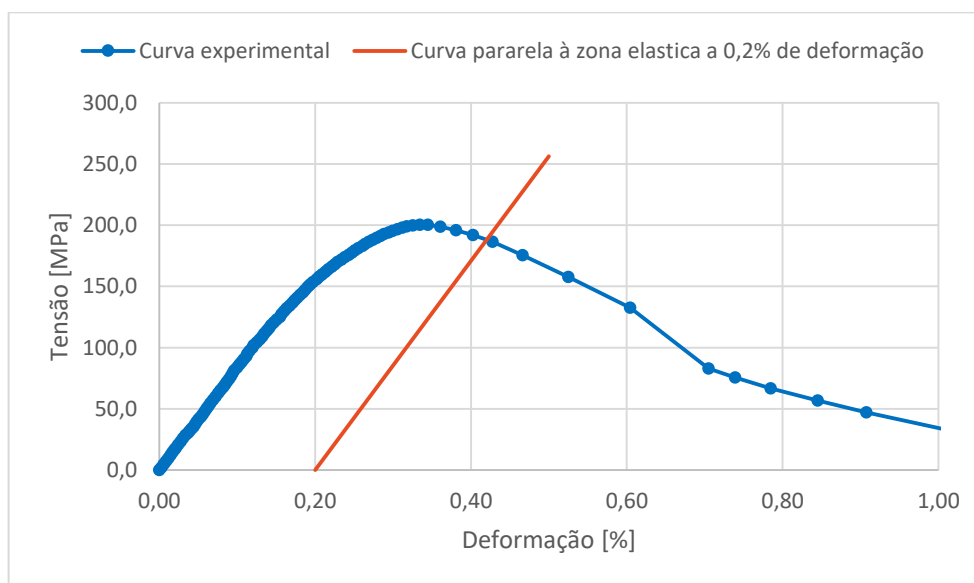


Figura 49 - Ensaio de tração realizado a provete de 2,5 mm injetado na ZM3.

Deste modo, o valor da tensão limite elástico torna-se coincidente ou semelhante ao valor da tensão de rotura, não sendo possível a sua determinação por este método. Por este motivo, optou-se, tendo em conta a disponibilidade das máquinas de ensaio e devido à sua facilidade de manuseamento, realizar os ensaios noutro equipamento, que não permitiria a colocação de um extensómetro no provete, mas que permitiria obter a curva força-deslocamento das amarras e a tensão de rotura do material.

Porém, esta mudança tirou a possibilidade de calcular a extensão após rotura através dos dados recolhidos pela máquina, isto porque essa não regista a distância absoluta das amarras e porque estas têm a tendência de escorregar no provete, não providenciando um valor preciso da deformação. Assim, tentou-se calcular a extensão após rotura através da colocação de duas riscas a 25 mm de distância no provete e medindo a sua distância após ensaio. Assim, poder-se-ia obter um valor aproximado deste parâmetro sem auxílio dos gráficos gerados pelos equipamentos de ensaio, cometendo o erro próprio de medição manual do valor entre traços por paquímetro.

No entanto, esta medida não se mostrou muito fidedigna, pois apresentou valores diferentes dos conseguidos nos ensaios em que se usou extensómetros, e porque a variabilidade de resultados foi grande, muito devido à zona de rotura do provete. Nos provetes com rotura dentro dos limites colocados, a extensão após rotura foi significativamente maior que os que evidenciavam a rotura fora desta zona. Assim, o resultado obtido estaria sempre afetado de erros. Deste modo, foi desconsiderada a análise da extensão após rotura na análise dos parâmetros de injeção no produto final.

8.2. Influência da pressão de injeção no enchimento e qualidade das peças

A pressão de injeção, conforme foi sendo referido, é um dos parâmetros mais influentes no processo pois através dela é possível modificar a velocidade de enchimento, a pressão de compactação e o tempo de enchimento das cavidades.

Uma primeira averiguação da influência da pressão nas peças já foi realizada aquando dos testes de enchimento da porca *yämmi* com a bomba nova. Contudo, nestas peças, não seria possível obter propriedades mecânicas como através dos ensaios de tração com provetes.

Apresentação de resultados

Seguidamente são apresentadas, na Tabela 8 as porosidades, percentagem de peças defeituosas com mal cheios e tensões de roturas médias de provetes injetados com três pressões distintas.

Tabela 8 - Porosidades, percentagem de mal cheios e tensões de rotura de provetes injetados a diferentes pressões.

Peça	Código de ensaio	Pressão de ar comprimido (Pressão de metal) [bar]	Velocidade nos ataques teórica [m/s]	Porosidade média [%]	Peças com mal cheios [%]	Tensão de rotura [MPa]
Proвете [2,5 mm]	AG600BN PROV60	6,0 (58,7)	60	3,41 (0,49)*	0	251 (9)*
Proвете [2,5 mm]	BG600BN PROV45	4,5 (44,0)	51	3,43 (0,61)*	0	255 (4)*
Proвете [2,5 mm]	CG600BN PROV25	2,5 (24,4)	38	4,46 (1,70)*	0	256 (9)*
Proвете [1,5 mm]	AF600BN PROV60	6,0 (58,7)	60	2,69 (0,33)*	14,3	289 (3)*
Proвете [1,5 mm]	BF600BN PROV45	4,5 (44,0)	51	2,36 (0,34)*	25,0	Não medida
Proвете [1,5 mm]	CF600BN PROV25	2,5 (24,4)	38	X	100,0	Não medida

*Desvio Padrão da Amostra

Nota para os provetes de código CF600BNPROV25 não apresentarem valor para a porosidade média, uma vez que, dos oito provetes injetados, todos apresentavam mal cheios. Relembra-se ainda que o valor de tensão de rotura para o zamak 5 nas normas ser de 338 MPa (ASTM 2009).

Análise de resultados

Perante os resultados apresentados, desde logo é evidente que o enchimento das cavidades das moldações foi influenciado pela pressão utilizada. Embora nenhum dos provetes de 2,5 mm de espessura tivesse tido presença de mal cheios, nos provetes de 1,5 mm de espessura, houve um aumento da quantidade de peças com este defeito à medida que se diminuiu a pressão. Isto indica que a diminuição da pressão de compactação final e a redução do tempo de enchimento das cavidades promovem a ocorrência de mal cheios. Este é, no entanto, um resultado esperado segundo a bibliografia, uma vez que, conforme referido no capítulo 2.2.4 e 2.3.4, devem ser usadas pressões de compactação elevadas e tempos de enchimento mais curtos de modo a preencher as zonas de enchimento mais difícil.

Quanto à porosidade, foi visto, no capítulo 6.1, aquando da análise da porca *yämmi* injetada com a bomba nova que quanto mais baixa fosse a pressão, mais porosa seria a peça. No que se refere aos provetes, os resultados obtidos podem ser observados no gráfico da Figura 50.

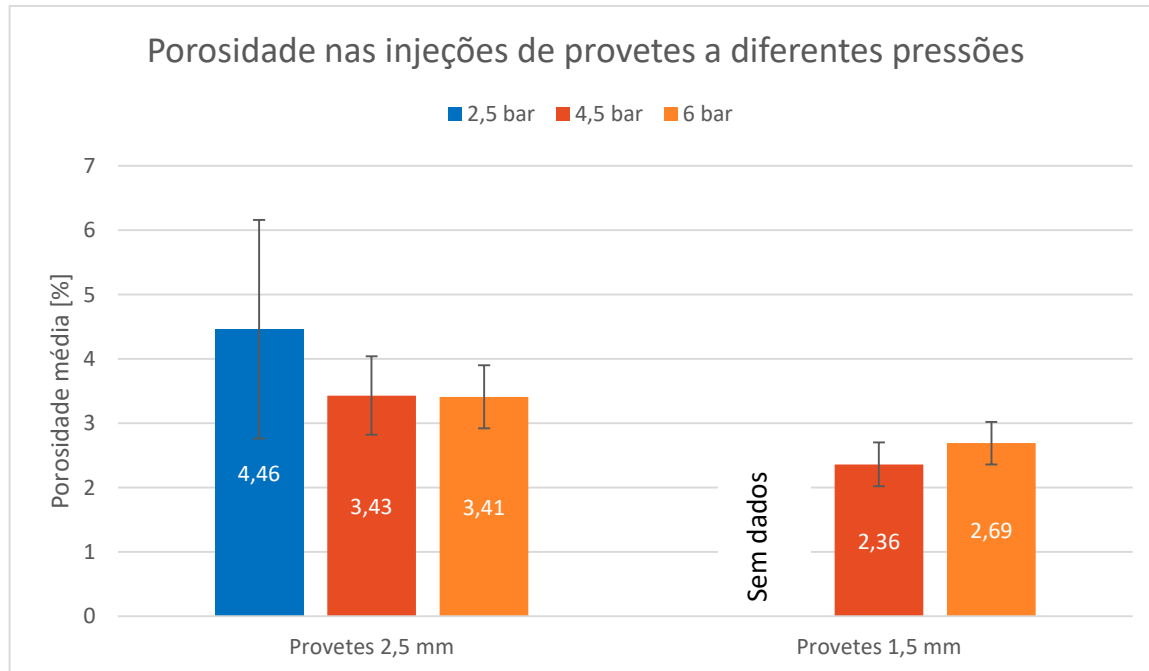


Figura 50 - Gráfico com a distribuição da porosidade segundo as pressões de ar comprimido de 2,5, 4,5 e 6 bar.

Ao contrário do que observado na porca *yämmi*, nos provetes não houve alterações significativas nos valores de porosidade entre os 4,5 bar e os 6 bar, tanto para os provetes de 2,5 mm de espessura como para os de 1,5 mm de espessura. No entanto, o valor obtido para os 2,5 bar no

proвете de 2,5 mm foi superior aos obtidos para as outras duas pressões. Porém, este valor também apresentou grande variabilidade. Mesmo assim, os valores médios obtidos para as pressões de 4,5 e 6 bar, incrementados do seu respetivo desvio padrão, são inferiores ao valor médio obtido para a porosidade em 2,5 bar. Assim, poder-se-á estar perante, novamente, um caso em que a diminuição da pressão prejudicou a sanidade das peças injetadas.

Mais uma vez, não parecem existir evidências de que as peças injetadas melhorem em termos de porosidade aquando da utilização de uma velocidade nos ataques dentro dos limites recomendados em detrimento da utilização de uma pressão elevada, indo de encontro ao observado no capítulo 6.1.

Em relação à tensão de rotura, na Figura 51, pode-se observar um gráfico com os valores médios obtidos nos ensaios de tração e o seus respetivos desvios padrões.

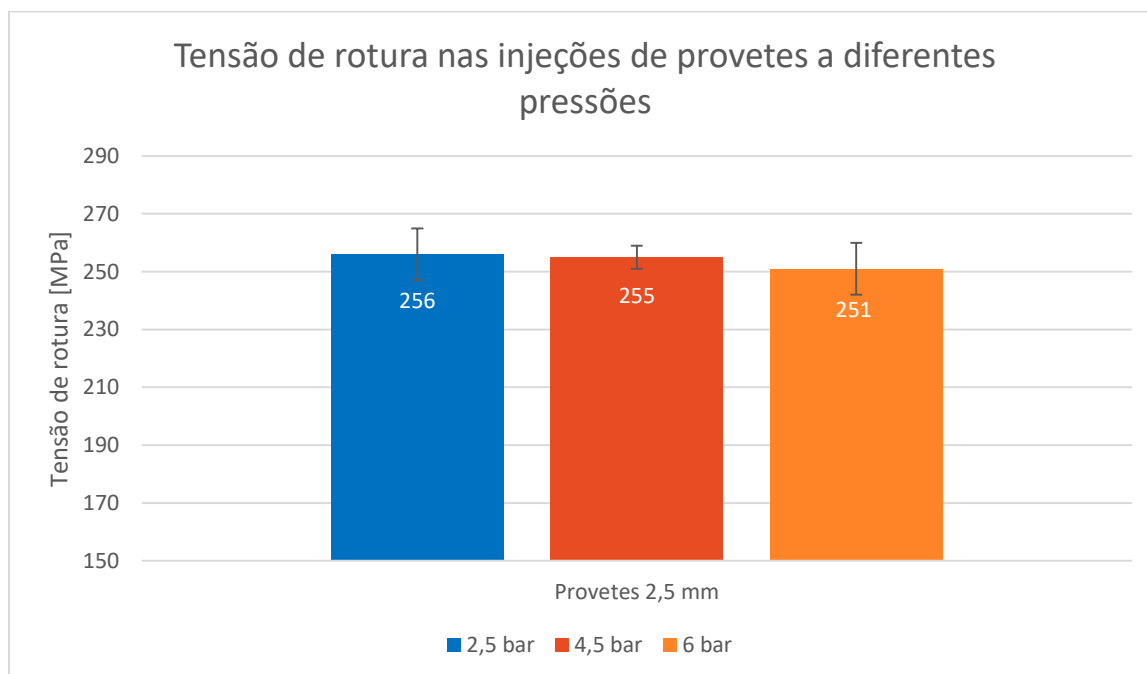


Figura 51 - Gráfico com as tensões de rotura dos provetes Injetados a diferentes pressões de ar comprimido.

Conforme se pode visualizar, os resultados obtidos em termos de médias encontram-se dentro da totalidade dos limites de um desvio padrão dos restantes. Assim, todos os resultados são tratados como significativamente idênticos, não sendo relevantes as diferenças das suas médias. Pode-se assim dizer que a alteração da pressão de injeção não teve qualquer efeito em termos de perda de resistência à tração das peças.

Este resultado não é de todo o esperado uma vez que era expectável que, devido à maior porosidade das peças para a pressão de 2,5 bar, isso se repercutisse numa perda de propriedades mecânicas das peças.

A presença de uma união de fluxo (ou possível junta fria) na zona útil do provete poderá ajudar a explicar as razões para a não existência de alterações significativas nestes valores, bem como possíveis secções com grande porosidade local. Note-se que as juntas frias são zonas de baixa qualidade nas ligações do material (de Lima, Freitas, e Magalhães 2003; Neto 2007).

De notar, ainda, que se está a injetar a pressões bastante abaixo do mínimo recomendado (103 bar), pelo que os resultados mais baixos de tensão de rotura, comparativamente ao apresentado nas normas, possam se dever a uma baixa compactação das peças.

Conclusões

Tal como já observado no capítulo 6.1, a pressão de injeção parece influenciar a porosidade das peças, na medida em que pressões de injeção mais baixas provoquem peças mais porosas. No entanto, a variabilidade de resultados é elevada, não sendo de todo comprovada esta premissa. Para além disso, voltou-se a não registar qualquer melhoria na utilização de velocidade nos ataques dentro dos limites recomendados (5 a 40 ms^{-1} (Allsop e Kennedy 1982)) em detrimento de uma pressão mais elevada.

Já em termos de tensão de rotura, os resultados obtidos não apresentaram qualquer diferença entre si, indicando que as alterações de pressões não modificam a resistência mecânica das peças. Em termos de enchimento, através da quantidade de provetes de 1,5 mm com presença de mal cheios foi possível concluir que maiores pressões ajudam no enchimento das peças e evitam o aparecimento deste defeito.

8.3. Influência da temperatura do metal no banho de fusão e da resistência elétrica do bico de injeção no enchimento e qualidade das peças

Neste tópico pretende-se debater o efeito das temperaturas do banho de fusão e da resistência elétrica do bico de injeção na qualidade das peças injetadas.

Como já referido, a temperatura do zamak no banho de fusão encontra-se, por norma, nos 430°C . Este valor encontra-se dentro dos limites aconselhados na bibliografia, mas encontra-se relativamente próximo do limite superior de 440°C . Assim, pretende-se testar qual o efeito nas peças se a esta temperatura fosse colocada num valor mais baixo, e se realmente compensa a utilização do valor de 430°C .

Outro parâmetro em estudo será a temperatura da resistência do bico de injeção. Por norma, a temperatura desta resistência é colocada entre os 550 e os 600°C . O objetivo primário será perceber se esta diferença de 50°C implica uma perda ou melhoria de propriedades ou se não apresenta um efeito significativo, podendo ser colocado no limite mais baixo de forma a poupar energia.

Apresentação de resultados

Recorrendo-se novamente à moldação para provetes, foram injetadas algumas amostras com as diferentes condições em estudo. Os valores dos parâmetros mais relevantes de injeção e os valores de porosidade, percentagem de mal cheios e tensão de rotura dos provetes injetados podem ser consultados na Tabela 9. Note-se que em todos os ensaios foram utilizadas pressões de 6 bar de ar comprimido, ou seja, 5,86 MPa de pressão de metal e amostras de oito a sete peças no cálculo de porosidade e três provetes para ensaios de tração.

Tabela 9 - Porosidades, percentagens de mal cheios e tensões de rotura de provetes injetados a diferentes temperaturas do metal no banho de fusão e da resistência do bico de injeção.

Peça	Código de ensaio	Pressão de ar comprimido [bar]	Temp. do metal no banho de fusão [°C]	Temp. da resistência do bico de injeção [°C]	Porosidade média [%]	Peças com mal cheios [%]	Tensão de rotura [MPa]
Proвете [2,5 mm]	AG600BN PROV60	6,0	430	600	3,41 (0,49)*	0	251 (9)*
Proвете [2,5 mm]	DG600BN PROV60	6,0	430	550	3,83 (1,37)*	0	262 (9)*
Proвете [2,5 mm]	EG600BN PROV60	6,0	415	550	3,96 (0,99)*	0	246 (15)*
Proвете [2,5 mm]	HG600BN PROV60	6,0	415	600	5,51 (1,89)*	0	246 (5)*
Proвете [1,5 mm]	AF600BN PROV60	6,0	430	600	2,69 (0,33)*	14,3	289 (3)*
Proвете [1,5 mm]	DF600BN PROV60	6,0	430	550	2,55 (0,65)*	25,0	Não medida
Proвете [1,5 mm]	EF600BN PROV60	6,0	415	550	2,69 (0,32)*	28,6	Não medida
Proвете [1,5 mm]	HF600BN PROV60	6,0	415	600	3,43 (0,24)*	28,6	Não medida

*Desvio Padrão da Amostra

Análise de resultados

De forma a sintetizar a informação contida na Tabela 9, considere-se as diferentes condições de ensaios usadas nos provetes denominadas pela primeira letra do seu código ensaios.

Em termos de enchimento, há que realçar que a menor quantidade de peças com mal cheios foi registada para as condições A, que apresenta a maior temperatura da resistência do bico de injeção e do metal no forno de fusão. As restantes condições apresentam valores similares de mal cheios. Assim,

pode-se concluir que, em termos de enchimento, utilizar temperaturas do banho e da resistência no bico de injeção elevadas em conjunto ajudam no enchimento das peças, evitando os mal cheios.

No entanto, é necessário saber, em termos de propriedades, se existem inconvenientes na utilização de temperaturas elevadas nestes elementos.

Seguidamente, é expressa no gráfico da Figura 52 a porosidade dos provetes recolhidos segundo as suas condições de ensaios.

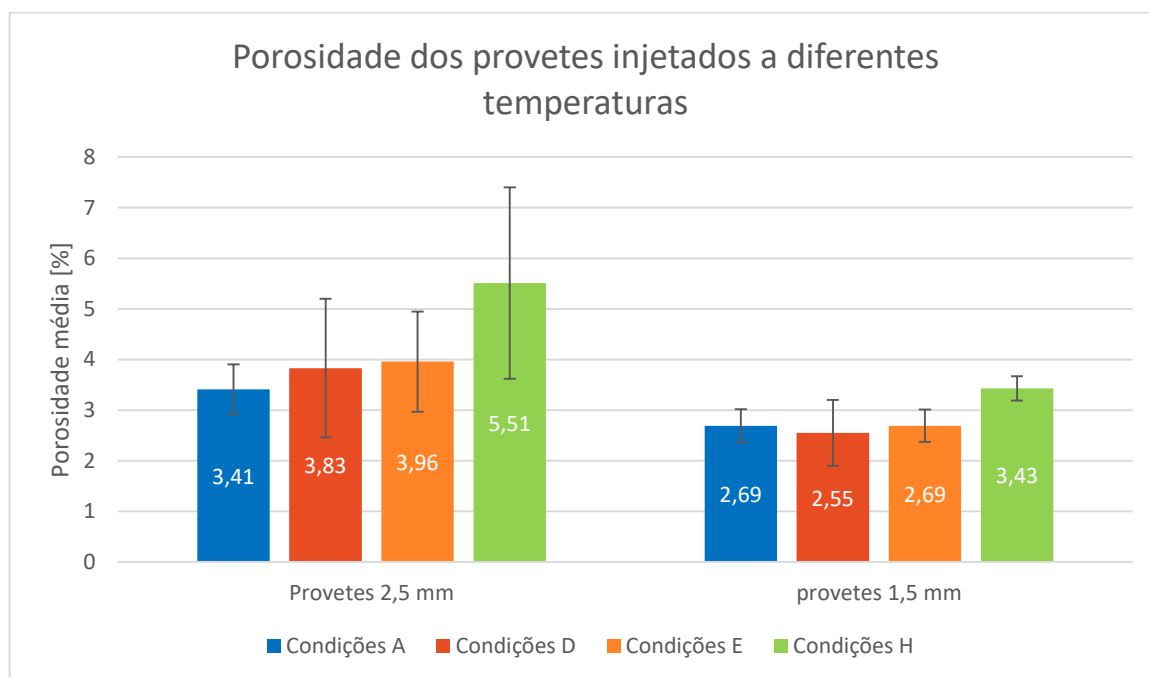


Figura 52 - Porosidades dos provetes injetados a diferentes temperaturas. Condições de ensaio presentes na Tabela 9.

Focando nos ensaios com as condições A e D, foi alterada a temperatura do bico de injeção de 600 °C para 550 °C. Conforme se pode observar, entre estes dois ensaios, nenhuma alteração significativa surgiu da mudança deste parâmetro em termos de porosidade, já que as médias obtidas encontram-se dentro dos intervalos dos desvios padrão. Assim, perante estes resultados, por um motivo de economia de energia fornecida à resistência, aconselhar-se-ia a utilização da temperatura mais baixa no bico de injeção, pois esta não aparenta aumentar a porosidade quando situada a 550 °C.

Para além disso, o bico de injeção é um elemento de grande desgaste na máquina de injeção, muito devido às temperaturas elevadas nele utilizadas, conjugadas com as pressões elevadas do processo. Assim, a utilização da temperatura de 550 °C neste elemento pode aumentar a sua longevidade e permitir poupanças na compra ou conceção de novos bicos e nos custos associados à paragem do processo de produção para a troca de componentes da máquina (Allsop e Kennedy 1982).

Focando agora nas condições A e H, a alteração provocada foi a descida da temperatura do banho de fusão de 430 °C (A) para 415 °C (H). Neste caso, tanto nos provetes de 2,5 mm de espessura como nos provetes de 1,5 mm de espessura, houve um aumento significativo da porosidade das peças com esta alteração. Este efeito poderá ser explicado pela diminuição da fluidez do metal aquando da utilização de temperaturas mais baixas no banho de fusão e pela solidificação mais rápida no metal na cavidade.

A condição E diz respeito a uma situação de utilização de temperaturas no banho de fusão e na resistência do bico no limite mais baixo dos testados. No entanto, os resultados obtidos com estas condições não correspondem ao esperado já que a porosidade obtida foi inferior à registada para as condições H. Este resultado parece não apresentar muito sentido, sendo que não se encontrou razões para este abaixamento da porosidade.

Feita a análise em termos de porosidade e enchimento, resta agora comparar os resultados para a evolução da tensão de rotura medida nos ensaios de tração. Na Figura 53 é apresentado o gráfico que compila os diferentes resultados obtidos para as diferentes condições de teste.

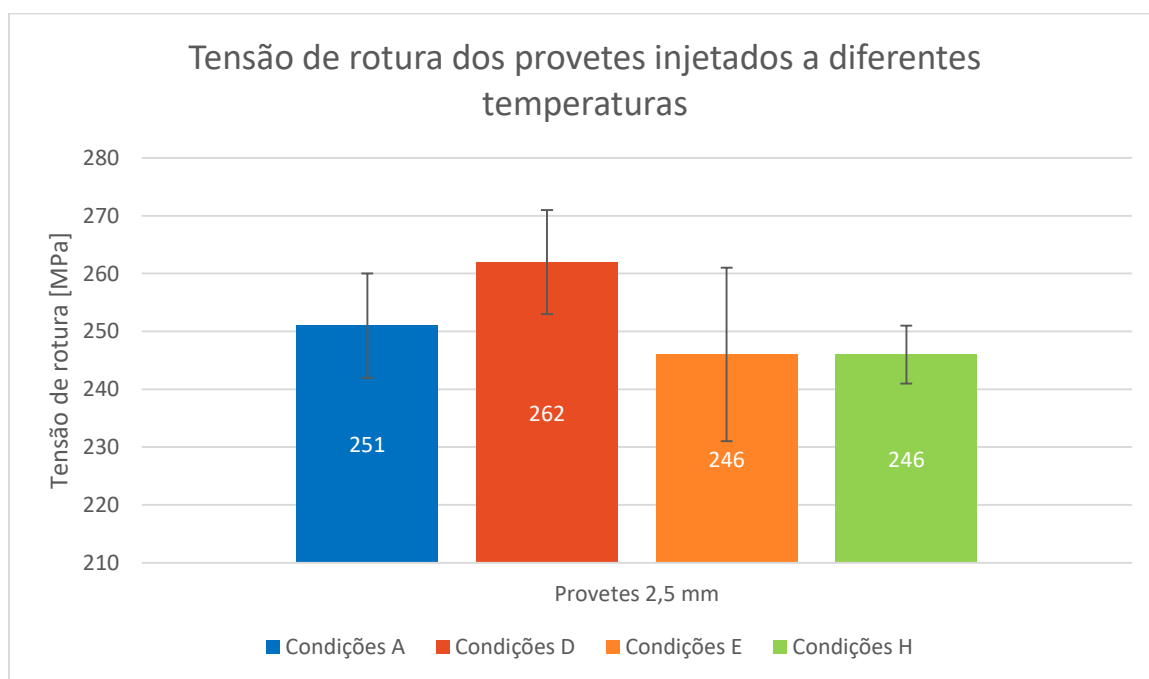


Figura 53 - Tensão de rotura dos provetes injetados a diferentes temperaturas.

Tal como no caso da modificação da pressão, a tensão de rotura determinada apresenta-se bastante próxima para as diferentes condições testadas, não sendo significativamente diferentes umas das outras, à exceção dos resultados para a condição D. Este ensaio apresenta a temperatura da resistência do bico de injeção nos 550 °C e a temperatura do banho a 430 °C, o que reforça as vantagens que poderão existir na utilização de uma temperatura mais baixa nesta resistência.

Conclusões

Nos ensaios realizados com alterações de temperaturas da resistência do bico de injeção e do metal no banho de fusão, em termos de enchimento, parece haver uma redução de peças com mal cheios quando usada uma combinação de temperaturas elevadas nestas duas variáveis.

Em termos de porosidade, a única condição que alterou significativamente as médias das amostras testadas foi a modificação da temperatura do banho de fusão de 430 °C para 415°C, aumentando-a. Assim, será aconselhável a manutenção do valor desta variável nos 430 °C. Quanto à resistência do bico de injeção, como não existiram alterações nas porosidades medidas nos provetes, sugere-se que a utilização da temperatura de 550 °C neste elemento seja benéfica, pelo menos do ponto de vista económico. Para além disso, registou-se um aumento da tensão de rotura para esta condição de injeção. As restantes condições testadas não provocaram qualquer efeito em termos de tensão de rotura.

8.4. Influência das temperaturas das moldações na porosidade das peças

As temperaturas das moldações na empresa são reguladas através de um sistema de arrefecimento a água que circula em canais presentes nas estruturas das moldações. O caudal de água é ajustado através de passadores de abertura manual. Por norma, estes não são abertos na sua totalidade, sendo a abertura dada pelo funcionário que trata da produção das máquinas durante o turno, segundo a sua experiência.

Ao contrário de outros parâmetros de injeção, a influência da temperatura das moldações na porosidade das peças não foi medida com a moldação dos provetes. Isto deve-se ao facto de estas não se encontrarem preparadas com os canais de arrefecimento. Assim, não seria possível testar várias temperaturas das cavidades, uma vez que se perderia a variável de controlo deste parâmetro.

Desta forma, recorreu-se a peças que se encontravam em produção para perceber a influência deste parâmetro de injeção na porosidade e aspeto das peças.

Note-se que a temperatura das cavidades das peças foi retirada com um pirómetro ótico apontado à cavidade da moldação das peças. Os valores foram recolhidos nas proximidades da zona do ataque à cavidade, sendo natural que esta temperatura não corresponda à totalidade da cavidade. Isto porque são constatáveis maiores temperaturas nas zonas mais próximas dos ataques, uma vez que o metal tende a arrefecer ao longo do seu trajeto na cavidade devido à condutividade térmica da moldação.

Apresentação de resultados

Foram utilizadas as moldações do *lever door handle inner*, do *lever door handle outer* e do *lever door stop* para estas medições. Os resultados médios obtidos em termos de porosidade podem ser consultados na Tabela 10. Todas as medições efetuadas estão expressas no Anexo K desta dissertação.

Tabela 10 - Porosidade média de peças injetadas a diferentes temperaturas da moldação.

Peça	Código de ensaio	Temp. da moldação [°C]	Porosidade média [%]	Peça	Código de ensaio	Temp. da moldação [°C]	Porosidade média [%]
LDHI	BNLDI40	85	3,44	LDS	BNLDS45	118	2,91
	0507_M85		(1,20)*		0505_M118		(0,75)*
LDHI	BNLDI40	102	3,39	LDHO	BNMLDO60	77	2,53
	0507_M102		(1,39)*		1307_M77		(0,35)*
LDHI	BNLDI40	120	3,66	LDHO	BNMLDO60	104	2,22
	0507_M120		(0,53)*		1307_M104		(0,26)*
LDS	BNLDS45	97	3,58	LDHO	BNMLDO60	148	2,66
	0505_M97		(1,03)*		1307_M148		(0,18%)*

*Desvio Padrão da Amostra

Discussão de resultados

Observa-se na Figura 54 o gráfico que representa a evolução da porosidade das peças com a mudança da temperatura da moldação.

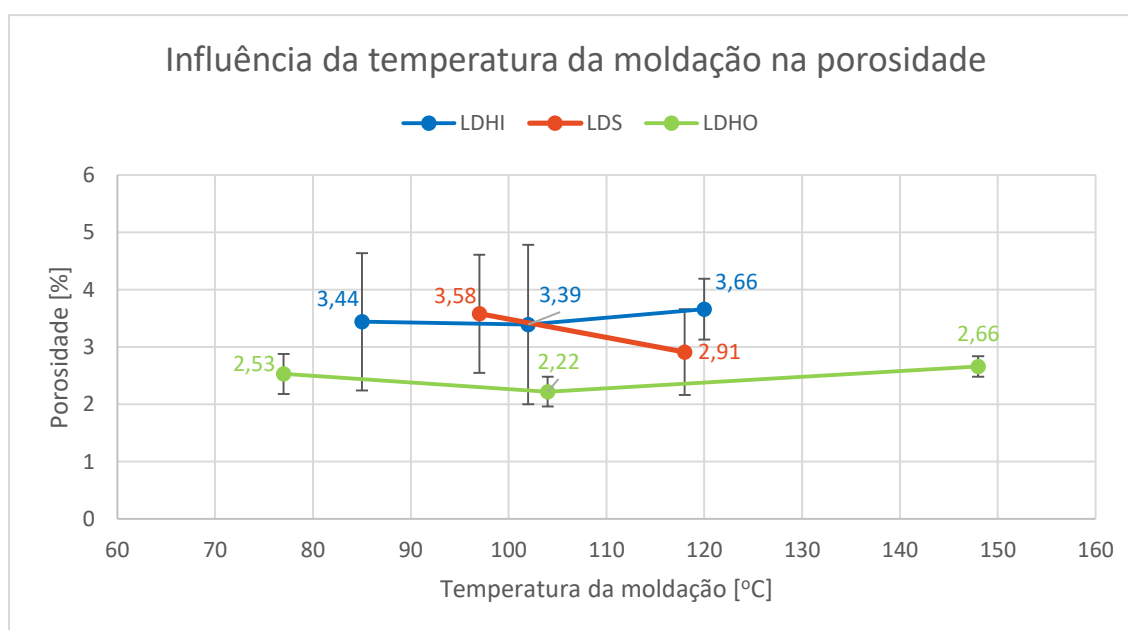


Figura 54 - Gráfico da evolução da porosidade segundo a temperatura da moldação.

Verifica-se que tanto para o *lever door handle inner* como para o *lever door Stop* existe uma grande variabilidade nas medições efetuadas. Isto indica que nenhuma das médias de porosidade medidas sejam significativamente diferentes umas das outras. Logo, através destas peças, apenas se poderia concluir que a modificação desta variável não se traduz em nenhuma modificação da sanidade das peças.

No caso da peça *lever door handle outer*, a variabilidade registada na amostragem recolhida foi menor. Apesar disso, a medição para 77 °C não é significativamente diferente das outras duas medições efetuadas. Contudo, dos 104 °C para os 148 °C, parece haver um ligeiro aumento de porosidade.

Relembra-se que de acordo com a revisão bibliográfica nesta dissertação, temperaturas de moldações baixas deveriam provocar maiores porosidades e maiores dificuldades no enchimento (ASM International 2008). Desta forma, o aumento registado de 104 °C para 148 °C não seria esperado. Para além disso, não seria de esperar que dos 104 °C para 148 °C existissem diferenças significativas e dos 77 °C para os 148 °C não houvesse diferenças. É assim possível que exista algum tipo de erro de medição de porosidades nesta série de peças, ou que tenha havido outras variáveis a influenciar os valores medidos.

Quanto ao aspeto, entre as peças LDHI não parece existir, através de uma inspeção visual, diferenças entre as amostras recolhidas para as várias temperaturas de moldação. O mesmo sucede entre as amostras recolhidas para o *lever door Stop*. No entanto, parece existir uma melhoria no acabamento da *lever door handle outer* injetada com a temperatura da moldação a 148 °C, em relação às injetadas a outras temperaturas. A gama de temperaturas recomendadas para as ligas de zinco, em termos de temperaturas de moldações, é entre os 160 °C e os 245 °C (ASM International 2008). Assim, será possível que o melhor aspeto das peças injetadas com esta temperatura das moldações se deva à proximidade dos 148 °C à gama de valores recomendados. Assim, caso seja necessário peças com melhor acabamento, o aumento da temperatura da moldação poderá ser uma solução possível para o problema. Contudo, há que ter em atenção que o aumento sucessivo das temperaturas das moldações pode trazer outros problemas como a soldagem das peças às moldações e consequente não extração das peças (ASM International 2008), problema já constatado pelos funcionários da empresa noutras ocasiões.

Porém, na empresa, o aspeto das peças nem sempre é um dos focos de atenção, uma vez que a maioria destas passa posteriormente por um processo de granalhagem que lhes dá o acabamento final e uniformiza a superfície antes de entregues ao cliente. A operação de granalhagem é, assim, por

muitas vezes, suficiente para compensar o pior aspeto com que as peças saem da máquina de injeção. Na Figura 55, pode-se observar o aspeto de uma peça por granalhar e outra granalhada.

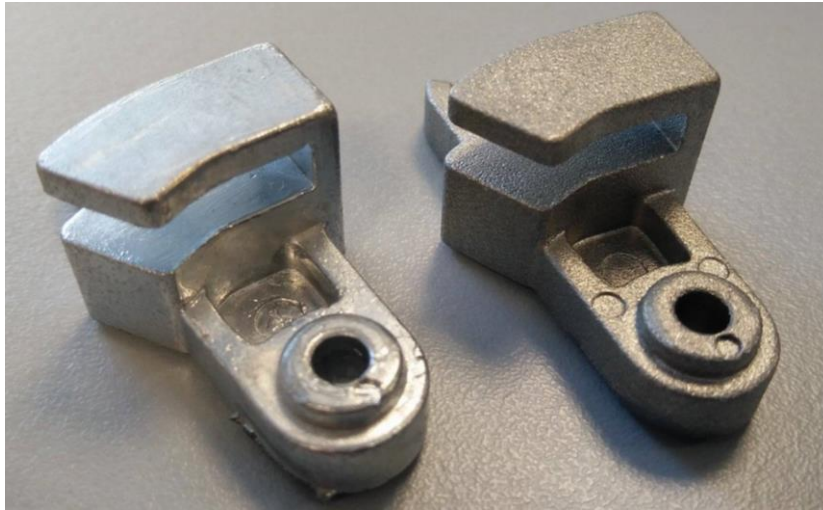


Figura 55 - Aspeto da peça LDHI à saída da máquina de injeção (à esquerda) e depois de granalhada (à direita).

Conclusões

De uma forma geral, a modificação da temperatura da moldação não provocou alterações significativas de resultados em termos de porosidades nas peças, pois as diferenças nas médias obtidas apresentam-se dentro do desvio padrão das amostras. Em termos de aspeto, parece existir uma melhoria do acabamento nas *lever door handle outer* injetadas a 148 °C, pelo que pode ser uma mais-valia, em caso de necessidade de melhores acabamentos superficiais, tentar regular esta variável para a gama de valores recomendados. Porém, seria interessante tentar injetar mais peças próximas das temperaturas de moldações recomendadas (160 a 245 °C (ASM International 2008)), de forma a confirmar o observado na LDHO.

9. Influência da espessura de parede no processo e propriedades das peças.

A injeção de provetes de diferentes espessuras proporcionou uma comparação entre o enchimento de peças mais finas e mais grossas na máquina ZM3.

Apresentação de resultados

A cada injeção na máquina ZM3, a moldação dos provetes permitia obter um provete de 2,5 mm de espessura e outro de 1,5 mm de espessura. O sistema de gitagem de cada uma destas cavidades foi dimensionado conforme o descrito no capítulo 2.2.6, sendo que apenas o volume a preencher e o tempo de enchimento recomendado variou no dimensionamento destes. Assim, verifica-se um sistema de gitagem equivalente para cada uma das cavidades.

Para averiguar a influência da espessura no enchimento e nas propriedades das peças, usar-se-ão os ensaios realizados no capítulo 8 desta dissertação.

Assim, os valores necessários para a análise de resultados neste capítulo estão representados nas Tabela 9 e 10.

Análise de resultados

Desde logo, é possível constatar que, devido à percentagem da presença de mal cheios registada nos provetes de 1,5 mm, o enchimento de espessuras mais finas é mais difícil que o enchimento de espessuras mais grossas. Em nenhum dos ensaios realizados se constatou este defeito nos provetes de 2,5 mm de espessura, enquanto, nos provetes de 1,5 mm de espessura, existiram sempre mal cheios para qualquer condição de ensaio. Houve, inclusivé, uma destas condições que não providenciou nenhum provete de 1,5 mm de espessura totalmente preenchido (condição C).

O enchimento dificultado das espessuras mais finas é justificado pelo arrefecimento do metal, que se faz das paredes das moldações para as zonas mais centrais da peça. Assim, como nos provetes menos espessos existe uma distância ao centro da peça menor, o metal solidifica mais rapidamente, entupindo as cavidades. Tal não permite o enchimento completo das peças. Este efeito pode ser contrariado por um maior sistema de gitagem que providencia menores tempos de enchimento da cavidade e ,consequentemente, uma circulação mais rápida do metal no enchimento. Também se pode utilizar um aumento da temperatura metal injetado, um isolamento das moldações ou um aumento da pressão de compactação, como já referido anteriormente, para melhorar o enchimento

das peças (Braga Jr; de Lima, Freitas, e Magalhães 2003). Para além disso, como se tem uma cavidade com dois provetes de espessuras diferente, é natural que o metal preferencialmente encha o provete mais grosso primeiro, já que os canais de gitagem são maiores para esse mesmo. Isto pode fazer com que o provete mais fino só encha na parte final da injeção, onde o metal já está mais frio e menos fluido. Assim, os mal cheios terão tendência a formar-se unicamente no provete mais fino. No entanto, esta é uma hipótese que não é possível de confirmar visualmente, pelo que se teria de fazer simulações de forma a confirmar a sua veracidade.

No que se refere à porosidade, no gráfico da Figura 56, apresenta-se a porosidade dos provetes de 2,5 mm e 1,5 mm para as diferentes condições de ensaio (ver Tabelas 9 e 10).

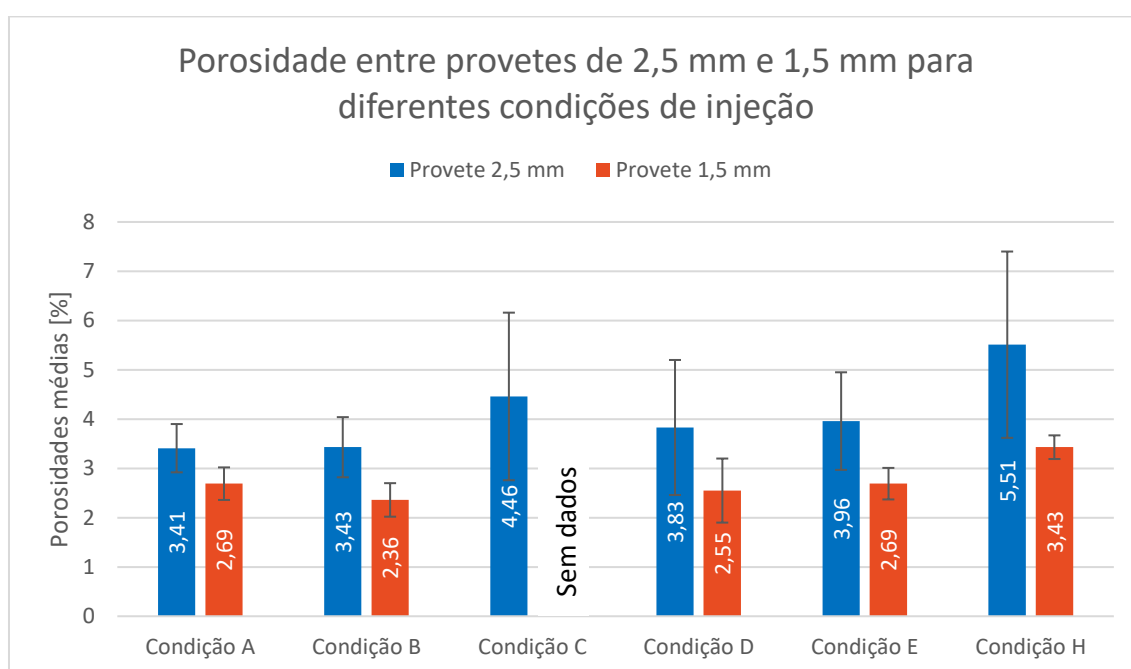


Figura 56 - Gráfico com a porosidade entre provetes de 2,5 mm e 1,5 mm de espessura para diferentes condições de injeção.

Conforme é possível visualizar, para qualquer uma das condições de ensaio, existem diferenças significativas de porosidades nos provetes de 1,5 mm de espessura, comparativamente com os de 2,5 mm de espessura. A justificação para as mais baixas porosidades nos provetes mais finos pode residir na hipótese apresentada anteriormente de o provete de 1,5 mm apenas encher na parte final da injeção, tendo todo o caudal da bomba para ele disponível. Isto significaria que este provete apresentaria um tempo de enchimento da cavidade muito baixo, o que corresponde, teoricamente, mais baixas porosidades nas peças.

Já em termos de tensão de rotura, conforme já explicado anteriormente no capítulo 8.1, apenas foram realizados ensaios de tração nos provetes de 1,5 mm para as condições A por questões de

disponibilidade. Seguidamente, apresenta-se um gráfico na Figura 57 com a variação da tensão de rotura entre os provetes de 1,5 e 2,5 mm de espessura para as condições de injeção A.

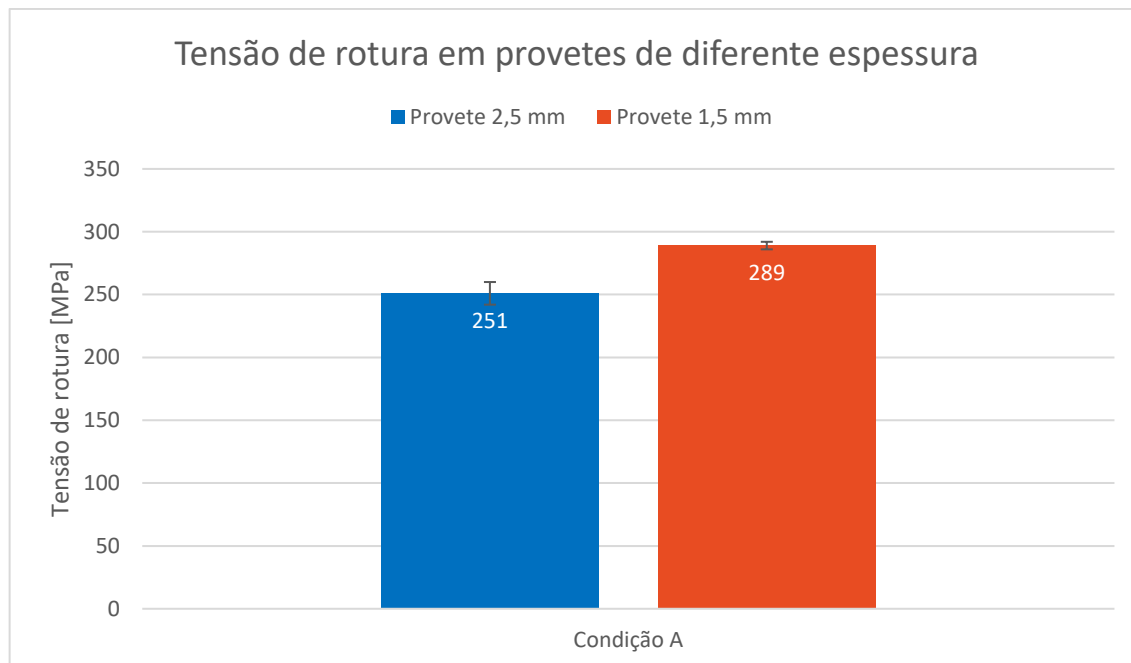


Figura 57 - Gráfico com a tensão de rotura em provetes de espessura diferente.

Perante os resultados aqui expressos, existe uma diferença significativa de propriedades nos dois provetes. Isto pode ser explicado pela menor porosidade dos provetes de 1,5 mm, como visto anteriormente, mas também será explicado pela natural melhoria da tensão de rotura em ensaios de tração com provetes mais finos, como se pode visualizar na Figura 58.

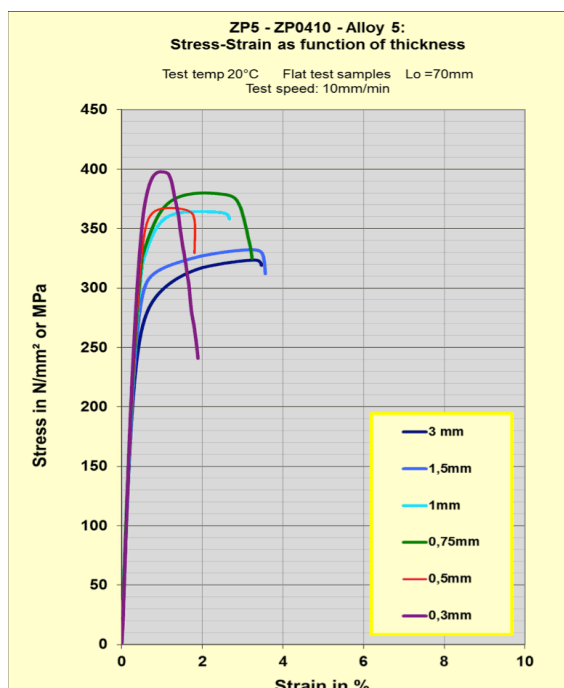


Figura 58 - Efeito da espessura nos provetes de zamak num ensaio de tração (Association 2017).

A explicação para esta melhoria poderá estar no mais fino tamanho de grão presente nos provetes mais finos, já que estes arrefecem mais rapidamente devido à sua menor espessura (Silva, Alves, e Marques 2013).

Conclusões

É possível concluir que a espessura das peças pode influenciar o enchimento, na medida em que quanto mais finas, mais difícil é o seu enchimento. No entanto, isto pode ser consequência de um enchimento seletivo da cavidade, já que pode ter acontecido que o provete de 2,5 mm tenha enchido primeiro que o de 1,5 mm de espessura, devido aos tamanhos diferentes dos canais de gitagem. Porém, esta hipótese necessita de confirmação por simulação em computador. Para além disso, constatou-se menores porosidade nos provetes mais finos que nos provetes mais grossos, o que pode ter acontecido devido ao enchimento mais tardio, mas com a total capacidade da bomba, do provete de 1,5 mm de espessura. Além do mais, obtiveram-se melhores propriedades mecânicas para os provetes de 1,5 mm de espessura.

10. Propriedades mecânicas das peças produzidas na ZM3

Neste capítulo, pretende-se comparar as propriedades mecânicas obtidas através dos provetes de ensaios injetados na ZM3 com as propriedades referidas nas normas para estas ligas.

Considerar-se-á para esta análise os valores de tensão de rotura obtidos nos ensaios de tração, mas também, apresentar-se-ão os valores obtidos para a extensão após rotura medidos através dos traços a 25 mm de distância colocados na zona de ensaio. Embora estes valores possam apresentar erros de medição que lhes confirmem um valor um pouco diferente do real, representam uma aproximação desse mesmo valor.

Apresentação de resultados

Como base para a análise das propriedades mecânicas, utilizar-se-ão os valores dos ensaios mecânicos realizados para as peças de código AG600BNPROV60, BG600BNPROV60, CG600BNPROV60, DG600BNPROV60, EG600BNPROV60 e HG600BNPROV60.

Na Tabela 11, são apresentados os valores de tensão de rotura, extensão após rotura e porosidade de cada um dos ensaios realizados. No anexo J pode-se consultar as curvas força-deslocamento recolhidas para cada um dos provetes ensaiados. Relembra-se que o deslocamento expresso nestes gráficos se refere ao deslocamento relativo das amarras da máquina de ensaio de tração.

Tabela 11 - Porosidade, tensão de rotura e extensão após rotura de todos os provetes ensaiados.

Peça	Código	Amostra	Porosidade [%]	Tensão de rotura [MPa]	Extensão após rotura [%]
Provete [2,5 mm]	AG600BNPROV60	1	3,69	263	1,3
		3	3,57	246	1,7
		4	3,30	243	1,1
Provete [2,5 mm]	BG600BNPROV60	2	3,07	257	2,3
		3	4,22	249	1,1
		7	2,88	258	2,7
Provete [2,5 mm]	CG600BNPROV60	5	3,70	253	1,9
		7	3,98	247	1,8
		8	3,98	268	1,1
Provete [2,5 mm]	DG600BNPROV60	4	3,50	265	1,4
		6	3,95	250	2,5
		8	3,12	272	0,9
Provete [2,5 mm]	EG600BNPROV60	2	4,15	265	1,5
		6	4,22	228	2,2
		7	4,21	245	1,9
Provete [2,5 mm]	HG600BNPROV60	3	4,56	249	1,9
		5	3,85	249	2,6
		7	7,07	239	1,7
Média de todas as medições				254	1,7
				(11)*	(0,5)*
Gama de resultados				272	2,7
				228	0,9

*Desvio Padrão da Amostra

Discussão de resultados

Conforme se pode retirar da tabela anterior, a média da tensão de rotura nos ensaios executados foi de 254 MPa. Este valor é bastante inferior ao referido na norma ASTM B86-09 de 328 MPa (ASTM 2009). A percentagem de redução deste valor é de 23%, sendo algo similar ao valor de tensão limite elástico referido nesta mesma norma de 228 MPa. É, assim, um decréscimo de tensão bastante significativo e que deverá ser tido em conta no projeto de peças produzidas nesta máquina. Todavia, as peças produzidas na máquina ZM3 têm como principal aplicação peças não estruturais

onde a exigência de propriedades mecânicas não será muito apertada. As principais razões para o decréscimo da tensão de rotura dos provetes, em relação ao referido na norma, devem residir na porosidade registada nos provetes, que se apresentam como zonas ocas de resistência nula, na junta fria devido ao ataque duplo utilizado e na baixa pressão de compactação disponível, já que a bomba apenas fornece 58,6 MPa de pressão de metal em vez dos 103 MPa recomendados na literatura (ASM International 2008).

Quanto à extensão após rotura, embora o seu valor possa apresentar algum erro, também se apresentou aquém dos 7% expressos na norma ASTM B86-09 (ASTM 2009). Neste caso, a redução foi de cerca de 75%. Contudo, este efeito era de esperar uma vez que, uma das principais desvantagens do processo de fundição injetada, é a baixa ductilidade das peças produzidas (Amaro 2009; de Lima, Freitas, e Magalhães 2003). Devido a esta baixa extensão após rotura, consequentemente, será de esperar que a tenacidade das peças seja mais baixa, sendo assim menos capazes de absorver energia até à rotura do material.

Conclusões

Tanto a tensão de rotura como a extensão após rotura medidas pelo ensaio de tração foram inferiores aos valores prescritos pela norma ASTM B86-09 (ASTM 2009). A redução da extensão após rotura era esperada devido à baixa ductilidade característica das peças concebidas por este processo. Já as principais razões para a redução da tensão de rotura devem residir na baixa pressão de compactação disponível, na presença de uma união de fluxos na zona útil do provete e na porosidade detetada no provete. É de salientar que, aquando do projeto de peças, deve ser tida em conta a redução verificada nas propriedades mecânicas.

11. Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

11.1. Conclusões

No âmbito do trabalho realizado na PR Injeção® acerca do tópico da fundição injetada de zamak, foi proposto o estudo das variáveis críticas do processo de injeção de zamak e o seu efeito no produto final.

Desde logo, foi possível concluir que o estudo destas variáveis não se resumia ao estudo do efeito dos parâmetros de injeção nas peças finais. O processo de conceção de ferramentas, as interações do banho de fusão com o ambiente, os componentes utilizados na máquina de injeção e a geometria das peças a conceber são também variáveis que alteram a qualidade do produto final.

Numa primeira fase, foi estudada a máquina em utilização, concluindo-se que esta apresenta falta de monitorização, não proporcionando informações sobre as velocidades de injeção e temperaturas das moldações. Para além disso, observou-se um défice de pressão de metal aplicada em relação ao recomendado de 10,3 MPa a 20,6 MPa (ASM International 2008).

No que se refere ao banho de fusão, este encontrava-se dentro das temperaturas recomendadas e, segundo a bibliografia recolhida, nenhum tratamento é naturalmente usado para estas ligas. Para além disso, na PR Injeção® não é usado qualquer retorno de sucata para o forno pelo que se pode referir que se encontra dentro do habitual para esta aplicação. As análises ao lingote da empresa também não produziram resultados discrepantes em relação ao esperado.

Em termos da utilização das bombas de injeção, a bomba antiga apresentava falta de capacidade para encher peças com maior massa, pelo que, mesmo com a redução de pressão provocada pelo aumento do diâmetro do pistão, melhorou a qualidade das peças mais pesadas.

Abordando os sistemas de gitagem, duas moldações foram concebidas de forma a analisar a influência das suas dimensões. Uma delas apresentava um ataque simples para encher uma cavidade, enquanto a outra apresentava duas peças a encher, sendo que cada uma delas possuía dois ataques. Na primeira, que produziu porta-chaves, obteve-se uma estabilização de porosidades para rácios de valores de tamanhos dos gitos reais sobre os teóricos de cerca de 1,5. Isto significa que será este o seu tamanho ideal. Já na segunda moldação, que se destinava à produção de provetes, encontraram-se bastantes problemas no seu enchimento, apenas conseguindo resultados satisfatórios para sistemas

de gitagem 500% maiores que os calculados. Devido a este grande valor de aumento, pensa-se que as escolhas feitas para a conceção dos canais de gitagem podem não ter sido as melhores, sendo, no entanto, algumas necessárias devido aos requisitos da peça. Recomenda-se, assim, a utilização de ferramentas de simulação para a conceção de gitos que possam provocar muitas perdas de carga ao fluxo de metal injetado.

No que se refere à pressão, desde logo há que relevar que esta não se encontrava dentro da gama de pressões recomendadas para esta aplicação. A força produzida pelo cilindro pneumático à pressão máxima de ar comprimido era insuficiente para elevar a pressão do metal acima dos 10,3 MPa recomendados, com qualquer uma das bombas (ASM International 2008). Para além disso, foi possível comprovar que uma maior pressão de injeção melhora o enchimento de zonas mais finas das peças e que pode ter um efeito de redução da porosidade das peças produzidas. Salienta-se ainda que foram obtidos melhores resultados nas injeções a mais altas pressões do que para pressões que possibilitassem velocidades no ataque dentro da gama recomendada. Note-se que a máquina ZM3 apenas permite, atualmente, uma fase no seu ciclo de injeção.

No que diz respeito às temperaturas do banho de fusão, da resistência do bico de injeção e das moldações, apenas a alteração das temperaturas do banho de fusão modificou a porosidade das peças injetadas. Assim, recomenda-se a utilização dos 430 °C neste parâmetro, pois foi onde se encontraram os melhores resultados. Devido à não modificação da porosidade aquando da alteração da temperatura da resistência do bico de injeção, pode-se baixar a temperatura desta para os 550 °C, de forma a poupar energia a aumentar a vida útil do componente. Nenhuma alteração foi também observada na modificação das temperaturas das moldações, excetuando o aspeto superficial da LDHO para a temperatura de 148 °C, que se apresentou ligeiramente melhor.

Em termos de propriedades mecânicas, destaque para a redução de cerca de 23% da tensão de rotura em relação às mencionadas nas normas e de 75 % da extensão após rotura.

Destaque-se ainda a maior incidência de mal cheios nos provetes de 1,5 mm, comparativamente com os provetes de 2,5 mm, o que comprova a dificuldade de enchimento das zonas mais finas das peças. Contudo, em termos comparativos, encontraram-se melhores porosidades e tensões de rotura nos provetes de 1,5 mm.

Por fim, analisando o cumprimento dos objetivos propostos para esta dissertação, há que salientar o não cumprimento da averiguação do efeito dos *vents* e *masselotes* na qualidade das peças, devido à falta de tempo para a realização de mais uma maquinação da moldação e respetivos ensaios. Os restantes objetivos foram cumpridos.

11.2. Perspetivas de trabalhos futuros

Apesar de não realizada no âmbito da presente dissertação, recomenda-se, em futuros trabalhos sobre a máquina ZM3, a análise da influência de sistemas de *venting* e *masselotes* na qualidade das peças produzidas. Esta é uma situação comum no fabrico de peças de grande porte por fundição injetada, podendo resultar em valores de porosidades significativamente diferentes dos obtidos atualmente.

A utilização de sistemas de vácuo pode ser outra das soluções para reduzir as porosidades e mal cheios das peças e que tem vindo a ser implementada em algumas empresas de injeção de peças de maior massa (Dynacast 2017). Futuramente, também se poderiam realizar trabalhos de modo a perceber se a sua inclusão poderia melhorar a qualidade do processo.

Outra questão possível de ser abordada no futuro é o enchimento da moldação dos provetes com recurso a outros sistemas de gitagem e observar o seu efeito nas peças. Poder-se-ia conceber a moldação mantendo os rácios de altura e largura do perfil trapezoidal de 1:2 e sem a zona de direcionamento de fluxo criada para esta dissertação. Para além disso, poderia ser testado um enchimento com recurso a apenas um ataque numa das cabeças, evitando, assim, a presença de uma junta fria na zona útil do provete. Deste modo, poderia ser analisada a influência deste defeito nas propriedades mecânicas das peças. Contudo, um enchimento das cavidades através de um único ataque poderá ser difícil e desadequado perante os resultados obtidos nos estudos desta dissertação.

A utilização de revestimentos do tipo PVD (*Physical Vapour Deposition*), também poderá apresentar uma melhoria do processo em termos de porosidades e acabamento, em detrimento da utilização da lubrificação atual. Estes revestimentos têm a vantagem de servir de lubrificante e isolamento à moldação e ainda reduzir a abrasão, erosão e o choque térmico da moldação e prevenir soldagem do metal injetado (Braga 2015; Prirev 2013).

Seria também interessante apurar a influência da utilização de duas pressões em vez de uma no enchimento das peças. Esta é uma prática muito comum, pelo menos em máquinas de câmara fria, onde se pode colocar uma primeira pressão de forma a obter uma velocidade nos ataques dentro dos limites recomendado, e de seguida, dar uma pressão de compactação às peças. A programação destas duas pressões é possível, sendo que a máquina ZM3, em versões anteriores de *software*, já teve esta possibilidade integrada.

Outro dado relevante que pode ser analisado é injeção de peças com uma pressão de metal dentro da gama recomendada. A bomba nova de injeção, devido ao seu diâmetro no pistão, reduziu a pressão de metal máxima disponível para 5,86 MPa contra os 10,3 MPa recomendados como mínimo

(ASM International 2008). Uma das formas de não alterar a bomba e aumentar a pressão de metal seria usar um cilindro pneumático que providenciasse mais força ou usar um sistema de alavancas com desmultiplicação que permitisse imprimir mais força, reduzindo a velocidade de atuação. Também se poderia trocar o sistema de atuação de pneumático para hidráulico que tem como característica maiores forças e mais controladas, embora seja de atuação mais lenta. Devido à PR Metal® ser produtora de máquinas de fundição injetada, seria relevante averiguar o efeito da utilização de pressões nos limites recomendados e, caso se confirmem melhorias na sua utilização, dar esta opção aos seus clientes na compra das máquinas, enaltecendo as suas vantagens.

A simulação em computador do enchimento das peças também seria uma mais-valia para a empresa, caso se comprove que esta possa fornecer resultados idênticos aos verificados experimentalmente. Existem no mercado alguns *softwares* específicos para fundição injetada onde se poderiam fazer simulações e compará-las com os resultados experimentais. As simulações poderiam melhorar os processos iterativos na conceção de ferramentas por parte da empresa e ajudar a prever a localização dos defeitos aquando da produção das peças. Os *softwares* podem ser úteis, sobretudo caso sejam necessários gitos complexos devido aos requisitos das peças (Dynacast 2017).

Por fim, refere-se a possibilidade, em casos de necessidade, de otimizar o enchimento, a porosidade, o acabamento ou propriedades mecânicas das peças, de executar uma análise *Taguchi* na seleção de parâmetros de injeção. Estas análises permitem obter a melhor combinação de parâmetros para um determinado objetivo, com a vantagem de requerer um número reduzido de experiências. O método visa a simplificação e a padronização de experimentos e a sua aplicação é fácil a nível industrial e apresenta resultados consistentes. A análise *Taguchi* visa melhorar um processo ou um produto, através da identificação e ajuste dos seus parâmetros controláveis, divididos em vários níveis. O objetivo do método é minimizar a variabilidade dos produtos finais em relação a um determinado valor ótimo, de forma a tornar a produção mais robusta a qualquer mudança que possa ocorrer nos parâmetros não controláveis (ruído) (e Castro; Viana e Neto 2013).

Referências

Allsop, D. F. e D. Kennedy. 1982. Pressure Diecasting Part 2: The technology of the casting and the die. Pergamon Press.

Alves, F. J. L. 2001. MCMII - Materiais Cerâmicos. aeFEUP.

Amaro, C. S. P. M. 2009. "Melhoria de Produtividade na Operação e Manutenção de Máquinas de Fundição Injectada". Dissertação de Mestrado, FEUP.

ASM International. 1990. ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Vol. 2.

———. 2004. ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures. Vol. 9.

———. 2008. ASM Handbook Volume 15: Casting. Vol. 15.

Association, International Zinc. 2017. "ZINC DIECASTING ALLOYS - Mechanical Properties". Acedido a 25/06/2017. <http://zinc-diecasting.ionainteractive.com/db-en/HTML/1-2.php>.

ASTM. 2009. Standard Specification for Zinc and Zinc-Aluminum (ZA) Alloy Foundry and Die Castings.

———. 2010. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.

Braga, E. M. G. F. 2015. "Otimização do Processo de Injeção de Zamak". Dissertação de Mestrado, ISEP.

Braga Jr, A. F. Defeitos em Peças Fabricadas pelo Processo de Fundição.

Brito, A. M. G. 2015. "Curvas de escoamento – Parte II: Métodos de obtenção". Acedido a 08/06/2017. <http://revistaforge.com.br/curvas-de-escoamento-parte-ii-metodos-de-obtencao/>.

Callister, Jr, William D. 2008. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. Traduzido por Sérgio Soares. sétima ed.: LTC - Livros Técnicos e Científicos SA.

CEMUP. Acedido a 26/04/2017. <http://www.cemup.up.pt/>.

Chivall, J. e Brook, D. 2004. "DoITPoMS - Ellingham Diagrams". Acedido a 26/04/2017. https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/ellingham_diagrams/printall.php.

Coniex. 2016. Acedido a 24/04/2017. <http://www.coniex.pt/pt/catalogo/go/fundicao-centrifuga-centrifugacao-injectada-injeccao/fundicao>.

- Coutinho, J. S. 2006. Ensaaios Mecânicos. [paginas.fe.up.pt: FEUP.](https://paginas.fe.up.pt/~jcouti/4-06%20ensaio%20traccao.pdf)
<https://paginas.fe.up.pt/~jcouti/4-06%20ensaio%20traccao.pdf>.
- Cunha, F. G. C. Aula 15: Princípio de Arquimedes. Apontamentos.
- de Castro, P. N. D. 2013. "Analisar e Estabilizar o Processo de Fundição Injetada de Alumínio para Minimizar a Rejeição no Produto na STA – Sociedade Transformadora de Alumínios". Dissertação de Mestrado, FEUP.
- de Lima, A. R. M. C. S., W. A. Freitas e P. J. M. Magalhães. 2003. Processos de vazamento em moldações permanentes.
- Dubay, R. e L. Winkler. 2005. Correctly Applying Vacuum Technology. www.diecasting.org/dce.
- Dynacast. 2017. "Porosity". Última atualização 21/06/2017. Acedido a 26/06/2017.
<https://www.dynacast.com/porosity>.
- e Castro, P. M. M. Método de taguchi: controlo de qualidade com recurso não convencional ao desenho estatístico de experiências (doe). Apontamentos.
- Eastern Alloys Inc. 2012. "Classification of Zinc Die Casting Defects". Acedido a 24/04/2017.
<https://www.eazall.com/classification-of-zinc-die-casting-defects>.
- FCTUC e FEUP. 2007. "Portal de Laboratórios Virtuais de Processos Químico - Termodinâmica Quimica". Acedido a 26/04/2017.
http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=217&Itemid=382.
- Ferreira, P. J. S. 2006. "Optimização do processo de fundição injetada através da minimização do aprisionamento de ar na primeira fase do ciclo de injeção". Dissertação de Mestrado, FEUP.
- CES EduPack 2016 16.1.22.
- Grupo PR. 2017. Corporate Presentation Grupo PR.
- Höök, T. HPDC runner and gating system design. Manual.
- Magalhães, A. B. 2006. A Fusão do Metais.
- Marbo. 2016. "Products for die casting aluminium, magnesium and zinc alloys". Acedido a 27/06/2017. <http://www.gruppomarbo.com/en/applications/die-casting/>.
- NADCA. 2006. Gattiiing Manual.
- Neto, R. J. L. 2007. Apontamentos de Processos de Fabrico II: Defeitos. Apontamentos.

Niu, X. P., B. H. Hu, I. Pinwill e H. Li. 2000. "Vacuum assisted high pressure die casting of aluminium alloys". Journal of Materials Processing Technology no. 105 (1–2):119-127. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013600005458>.

Pedreño, R. Z. 2005. "Estudio Experimental de la Formación de Porosidad por Atrapamiento de Aire durante la Etapa Lenta de Inyección en Máquinas de Fundición a Alta Presión". Tese de Doutoramento, Universidad Politécnica de Cartagena.

Prirev. 2013. "Nossos Revestimentos". Acedido a 26/06/2017. <http://www.prirev.com/pt/revestimentos/pvd-funcional>.

Ramnath, B. Vijaya, C. Elanchezhian, Vishal Chandrasekhar, A. Arun Kumar, S. Mohamed Asif, G. Riyaz Mohamed, D. Vinodh Raj e C. Suresh Kumar. 2014. "Analysis and Optimization of Gating System for Commutator End Bracket". Procedia Materials Science no. 6:1312-1328. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211812814004751>.

Silva, D. H. 2016. "Projeto de um forno à resistência elétrica para fundição de alumínio". Monografia, UNIVATES.

Silva, L., F. Alves e A. Marques. 2013. Materiais de Construção. Porto: Publindústria.

Soares, G. A. 2000. Fundição: Mercado, Processos e Metalurgia.

Vac Aero. 2008. Acedido a 26/04/2017. <https://vacaero.com/wp-content/uploads/2008/05/vapour-pressure-curves-for-.gif>.

VDS. 2008. Acedido a 24/04/2017. <http://www.vdssa.ch/images/content/chillvents.jpg>.

Viana, D. J. e A. F. Neto. 2013. "Otimização do processo de fundição sob pressão aplicando o método de taguchi". Revista Produção Online no. 13 (4):1435 -1465.

Wang, Laihua, Peter Turnley e Gary Savage. 2011. "Gas content in high pressure die castings". Journal of Materials Processing Technology no. 211 (9):1510-1515. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013611001014>.

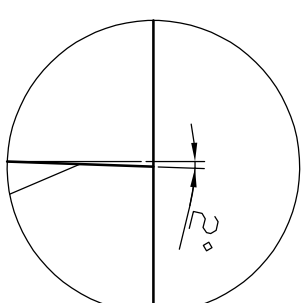
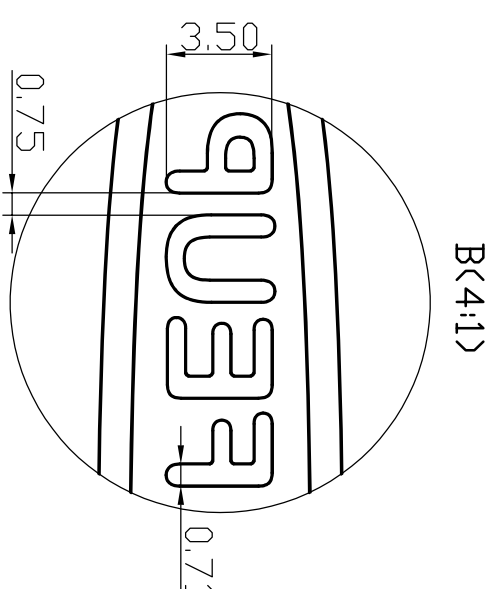
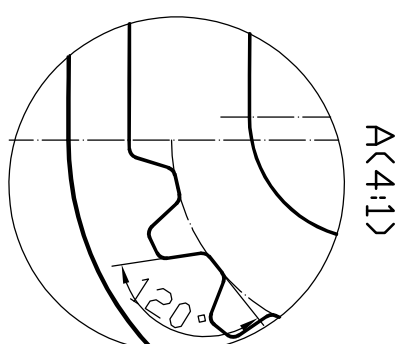
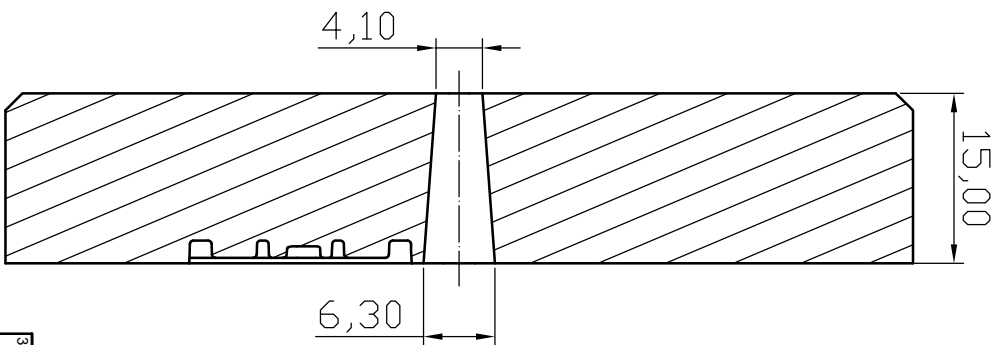
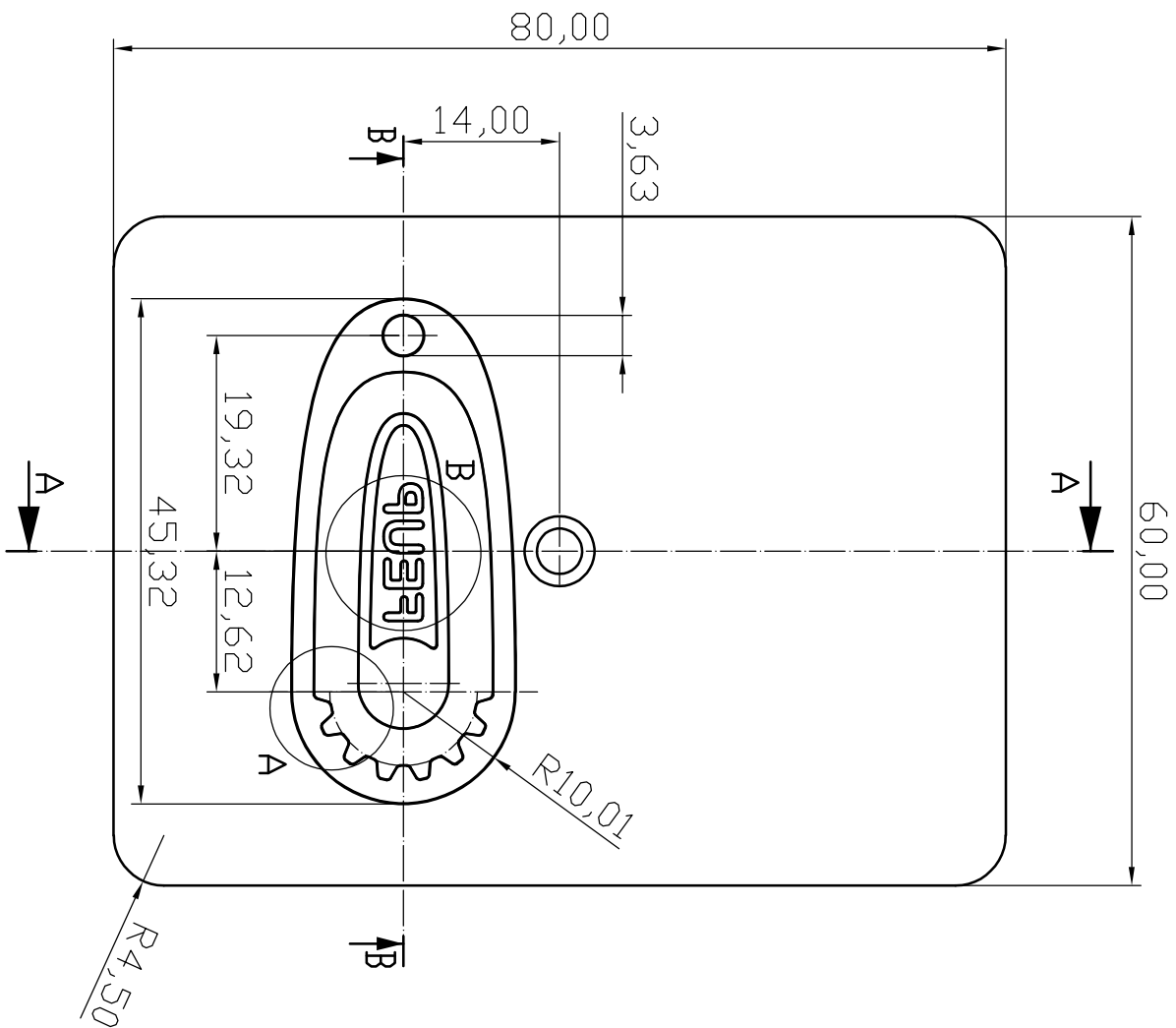
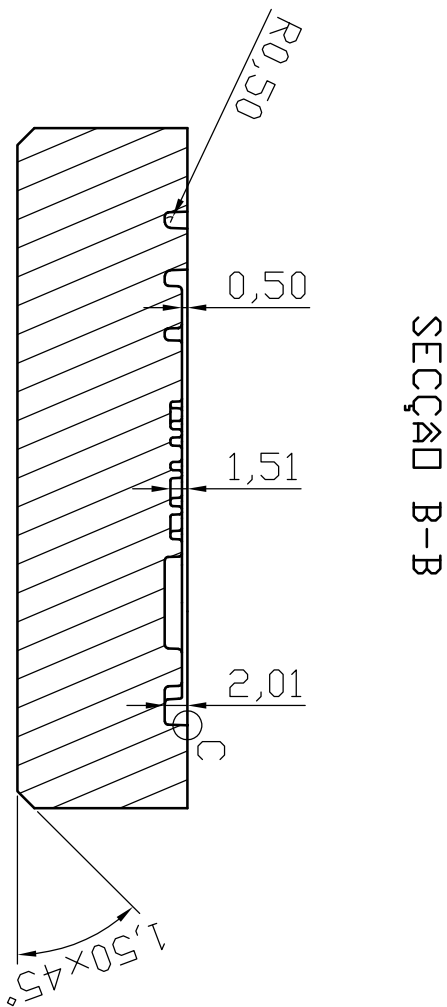
Anexo A: Procedimento experimental da medição de porosidades por princípio de Arquimedes

Etapa	Fotografias / equações	Descrição	Observações
1		Amarração de fio à peça e criação de argola para pendurar a amostra na balança.	
2		Pesagem da amostra seca na balança, com o fio amarrado (W_d).	▪ A amostra não deve entrar em contacto com a base da balança
3		Pesagem da amostra imersa em água destilada na balança, com o fio amarrado (W_D).	▪ A amostra não deve entrar em contacto com a base ou paredes do recipiente usado. ▪ Fio não deve entrar em contacto com o recipiente também. ▪ Deve-se retirar o máximo de bolha de ar das cavidades, furos e paredes das peças
4		Secagem da superfície da amostra com pano ou papel	▪ Deve ser retirada a água presente nos furos e cavidades da peça

5		Pesagem da amostra molhada na balança, com o fio amarrado (W_w) ▪ A amostra não deve entrar em contacto com a base da balança
6		Pesagem do fio na balança sem a amostra (W_s)
7		Medição da temperatura da água destilada
8	$\rho_{corpo} = \frac{W_D - W_s}{W_w - W_i} * \rho_f$	Cálculo da massa volúmica da peça (ρ_{corpo}) com recurso à massa volúmica da água destilada à temperatura medida e das quatro medições de massa realizadas ▪ Atenção à colocação de unidades consistentes na fórmula apresentada
9	$V_{Poros} = (W_D - W_s) * \left[\frac{1}{\rho_{corpo}} - \frac{1}{\rho_{teo\ material}} \right]$	Cálculo do volume de poros com recurso ao ρ_{corpo} calculado na etapa 8 e à massa volúmica teórica do material ($\rho_{teo\ material}$). ▪ Atenção à colocação de unidades consistentes na fórmula apresentada
10	$Porosidade [\%] = \frac{V_{Poros}}{(W_D - W_s) / \rho_{corpo}}$	Cálculo da porosidade [%] ▪ Atenção à colocação de unidades consistentes na fórmula apresentada

Nota para a utilização nesta dissertação de uma balança de precisão 0,0001 g

Anexo B: Desenhos técnicos dos postigos móveis e fixos para porta-chaves e provetes



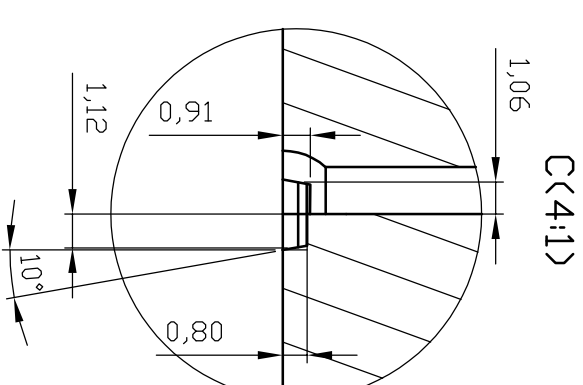
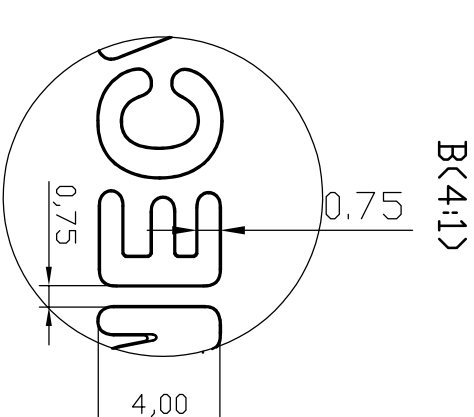
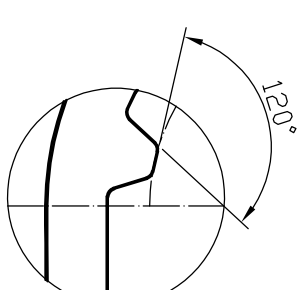
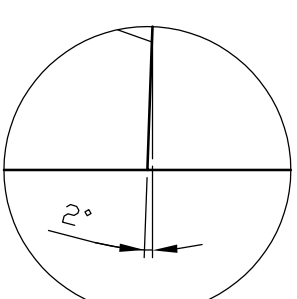
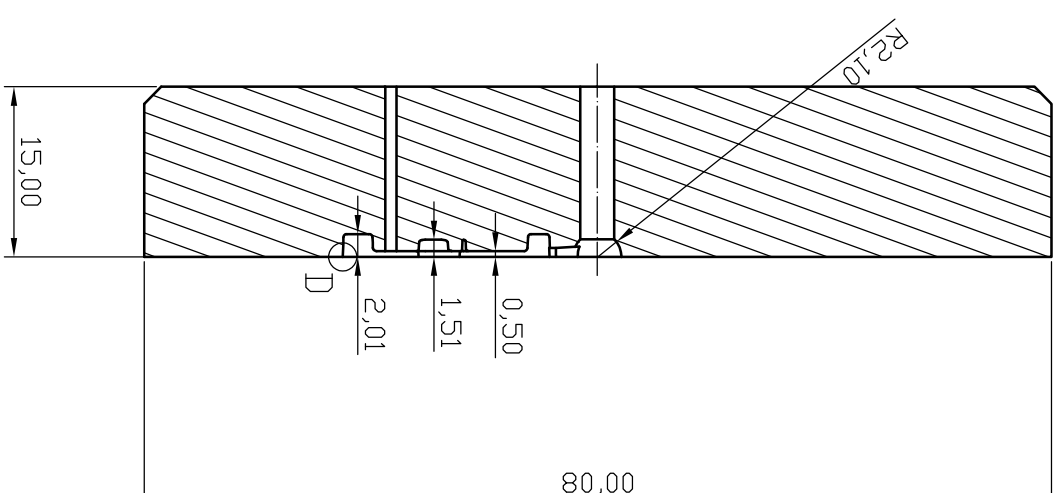
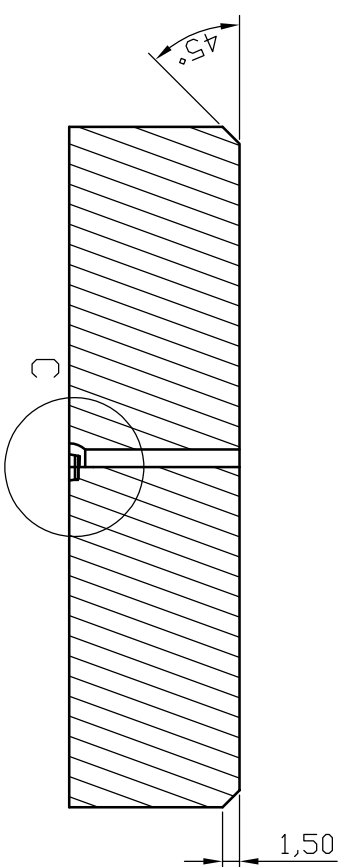
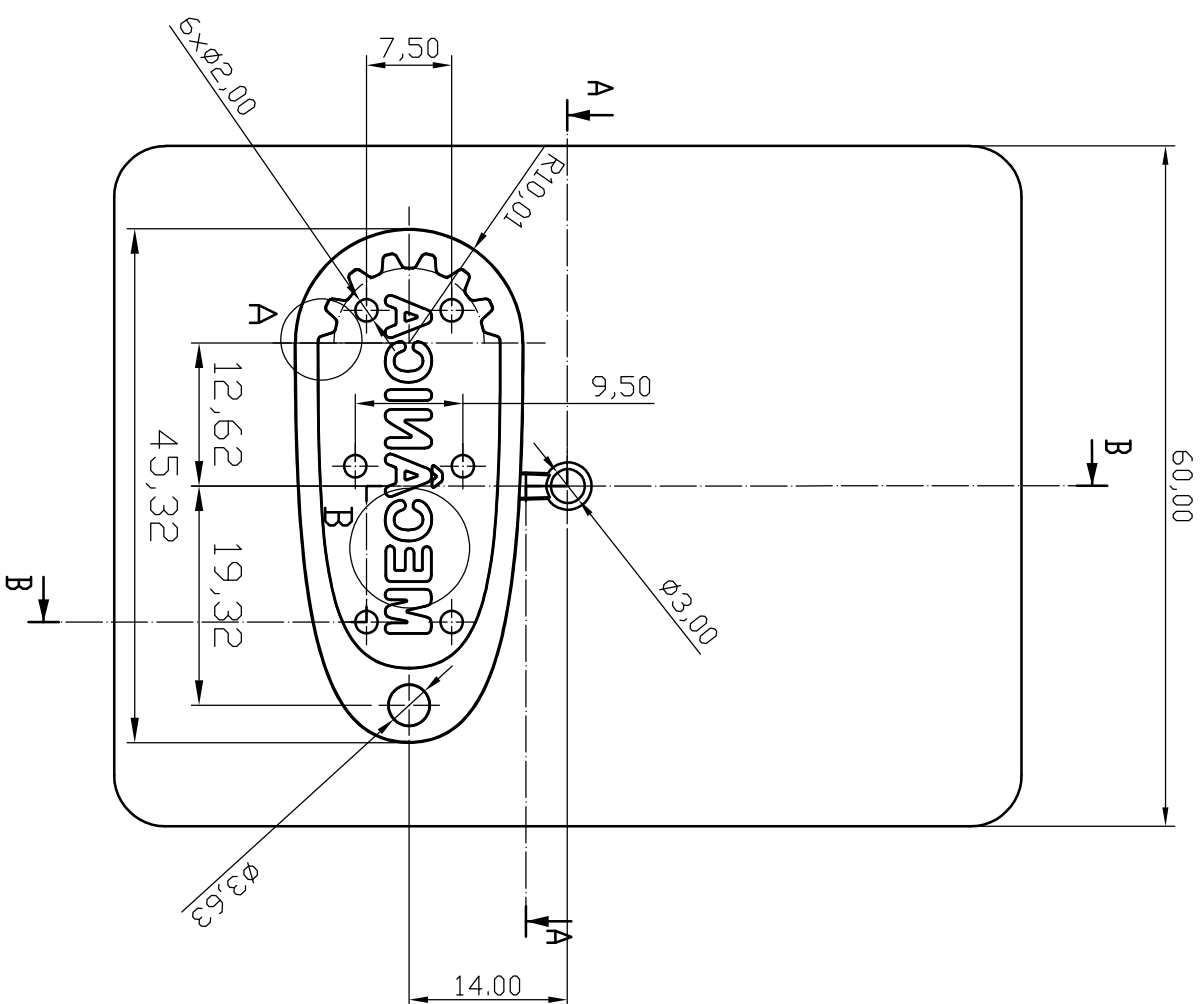
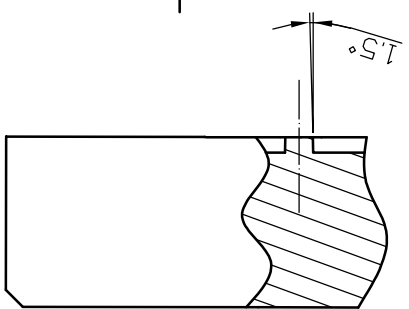
Ângulo de saída: 2°

Overall Dimensions:			
Client	FEUP	Qty:	1
Scale:	1,5 : 1	Angular:	± 1°
Surface Finishing:	Linear:	± 0,1	
Thread:	H7/g6		
Sheet Size:	A3		
228 Grupo PR			

Draw:	J. Ferreira	Denomination:	Moldação Fixa Porta-chaves
Date:	23/03/2017	Assembly:	Moldação Porta-chaves
Approved:		Sub-Assembly:	
Date:		Heat Treatment:	

3D dimension:	
Group:	

This drawing is the property of Grupo PR. All rights reserved. It is forbidden to copy or let to third parties without our written consent.

 $A(4:1)$ $B(4;1)$

C<4:1

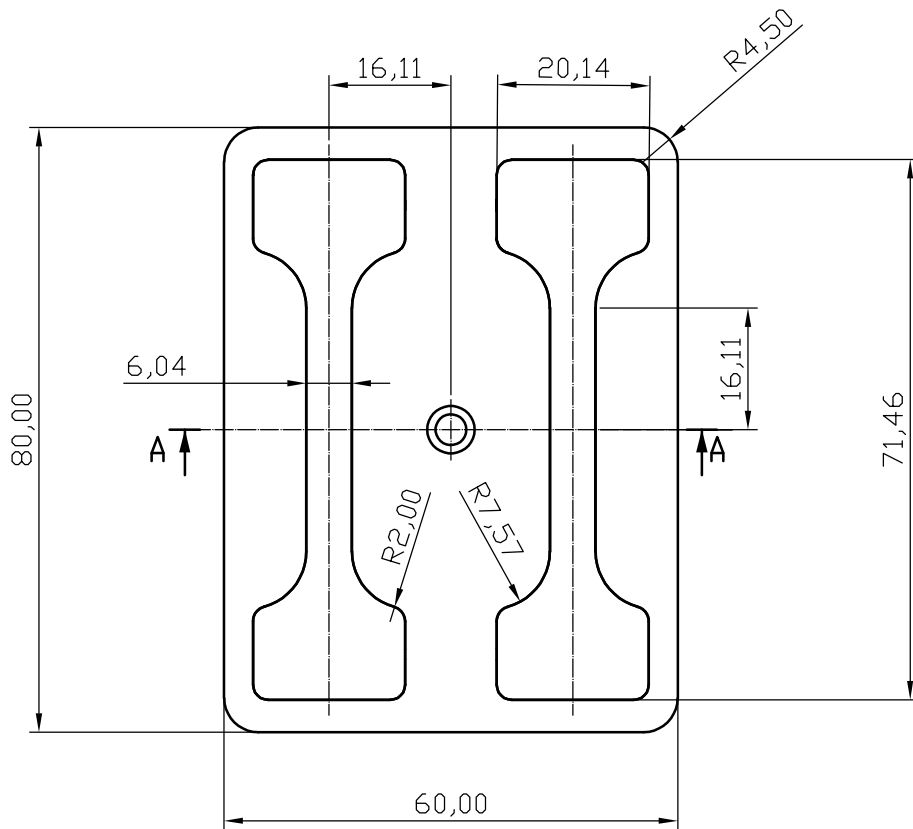
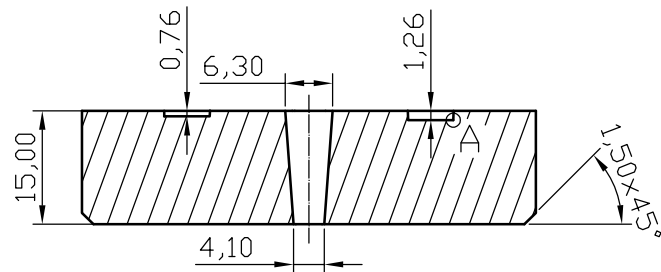
Ângulos de saída: 2°

Overall Dimension

3Dimension:			
Draw:	J. Ferreira	Denomination:	Moldação Móvel Porta-chaves
Date:	23/03/2017	Assembly:	Moldação Porta-chaves
Approved:		Material:	
Date:		Heat Treatment:	
Sub-Assembly:		Surface Finishing:	
This drawing is the property of Grupo PR. All rights reserved. It is forbidden to copy or let to third parties without our written consent.			
Grupo		Client:	FEUP
Sheet Size: A3		Work N.º:	
Thread: H7/g6		Qty:	1
		Self:	1,5 : 1
		Angular:	± 1°
		Linear:	± 0,1

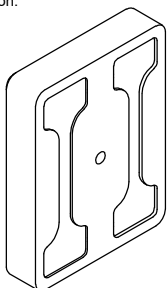
A(15:1)

Corte A-A



ângulo de saída: 1°

3Dimension:



Draw:
J. Ferreira

Date:
23/03/2017

Approved:

Date:

Grupo

PR

Denomination:

Moldação fixa provetes

Assembly:

Moldação Provetes

Sub-Assembly:

Overall Dimensions:

Drawing nº/ Level:

Client:

Qty:

FEUP

1

Scale:

1 : 1

Material:

Werk Nº:

Angular:

± 1°

Heat Treatment:

Surface Finishing:

Linear:

± 0,1



Sheet Size:

Thread:

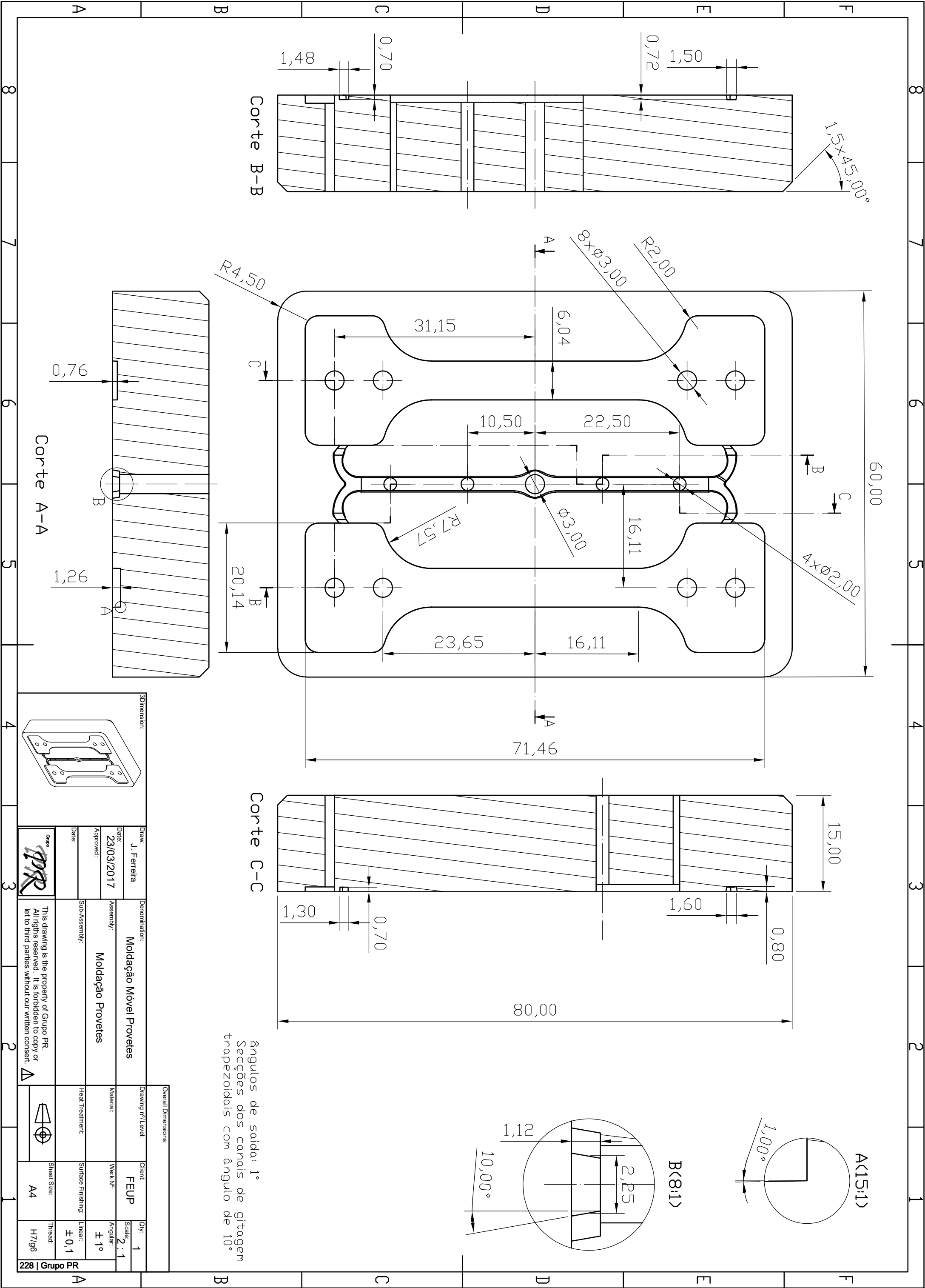
A4

H7/g6

This drawing is the property of Grupo PR.
All rights reserved. It is forbidden to copy or
let to third parties without our written consent.



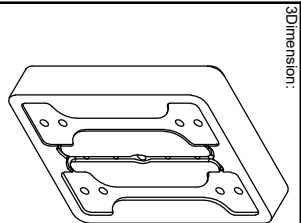
228 | Grupo PR



Overall Dimensions:			
Client:	FEUP	Qty:	1
Drawing n°/Level:		Scale:	2 : 1
Denomination:	Moldação Móvel Provetes	Material:	
Assembly:	Moldação Provetes	Work N°:	
Sub-Assembly:		Surface Finishing:	Linear: ± 0,1
Heat Treatment:		Thread:	H7/g6
Sheet Size:	A4		

228 | Grupo PR

Draw:	J. Ferreira
Date:	23/03/2017
Approved:	
Date:	



Corte A-A

Corte C-C

Corte B-B

Ângulos de saída: 1°
Secções dos canais de gitação
trapezoidais com ângulo de 10°

Anexo C: Porosidades medidas para o estudo inicial do processo na

ZM3

Ensaio: Inicial LDI		Código: BALDI600705						
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5		
	Wd [g]	11,7064	11,5700	11,6879	11,6849	11,6573		Pressão 1 6,0 bar
	Wi [g]	9,8471	9,7563	9,8114	9,8416	9,8347		t enchi. 1 0,70 s
	Ww [g]	11,7147	11,5785	11,6997	11,6869	11,6629		Pressão 2 6,0 bar
	Ws [g]	0,0319	0,0315	0,0315	0,0294	0,0295		t enchi. 2 0,01 s
	p corpo [g/cm³]	6,2398	6,3208	6,1618	6,3049	6,3488		t arrefec. 0,50 s
	V poros [cm³]	0,1285	0,1033	0,1519	0,1090	0,0960		t sopro 0,40 s
	% poros	6,87%	5,66%	8,03%	5,90%	5,24%		
	Média p corpo	6,2752		Média % poros	6,34%		TH2O [°C]	19,5
	DesvPad p corpo	0,0671		DesvPad % poros	1,00%		pH2O [g/cm³]	0,9982

Pressão 1	6,0 bar
t enchi. 1	0,70 s
Pressão 2	6,0 bar
t enchi. 2	0,01 s
t arrefec.	0,50 s
t sopro	0,40 s

Ensaio: Inicial LDS

Código: BALDS600605

Prin. Aquimedes [poros]

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	
Wd [g]	12,9843	12,4848	13,0361	13,0299	13,0038	
Wi [g]	10,9768	10,5214	11,0497	11,0686	11,0122	
Ww [g]	12,9847	12,4891	13,0377	13,0306	13,0049	
Ws [g]	0,0276	0,0340	0,0273	0,0276	0,0267	
p corpo [g/cm³]	6,4412	6,3118	6,5273	6,6151	6,5006	
V poros [cm³]	0,0777	0,1143	0,0514	0,0249	0,0594	
% poros	3,86%	5,79%	2,58%	1,27%	2,98%	

Pressão 1	6,0 bar
t enchi. 1	0,60 s
Pressão 2	6,0 bar
t enchi. 2	0,01 s
t arrefec.	0,50 s
t sopra	0,40 s

Média p corpo	6,4792	Média % poros	3,30%	TH2O [°C]	19,5
DesvPad p corpo	0,1007	DesvPad % poros	1,50%	pH2O [g/cm³]	0,9982

Pressão 1	6,0 bar
t enchi. 1	0,60 s
Pressão 2	6,0 bar
t enchi. 2	0,01 s
t arrefec.	0,50 s
t sopro	0,40 s

Ensaio: Inicial LDO		Código: BALDO601106							
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5			
	Wd [g]	17,655	17,5584	17,7268	16,9972	17,7012		Pressão 1	6,0 bar
	Wi [g]	14,8833	14,7366	14,9132	14,3292	14,7573		t enchi. 1	0,90 s
	Ww [g]	17,685	17,5693	17,7469	17,006	17,7083		Pressão 2	6,0 bar
	Ws [g]	0,0226	0,0304	0,0383	0,0276	0,0268		t enchi. 2	0,20 s
	p corpo [g/cm³]	6,2821	6,1766	6,2310	6,3281	5,9785		t arrefec.	0,60 s
	V poros [cm³]	0,1751	0,2217	0,1987	0,1489	0,3184		t sopra	0,60 s
	% poros	6,24%	7,81%	7,00%	5,55%	10,77%			
	Média p corpo	6,1993		Média % poros	7,47%			TH2O [°C]	19,5
	DesvPad p corpo	0,1214		DesvPad % poros	1,81%			pH2O [g/cm³]	0,9982

Pressão 1	6,0 bar
t enchi. 1	0,90 s
Pressão 2	6,0 bar
t enchi. 2	0,20 s
t arrefec.	0,60 s
t sopro	0,60 s

Ensaio: Inicial PY		Código: BAPY600913					
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	
	Wd [g]	26,8658	26,9586	27,1905	26,8957	26,7787	
	Wi [g]	21,7771	21,83	22,0934	21,8027	21,68	
	Ww [g]	26,8683	26,9636	27,1936	26,8682	26,7625	
	Ws [g]	0,0359	0,0343	0,0354	0,0391	0,0354	
	p corpo [g/cm³]	5,2604	5,2353	5,3147	5,2923	5,2524	
	V poros [cm³]	1,0959	1,1243	1,0564	1,0662	1,1001	
	% poros	21,49%	21,86%	20,68%	21,01%	21,61%	
	Média p corpo	5,2710	Média % poros		21,33%	TH2O [°C]	19,5
	DesvPad p corpo	0,0286	DesvPad % poros		0,43%	pH2O [g/cm³]	0,9982

Pressão 1	6,0 bar
t enchi. 1	0,90 s
Pressão 2	6,0 Bar
t enchi. 2	0,01 s
t arrefec.	1,30 s
t sopro	0,50 s

Anexo D: Porosidades medidas para o estudo do efeito da modificação da bomba de injeção no produto final.

Ensaio: Bomba Nova LDHI		Código: BNLDI400507					
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
	Wd [g]	11,4683	11,4893	11,4348	11,5037	11,5143	11,4871
	Wi [g]	9,7017	9,6357	9,6485	9,7384	9,7670	9,7190
	Ww [g]	11,5018	11,5046	11,4562	11,5476	11,5311	11,5070
	Ws [g]	0,0242	0,0242	0,0242	0,0242	0,0205	0,0205
	p corpo [g/cm ³]	6,3410	6,1187	6,2958	6,3286	6,4985	6,3964
	V poros [cm ³]	0,0967	0,1626	0,1093	0,1006	0,0532	0,0812
	% poros	5,36%	8,68%	6,03%	5,54%	3,01%	4,53%
	Média p corpo	6,3298	Média % poros		5,53%	TH2O [°C]	23,5
	DesvPad p corpo	0,1145	DesvPad % poros		1,71%	pH2O [g/cm ³]	0,9974
						Pressão	4,0 bar
						t enchim.	0,50 s
						t arrefec.	0,70 s
						t sopro	0,30 s
						T bico	600 °C
						T banho	430 °C

Ensaio: Bomba Nova LDS		Código: BNLDS450405					
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
	Wd [g]	12,5984	12,5719	12,6373	12,6061	12,5981	12,5876
	Wi [g]	10,6427	10,6096	10,6922	10,6287	10,6185	10,6180
	Ww [g]	12,6200	12,5843	12,6506	12,6239	12,6062	12,6018
	Ws [g]	0,0208	0,0286	0,0286	0,0235	0,0233	0,0234
	p corpo [g/cm ³]	6,3445	6,3355	6,4215	6,2900	6,3099	6,3169
	V poros [cm ³]	0,1052	0,1077	0,0816	0,1224	0,1160	0,1137
	% poros	5,31%	5,44%	4,16%	6,12%	5,82%	5,72%
	Média p corpo	6,3364	Média % poros		5,43%	TH2O [°C]	23,5
	DesvPad p corpo	0,0419	DesvPad % poros		0,63%	pH2O [g/cm ³]	0,9974
						Pressão	4,5 bar
						t enchim.	0,4 s
						t arrefec.	0,5 s
						t sopro	0,3 s
						T bico	600 °C
						T banho	430 °C

Ensaio: Bomba Nova LDHO		Código: BNLD0500907					
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
	Wd [g]	17,7730	17,7685	17,7666	17,7872	17,8258	17,8121
	Wi [g]	15,0518	15,0679	15,0608	15,0776	15,1156	15,1072
	Ww [g]	17,8112	17,8357	17,8048	17,8270	17,8433	17,8577
	Ws [g]	0,0235	0,0236	0,0234	0,0235	0,0239	0,0237
	p corpo [g/cm ³]	6,4157	6,3945	6,4494	6,4441	6,5094	6,4505
	V poros [cm ³]	0,1174	0,1265	0,1029	0,1053	0,0778	0,1027
	% poros	4,24%	4,56%	3,74%	3,82%	2,85%	3,72%
	Média p corpo	6,4439	Média % poros		3,82%	TH2O [°C]	23,5
	DesvPad p corpo	0,0356	DesvPad % poros		0,53%	pH2O [g/cm ³]	0,9974
						Pressão	5,0 bar
						t enchim.	0,85 s
						t arrefec.	0,65 s
						t sopro	0,50 s
						T bico	600 °C
						T banho	430 °C

Ensaio: Bomba Nova PY 3,0 Código: BNPY300912									
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6		
	Wd [g]	31,6739	31,4365	31,5434	32,4291	32,8888	32,2658	Pressão	3,0 bar
	Wi [g]	26,5728	26,3355	26,4550	27,3227	27,6993	27,1599	t enchim.	0,90 s
	Ww [g]	31,6780	31,4390	31,5690	32,4495	32,8956	32,3010	t arrefec.	1,20 s
	Ws [g]	0,0294	0,0258	0,0358	0,0348	0,0334	0,0334	t sopro	0,50 s
	p corpo [g/cm ³]	6,1830	6,1394	6,1456	6,3028	6,3070	6,2539	T bico	600 °C
	V poros [cm ³]	0,3949	0,4281	0,4242	0,3047	0,3055	0,3432	T banho	430 °C
	% poros	7,72%	8,37%	8,27%	5,93%	5,87%	6,66%	T mold*	91 °C
	Média p corpo	6,2220			Média % poros	7,14%		TH ₂ O [°C]	23
	DesvPad p corpo	0,0695			DesvPad % poros	1,04%		pH ₂ O [g/cm ³]	0,9975

Ensaio: Bomba Nova PY 4,5 Código: BNPY450912									
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6		
	Wd [g]	31,7968	31,7187	31,8954	31,8367	31,7448	31,9384	Pressão	4,5 bar
	Wi [g]	26,6999	26,6189	26,7984	26,7345	26,6583	26,8378	t enchim.	0,90 s
	Ww [g]	31,8059	31,7226	31,9023	31,8411	31,7512	31,9441	t arrefec.	1,20 s
	Ws [g]	0,0356	0,0356	0,0356	0,0321	0,0346	0,0288	t sopro	0,50 s
	p corpo [g/cm ³]	6,2048	6,1923	6,2266	6,2126	6,2108	6,2334	T bico	600 °C
	V poros [cm ³]	0,3783	0,3877	0,3615	0,3724	0,3728	0,3565	T banho	430 °C
	% poros	7,39%	7,58%	7,07%	7,28%	7,30%	6,96%	T mold*	83 °C
	Média p corpo	6,2134			Média % poros	7,26%		TH ₂ O [°C]	23
	DesvPad p corpo	0,0135			DesvPad % poros	0,20%		pH ₂ O [g/cm ³]	0,9975

Ensaio: Bomba Nova PY 6,0 Código: BNPY600912									
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6		
	Wd [g]	32,5544	32,4862	32,5595	32,3963	32,6160	32,4387	Pressão	6,0 bar
	Wi [g]	27,4480	27,3842	27,3973	27,2957	27,5175	27,3312	t enchim.	0,90 s
	Ww [g]	32,5693	32,5002	32,5773	32,4006	32,6208	32,4411	t arrefec.	1,20 s
	Ws [g]	0,0346	0,0326	0,0214	0,0279	0,0266	0,0338	t sopro	0,50 s
	p corpo [g/cm ³]	6,3340	6,3277	6,2658	6,3248	6,3700	6,3257	T bico	600 °C
	V poros [cm ³]	0,2804	0,2850	0,3365	0,2866	0,2520	0,2862	T banho	430 °C
	% poros	5,46%	5,56%	6,48%	5,60%	4,93%	5,59%	T mold*	91 °C
	Média p corpo	6,3247			Média % poros	5,60%		TH ₂ O [°C]	23
	DesvPad p corpo	0,0306			DesvPad % poros	0,46%		pH ₂ O [g/cm ³]	0,9975

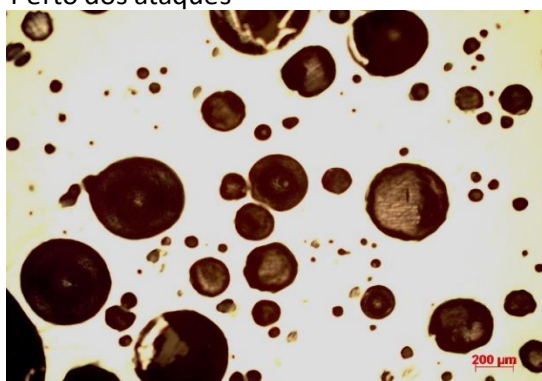
* Temperatura da cavidade da moldação inferior (ou fixa) na abertura do último ciclo de injeção de 6 peças. Temperatura da moldação móvel não registada devido às dificuldades de acesso. Temperatura medida por pirómetro ótico com emissividade de 0,95.

Anexo E: Análises metalográficas de cortes na porca yammi

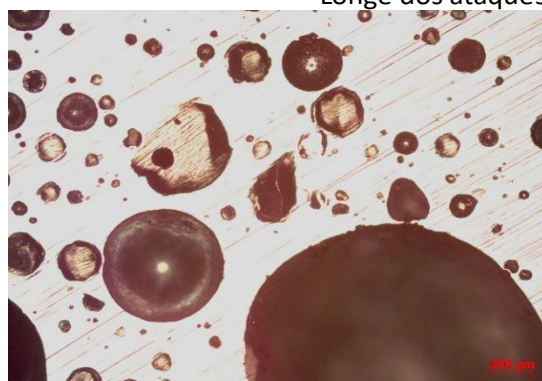
Código ensaio: BAPY600913	Porosidades [%]	
	Perto dos ataques	Longe dos ataques
Amostra 1	33,8	38,9
Amostra 2	19,7	48,5
Amostra 3	36,9	36,9
Amostra 4	28,7	37,6
Amostra 5	21,1	43,0
Média	28,1	41,0
Desvio Padrão	6,8	4,3

Amostra 1

Perto dos ataques

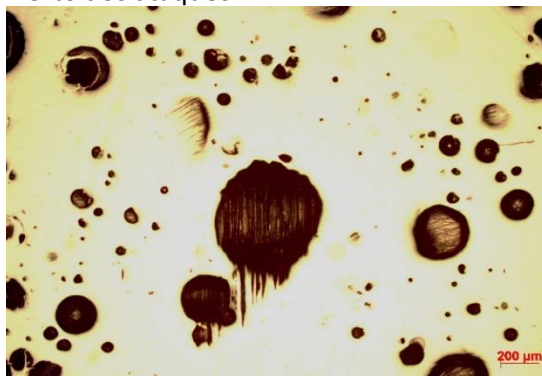


Longe dos ataques

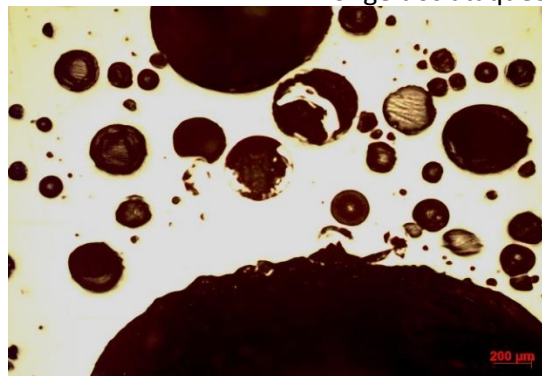


Amostra 2

Perto dos ataques

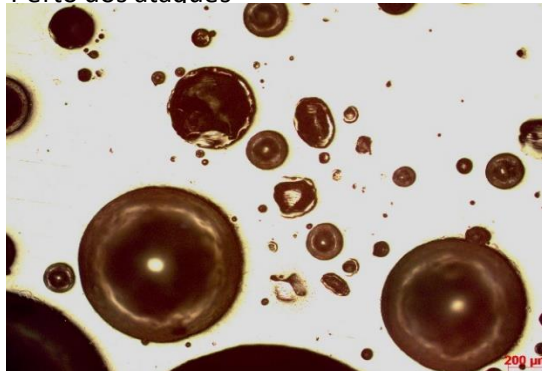


Longe dos ataques

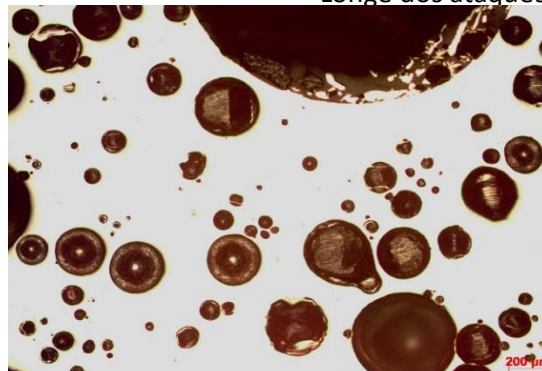


Amostra 3

Perto dos ataques

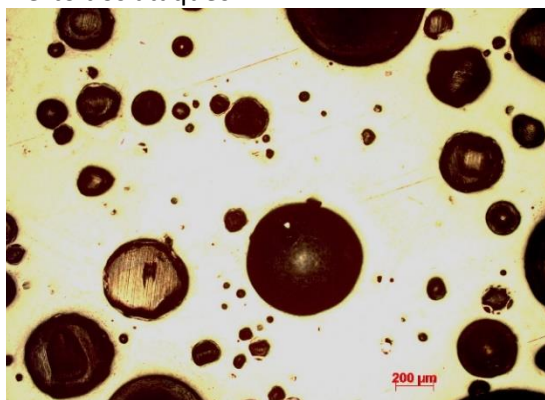


Longe dos ataques

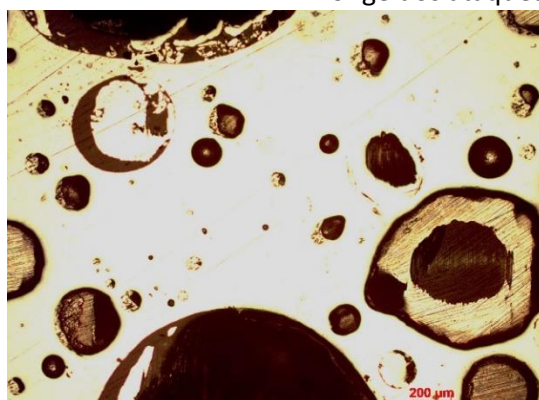


Amostra 4

Perto dos ataques

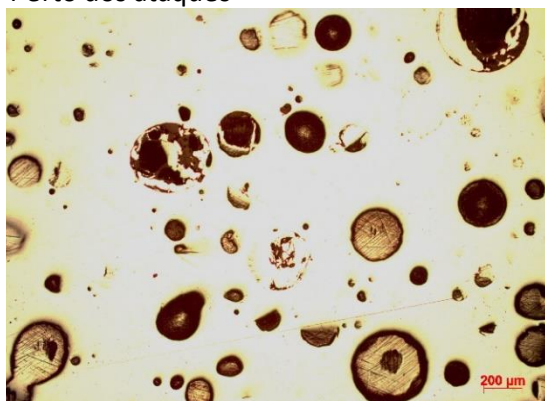


Longe dos ataques

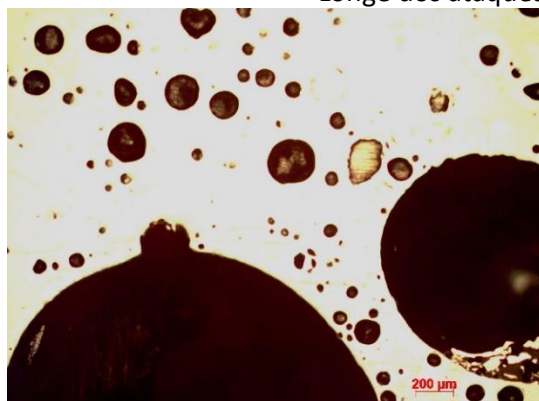


Amostra 5

Perto dos ataques



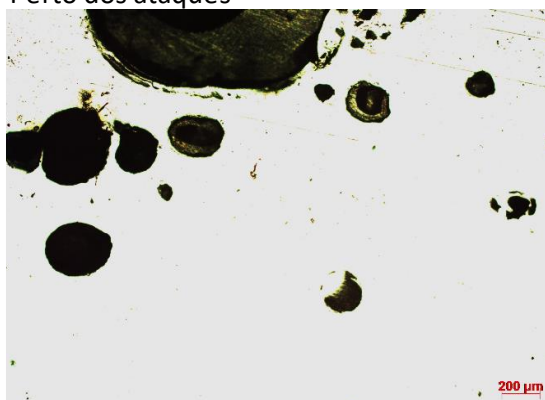
Longe dos ataques



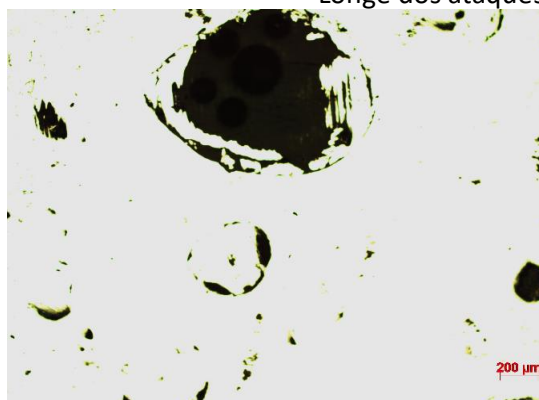
Código ensaio: BNPY600913	Porosidades [%]	
	Perto dos ataques	Longe dos ataques
Amostra 1	17,0	12,2
Amostra 2	5,3	6,7
Amostra 3	1,5	4,1
Amostra 4	3,3	27,9
Amostra 5	2,5	0,8
Média	5,9	10,3
Desvio Padrão	5,7	9,5

Amostra 1

Perto dos ataques

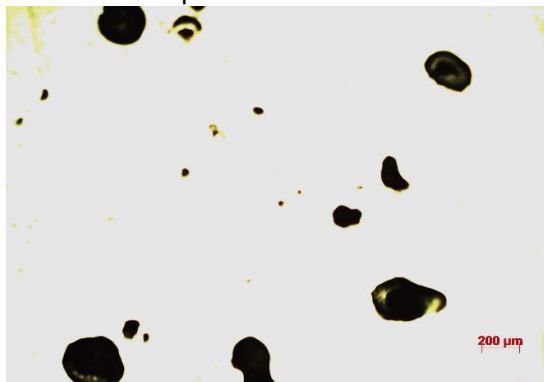


Longe dos ataques



Amostra 2

Perto dos ataques

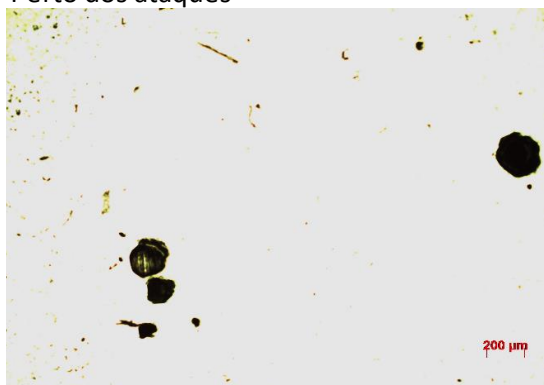


Longe dos ataques

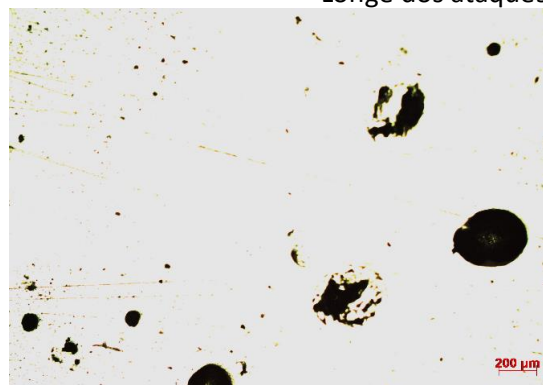


Amostra 3

Perto dos ataques

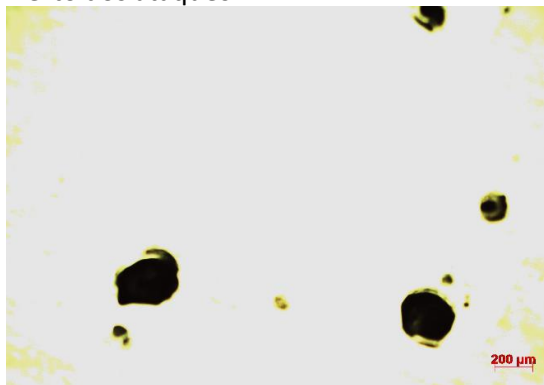


Longe dos ataques

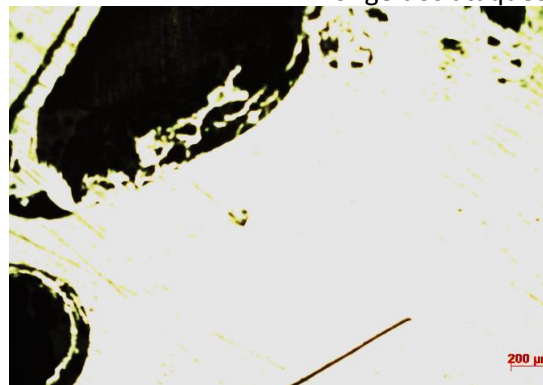


Amostra 4

Perto dos ataques

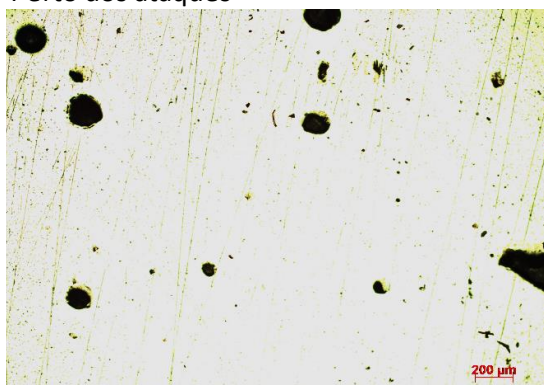


Longe dos ataques

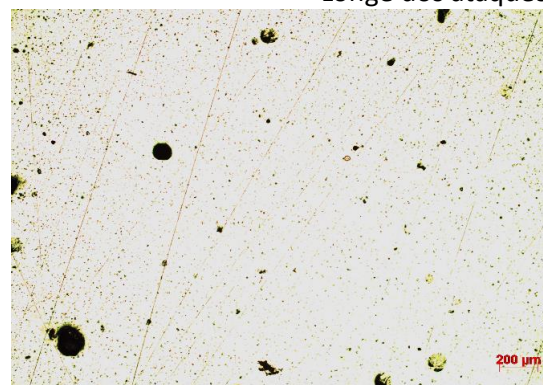


Amostra 5

Perto dos ataques



Longe dos ataques

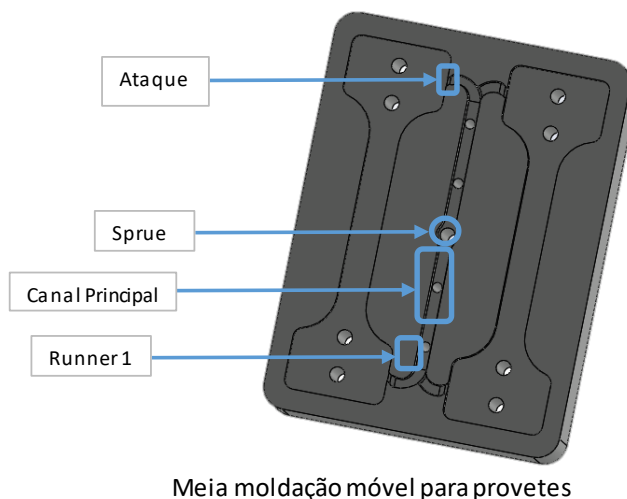


Anexo F: Dimensões dos sistemas de gitagem dos porta-chaves e provetes, segundo o seu rácio

Moldação do Porta-chaves									
Rácio tamanho teórico / real	Pressão de ar comprimido [bar]	Pressão de metal [MPa]	Velocidade no ataque [m/s]	Tempo de enchimento teórico [s]	Área do ataque [mm ²]	Altura x largura do ataque [mmxmm]	Área runner 1 [mm ²]	Altura x largura do runner 1 [mmxmm]	Área da base do sprue [mm ²]
0,60	3,5 bar	3,42	45,03	21,8	1,79	0,80 x 2,24	1,97	0,99 x 1,99	13,2
0,95	3,5 bar	3,42	45,03	13,6	2,87	0,80 x 3,60	3,16	1,25 x 2,51	13,2
1,00	3,5 bar	3,42	45,03	13,0	3,00	0,80 x 3,76	3,31	1,29 x 2,57	13,2
1,15	3,5 bar	3,42	45,03	11,3	3,46	0,80 x 4,33	3,8	1,38 x 2,76	13,2
1,41	3,5 bar	3,42	45,03	9,2	4,24	0,80 x 5,30	4,67	1,53 x 3,05	13,2
1,60	3,5 bar	3,42	45,03	8,2	4,80	0,80 x 6,00	5,28	1,62 x 3,25	13,2
1,50	6 bar	5,86	58,96	8,6	3,46	0,80 x 4,33	3,81	1,38 x 2,76	13,2
1,85	6 bar	5,86	58,96	7,1	4,24	0,80 x 5,30	4,67	1,53 x 3,05	13,2
2,09	6 bar	5,86	58,96	6,2	4,80	0,80 x 6,00	5,28	1,62 x 3,25	13,2

Moldação dos Provetes									
Rácio tamanho teórico / real	Pressão de ar comprimido [bar]	Pressão de metal [MPa]	Velocidade no ataque [m/s]	Tempo de enchimento teórico [s]	Área do ataque [mm ²]	Altura x largura do ataque [mmxmm]	Área runner 1 [mm ²]	Altura x largura do runner 1 [mmxmm]	Área canal principal [mm ²]
1	6 bar	5,86	58,96	22,0	1,56	0,70 x 2,23	1,87	0,97 x 1,94	3,76
	6 bar	5,86	58,96	16,0	1,29	0,70 x 1,84	1,54	0,88 x 1,76	
1,35	6 bar	5,86	58,96	16,3	2,11	0,70 x 3,00	2,87	1,12 x 2,25	5,19
	6 bar	5,86	58,96	11,3	1,82	0,70 x 2,60	2,19	1,05 x 2,09	
1,8	6 bar	5,86	58,96	12,2	2,81	0,70 x 4,00	3,37	0,80 x 4,22	6,77
	6 bar	5,86	58,96	8,9	2,31	0,70 x 3,30	2,78	0,72 x 1,93	
2,5	6 bar	5,86	58,96	8,9	3,85	0,70 x 5,50	4,62	0,90 x 5,14	9,24
	6 bar	5,86	58,96	6,6	3,14	0,70 x 4,49	3,77	0,80 x 4,72	
4,5	6 bar	5,86	58,96	5,0	6,94	0,70 x 9,90	8,32	0,90 x 9,24	16,64
	6 bar	5,86	58,96	3,6	5,67	0,70 x 8,11	6,81	0,80 x 8,52	
6	6 bar	5,86	58,96	3,7	9,25	0,70 x 6,61	11,10	0,90 x 6,17	22,21
	6 bar	5,86	58,96	2,7	7,57	0,70 x 5,41	9,09	0,80 x 5,68	

Moldação dos Provetes		
Altura x largura do canal principal [mmxmm]	Área da base do sprue [mm ²]	Espessura do provete [mm]
1,20 x 3,13	13,2	2,5
		1,5
1,20 x 4,32	13,2	2,5
		1,5
1,20 x 5,64	13,2	2,5
		1,5
1,50 x 6,16	13,2	2,5
		1,5
1,50 x 11,96	13,2	2,5
		1,5
1,50 x 14,81	13,2	2,5
		1,5



Notas: Aumentos de área entre secções de 10% nos gitos do porta chaves e 20 % nos gitos dos provetes. Rácio 1 representa secções segundo a formula teórica de perda de carga presente no relatório de dissertação. Não testado o rácio de 1 nas moldações dos provetes e do porta-chaves. Como nas moldações dos provetes optou-se por um ataque duplo, o valor da largura em cada ataque, runner 1 e canal principal é metade do apresentado na tabela.

Anexo G: Registo de ensaios nas moldações dos provetes e porta-chaves

Ensaio: gitagem 3,5 bar		Data:	31/05/2017		
Moldação: Porta-Chaves		Código:	60BNPC350404		
Pressão 1 [bar]	3,5	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,40
Tempo pressão 1 [s]	0,40	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo extração [s]	
T Banho de fusão [°C]	430	T Ressit. Bico [°C]	600	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

T cavidade = 88 °C | Aspeto consistente e algo brilhante | Marcas de fluxo na direção do gito até ao fim da peça | Marcas por toda a peça | Aspeto das letras mediano (marcas)

Ensaio: gitagem 3,5 bar		Data:	31/05/2017		
Moldação: Porta-chaves		Código:	75BNPC350404		
Pressão 1 [bar]	3,5	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,40
Tempo pressão 1 [s]	0,40	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo extração [s]	
T Banho de fusão [°C]	430	T Ressit. Bico [°C]	600	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

T cavidade = 92 °C | Aspeto consistente e brilhante | Marcas de fluxo proximas do gito | Algumas marcas por toda a peça | Aspeto das letras regular (marcas)

Ensaio: gitagem 3,5 bar		Data:	31/05/2017		
Moldação: Porta-chaves		Código:	96BNPC350404		
Pressão 1 [bar]	3,5	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,40
Tempo pressão 1 [s]	0,40	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo extração [s]	
T Banho de fusão [°C]	430	T Ressit. Bico [°C]	600	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

T cavidade = 89 °C | Aspeto consistente e brilhante | Marcas de fluxo proximas do gito | Algumas marcas por toda a peça | Aspeto das letras regular (marcas)

Ensaio: gitagem 3,5 bar		Data:	31/05/2017		
Moldação: Porta-chaves		Código:	115BNPC350404		
Pressão 1 [bar]	3,5	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,40
Tempo pressão 1 [s]	0,40	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo extração [s]	
T Banho de fusão [°C]	430	T Ressit. Bico [°C]	600	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

T cavidade = 89 °C | Aspeto consistente e brilhante | Marcas de fluxo proximas do gito | Algumas marcas por toda a peça | Aspeto das letras regular (marcas)

Ensaio: gitagem 3,5 bar		Data:	06/06/2017		
Moldação: Porta-chaves		Código:	141BNPC350404		
Pressão 1 [bar]	3,5	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,40
Tempo pressão 1 [s]	0,40	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo extração [s]	
T Banho de fusão [°C]	430	T Ressit. Bico [°C]	600	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

T cavidade = 88 °C | Aspeto consistente e brilhante | Marcas de fluxo proximas do gito |
 Algumas marcas por toda a peça | Aspeto das letras regular (marcas)

Ensaio: gitagem 3,5 bar		Data:	06/06/2017		
Moldação: Porta-chaves		Código:	160BNPC350404		
Pressão 1 [bar]	3,5	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,40
Tempo pressão 1 [s]	0,40	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo extração [s]	
T Banho de fusão [°C]	430	T Ressit. Bico [°C]	600	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

T cavidade = 88 °C | Aspeto consistente e picotado - consequencia do aumento da lubrificação do molde | Marcas de fluxo proximas do gito | Algumas marcas por toda a peça | Aspeto das letras regular (marcas)

Ensaio: gitagem 6 bar

Moldação: Porta-chaves

Data:

Código:

06/06/2017

150BNPC600404

Pressão 1 [bar]	6	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,40
Tempo pressão 1 [s]	0,40	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo extração [s]	
T Banho de fusão [°C]	430	T Ressit. Bico [°C]	600	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

T cavidade = 88 °C | Aspeto consistente | Marcas de fluxo proximas do gito | Algumas marcas por toda a peça | Aspeto das letras regular (marcas)

Ensaio: gitagem 6 bar		Data:	06/06/2017		
Moldação: Porta-chaves		Código:	185BNPC600404		
Pressão 1 [bar]	6	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,40
Tempo pressão 1 [s]	0,40	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo extração [s]	
T Banho de fusão [°C]	430	T Ressit. Bico [°C]	600	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

T cavidade = 85 °C | Aspeto consistente e picotado - consequencia do aumento da lubrificação do molde | Marcas de fluxo proximas do gito | Algumas marcas por toda a peça | Aspeto das letras regular (marcas)

Ensaio: gitagem 6 bar		Data:	06/06/2017		
Moldação: Porta-chaves		Código:	209BNPC600404		
Pressão 1 [bar]	6	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,40
Tempo pressão 1 [s]	0,40	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo extração [s]	
T Banho de fusão [°C]	430	T Ressit. Bico [°C]	600	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

T cavidade = 89 °C | Aspeto consistente e picotado - consequencia do aumento da lubrificação do molde | Marcas de fluxo proximas do gito | Algumas marcas por toda a peça | Aspeto das letras regular (marcas)

Ensaio: Enchimento provetes		Data:	08/05/2017		
Moldação: Provetes		Código:	135BNPROV60		
Pressão 1 [bar]	6,0	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,50
Tempo pressão 1 [s]	0,90	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo início sopro [s]	0,01
T Banho de fusão [°C]	430	T Ressit. Bico [°C]	600	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

Não encheu --> aumentar canais de gitagem

Ensaio: Enchimento provetes

Moldação: Provetes

Data:

Código:

25/05/2017

180BNPROV60

Pressão 1 [bar]	6,0	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,50
Tempo pressão 1 [s]	0,90	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo início sopro [s]	0,01
T Banho de fusão [°C]	430	T Ressit. Bico [°C]	600	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

Não encheu --> aumentar canais de gitagem

Ensaio: Enchimento provetes		Data:	05/06/2017		
Moldação: Provetes		Código:	250BNPROV60		
Pressão 1 [bar]	6,0	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,50
Tempo pressão 1 [s]	0,90	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo início sopro [s]	0,01
T Banho de fusão [°C]	430	T Ressit. Bico [°C]	600	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

Não encheu --> aumentar canais de gitagem

Ensaio: Enchimento Provetes		Data:	13/06/2017		
Moldação: Provetes		Código:	450BNPROV60		
Pressão 1 [bar]	6,0	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,50
Tempo pressão 1 [s]	0,90	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo início sopro [s]	0,01
T Banho de fusão [°C]	430	T Ressit. Bico [°C]	600	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

Não encheu --> aumentar canais de gitagem

Ensaio: Enchimento Provetes		Data:	20/06/2017		
Moldação: Provetes		Código:	A_600BNPROV60		
Pressão 1 [bar]	6,0	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,50
Tempo pressão 1 [s]	0,90	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo início sopro [s]	0,01
T Banho de fusão [°C]	430	T Ressit. Bico [°C]	600	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

Enchimento total da cavidade para o provete de 2,5mm. Maus cheios em 1 dos 7 provetes injetados de 1,5mm (14,3 %). T mold = 86 °C

Ensaio: Alteração de Pressão		Data:	20/06/2017		
Moldação: Provetes		Código:	B_600BNPROV45		
Pressão 1 [bar]	4,5	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,50
Tempo pressão 1 [s]	0,90	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo início sopro [s]	0,01
T Banho de fusão [°C]	430	T Ressit. Bico [°C]	600	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

Enchimento total da cavidade para o provete de 2,5mm. Maus cheios em 2 dos 8 provetes injetados de 1,5mm (25 %). T mold = 91 °C

Ensaio: Alteração de Pressão		Data:	20/06/2017		
Moldação: Provetes		Código:	C_600BNPROV25		
Pressão 1 [bar]	2,5	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,50
Tempo pressão 1 [s]	0,90	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo início sopro [s]	0,01
T Banho de fusão [°C]	430	T Ressit. Bico [°C]	600	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

Enchimento total da cavidade para o provete de 2,5mm. Maus cheios em 8 dos 8 provetes injetados de 1,5mm (100 %). T mold = 100 °C

Ensaio: Alterações de temp.		Data:	20/06/2017		
Moldação: Provetes		Código:	D_600BNPROV60		
Pressão 1 [bar]	6,0	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,50
Tempo pressão 1 [s]	0,90	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo início sopro [s]	0,01
T Banho de fusão [°C]	430	T Ressit. Bico [°C]	550	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

Enchimento total da cavidade para o provete de 2,5mm. Maus cheios em 2 dos 8 provetes injetados de 1,5mm (25 %). T mold = 100 °C

Ensaio: Alterações de temp.

Data: 20/06/2017

Moldação: Provetes

Código: E_600BNPROV60

Pressão 1 [bar]	6,0	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,50
Tempo pressão 1 [s]	0,90	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo início sopro [s]	0,01
T Banho de fusão [°C]	415	T Ressit. Bico [°C]	550	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

Enchimento total da cavidade para o provete de 2,5mm. Maus cheios em 2 dos 7 provetes injetados de 1,5mm (28,6 %). T mold = 90 °C

Ensaio: Alterações de temp.		Data:	20/06/2017		
Moldação: Provetes		Código:	H_600BNPROV60		
Pressão 1 [bar]	6,0	Pressão 2 [bar]	x	Tempo arref. [s]	0,50
Tempo pressão 1 [s]	0,90	Tempo pressão 2 [s]	x	Tempo início sopro [s]	0,01
T Banho de fusão [°C]	415	T Ressit. Bico [°C]	600	Tempo de sopro [s]	0,30

Notas:

Enchimento total da cavidade para o provete de 2,5mm. Maus cheios em 2 dos 7 provetes injetados de 1,5mm (28,6 %). T mold = 96 °C

Anexo H: Registo de medições de porosidade em porta-chaves

Ensaio: gitagem 3,5 bar		Código: 60BNPC350404							
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	Wd [g]	11,4868	11,3730	11,4638	11,3022	11,3794	11,2348	11,3203	11,3458
	Wi [g]	9,6712	9,5568	9,6337	9,4880	9,5736	9,4167	9,5269	9,5315
	Ww [g]	11,5254	11,3924	11,4830	11,3324	11,4032	11,2647	11,3498	11,3691
	Ws [g]	0,0292	0,0261	0,0261	0,0203	0,0256	0,0257	0,0257	0,0257
	pcorpo [g/cm^3]	6,1632	6,1655	6,1688	6,1009	6,1895	6,0498	6,1798	6,1442
	V poros [cm^3]	0,1489	0,1468	0,1470	0,1653	0,1398	0,1798	0,1419	0,1528
	% poros	8,01%	7,98%	7,93%	8,94%	7,62%	9,71%	7,76%	8,29%
	Média pcorpo	6,1452	Média % poros		8,28%	Th20 [°C]		23,5	
	DesvPad pcorpo	0,0441	DesvPad % poros		0,66%	pH2O [g/cm^3]		0,9974	

Ensaio: gitagem 3,5 bar		Código: 75BNPC350404							
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	Wd [g]	11,6672	11,5081	11,5961	11,4743	11,5749	11,6427	11,5557	11,5858
	Wi [g]	9,8362	9,7084	9,7776	9,6483	9,7553	9,8352	9,7332	9,7514
	Ww [g]	11,6935	11,5363	11,6334	11,4922	11,6139	11,6645	11,5830	11,6100
	Ws [g]	0,0284	0,0284	0,0242	0,0284	0,0284	0,0209	0,0209	0,0198
	pcorpo [g/cm^3]	6,2490	6,2627	6,2181	6,1901	6,1951	6,3354	6,2182	6,2055
	V poros [cm^3]	0,1254	0,1196	0,1339	0,1407	0,1405	0,0998	0,1334	0,1376
	% poros	6,73%	6,53%	7,19%	7,61%	7,54%	5,44%	7,19%	7,38%
	Média pcorpo	6,2342	Média % poros		6,95%	Th20 [°C]		24,5	
	DesvPad pcorpo	0,0448	DesvPad % poros		0,67%	pH2O [g/cm^3]		0,9972	

Ensaio: gitagem 3,5 bar		Código: 96BNPC350404							
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	Wd [g]	11,5802	11,6758	11,6468	11,5510	11,6247	11,6322	11,6124	11,5994
	Wi [g]	9,7743	9,8657	9,8250	9,7308	9,8111	9,8197	9,7954	9,7810
	Ww [g]	11,6072	11,7073	11,6709	11,5836	11,6523	11,6600	11,6385	11,6233
	Ws [g]	0,0264	0,0264	0,0254	0,0229	0,0297	0,0260	0,0260	0,0239
	pcorpo [g/cm^3]	6,2859	6,3080	6,2782	6,2046	6,2799	6,2890	6,2688	6,2656
	V poros [cm^3]	0,1136	0,1081	0,1165	0,1374	0,1158	0,1132	0,1190	0,1198
	% poros	6,18%	5,85%	6,30%	7,39%	6,27%	6,13%	6,44%	6,48%
	Média pcorpo	6,2725	Média % poros		6,38%	Th20 [°C]		24,5	
	DesvPad pcorpo	0,0285	DesvPad % poros		0,42%	pH2O [g/cm^3]		0,9972	

Ensaio: gitagem 3,5 bar		Código: 115BNPC350404							
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	Wd [g]	11,5790	11,6796	11,6252	11,5968	11,6852	11,6556	11,6021	11,6102
	Wi [g]	9,7702	9,8713	9,8203	9,7863	9,8863	9,8485	9,7944	9,8097
	Ww [g]	11,5961	11,7081	11,6492	11,6223	11,7268	11,6904	11,6291	11,6358
	Ws [g]	0,0261	0,0261	0,0237	0,0250	0,0210	0,0196	0,0248	0,0221
	pcorpo [g/cm^3]	6,3089	6,3261	6,3250	6,2844	6,3191	6,2991	6,2919	6,3274
	V poros [cm^3]	0,1069	0,1028	0,1027	0,1142	0,1049	0,1105	0,1121	0,1018
	% poros	5,84%	5,58%	5,60%	6,20%	5,68%	5,98%	6,09%	5,56%
	Média pcorpo	6,3102	Média % poros		5,82%	Th20 [°C]		25	
	DesvPad pcorpo	0,0157	DesvPad % poros		0,23%	pH2O [g/cm^3]		0,9971	

Ensaio: gitagem 3,5 bar		Código: 141BNPC350404							
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	Wd [g]	11,7188	11,8482	11,7514	11,7200	11,8518	11,8271	11,7859	11,7813
	Wi [g]	9,9382	10,0650	9,9311	9,9098	10,0346	10,0255	9,9790	9,9728
	Ww [g]	11,7555	11,8946	11,7719	11,7405	11,8816	11,8439	11,8062	11,8030
	Ws [g]	0,0286	0,0245	0,0303	0,0228	0,0227	0,0228	0,0227	0,0228
	p corpo [g/cm^3]	6,4166	6,4463	6,3515	6,3735	6,3885	6,4754	6,4217	6,4086
	V poros [cm^3]	0,0770	0,0695	0,0960	0,0894	0,0861	0,0611	0,0761	0,0798
	% poros	4,23%	3,79%	5,20%	4,87%	4,65%	3,35%	4,15%	4,35%
	Média p corpo	6,4103	Média % poros			4,32%	Th2O [°C]		23
	DesvPad p corpo	0,0371	DesvPad % poros			0,55%	pH2O [g/cm^3]		0,9975

Ensaio: gitagem 3,5 bar		Código: 160BNPC350404							
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	Wd [g]	11,8644	11,7588	11,8036	11,6701	11,7339	11,8459	11,8625	11,8504
	Wi [g]	10,0672	9,9564	9,9964	9,8638	9,9356	10,0296	10,0679	10,0532
	Ww [g]	11,8883	11,7851	11,8374	11,6906	11,7570	11,8649	11,8875	11,8791
	Ws [g]	0,0228	0,0228	0,0228	0,0228	0,0213	0,0182	0,0323	0,0323
	p corpo [g/cm^3]	6,4862	6,4016	6,3831	6,3599	6,4145	6,4284	6,4853	6,4563
	V poros [cm^3]	0,0583	0,0816	0,0873	0,0930	0,0778	0,0746	0,0585	0,0666
	% poros	3,19%	4,45%	4,73%	5,08%	4,26%	4,05%	3,20%	3,64%
	Média p corpo	6,4269	Média % poros			4,08%	Th2O [°C]		23
	DesvPad p corpo	0,0433	DesvPad % poros			0,65%	pH2O [g/cm^3]		0,9975

Ensaio: gitagem 6 bar		Código: 150BNPC600404							
Prin. Arquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	Wd [g]	11,8437	11,8357	11,7556	11,8410	11,8335	11,5610	11,8294	11,8503
	Wi [g]	10,0485	10,0343	9,9419	10,0288	10,0154	9,7558	10,0353	10,0549
	Ww [g]	11,8657	11,8612	11,7746	11,8638	11,8510	11,5816	11,8538	11,8821
	Ws [g]	0,0268	0,0267	0,0268	0,0267	0,0268	0,0241	0,0214	0,0216
	p corpo [g/cm^3]	6,4865	6,4478	6,3837	6,4222	6,4160	6,3030	6,4770	6,4575
	V poros [cm^3]	0,0580	0,0689	0,0867	0,0763	0,0780	0,1085	0,0607	0,0663
	% poros	3,19%	3,76%	4,72%	4,15%	4,24%	5,93%	3,33%	3,62%
	Média p corpo	6,4242	Média % poros			4,12%	Th2O [°C]		23
	DesvPad p corpo	0,0556	DesvPad % poros			0,83%	pH2O [g/cm^3]		0,9975

Ensaio: gitagem 6 bar		Código: 185BNPC600404							
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	Wd [g]	11,9071	11,8796	11,8986	11,7374	11,5811	11,8378	11,9039	11,8199
	Wi [g]	10,1074	10,0733	10,0841	9,9347	9,7626	10,0318	10,0990	10,0118
	Ww [g]	11,9348	11,9005	11,9125	11,7613	11,6037	11,8557	11,9231	11,8327
	Ws [g]	0,0204	0,0203	0,0204	0,0203	0,0204	0,0204	0,0190	0,0189
	p corpo [g/cm^3]	6,4884	6,4742	6,4803	6,3987	6,2635	6,4630	6,4992	6,4647
	V poros [cm^3]	0,0578	0,0617	0,0601	0,0824	0,1202	0,0647	0,0548	0,0641
	% poros	3,16%	3,37%	3,28%	4,50%	6,51%	3,54%	3,00%	3,51%
	Média p corpo	6,4415	Média % poros			3,86%	Th2O [°C]		23
	DesvPad p corpo	0,0730	DesvPad % poros			1,09%	pH2O [g/cm^3]		0,9975

Ensaio: gitagem 6 bar		Código: 209BNPC600404							
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	Wd [g]	11,8864	11,9362	11,6468	11,8817	11,9037	11,8825	11,7035	11,7716
	Wi [g]	10,0904	10,1205	9,8490	10,0732	10,0864	10,0705	9,8944	9,9754
	Ww [g]	11,9170	11,9559	11,6633	11,8971	11,9242	11,9018	11,7323	11,7861
	Ws [g]	0,0189	0,0285	0,0285	0,0285	0,0273	0,0272	0,0256	0,0256
	pcorpo [g/cm ³]	6,4802	6,4716	6,3877	6,4826	6,4461	6,4575	6,3381	6,4708
	V poros [cm ³]	0,0601	0,0627	0,0848	0,0593	0,0698	0,0664	0,0995	0,0621
	% poros	3,28%	3,41%	4,66%	3,25%	3,79%	3,62%	5,40%	3,42%
	Média pcorpo	6,4418	Média % poros		3,85%	Th ₂ O [°C]		23,5	
	DesvPad pcorpo	0,0485	DesvPad % poros		0,72%	pH ₂ O [g/cm ³]		0,9974	

Anexo I: Registo de medições de porosidades e valores de ensaio de tração em provetes

Ensaio: Enchimento provetes		Código: AG600BNPROV60							
Ensaio Tração		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	σ rotura [MPa]	263		246	243				
	Ext. ap. rot. (A) [%]	1,3		1,7	1,1				
Média σ		251		Média A		1,4			
Desvio Pad. σ		9		Desvio Pad. A		0,2			
Prin. Aquimedes [porosidade]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	Wd [g]	13,2418	13,1565	13,2381	13,2758	13,3771	13,2541	13,2886	
	Wi [g]	11,2009	11,1213	11,1999	11,2375	11,3433	11,2129	11,2473	
	Ww [g]	13,2422	13,1565	13,2381	13,2759	13,3773	13,2545	13,2887	
	Ws [g]	0,0259	0,026	0,0259	0,026	0,026	0,026	0,026	
	p corpo [g/cm^3]	6,4529	6,4304	6,4609	6,4786	6,5423	6,4579	6,4754	
	V poros [cm^3]	0,0755	0,0822	0,0730	0,0676	0,0480	0,0740	0,0687	
	% poros	3,69%	4,02%	3,57%	3,30%	2,35%	3,61%	3,35%	
	Média p corpo	6,4712		Média % poros		3,41%		Th2O [°C]	26,5
	DesvPad p corpo	0,0325		DesvPad % poros		0,49%		pH2O [g/cm^3]	0,9967

Ensaio: Enchimento provetes		Código: AF600BNPROV60							
Ensaio Tração		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	σ rotura [MPa]			Mal cheio	285	289	292		
	Ext. ap. rot. (A) [%]				1,0		2,5		
Média σ		289		Média A		1,8			
Desvio Pad. σ		3		Desvio Pad. A		0,8			
Prin. Aquimedes [porosidade]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	Wd [g]	8,224	8,1857	Mal cheio	8,2819	8,3291	8,2438	8,1921	
	Wi [g]	6,9739	6,9322		7,019	7,0658	6,9899	6,9394	
	Ww [g]	8,224	8,1857		8,2822	8,3291	8,2439	8,1921	
	Ws [g]	0,0259	0,026		0,0259	0,0259	0,0259	0,0259	
	p corpo [g/cm^3]	6,5363	6,4881		6,5142	6,5509	6,5317	6,4974	
	V poros [cm^3]	0,0306	0,0398		0,0351	0,0282	0,0316	0,0380	
	% poros	2,44%	3,16%		2,77%	2,22%	2,51%	3,02%	
	Média p corpo	6,5198		Média % poros		2,69%		TH2O [°C]	26,5
	DesvPad p corpo	0,0221		DesvPad % poros		0,33%		pH2O [g/cm^3]	0,9967

Ensaio: Variação de Pressão		Código: BG600BNPROV45							
Ensaio Tração		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	σ rotura [MPa]		257	249				258	
	Ext. ap. rot. (A) [%]		2,3	1,1				2,7	
Média σ		255		Média A		2,0			
Desvio Pad. σ		4		Desvio Pad. A		0,7			
Prin. Aquimedes [porosidade]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	Wd [g]	13,256	13,294	13,1446	13,1953	12,9965	13,1608	13,3075	13,2637
	Wi [g]	11,2352	11,2579	11,1071	11,1612	10,9761	11,1408	11,2738	11,2307
	Ww [g]	13,2572	13,2942	13,1446	13,1953	12,9966	13,161	13,3082	13,2637
	Ws [g]	0,0259	0,0259	0,0259	0,0259	0,0259	0,0259	0,0259	0,0259
	p corpo [g/cm^3]	6,5215	6,4943	6,4174	6,4529	6,3983	6,4803	6,5070	6,4900
	V poros [cm^3]	0,0541	0,0627	0,0862	0,0753	0,0913	0,0665	0,0588	0,0639
	% poros	2,66%	3,07%	4,22%	3,69%	4,50%	3,28%	2,88%	3,13%
	Média p corpo	6,4702		Média % poros		3,43%		TH2O [°C]	26,5
	DesvPad p corpo	0,0408		DesvPad % poros		0,61%		pH2O [g/cm^3]	0,9967

Ensaio: Variação de Pressão

Código: BF600BNPROV45

Ensaio Tração

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
σ rotura [MPa]				Mal cheio		Mal cheio		
Ext. ap. rot. (A) [%]								
Média σ	#DIV/0!			Média A	#DIV/0!			
Desvio Pad. σ	#DIV/0!			Desvio Pad. A	#DIV/0!			

Prin. Aquimedes [porosidade]

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
Wd [g]	8,2391	8,2569	8,2026	Mal cheio	8,1445	Mal cheio	8,2745	8,2657
Wi [g]	6,9906	7,0022	6,96		6,8998		7,0229	7,0086
Ww [g]	8,2391	8,257	8,2028		8,1449		8,2745	8,2657
Ws [g]	0,0259	0,0259	0,026		0,0259		0,026	0,026
p corpo [g/cm³]	6,5567	6,5380	6,5575		6,4989		6,5686	6,5329
V poros [cm³]	0,0268	0,0304	0,0265		0,0375		0,0246	0,0315
% poros	2,14%	2,42%	2,13%		3,00%		1,96%	2,49%
Média p corpo	6,5421			Média % poros	2,36%		Th20 [°C]	26,5
DesvPad p corpo	0,0228			DesvPad % poros	0,34%		pH2O [g/cm³]	0,9967

Ensaio: Variação de Pressão		Código: CG600BNPROV25							
Ensaio Tração		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	σ rotura [MPa]					253		247	268
	Ext. ap. rot. (A) [%]					1,9		1,8	1,1
Média σ		256		Média A		1,6			
Desvio Pad. σ		9		Desvio Pad. A		0,4			
Prin. Aquimedes [porosidade]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	Wd [g]	13,1103	12,4523	12,9881	13,2038	13,1667	13,2331	13,1347	13,1118
	Wi [g]	11,0825	10,4236	10,9749	11,1761	11,1368	11,1989	11,1041	11,0845
	Ww [g]	13,111	12,4524	12,9911	13,2038	13,1667	13,2334	13,1351	13,1118
	Ws [g]	0,0259	0,0259	0,0259	0,0259	0,0259	0,0259	0,0259	0,0258
	p corpo [g/cm^3]	6,4290	6,1048	6,4078	6,4775	6,4523	6,4702	6,4331	6,4336
	V poros [cm^3]	0,0823	0,1808	0,0882	0,0676	0,0753	0,0700	0,0812	0,0809
	% poros	4,04%	8,88%	4,36%	3,32%	3,70%	3,43%	3,98%	3,98%
	Média p corpo	6,4010		Média % poros		4,46%		TH2O [°C]	
DesvPad p corpo	0,1140		DesvPad % poros		1,70%		pH2O [g/cm^3]		0,9967

Ensaio: Variação de Pressão		Código: CF600BNPROV25								
Ensaio Tração		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8	
	σ rotura [MPa]	Mal cheio	Mal cheio	Mal cheio	Mal cheio	Mal cheio	Mal cheio	Mal cheio	Mal cheio	
	Ext. ap. rot. (A) [%]									
Média σ		Média A								
Desvio Pad. σ		Desvio Pad. A								
Prin. Aquimedes [porosidade]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8	
	Wd [g]	Mal cheio	Mal cheio	Mal cheio	Mal cheio	Mal cheio	Mal cheio	Mal cheio	Mal cheio	
	Wi [g]									
	Ww [g]									
	Ws [g]									
	p corpo [g/cm³]									
	V poros [cm³]									
	% poros									
	Média p corpo		Média % poros				TH2O [°C]		26,5	
DesvPad p corpo		DesvPad % poros				pH2O [g/cm³]		0,9967		

Ensaio: Variação de Temp.

Código: DG600BNPROV60

Ensaio Tração

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
σ rotura [MPa]				265		250		272
Ext. ap. rot. (A) [%]				1,4		2,5		0,9
Média σ	262		Média A		1,6			
Desvio Pad. σ	9		Desvio Pad. A		0,7			

Prin. Aquimedes [porosidade]

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
Wd [g]	13,3753	13,3483	12,8433	13,2776	13,303	13,1307	12,8797	13,2713
Wi [g]	11,337	11,3145	10,8107	11,2356	11,2746	11,1008	10,8474	11,2383
Ww [g]	13,3764	13,35	12,8435	13,2787	13,3039	13,1307	12,8813	13,2723
Ws [g]	0,0258	0,0258	0,0258	0,0258	0,0259	0,0258	0,0257	0,0257
pcorpo [g/cm³]	6,5249	6,5241	6,2852	6,4654	6,5218	6,4353	6,2997	6,4913
V poros [cm³]	0,0535	0,0536	0,1263	0,0718	0,0542	0,0805	0,1219	0,0636
% poros	2,61%	2,62%	6,19%	3,50%	2,66%	3,95%	5,98%	3,12%
Média pcorpo	6,4434		Média % poros		3,83%		Th20 [°C]	26
DesvPad pcorpo	0,0921		DesvPad % poros		1,37%		pH2O [g/cm³]	0,9968

Ensaio: Variação de Temp.		Código: DF600BNPROV60							
Ensaio Tração		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	σ rotura [MPa]	Mal cheio							Mal cheio
	Ext. ap. rot. (A) [%]								
Média σ		#DIV/0!		Média A		#DIV/0!			
Desvio Pad. σ		#DIV/0!		Desvio Pad. A		#DIV/0!			
Prin. Aquimedes [porosidade]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
	Wd [g]	Mal cheio	8,268	8,2382	8,2091	8,2812	8,2237	8,1376	Mal cheio
	Wi [g]		7,0155	6,9914	6,9609	7,0196	6,9755	6,8806	
	Ww [g]		8,2681	8,2391	8,2092	8,2813	8,225	8,1376	
	Ws [g]		0,0203	0,0204	0,0204	0,0203	0,0204	0,0203	
	pcorpo [g/cm^3]		6,5634	6,5653	6,5389	6,5265	6,5443	6,4370	
	V poros [cm^3]		0,0256	0,0252	0,0301	0,0328	0,0291	0,0495	
	% poros		2,04%	2,01%	2,40%	2,59%	2,32%	3,93%	
	Média pcorpo		6,5292		Média % poros		2,55%		TH2O [°C] 26
DesvPad pcorpo		0,0434		DesvPad % poros		0,65%		pH2O [g/cm^3] 0,9968	

Ensaio Tração

Ensaio: Variação de Temp.		Código: EG600BNPROV60						
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
σ rotura [MPa]		265				228	245	
Ext. ap. rot. (A) [%]		1,5				2,2	1,9	
Média σ	246		Média A		1,9			
Desvio Pad. σ	15		Desvio Pad. A		0,3			

Prin. Aquimedes [porosidade]

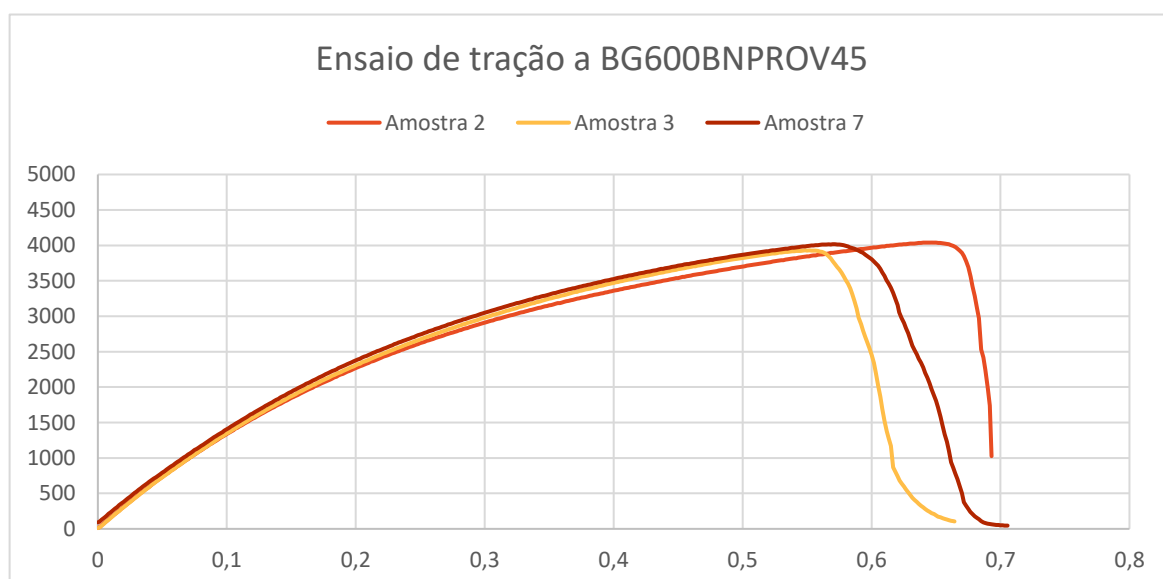
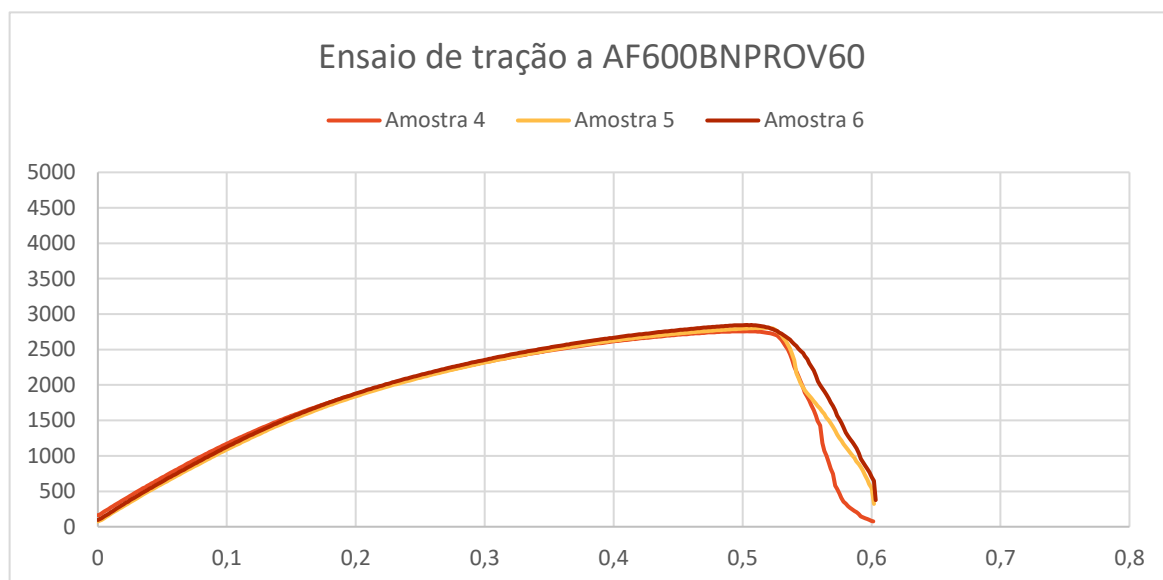
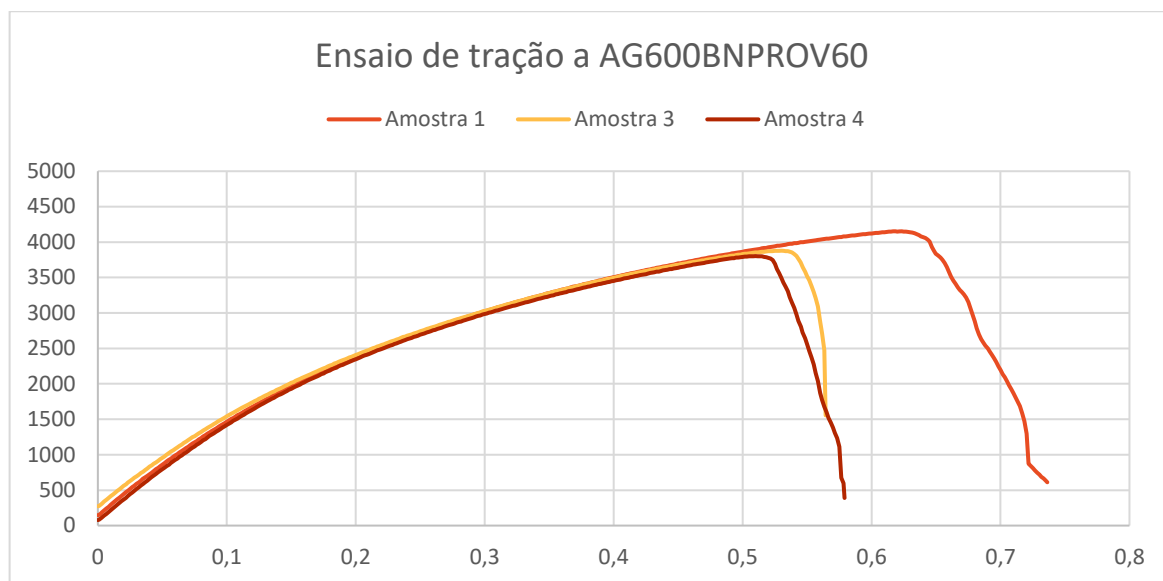
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
Wd [g]	13,2155	13,1905	12,9388	13,3677	13,2782	13,0217	13,1089	
Wi [g]	11,172	11,1475	10,8985	11,3324	11,2488	11,0034	11,0775	
Ww [g]	13,2156	13,1917	12,9388	13,3684	13,2786	13,0219	13,1094	
Ws [g]	0,0203	0,0205	0,0204	0,0273	0,0274	0,0274	0,0271	
pcorpo [g/cm^3]	6,4362	6,4220	6,3114	6,5313	6,5072	6,4170	6,4176	
V poros [cm^3]	0,0807	0,0851	0,1187	0,0514	0,0586	0,0855	0,0859	
% poros	3,94%	4,15%	5,80%	2,52%	2,88%	4,22%	4,21%	
Média pcorpo	6,4347		Média % poros		3,96%		TH2O [°C]	26
DesvPad pcorpo	0,0661		DesvPad % poros		0,99%		pH2O [g/cm^3]	0,9968

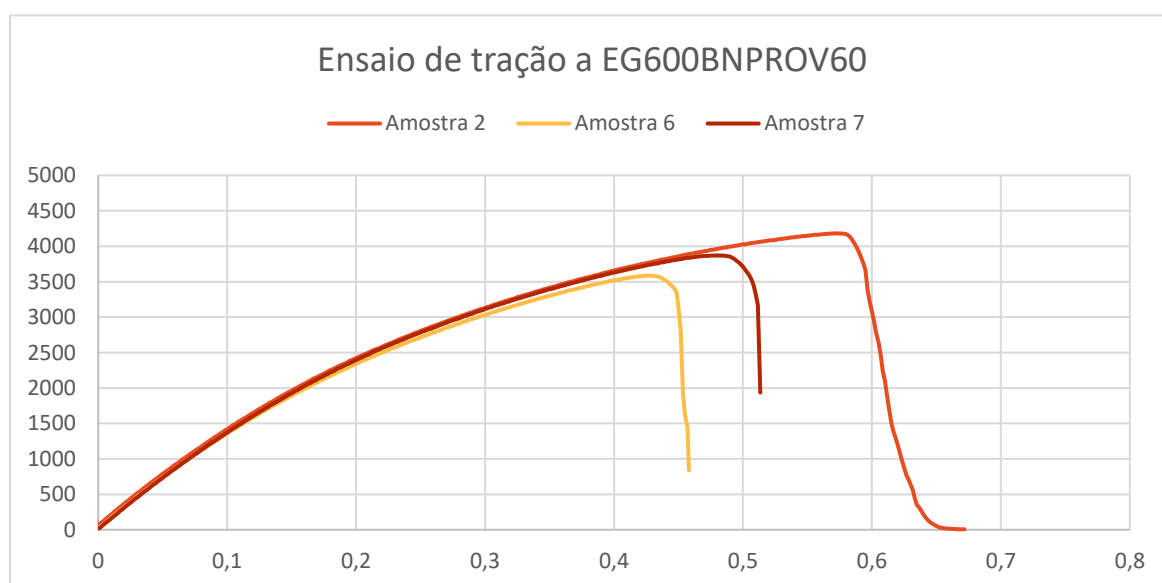
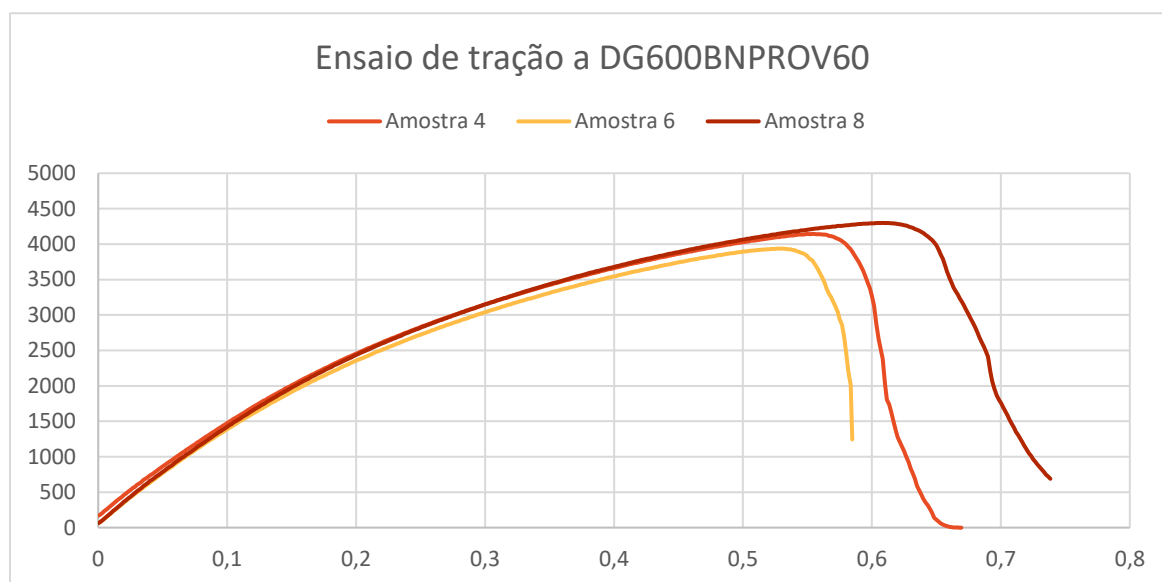
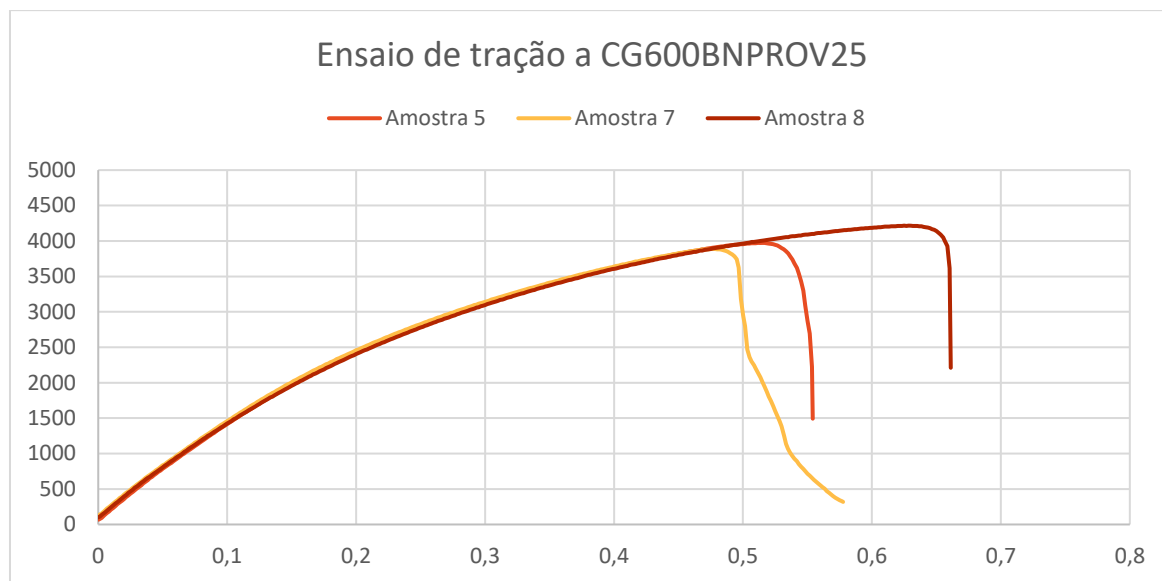
Ensaio: Variação de Temp.			Código: EF600BNPROV60							
Ensaio Tração		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8	
	σ rotura [MPa]	Mal cheio					Mal cheio			
	Ext. ap. rot. (A) [%]									
Média σ		#DIV/0!		Média A		#DIV/0!				
Desvio Pad. σ		#DIV/0!		Desvio Pad. A		#DIV/0!				
Prin. Aquimedes [porosidade]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8	
	Wd [g]	Mal cheio	8,2892	8,216	8,2193	8,2027	Mal cheio	8,243		
	Wi [g]		7,0317	6,9623	6,9627	6,9481		6,9889		
	Ww [g]		8,2892	8,2169	8,2197	8,2033		8,2432		
	Ws [g]		0,0202	0,0202	0,0202	0,0202		0,0202		
	p corpo [g/cm^3]		6,5540	6,5110	6,5012	6,4974		6,5341		
	V poros [cm^3]		0,0275	0,0355	0,0374	0,0381		0,0312		
	% poros		2,18%	2,82%	2,97%	3,02%		2,48%		
	Média p corpo		6,5195		Média % poros		2,69%		Th2O [°C]	26,5
	DesvPad p corpo		0,0214		DesvPad % poros		0,32%		pH2O [g/cm^3]	0,9967

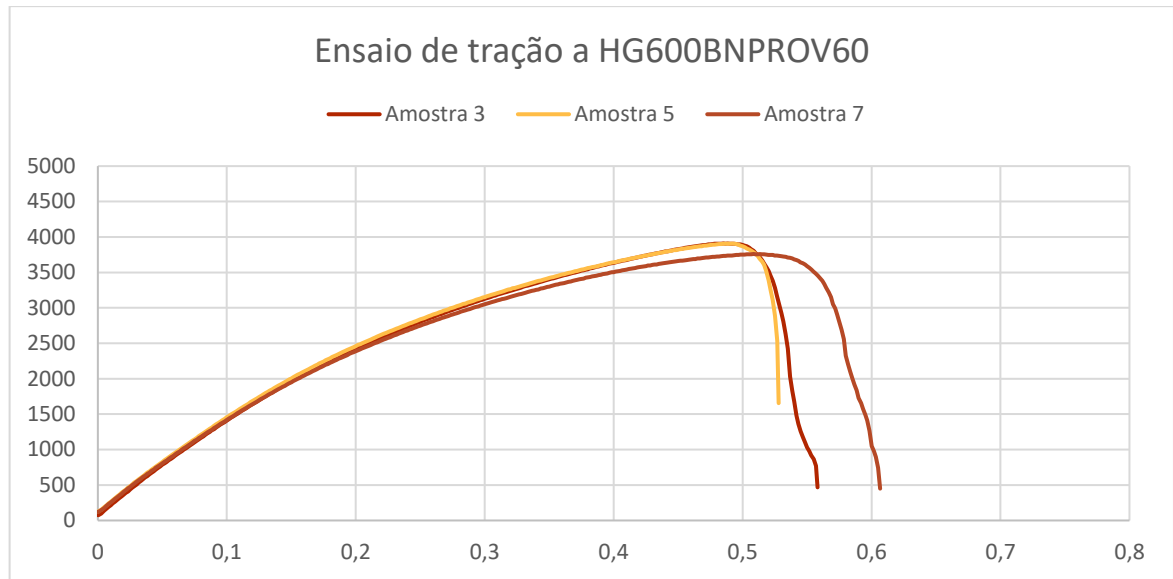
Ensaio: Variação de Temp.			Código: HG600BNPROV60							
Ensaio Tração		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8	
	σ rotura [MPa]			249		249		239		
	Ext. ap. rot. (A) [%]			1,9		2,6		1,7		
Média σ		246		Média A		2,1				
Desvio Pad. σ		5		Desvio Pad. A		0,4				
Prin. Aquimedes [porosidade]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8	
	Wd [g]	13,2921	12,6319	13,1162	12,6421	13,2122	13,24	12,7505		
	Wi [g]	11,2523	10,5944	11,0762	10,6071	11,1746	11,1967	10,7138		
	Ww [g]	13,2965	12,635	13,1176	12,6438	13,2158	13,2423	12,7518		
	Ws [g]	0,0203	0,0203	0,0203	0,0203	0,0203	0,0203	0,0203		
	p corpo [g/cm^3]	6,4716	6,1606	6,3946	6,1774	6,4421	6,4418	6,2264		
	V poros [cm^3]	0,0699	0,1648	0,0933	0,1594	0,0788	0,0791	0,1445		
	% poros	3,41%	8,05%	4,56%	7,80%	3,85%	3,85%	7,07%		
	Média p corpo		6,3307		Média % poros		5,51%		TH2O [°C]	26
	DesvPad p corpo		0,1265		DesvPad % poros		1,89%		pH2O [g/cm^3]	0,9968

Ensaio: Variação de Temp.			Código: HF600BNPROV60							
Ensaio Tração		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8	
	σ rotura [MPa]					Mal cheio	Mal cheio			
	Ext. ap. rot. (A) [%]									
Média σ		#DIV/0!		Média A		#DIV/0!				
Desvio Pad. σ		#DIV/0!		Desvio Pad. A		#DIV/0!				
Prin. Aquimedes [porosidade]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8	
	Wd [g]	8,1839	8,1597	8,2299	8,1566	Mal cheio	Mal cheio	8,1772		
	Wi [g]	6,93	6,9041	6,9714	6,9008			6,9197		
	Ww [g]	8,1856	8,1619	8,2315	8,1568			8,1772		
	Ws [g]	0,02	0,02	0,0199	0,0199			0,0199		
	p corpo [g/cm^3]	6,4812	6,4507	6,4945	6,4575			6,4662		
	V poros [cm^3]	0,0411	0,0470	0,0388	0,0456			0,0440		
	% poros	3,27%	3,72%	3,07%	3,62%			3,49%		
	Média p corpo		6,4700		Média % poros		3,43%		TH2O [°C]	26
	DesvPad p corpo		0,0159		DesvPad % poros		0,24%		pH2O [g/cm^3]	0,9968

Anexo J: Curvas força-deformação obtidas nos ensaios de tração







Anexo K: Registo de medições de porosidades para análise da influência da temperatura das moldações no produto final

Ensaio: LDI Tmold 85		Código: BNLDI400507_M85							
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6		
	Wd [g]	11,6655	11,6419	11,6468	11,5272	11,5793	11,6398	Pressão	4,0 bar
	Wi [g]	9,8414	9,8797	9,8799	9,7629	9,8168	9,8809	t enchim.	0,50 s
	Ww [g]	11,6823	11,6635	11,6639	11,5364	11,5869	11,6450	t arrefec.	0,70 s
	Ws [g]	0,0280	0,0280	0,0280	0,0310	0,0310	0,0280	t sopro	0,30 s
	pcorpo [g/cm^3]	6,3027	6,4912	6,4932	6,4628	6,5045	6,5625	T bico	560 °C
	V poros [cm^3]	0,1095	0,0557	0,0552	0,0630	0,0518	0,0363	T banho	430 °C
	% poros	5,93%	3,12%	3,09%	3,54%	2,92%	2,05%		
	Média pcorpo	6,4695		Média % poros	3,44%			TH2O [°C]	25
	DesvPad pcorpo	0,0804		DesvPad % poros	1,20%			ρH2O [g/cm^3]	0,997

Ensaio: LDI Tmold 102		Código: BNLDI400507_M102							
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6		
	Wd [g]	11,6347	11,6126	11,6194	11,6120	11,5688	11,5889	Pressão	4,0 bar
	Wi [g]	9,8258	9,8275	9,8328	9,8476	9,8157	9,8418	t enchim.	0,50 s
	Ww [g]	11,6617	11,6192	11,6276	11,6180	11,5731	11,5921	t arrefec.	0,70 s
	Ws [g]	0,0310	0,0310	0,0310	0,0310	0,0287	0,0287	t sopro	0,30 s
	pcorpo [g/cm^3]	6,3015	6,4446	6,4373	6,5218	6,5469	6,5849	T bico	560 °C
	V poros [cm^3]	0,1095	0,0685	0,0706	0,0472	0,0403	0,0302	T banho	430 °C
	% poros	5,95%	3,81%	3,92%	2,66%	2,29%	1,72%		
	Média pcorpo	6,4728		Média % poros	3,39%			TH2O [°C]	25
	DesvPad pcorpo	0,0930		DesvPad % poros	1,39%			ρH2O [g/cm^3]	0,997

Ensaio: LDI Tmold 120		Código: BNLDI400507_M120							
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6		
	Wd [g]	11,6504	11,6362	11,6594	11,6382	11,6251	11,6207	Pressão	4,0 bar
	Wi [g]	9,8952	9,8558	9,8495	9,8686	9,8513	9,8597	t enchim.	0,50 s
	Ww [g]	11,6980	11,6507	11,6626	11,6498	11,6411	11,6399	t arrefec.	0,70 s
	Ws [g]	0,0293	0,0253	0,0253	0,0292	0,0279	0,0220	t sopro	0,30 s
	pcorpo [g/cm^3]	6,4268	6,4494	6,3974	6,4980	6,4602	6,4958	T bico	560 °C
	V poros [cm^3]	0,0737	0,0673	0,0821	0,0539	0,0643	0,0544	T banho	430 °C
	% poros	4,08%	3,74%	4,52%	3,02%	3,58%	3,05%		
	Média pcorpo	6,4546		Média % poros	3,66%			TH2O [°C]	25
	DesvPad pcorpo	0,0358		DesvPad % poros	0,53%			ρH2O [g/cm^3]	0,997

Ensaio: LDS Tmold 97		Código: BNLDS450505_M97							
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6		
	Wd [g]	12,8787	12,756	12,4422	12,8076	12,875	12,721	Pressão	4,5 bar
	Wi [g]	10,9208	10,7888	10,4902	10,8543	10,9091	10,7525	t enchim.	0,50 s
	Ww [g]	12,8825	12,7585	12,4447	12,8098	12,8769	12,723	t arrefec.	0,50 s
	Ws [g]	0,0287	0,0253	0,025	0,022	0,0218	0,0267	t sopro	0,30 s
	pcorpo [g/cm^3]	6,5308	6,4439	6,3341	6,5187	6,5122	6,4228	T bico	560 °C
	V poros [cm^3]	0,0497	0,0755	0,1071	0,0531	0,0553	0,0818	T banho	430 °C
	% poros	2,53%	3,82%	5,46%	2,71%	2,80%	4,14%		
	Média pcorpo	6,4604		Média % poros	3,58%			TH2O [°C]	25
	DesvPad pcorpo	0,0691		DesvPad % poros	1,03%			ρH2O [g/cm^3]	0,997

Ensaio: LDS Tmold 118		Código: BNLDS450505_M97							
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6		
	Wd [g]	12,9219	12,7566	12,8309	12,9208	12,7942	12,8580	Pressão	4,5 bar
	Wi [g]	10,9769	10,7895	10,8605	10,9536	10,8324	10,8882	t enchim.	0,50 s
	Ww [g]	12,9234	12,7577	12,8321	12,9229	12,7964	12,8600	t arrefec.	0,50 s
	Ws [g]	0,0268	0,0250	0,0217	0,0268	0,0268	0,0268	t sopro	0,30 s
	p corpo [g/cm³]	6,6049	6,4492	6,4774	6,5279	6,4812	6,4878	T bico	560 °C
	V poros [cm³]	0,0277	0,0739	0,0657	0,0507	0,0643	0,0626	T banho	430 °C
	% poros	1,42%	3,74%	3,32%	2,57%	3,27%	3,17%		
	Média p corpo	6,5047			Média % poros	2,91%		T H2O [°C]	25
	DesvPad p corpo	0,0504			DesvPad % poros	0,75%		pH2O [g/cm³]	0,997

Pressão	4,5 bar
t enchim.	0,50 s
t arrefec.	0,50 s
t sopro	0,30 s
T bico	560 °C
T banho	430 °C

Ensaio: LDHO Tmold 148		Código: BNMLDO601307_M148							
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6		
	Wd [g]	17,8636	17,8252	17,8137	17,8477	17,8035	17,8261	Pressão	6,0 bar
	Wi [g]	15,1484	15,1156	15,1053	15,1422	15,0973	15,1148	t enchim.	0,60 s
	Ww [g]	17,8726	17,8447	17,8238	17,8573	17,8120	17,8387	t arrefec.	1,30 s
	Ws [g]	0,0190	0,0191	0,0191	0,0257	0,0257	0,0259	t sopro	0,30 s
	p corpo [g/cm³]	6,5275	6,5017	6,5228	6,5411	6,5258	6,5119	T bico	620 °C
	V poros [cm³]	0,0704	0,0811	0,0721	0,0646	0,0708	0,0767	T banho	430 °C
	% poros	2,58%	2,96%	2,64%	2,37%	2,60%	2,81%		
	Média p corpo	6,5218		Média % poros	2,66%			T H2O [°C]	27
	DesvPad p corpo	0,0124		DesvPad % poros	0,18%			pH2O [g/cm³]	0,9965

Pressão	6,0 bar
t enchim.	0,60 s
t arrefec.	1,30 s
t sopro	0,30 s
T bico	620 °C
T banho	430 °C

Ensaio: LDHO Tmold 77		Código: BNMLDO601307_M77							
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6		
	Wd [g]	17,7735	17,8129	17,8187	17,7810	17,8605	17,7925	Pressão	6,0 bar
	Wi [g]	15,0687	15,1162	15,1137	15,0842	15,1586	15,0892	t enchim.	0,60 s
	Ww [g]	17,7878	17,8211	17,8416	17,7946	17,8660	17,8019	t arrefec.	1,30 s
	Ws [g]	0,0190	0,0203	0,0259	0,0258	0,0258	0,0204	t sopro	0,30 s
	p corpo [g/cm³]	6,5067	6,5549	6,4997	6,5278	6,5643	6,5285	T bico	620 °C
	V poros [cm³]	0,0787	0,0588	0,0818	0,0699	0,0550	0,0697	T banho	430 °C
	% poros	2,89%	2,17%	2,99%	2,57%	2,02%	2,56%		
	Média p corpo	6,5303			Média % poros	2,53%		TH2O [°C]	27
	DesvPad p corpo	0,0233			DesvPad % poros	0,35%		pH2O [g/cm³]	0,9965

Pressão	6,0 bar
t enchim.	0,60 s
t arrefec.	1,30 s
t sopro	0,30 s
T bico	620 °C
T banho	430 °C

Ensaio: LDHO Tmold 104		Código: BNMLDO601307_M104							
Prin. Aquimedes [poros]		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6		
	Wd [g]	17,8322	17,8791	17,8142	17,7742	17,897	17,7737	Pressão	6,0 bar
	Wi [g]	15,1327	15,1703	15,1217	15,0752	15,1962	15,0835	t enchim.	0,60 s
	Ww [g]	17,8464	17,8931	17,822	17,7817	17,9018	17,7814	t arrefec.	1,30 s
	Ws [g]	0,0259	0,0259	0,0259	0,0259	0,0259	0,0259	t sopro	0,30 s
	p corpo [g/cm³]	6,5387	6,5340	6,5645	6,5347	6,5821	6,5554	T bico	620 °C
	V poros [cm³]	0,0656	0,0677	0,0548	0,0670	0,0478	0,0585	T banho	430 °C
	% poros	2,41%	2,48%	2,02%	2,47%	1,76%	2,16%		
	Média p corpo	6,5515		Média % poros	2,22%		TH2O [°C]	27	
	DesvPad p corpo	0,0177		DesvPad % poros	0,26%		pH2O [g/cm³]	0,9965	

Pressão	6,0 bar
t enchim.	0,60 s
t arrefec.	1,30 s
t sopro	0,30 s
T bico	620 °C
T banho	430 °C