



Dissertação

Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento de Produto

***Injeção assistida por água de componentes
tubulares mono e multi-ramificados***

David Santos Oliveira

Leiria, *Setembro* de 2016



Dissertação

Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento de Produto

***Injeção assistida por água de componentes
tubulares mono e multi-ramificados***

David Santos Oliveira

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Artur Mateus, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Fábio Simões, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, *Setembro de 2016*

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos sem os quais não se teria tornado uma realidade e aos quais estarei eternamente grato.

Ao Professor Doutor Artur Jorge dos Santos Mateus, expresso o meu profundo agradecimento pela orientação e apoio incondicionais que muito elevaram os meus conhecimentos científicos e, sem dúvida, muito estimularam o meu desejo de querer, sempre, saber mais e a vontade constante de inovar criar e soluções.

Ao Professor Doutor Fábio Pereira Simões, pela disponibilidade, apoio e pela originalidade de ideias para elaborar uma dissertação completa e ideal.

À Professora Doutora Cândida Maria Dos Santos Pereira Malça, expresso o meu agradecimento pelas opiniões, pelo apoio e pelos conhecimentos transmitidos, que muito elevaram os meus conhecimentos científicos

Ao diretor do Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado do Produto, o Professor Doutor Nuno Manuel Fernandes Alves, pela oportunidade de desenvolver todo o trabalho de investigação no CDRsp.

Aos colegas de trabalho e amigos Tiago, Cyril, Pedro, Miguel, Raimundo, Mauro e Margarida pelas horas de trabalho que passamos juntos. À Minha Família, em especial aos Meus Pais e ao Meu Irmão, um enorme obrigada por acreditarem sempre em mim e naquilo que faço e por todos os ensinamentos de vida. Espero que esta etapa, que agora termino, possa, de alguma forma, retribuir e compensar todo o carinho, apoio e dedicação que, constantemente, me oferecem. A eles, dedico todo este trabalho.

À equipa da empresa Moldetipo II, em especial ao Engenheiro Silvério, Engenheiro Mário e Engenheiro Telmo, pela disponibilidade e apoio na elaboração dos casos de estudos desta dissertação. Esta parceria foi, sem dúvida, uma mais-valia para elevar o meu conhecimento técnico sobre esta importante indústria.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

Atualmente na produção de peças poliméricas com geometrias complexas e ocas é utilizada a tecnologia de injeção assistida por água, gás e com ou sem projétil. O processo consiste na injeção de água a pressões elevadas, isto ocorre após o fecho do molde e injeção de polímero até ao preenchimento total da zona moldante. A injeção de água a pressões elevadas vai forçar o polímero, do núcleo da peça, a ser expulso para um reservatório. Esta expulsão de material é possível não só graças às elevadas pressões da água, mas também por causa do polímero ainda se encontrar em estado viscoso, facilitando o seu escoamento.

A tecnologia de injeção assistida por fluido pode ser implementada por, injeção direta de água, gás ou com auxílio de um projétil. Dentro destas vertentes existe uma limitação em comum, a impossibilidade de produzir peças vazadas com canais bifurcados. No entanto existe a possibilidade de criar estas ramificações, mas com o entrave de não poderem ser geometricamente complexas e/ou serem extensas. Nestes casos as ramificações são criadas com posições dentro do molde, significando que estará sempre limitado pelo posição moldante e não controlado pelo jato de água. Para os casos onde é desejado a adição de ramificações complexas e/ou extensas têm de ser submetido a etapas subsequentes de preparação e montagem, influenciando o tempo global da produção.

Com o projeto Multi-Path.H₂O pretende-se criar um novo processo de produção para peças vazadas, mas com canais ramificados de geometrias complexas e extensas, num só ciclo de injeção e assim eliminando os processos subsequentes que atualmente são necessários. A abordagem primordial consiste na aplicação de vários injetores para jato de água, canalizados para as respetivas ramificações por vazar.

Esta inovação terá impacto na produção em série de peças complexas de tipologia tubular, reduzindo o tempo de produção com a eliminação dos processos subsequentes; também a poupança de matéria-prima pela desnecessidade de criar moldes adicionais.

Nesta dissertação foi elaborado um detalhado estudo experimental do processo de injeção assistida por água, para servir de base de conhecimento ao conceito do novo processo, Multi-Path.H₂O. De referir que em Portugal o projeto e fabrico de moldes com a implementação do sistema injeção por água, está resumido a um número limitado de empresas.

Palavras-chave: Injeção assistida por água (IAA), injeção assistida por gás (IAG), Injeção com auxílio por projétil, injeção vazada multi-ramificada.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

Currently to produce hollow polymeric parts with complex geometries the fluid assisted injection technology is used, in which water and gas can be employed, and also with or without the aid of a projectile. The process consists in the injection of water at high pressures, this occurs after the closing of the mould and polymer injection up to the filling the whole moulding zone. The injection of water at high pressures will force the polymer from the core to be expelled to a reservoir. This material expulsion is possible not only thanks to the high water pressures, but also because of the polymer is still in a viscous state, thus facilitating the evacuation.

The fluid assisted injection technology can be implemented by direct injection of water/gas or with aid of a projectile. Within these strands there is a common limitation, the inability to produce hollowed parts with forking channels. However there is the possibility of creating these branches, but with the impossibility of them being geometrically complex and/or extensive. In these cases, the branches are created with inserts inside the mould, meaning that it will always be limited by a moulding insert, and not controlled by water jet. For cases where it is desired to add complex and/or extensive ramifications, subsequent steps of production and assembling must be added, influencing the overall production time.

The Multi-Path.H₂O project aims to create a new production process for hollow parts, but with extensive branched channels and complexed geometries, within a single injection cycle and thus eliminating subsequent processes that are currently required. The primary approach is the application of several water jet injectors, guided towards the respective branches where hollow sections are intended to be produced.

This innovation will have an impact on the serial production of high complexity tubular type parts, reducing the production time with the elimination of subsequent processes; also the saving of raw materials by the lack of necessity to create additional moulds.

In this dissertation a detailed experimental study of the water assisted injection process was elaborated, to serve as a knowledge base to the concept of the new process, Multi-Path.H₂O. It should be noted that in Portugal the design and manufacture of moulds with the implementation of water injection system is reduced to a limited number of companies.

Keywords: *water assisted injection moulding (WAIM), gas assisted injection moulding (GAIM), injection with projectile, multi ramification hollow injection.*

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de figuras

Figura 1 - Estrutura de um molde de duas placas	6
Figura 2 - Tabela da produtividade horaria dependente do número de cavidades (SHEMCO 2005)	6
Figura 3 - Representação esquemática de um canal de arrefecimento (Centimfe 2003)	7
Figura 4- Ciclo de moldação (Centimfe 2003)	8
Figura 5 – Fluxo ocorrente no processo de injeção assistida por fluido (Hopmann et al. 2012)	12
Figura 6 - Ilustração do projeto das secções transversais (Kamal et al. 2009)	13
Figura 7 - Razão de aspeto (Kamal et al. 2009)	13
Figura 8 - Projeto com várias cavidades (Kamal et al. 2009)	13
Figura 9 - Projeto de curvas e redirecção (Kamal et al. 2009)	14
Figura 10 - Projeto com a variação da acumulação de material (Kamal et al. 2009)	14
Figura 11 - Comparação termográfica entre injeção a gás e água (Fleack 2007)	17
Figura 12 - Comparação da contração vs pressão de compactação (Michaeli & Jüntgen 2002)	19
Figura 13 - Diferença entre a tecnologia de injeção assistida por gás (IAG) e água (IAA) (Covestro 2015)	19
Figura 14 - Espessura residual das paredes internas e concentricidade das secções vazadas (Michaeli & Jüntgen 2002)	20
Figura 15 - Defeitos típicos na superfície interior da peça moldada, sem parâmetros otimizados (Protte & Konejung 2003)	21
Figura 16 - Variantes do processo (Knights 2002)	22
Figura 17 - Ciclo de moldação por injeção assistida por água (Kamal et al. 2009)	25
Figura 18 - Fases de processamento na injeção assistida por água (Liu et al. 2007)	26
Figura 19 - Perfil de pressão do processo da injeção assistida por água (Zhou et al. 2012)	26
Figura 20 - Possíveis tipos de injetores: Tipo A: injetor de abertura automática; Tipo B: injetor de funcionamento hidráulico (Protte & Konejung 2003)	29
Figura 21 - Injetores hidráulicos	29
Figura 22 - Vazamento a partir de projétil (Battenfeld 2014)	30
Figura 23 - Esquema exemplificativo da injeção com projétil (Battenfeld 2014)	30
Figura 24 - Injeção em perfis não circulares (Myplasticsblog 2012)	31

Figura 25 – Representação do molde protótipo industrial 1	36
Figura 26 - Chapa zona moldante do molde protótipo industrial 1	36
Figura 27 - Modelação do pedal de embraiagem	37
Figura 28 – Chapas moldantes do molde protótipo industrial 2	38
Figura 29 - Chapas do molde protótipo industrial 1	40
Figura 30 - Primeira versão do molde protótipo industrial 2	40
Figura 31 - Versão final do molde protótipo industrial 2	41
Figura 32 - Sistema de injeção assistida por água	42
Figura 33 - Injetor de água	42
Figura 34 - Projétil calibrado	42
Figura 35 - Unidade de injeção Euroinj D300	43
Figura 36 – Parâmetros de processamento para a injeção do TPE TC8GPN	44
Figura 37 - Parâmetros de processamento para a injeção da PA 6.6.	46
Figura 38 - Gráfico de processamento do componente do molde industrial 2	48
Figura 39 - Processamentos com molde protótipo industrial 1	48
Figura 40 - Injetor de água com auxílio a projétil	49
Figura 41 – Cavidade fixa do molde após o processo de injeção	50
Figura 42 - Componentes injetados sem água, com água e com projétil	51
Figura 43 - Vários componentes injetados do molde protótipo 2	52
Figura 44 - Projétil danificado durante processo de injeção	52
Figura 45 - Problemas derivados da má posição do projétil	53
Figura 46 - Fuga de polímero do núcleo do componente	54
Figura 47 - a) Rutura da zona de contacto entre materiais; b) Insuficiência do preenchimento; c) Rebarba do TPE	54
Figura 48 - Elemento: a) Sólido; b) Vazado com injeção assistida por água com projétil; c) Vazado com injeção assistida por água	55
Figura 49 - Componente: a) Sólido; b) Vazada	56
Figura 50 – a) Equipamento micro-tomografia; b) Extração da amostra; c) Amostra na plataforma do equipamento	57
Figura 51 - a) Amostra por injeção direta de água; b) Amostra injetado com auxílio de projétil	58
Figura 52 - Corte do pedal (visionamento da secção vazada)	58
Figura 53 - Digitalização tridimensional do componente injetado	59
Figura 54 - Desvios dimensionais	60

Figura 55 - Ilustração do processo convencional de injeção assistida por água	64
Figura 56 - Exemplo de tubo com ramificação por acoplar. Fonte: MoldetipoII, 2015	65
Figura 57 - Esquema do sistema proposto	66
Figura 58 - Representação por etapas da injeção da água	67
Figura 59 - Modelação final molde protótipo Multi-Path.H ₂ O	68
Figura 60 - Componente teste a injetar	69
Figura 61 - Estrutura moldante Multi-Path.H ₂ O	69
Figura 62 - Chapa moldante Multi-Path.H ₂ O	70
Figura 63 - Válvulas de controlo	71
Figura 64 - Ilustração do circuito de arrefecimento	71

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de tabelas

Tabela 1 - Desenhos guia de perfis para produção de componentes de paredes finas (Mieth & Tromm 2016)	14
Tabela 2 - Propriedades termicas da água e gás (Roth 2007)	18
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens principais entre os processos (Michaeli & Jüntgen 2002)	25
Tabela 4 - Vantagens e desvantagens do processo de injeção assistida por água (Michaeli & Jüntgen 2002)	32
Tabela 5 - Caraterísticas máximas do sistema de injeção Euroinj D300	43
Tabela 6 - Propriedades técnicas da TPE TC8GPN (KRAIBURG 2016)	44
Tabela 7 - Propriedades técnicas das poliamidas (Shappe 2012)	45
Tabela 8 - Parâmetros de processamento da injeção de água	47

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas

IAA	Injeção Assistida por Água
IAG	Injeção Assistida por Gás
GAIM	Gas Assisted Injection Moulding
PA	Poliamida
PP	Polipropileno
WAIM	Water Assisted Injection Moulding
TPE	Thermoplastic Elastomer

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SIGLAS	XV
ÍNDICE	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Estrutura da dissertação	2
2. INJEÇÃO DE POLÍMEROS	5
2.1. Molde e seus sistemas	5
2.2. Fases do ciclo de moldação	8
3. INJEÇÃO ASSISTIDA POR FLUIDO	11
3.1. Regras de projeto para peças vazadas	12
3.2. Injeção assistida por gás e água	16
3.2.1. Injeção assistida por gás versus água	17
3.2.2. Qualidade e defeitos dos componentes	18
3.3. IAA – Variantes de processo	22
3.4. IAA – Parâmetros de processamento	25
3.5. IAA – Sistema e abordagens de injeção	28
3.5.1. Injetores de água e suas características	28
3.5.2. Injeção com auxílio de projétil	30
3.6. Resumo do capítulo	32
4. ESTUDO PRELIMINAR	35
4.1. Conceção dos moldes protótipo	35
4.1.1. Retificações aos moldes protótipo	40
4.2. Ensaio e testes de injeção	41
4.2.1. Material e processamento	43
4.2.2. Parâmetros da injeção de água	46
4.2.3. Primeira série de ensaios	48
4.3. Resultados	50
4.3.1. Erros de produção	52
4.3.2. Comparação da diferença de massa	55

4.3.3.	Análises dimensionais	56
4.4.	Conclusões dos estudos preliminares	60
5.	O SISTEMA MULTI-PATH.H₂O	63
5.1.	IAA – Problemas atuais no processo	63
5.2.	Conceito e solução proposta	66
5.3.	Conceção do conceito Multi-Path.H ₂ O	68
5.3.1.	Estrutura do molde	69
5.4.	Possíveis benefícios e limitações	72
6.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	73
	BIBLIOGRAFIA	75
	ANEXOS	79
	ANEXO A – Comprovativo Pedido de Patente	80
	ANEXO B – Artigo Científico	82

1. Introdução

Diante de um mercado global cada vez mais competitivo, as empresas têm evidenciado parte de seus esforços no desenvolvimento rápido e eficaz de novos produtos para responder à procura e manterem-se competitivas. No processo de desenvolvimento de componentes injetados, o molde de injeção mostra ser um sistema complexo, de elevado custo, de grande importância para a obtenção de componentes de qualidade em prazos curtos.

Atualmente existem várias tecnologias para auxiliar a injeção convencional na produção de peças vazadas (tipologia tubular), cada um destes processos possui vantagens referentes à produção de peças em grande escala, mas por outro lado também possuem características menos favoráveis para geometrias mais complexas e no que diz respeito à qualidade das paredes interiores. Focando no método de injeção direta de fluido, este permite a criação de secções vazadas com perfis variáveis, que é ótimo para peças de maior complexidade e com grandes variações volumétricas, e uma remoção otimizada do polímero interno da peça. Apesar desta tecnologia de injeção assistida por fluido direto/projétil, apresentar uma grande versatilidade na produção de peças ocas, este também apresenta uma limitação em comum; a impossibilidade de produzir peças tubulares com ramificações de geometrias complexas e extensas, numa só injeção.

Atualmente existe um grande mercado com a necessidade de produção de peças vazadas (tipologia tubulares) e para estas produções a tecnologia mais adequada é a injeção assistida por fluido, que pode ser executada pelo método de injeção direta de água, injeção direta de gás ou, para ambos casos, com auxílio de um projétil. Esta tecnologia é apenas utilizada para fazer produção de peças vazadas de uma tipologia simples, com um ou vários canais, mas de um nível de complexidade baixa. Este projeto tem como objetivo explorar mais valências desta tecnologia, inovar e criar uma nova metodologia de produção, onde será possível a injeção de peças de secção vazada com ramificações bifurcadas de geometrias com um nível de complexidade superior num só ciclo de injeção, assim eliminando processos subsequentes e morosos. O sistema proposto neste projeto terá o nome de Multi-Path.H₂O.

A criação do sistema para esta nova metodologia de produção será dividida em duas partes: primeira das quais é focada num âmbito mais teórico, onde será feito um estudo e

testes preliminares sobre o comportamento dinâmico do fluxo das águas pelos canais, com o intuito de compreender melhor o processo de injeção assistida por fluido e suas vertentes. A segunda parte será um âmbito mais prático do sistema, onde será estudado, projetado e produzido um sistema mecânico para inserir num molde para adaptar à metodologia do novo proposto processo de produção de peças tubulares, assim criando uma via para um controlo físico do fluxo de água em sintonia com o algoritmo de sincronização.

1.1. Objetivos

O principal objetivo do projeto é o uso da tecnologia de injeção direta de água, para universalizar as seções das peças plásticas vazadas com ramificações extensas e de seções complexas e com uniformidade da espessura. As consequências são conseguir um processo que contribua para uma fabricação ecologicamente sustentável e uma produção menos demorada e dispendiosa para peças desta tipologia.

Assim, o foco desta dissertação consiste num forte estudo e compreensão do processo de injeção assistida por água para a conceção de um processo/sistema auxiliando à injeção direta de água que possibilita a criação de seções vazadas de vários canais bifurcados num só ciclo de injeção, eliminando processos subsequentes. Este sistema será titulado como Multi-Path.H₂O.

1.2. Estrutura da dissertação

A dissertação apresentada tem duas partes principais e está dividida em 6 capítulos. A primeira parte da dissertação consiste no estudo intensivo sobre a tecnologia de injeção assistida por água, a partir de pesquisas e da execução de testes em moldes protótipo. A segunda parte será a conceção e projeto de um sistema (Multi-Path.H₂O) que possibilita produzir as peças postas em causa, com base dos estudos elaborados anteriormente.

Os 6 capítulos são os seguintes:

- Capítulo 1 – Introdução

No primeiro capítulo são descritos e explicados os objetivos principais e a estrutura geral da presente dissertação.

- Capítulo 2 – Injeção de polímeros

O segundo capítulo consiste na introdução e explicação do processo de injeção de plástico convencional, tendo em conta que o sistema de injeção assistida por água está inteiramente dependente do ciclo de injeção.

- Capítulo 3 – Injeção assistida por fluido

O terceiro capítulo está inteiramente focado na pesquisa bibliográfica e científica do processo de injeção assistida por fluido e suas vertentes, mas dando um maior relevo à injeção assistida por água.

- Capítulo 4 – Desenvolvimento e estudo preliminar

No capítulo quatro, será demonstrado o trabalho executado para o desenvolvimento de protótipos para os estudos preliminares. Os estudos preliminares consistem em ser ensaios de injeção com o processo de injeção assistida por água (com e sem projétil) e várias análises aos resultados obtidos, assim tendo uma melhor compreensão do processo.

- Capítulo 5 – Conceito do sistema Multi-Path.H₂O

Com base nas pesquisas e resultados obtidos dos capítulos anteriores, será feito um resumo das limitações do processo de injeção assistida por água (com e sem projétil) para a produção da tipologia de peças propostas neste projeto. Com a análise destas limitações, neste capítulo cinco, será explicado um possível método/conceito para a resolução destes problemas.

Também será ilustrado uma possível solução para a resolução do problema posto em causa, com a elaboração de uma modelação de um molde protótipo para testar a solução proposta. O desenvolvimento da modelação deste molde terá com objetivo de injetar um componente tubular com vários canais ramificados e de grande simplicidade, para futuramente testar e validar o conceito.

- Capítulo 6 – Conclusões e trabalhos futuros

Por fim, no capítulo sete, será feito um resumo do trabalho efetuado nesta dissertação e as propostas de trabalhos futuros para a continuação e validação do projeto Multi-Path.H₂O.

2. Injeção de polímeros

O processo de injeção de polímero é o processo mais utilizado para a produção de elevados número de peças plásticas em tempos reduzidos. A produção de peças por este processo consiste na injeção de polímero para dentro de um molde. O polímero é fornecido a um fuso aquecido, é misturado e forçado sobre pressão para dentro de um molde, onde este vai arrefecer até solidificar com o formato da cavidade (Todd et al. 1994). A indústria que mais utiliza este processo de produção é do setor de automóvel, que demonstra uma grande necessidade de produzir elevado número peças, desde os componentes mais pequenos até a partes inteiras do corpo de um automóvel, em tempos reduzidos.

2.1. Molde e seus sistemas

Os moldes de injeção são ferramentas que permitem a moldação das peças numa máquina de injeção e são ferramentas de altíssima precisão, que envolvem conceitos dinâmicos, mecânicos, termodinâmicos e resistências dos materiais.

De uma forma simplificada, os moldes são constituídos por duas metades, a bucha e a cavidade. A bucha é normalmente fixa na parte móvel da máquina de injeção e a cavidade é normalmente fixa na parte fixa da máquina de injeção. Estas duas metades ajustam-se e assim definindo um volume, com a configuração da peça que se pretende obter.

O molde deverá ser prático e obedecer “regras” que promovam facilidades para montagem do molde no equipamento de injeção, como utilização de olhais, mangueiras de refrigeração do lado oposto ao operador e outros. O molde também tem que apresentar certas características para permitir uma manutenção rápida, como a desmontagem e montagem rápida e fácil acesso aos mecanismos.

Um molde pode ser considerado como uma estrutura, composto por um conjunto de placas (ou chapas), onde são montados e/ou maquinados os chamados sistemas funcionais, como a estrutura que assegura a solidez estrutural do molde, a centragem e o guiamento, a alimentação, a extração e o sistema de controlo de temperatura.

A estrutura de um molde (Figura 1) é constituída pelo conjunto de placas e calços, cujo número depende do tipo de molde. A estrutura típica e mais simples de um molde de duas placas é constituída por uma parte fixa ou lado da injeção e por uma parte móvel ou lado da extração. A parte fixa é constituída pelas placas de aperto da injeção e placa das cavidades, enquanto a parte móvel é constituída pela bucha, calços, placas de extração e placa de aperto da extração.

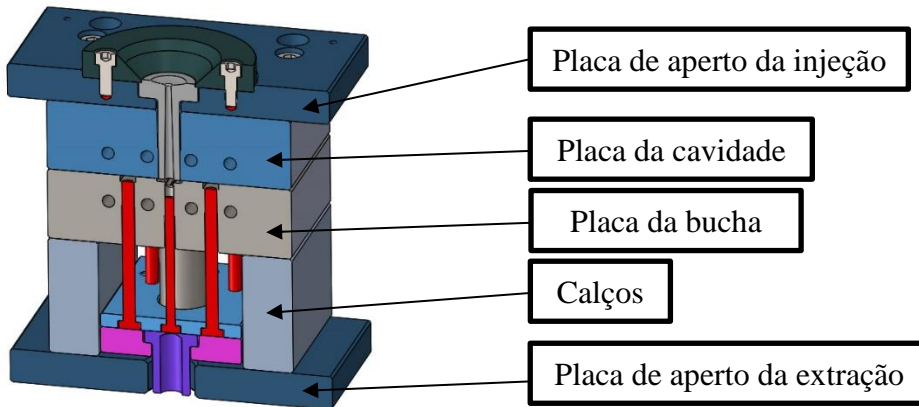


Figura 1 - Estrutura de um molde de duas placas

1. Chapas de bucha e cavidade

Nas placas da cavidade e bucha será maquinado uma área que irá definir a forma das peças a moldar pela injeção de polímero. Um fator importante que tem de se ter em consideração é o número de cavidades, onde vai depender de vários fatores como o consumo mensal estimado, tamanho, geometria da peça e mecanismos necessários para extração. Contudo, principal fator a ter em conta é o custo final da peça de plástico injetada, mas é inversamente proporcional ao valor de investimento para construção de um molde, ou seja, quanto maior o numero de cavidades num molde, maior é o custo de construção, mas quanto maior o numero das cavidades maior será o numero de peças produzidas. A Figura 2 demonstra um exemplo entre a produção de peças por dia tendo em conta o número de cavidades.

Nº DE CAVIDADES	CICLO EM SEGUNDOS	PEÇAS POR HORA	PEÇAS P/DIA (16 HORAS)
2	20	360	5760
4	20	720	11520
8	20	1440	23040
16	20	2880	46080

Figura 2 - Tabela da produtividade horaria dependente do número de cavidades (SHEMCO 2005)

Outro fator que tem impacto na determinação do número de cavidades de um molde é a dimensão do equipamento de injeção, sua capacidade de plastificação e força de fecho. Tendo estes fatores em conta, para uma correta determinação do número de cavidades para um molde, é necessário estabelecer uma relação entre eles, variando cenários até que se obtenha a melhor relação custo/benefício.

2. Sistema de extração

É de notar que a cavidade e a bucha podem estar situadas, indiferentemente, na parte fixa ou na parte móvel do molde. No entanto, é mais comum a configuração descrita já que esta facilita a extração das peças. Os calços permitem definir o espaço necessário aos movimentos do sistema de extração e podem contribuir para a altura mínima do molde, exigível pela máquina onde o molde vai produzir.

O sistema de extração é o mecanismo que permite a retirada da peça de dentro da cavidade do molde, após o processo de injeção. Como no ponto de injeção, o posicionamento correto do sistema de extração é um ponto crucial a ter em conta num molde. Existem vários mecanismos de extração, como pinos, placas, camisa extratora, gavetas, pinças, sistemas hidráulicos e pneumáticos e outros, onde cada um é aplicado dependente da geometria da peça a injetar/extrair.

3. Sistema de arrefecimento

Outra característica que um molde necessita, é um sistema de arrefecimento. Este sistema contribui para o arrefecimento das peças, variável crítica do processo de injeção (Bom 2014). A regulação e gestão da temperatura são feitas normalmente através de canais de arrefecimento dentro da cavidade e da bucha do molde. Um canal de arrefecimento é uma passagem na qual circula um fluido (água ou óleo) de arrefecimento, que transporta o calor para o exterior do molde (Figura 3).

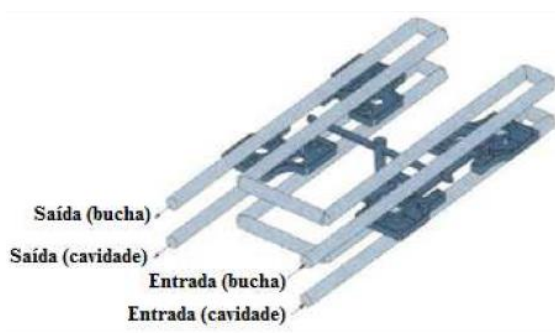


Figura 3 - Representação esquemática de um canal de arrefecimento (Centimfe 2003)

2.2. Fases do ciclo de moldação

O conjunto de operações representadas na Figura 4, fazem parte de um processo global que se designa de ciclo de moldação (Centimfe 2003). Este processo contempla todas as etapas para a produção de uma peça plástica. As fases do processo são praticamente independentes da máquina de injeção, podendo o ciclo ser utilizado para descrever praticamente todos os processos de injeção. O ciclo preferencialmente deve ser feito em modo automático para que seja o mais breve possível.

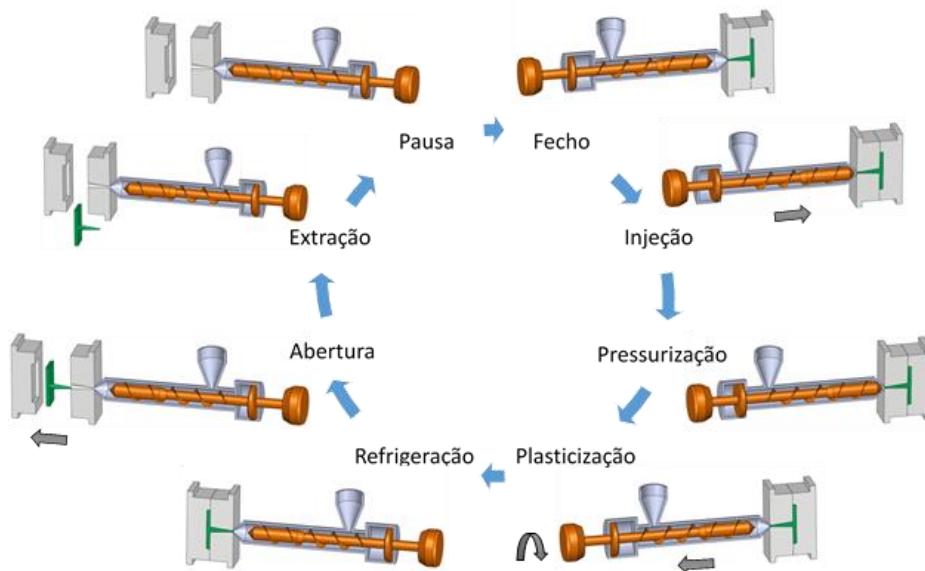


Figura 4- Ciclo de moldação (Centimfe 2003)

O processo de injeção é um processo cíclico e o conjunto de operações necessário à produção de uma moldação. Pode ser dividido em 6 fases, ou seja, existe um conjunto de 6 operações que se efetuam na máquina de injeção entre a produção de duas peças consecutivas, que são as seguintes:

1. Fecho do Molde

O ciclo tem início com o fechar do molde. Nesta fase as duas partes principais que constituem um molde injeção (lado da injeção e lado da extração) são prensadas entre os pratos da máquina injetora. Desta forma é garantido o total contacto entre as superfícies da junta do molde promovendo a boa qualidade da peça injetada. Esta fase deve ser tão rápida quanto possível estando a velocidade de execução limitada às características da máquina e dimensão do molde.

2. Fase da Injecção

A injeção do material fluido, para o interior do molde, é efetuada pelo avanço linear do fuso. O fuso desloca-se axialmente como um pistão pressionando o material, que é forçado a fluir para o interior da impressão. A velocidade de injeção deve ser tomada como um compromisso entre qualidade da peça e rapidez de enchimento. Elevadas velocidades de injeção promovem o total enchimento da peça, mas podem causar defeitos na peça. O tempo de injeção é normalmente muito reduzido.

3. Fase de Pressurização

Esta fase também, denominada de segunda pressão ou pós pressão, inicia após o enchimento da peça. A pressurização do material após o enchimento, reduz o efeito de contração por arrefecimento, contribuindo para a diminuição de empenos da peça e final, e evita o refluxo do material fundido. O excesso de pressurização pode ser prejudicial pois pode criar tensões internas na peça e dificultar a sua extração. A fase de pressurização termina quando o fundido nos canais solidifica impedindo o fluxo de material.

4. Fase de Arrefecimento e Plastização

A fase de arrefecimento é das que mais impacto tem no ciclo de moldação. Nesta fase ocorrem dois processos simultâneos muito importantes para o ciclo.

Após a solidificação do canal de injeção o fuso da máquina roda e inicia-se a plasticização do material para o novo ciclo. O movimento de rotação obriga o material a fluir para a frente do fuso e este recua axialmente, devido à pressão, deixando um aglomerado de fundido junto ao injetor a que se dá o nome de almofada.

Simultaneamente, ocorre o arrefecimento do fundido. Este processo energético, consiste na troca de calor por difusão através do material do molde, entre o fundido e o sistema de refrigeração. O tempo de refrigeração depende da eficácia do sistema de refrigeração, da geometria e espessura da peça plástica. Elevadas velocidades de refrigeração podem causar empenos na peça, enquanto velocidades mais baixas aumentam o tempo de ciclo. A fase de arrefecimento termina assim que o fundido adquira consistência suficiente para que possa ser extraído eficazmente.

5. Fase de Abertura e Extração

O molde é aberto normalmente em duas metades, o lado da injeção e o lado da extração. Desta forma, a peça injetada fica exposta e pronta para ser extraída. A extração da peça

sucede a abertura. As chapas extratoras avançam empurrando a peça plástica, através de extratores ou outros mecanismos de desmoldação, que cair por gravidade ou retirada por um robot. De forma a reduzir a fase da extração e a tornar o processo mais autónomo, a separação do gito da peça deve ser automática, na forma de injeção submarina ou com o auxílio de um robot. Após a extração da peça, as chapas extratoras recuam e o molde fecha. O tempo utilizado por estas duas fases depende principalmente das características da máquina injetora, mas também da complexidade do molde, e do método de injeção da peça.

6. Tempo de Pausa

Este período após a extração e antes do fecho do molde, preferencialmente deve ser zero, o que acontece normalmente quando o processo é automático. Quando remoção da peça é feita de forma manual, ou quando é necessário algum tipo de operação no molde antes do novo ciclo, o tempo de pausa deixa de ser zero.

3. Injeção assistida por fluido

O presente capítulo pretende explicar o conceito, vantagens e as várias variantes do processo de injeção assistida por fluido, para a criação de componentes poliméricos de secção vazada. Nestes últimos anos esta tecnologia tem vindo a ter uma maior procura, para a fabricação de peças plásticas, graças à sua capacidade de produzir peças mais leves, com ciclos mais rápidos e uma maior poupança de matéria-prima (Liu & Wu 2007). Estas características são ótimas para a produção de componentes para o setor automóvel e aeronáutica, pois é possível a produção de inúmeras peças com tempos reduzidos e com poupança na matéria-prima utilizada, como o caso da produção de pedais para embraiagem de automóveis. A injeção de um pedal, com o auxílio da injeção de fluido, otimiza o componente com uma redução de cerca 10% do seu peso e tendo o mesmo desempenho que um pedal maciço (Akro-Plastic 2016).

A tecnologia de injeção assistida por fluido representa uma mais-valia para a indústria de injeção de componentes plásticos, trazendo maior produtividade, rapidez e sustentabilidade. A sustentabilidade deste processo reflete-se pela poupança de material recuperado pela remoção do interior (núcleo) do componente, que depois irá ser reutilizados para próximas injeções. Também é de notar que este processo é bastante sustentável para a indústria automóvel, pois com a criação de componentes mais leves, irá resultar de um automóvel mais leve e daí trazer menores consumos.

O processo consiste na injeção de um fluido a pressões elevadas, após o fecho do molde e injeção de polímero até ao preenchimento total da zona moldante. A injeção deste fluido a pressões elevadas vai forçar o polímero, do núcleo da peça, a ser expulso para um reservatório e em certos casos são diretamente redirecionados para o fuso da injetora, assim tendo uma reutilização mais eficiente. Esta expulsão de material é possível não só graças às elevadas pressões do fluido, mas também por causa do polímero ainda se encontrar num estado viscoso, facilitando o seu escoamento.

O esquema da Figura 5 ilustra, de uma forma simplificada, o fluxo que ocorre no processo de injeção assistida por fluido. A produção de peças vazadas pode ser dividida em cinco zonas (Hopmann et al. 2012). Na zona do “*Flow front*” do polímero (IV), é presente um fluxo de recuo, onde as partículas fundidas do núcleo são transferidas para a extremidade da zona moldante e imediatamente arrefecido. A zona III é um fluxo paralelo e laminar,

nesta área uma camada exterior é arrefecida e formada. A formação da espessura da parede residual é significativamente afetada no intervalo “*Flow front of the fluid*” (II). A espessura de parede residual consiste numa camada solidificada exterior e uma camada de “*Melt-liquid*”, que ainda não foi deslocada pelo fluido. E por fim, “*One-component flow*” encontra-se na zona I, que representa a fase final do processo.

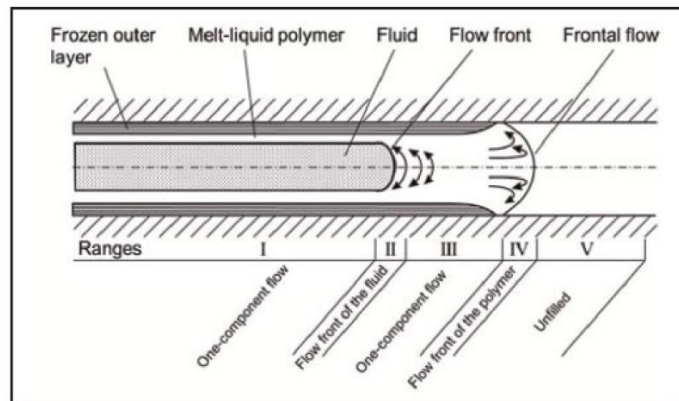


Figura 5 – Fluxo ocorrente no processo de injeção assistida por fluido (Hopmann et al. 2012)

3.1. Regras de projeto para peças vazadas

A tecnologia de moldação por injeção assistida por fluido apresenta um bom desempenho na produção de peças tubulares. Neste sentido, quando se está a projetar a secção transversal da peça, deve considerar-se que o canal provocado pelo escoamento do fluido formará uma secção transversal aproximadamente circular. Para prevenir a não uniformidade da distribuição do material ao longo a secção transversal, que leva inevitavelmente a defeitos e empenos, o contorno exterior deve ser projetado o mais circular possível. Durante a fase de projeto devem ser consideradas as seguintes regras para a forma exterior (Kamal et al. 2009), com a ilustração de alguns exemplos na Figura 6:

- Realização da melhor aproximação possível ao contorno circular;
- Evitar as arestas;
- Evitar acumulações de material;
- Distribuição uniforme da espessura residual da parede, ao longo da peça.

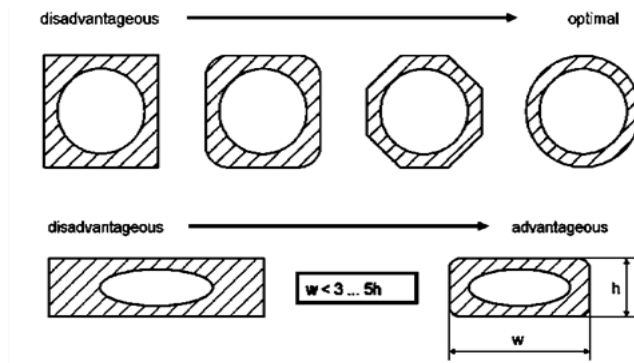


Figura 6 - Ilustração do projeto das secções transversais (Kamal et al. 2009)

Geralmente, depois de ocorrer a injeção, o fluido necessita de um determinado comprimento de fluxo, para que saia completamente da secção transversal, conforme demonstra a Figura 7, o que traduz as razões de aspeto do processo.

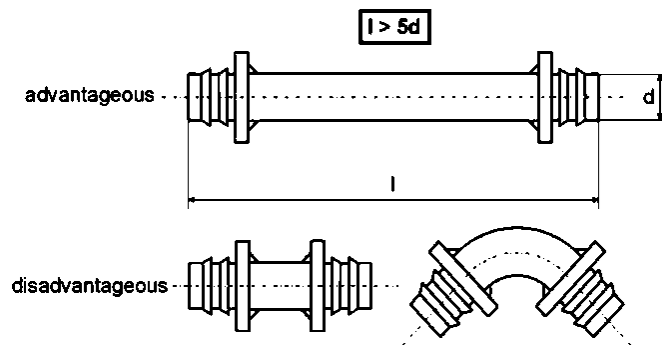


Figura 7 - Razão de aspeto (Kamal et al. 2009)

Caso seja necessário produzir um número de peças com um comprimento menor, como ilustrado na Figura 7, é necessário projetar um molde com várias cavidades. Para que seja possível este tipo de processamento com “multi-cavidades”, as cavidades têm de estar interligadas ao longo da zona moldante, conforme ilustra a Figura 8.

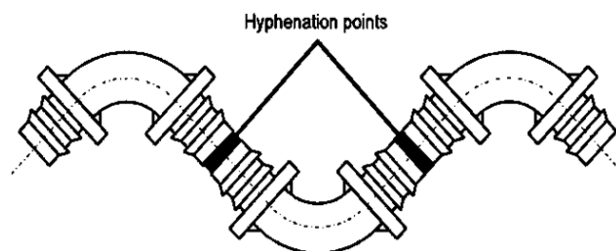


Figura 8 - Projeto com várias cavidades (Kamal et al. 2009)

Quando se pretende produzir peças com curvaturas e mudanças de direção, existe o risco de haver acumulação de material no raio externo. Para evitar problemas de escoamento e na peça final, é necessário evitar mudanças de direção com arestas vivas e considerar o máximo raio possível na área de redireção, como se pode observar na Figura 9.



Figura 9 - Projeto de curvas e redireção (Kamal et al. 2009)

Mudanças abruptas de diâmetros são consideradas críticas para as peças, pois por um lado, podem criar-se jatos durante a fase de alimentação do material fundido, e por outro lado, mudanças abruptas de geometrias geram zonas de estagnação do fluido, podendo provocar o aparecimento de acumulações de material, como se pode verificar na Figura 10.

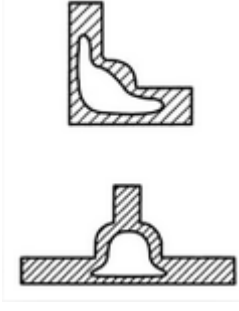
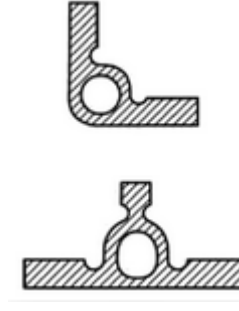
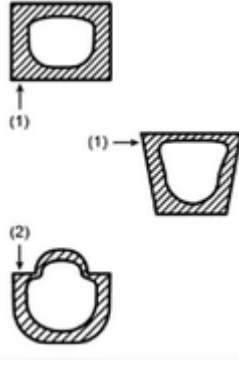

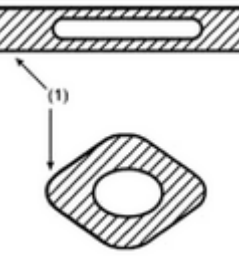
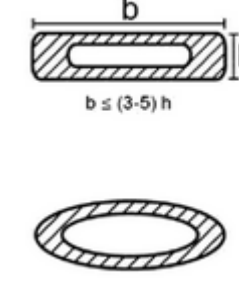
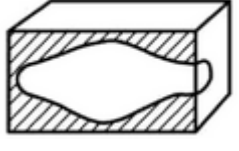
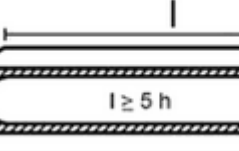
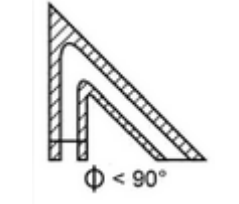
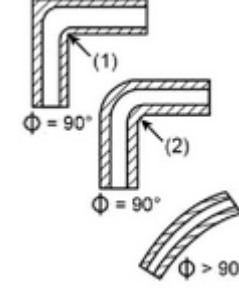
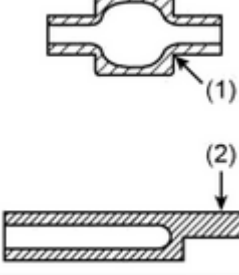
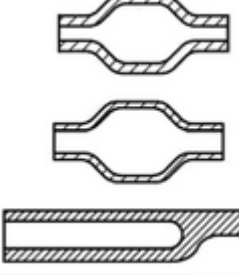


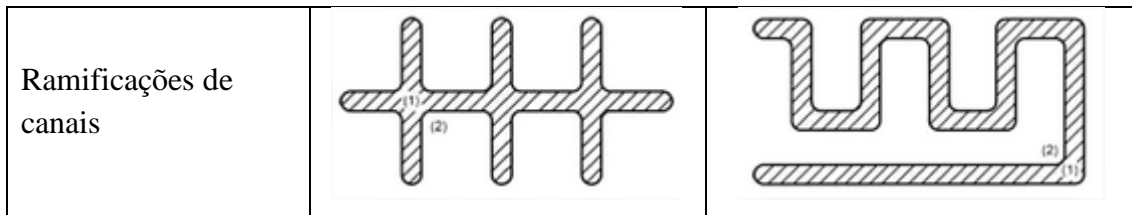
Figura 10 - Projeto com a variação da acumulação de material (Kamal et al. 2009)

Ao longo do tempo foram elaborados guias de projeto para os perfis e geometrias das peças a serem injetadas por este processo (Mieth & Tromm 2016). A Tabela 1 resume a informação essencial para o desenho de peças de paredes finas.

Tabela 1 - Desenhos guia de perfis para produção de componentes de paredes finas (Mieth & Tromm 2016)

(1) e (2) – Pontos de interesse	Desvantajoso	Vantajoso
Ligação entre áreas de paredes finas com áreas de paredes espessas		

<p>Transição de áreas com paredes espessas para áreas com paredes finas</p>		
<p>Perfis das áreas dos canais para fluidos</p>		
<p>Proporções entre largura e altura</p>		
<p>Proporções entre comprimento e espessura</p>		
<p>Influência da curvatura</p>		
<p>Perfil de mudança de seção</p>		



3.2. Injeção assistida por gás e água

A moldação por injeção assistida a gás, patenteada nos anos 1970's (Mohrbach 1971; Yasuike et al. 1973), foi a primeira abordagem para o processo de injeção assistido por fluido, recebendo muita atenção pelas indústrias de produção (Shah 1997; Parvez et al. 2002; Liu & Wu 2007), mas atualmente a sua utilização tem vindo a ser menor. Este decréscimo de utilização dá-se pelas limitações que o gás apresenta, como a baixa condutividade térmica, baixa capacidade calorífica, a compressibilidade do gás, a necessidade de um elevado grau de pureza do gás e também apresenta grandes desvantagens na questão da sustentabilidade. O gás demonstra ser menos sustentável do que a água, pois a água pode ser reutilizada várias vezes no mesmo processo, enquanto o gás tem de ser renovado, o que traz maiores gastos ao processo. Também é de notar que existe um acesso mais facilitado à água, enquanto o gás tem de ser adquirido e é prejudicial ao ambiente.

Para uma otimização desta tecnologia, substitui-se gás por água, pois este oferece uma boa condutividade térmica, uma grande capacidade de armazenamento e incompressibilidade. Outra grande vantagem é a redução de custo por produção, como o consumo do gás é elevado e tendo em conta o seu preço e ser um recurso não renovável, logo esta opção não é muito sustentável comparando com a água, onde em certos casos pode ser utilizado num circuito fechado (reutilização direta da água injetada). Em termos gerais, é utilizada a experiência adquirida na moldação assistida a gás, onde o processamento com gás (geralmente nitrogénio) é substituído por água (Protte & Konejung 2003).

A tecnologia de injeção assistida por água (*water assisted injection moulding*) foi criada pelo *Institute of Plastic Processing* (IKV) em 1998, o que se pode considerar uma tecnologia “recente” e recebeu muita atenção pelas indústrias de produção de componentes plásticas (Liu & Wu 2007; Knights 2005). O objetivo do desenvolvimento desta tecnologia é substituir o gás (Nitrogénio) por água, de forma a reduzir o tempo de

arrefecimento de peças plásticas vazadas (Goodship 2004). Permite uma produção mais económica de peças de plástico, com grandes seções transversais, possibilitando a abrangência de novos campos de aplicação para os materiais termoplásticos (Protte & Konejung 2003). Por outro lado, permite a produção de peças com maior rigidez, redução de peso e ganhos de produtividade.

3.2.1. Injeção assistida por gás versus água

O processo assistido a gás, para além de ter uma menor sustentabilidade, também demonstra outras desvantagens em relação ao processo assistido por água, o arrefecimento da peça é cerca de 50% mais lento do que o processo a água, pois este meio possui um coeficiente de condutividade térmica superior ao do gás (Fleack 2007), condição necessária para a redução do tempo de ciclo de produção. Na Figura 11, pode-se verificar a diferença de temperaturas, após a injeção de um componente (tubo com 10mm diâmetro), entre a injeção a gás ou a água.

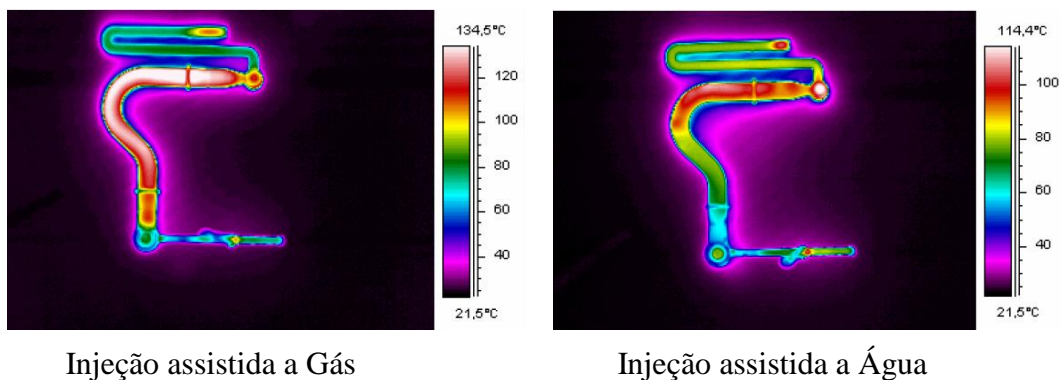


Figura 11 - Comparação termográfica entre injeção a gás e água (Fleack 2007)

Foi reportado, um teste executado pela Engel, que a injeção de um punho de motosserra (com secção oca) de nylon mais 30% de fibra de vidro em 30 segundos pelo processo de injeção de água e a partir do gás demorou 61 segundos. A Ferromatik também executou testes de comparação, concluído que ao injetar uma simples peça de polipropileno (PP) o processo sem fluido demorou 60 segundos a solidificar a peça injetada, com auxílio a gás demorou 40 segundos e com água 30 segundos. Contudo, também existe afirmações onde a injeção assistida por água pode ter reduções do tempo de arrefecimento até 70% (Michaeli et al. 2001), em comparação com a injeção assistida por gás.

Na Tabela 2 é possível verificar a capacidade térmica entre a água e o gás mais comum utilizado no processo (Nitrogénio). Outra grande diferença entre estes dois processos é a possibilidade do processo assistido por água produzir peças com paredes de espessura mais reduzidas, cerca de 25% (Fleack 2007), reduzindo o consumo de matérias-primas.

Tabela 2 - Propriedades térmicas da água e gás (Roth 2007)

	Nitrogénio [1bar, 20°C]	Água [1bar, 20°C]
Condutividade térmica, λ [W/m*K]	0,0143	0,604
Capacidade térmica, C_p [J/kg*K]	1038	4182

A incompressibilidade da água permite um melhor controlo do processo, colocando exigências mais rigorosas à unidade de injeção de água, visto que é necessário fornecer um fluxo volumétrico, de forma contínua. Uma das vantagens da água em relação ao gás verifica-se durante as fases de compactação e arrefecimento, uma vez que o melhor desempenho da água permite que o fundido possa ser arrefecido no seu interior, reduzindo consideravelmente o tempo de arrefecimento (Protte & Konejung 2003).

3.2.2. Qualidade e defeitos dos componentes

Como para a indústria de produção de componentes a qualidade final dos componentes é bastante importante, assim torna-se necessário precaver para evitar possíveis defeitos e reduzida qualidade do aspeto final dos componentes injetados por estas duas tecnológicas (IAG e IAA). Tendo isto em consideração, elaborou-se o seguinte resumo de possíveis imperfeições e defeitos possíveis de ocorrer entre estas vertentes:

1. Qualidade dos componentes injetados por IAG e IAA

A contração e empenos são aspetos fundamentais para a qualidade das peças, principalmente quando estas vão fazer parte de uma assemblagem. Um dos benefícios de utilização do processo de injeção assistida a gás e assistida a água é a reduzida contração volumétrica verificada, comparando com o processo convencional de moldação por injeção. A contração é, principalmente, afetada pela pressão de compactação, diminuindo à medida que aumenta a pressão do fluido, conforme demonstrado na Figura 12.

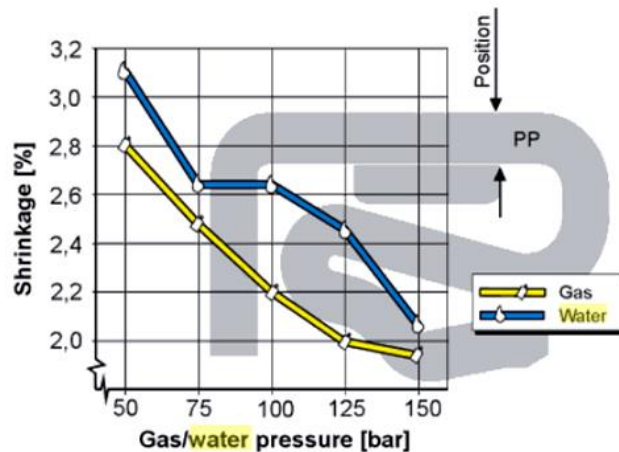


Figura 12 - Comparação da contração vs pressão de compactação (Michaeli & Jüntgen 2002)

Os empenos são determinados, principalmente, pelas condições de arrefecimento, sendo resultado da distribuição da espessura residual da parede, das condições térmicas da cavidade e do material que está a ser injetado.

Nas peças de secção vazada, torna-se evidente a diferença entre a moldação por injeção assistida a gás e assistida a água, onde a reduzida fase de compactação utilizada na IAG pode causar um aspeto de espuma na superfície interior da peça moldada. Neste sentido, no processo de injeção assistida por água, a utilização de área proporciona uma solidificação da superfície interna muito rápida, o que vai originar um não gotejamento de fusão a partir das paredes, como se verifica no processo de injeção assistida por gás, provocando a grande rugosidade ou efeito de espuma no interior da peça moldada, conforme demonstra a Figura 13 (Covestro 2015).

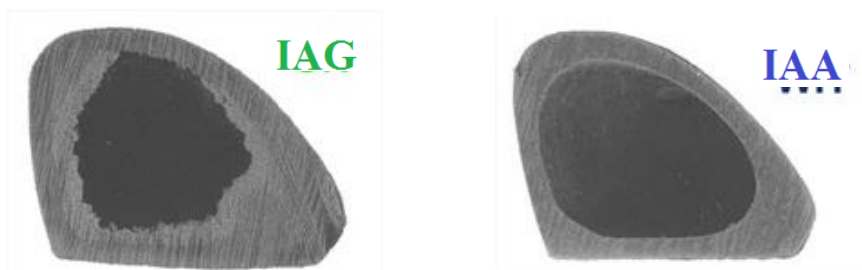


Figura 13 - Diferença entre a tecnologia de injeção assistida por gás (IAG) e água (IAA) (Covestro 2015)

A distribuição da espessura residual da parede ao longo do caminho do fluxo é um dos critérios essenciais para a produção de componentes de plástico com uma secção vazada. Por um lado, as propriedades mecânicas da peça são diretamente afetadas pela distribuição da espessura residual das paredes, assim como a contração e os empenos da peça (Kamal et al. 2009).

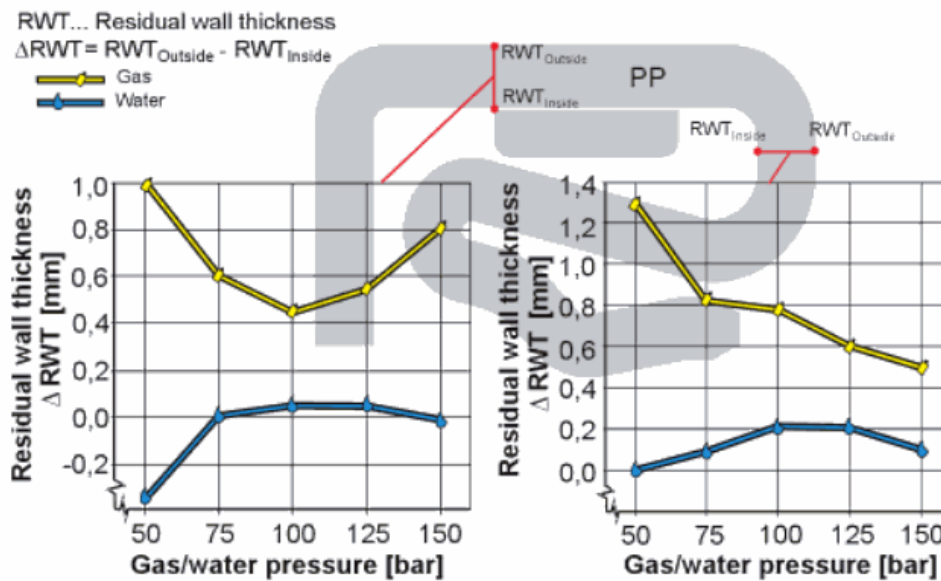


Figura 14 - Espessura residual das paredes internas e concentricidade das secções vazadas (Michaeli & Jüntgen 2002)

Como é possível verificar na Figura 14, na moldação por injeção assistida a água, a variação verificada entre o raio interior e o raio exterior da secção em análise, é inferior ao que se verifica na injeção assistida a gás, significando que o processo por água demonstra uma melhor concentricidade. Também é possível concluir que se tivermos perante de situação de escoamento horizontal, a dimensão da parede residual é superior, comparando com uma situação de escoamento vertical.

2. Defeitos dos componentes injetados por IAG e IAA

Contudo, o processo de injeção assistida a água pode dar origem a defeitos não verificados no processo de injeção assistida por gás. Os defeitos ilustrados na Figura 15 são os erros mais comuns de ocorrer no processo IAA, mas podem ser eliminados mediante a escolha adequada dos parâmetros de processamento, nomeadamente taxas e pressões de escoamento e pressão.

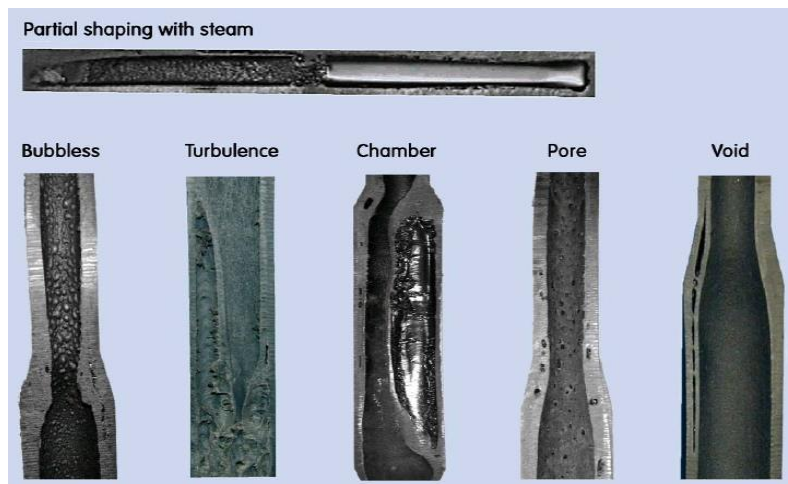


Figura 15 - Defeitos típicos na superfície interior da peça moldada, sem parâmetros otimizados (Protte & Konejung 2003)

O defeito “*partial shaping with steam*” (moldação parcial com vapor) é causado por uma taxa de caudal de água insuficiente. No caso dos “*pore*” (poro), a pressão da água é definida de modo a que se forme lentamente uma pele fina a baixa pressão, a qual é então penetrada pela pressão da água. Os processos de difusão da água são responsáveis pelos defeitos de “*bubble*” (bolhas) e “*chamber*” (câmaras), “*void*” (vazio), desenvolvidos durante a solidificação do material fundido sob baixa pressão, quer no lado do molde quer no lado do fluido. A contração característica do material permite a formação de vazios entre as camadas de solidificação exteriores. Os vazios podem igualmente ser eliminados ou minimizados recorrendo à utilização de um elevado caudal durante a fase de injeção e de uma pressão de água elevada durante a fase de compactação/arrefecimento. A solidificação lenta do material proporcionará a redução da formação de espaços vazios (Protte & Konejung 2003).

As peças de plásticos com ramificações a vazar, constituem um desafio particular, onde o controlo do fluxo nas cavidades ao longo do tempo de extração é particularmente importante. Especialmente, se são utilizados materiais de solidificação rápida, poderão surgir camadas finas indesejáveis que podem obstruir a ramificação, tendo que ser novamente quebradas. Isto conduz ao aparecimento de defeitos na superfície interior da peça (Protte & Konejung 2003).

3.3. IAA – Variantes de processo

Em termos gerais, a cavidade do molde é cheia e parcialmente compactada com o gás libertado pelo material plástico. De forma sequencial, procede-se à abertura de uma válvula de compactação para permitir a expulsão do material plástico fundido para uma cavidade secundária. Segue-se a entrada de água para a cavidade injeta a uma temperatura que varia entre 10°C e 80°C sob uma pressão de 350 bar, que atravessará a peça de plástico, expulsando o material fundido que está no seu interior (Goodship 2004), permitindo formar a geometria oca na peça e ao mesmo tempo arrefecer o material plástico. A água é então drenada da cavidade, por ação de vácuo ou por ar comprimido, que para além de expulsar a água da cavidade, também seca a peça antes da abertura do molde e extração.

A tecnologia de moldação por injeção assistida por água apresenta potenciais variantes de processamento, permitindo que a água possa ser removida da peça moldada de diversas formas. No caso de materiais que necessitam de altas temperaturas de processamento, a pressão de vapor é suficiente para eliminar a água, com o apoio adicional da gravidade. Outra forma possível é injetar ar comprimido através de um injetor secundário, a fim de soprar a água e secar a peça. Qualquer que seja o método escolhido, a água é conduzida através do injetor e retirada da peça moldada, para um tanque. Para assegurar uma remoção de água eficaz, o injetor de água deve ser colocado no ponto mais baixo do molde (Liu 2009; Protte & Konejung 2003).

De acordo com o que está representado na Figura 16, existem quatro possíveis combinações que podem ser consideradas no projeto do molde para este tipo de processamento, onde é variada a quantidade de material fundido e a forma de entrada/saída da água (Knights 2002).

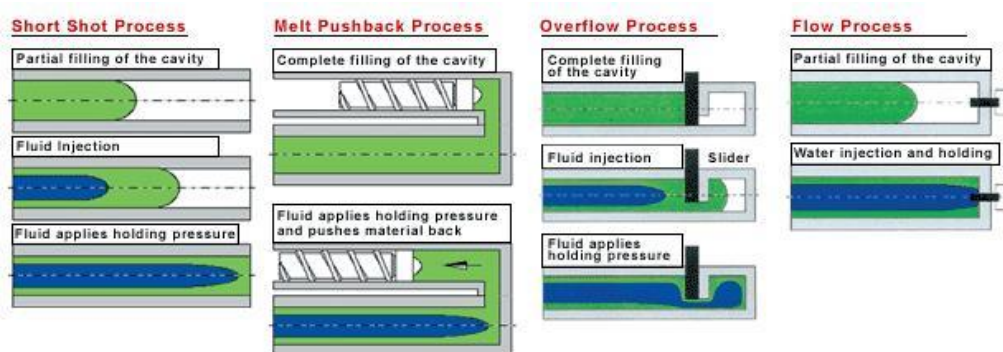


Figura 16 - Variantes do processo (Knights 2002)

3. Processo de “Short-Shot”

Nesta variante de processamento, a cavidade é parcialmente cheia, 50-95% do seu volume. Após um pequeno tempo de espera, a cavidade é completamente cheia, por ação da água. Para garantir que o fluido não atravessa a frente de fluxo, é necessário injetar uma quantidade de material fundido suficiente para o evitar. A fim de compensar uma potencial variação da espessura residual da parede, deve ser mantida uma pequena secção compacta, no final do percurso de fluxo para servir de amortecedor. No fim, é aberto uma válvula, permitindo a drenagem da água do interior do componente. Em certas situações é utilizado um disparo de ar comprimido para auxiliar a remoção da água e ao mesmo tempo secar o interior da peça.

Este método é considerado uma ótima solução para a produção de componentes com paredes espessas. A vantagem desta variante de processamento, comparativamente com o processamento tradicional é a quantidade de material fundido necessário que, neste caso, é inferior. A desvantagem deste método é a necessidade de um maior controlo e cuidado no processo, e para uma injeção bem-sucedida é necessário que a pressão da injeção de água seja mais alta que a pressão do polímero viscoso. Podem surgir defeitos superficiais, originados pela estagnação do material fundido e solidificação, gerados durante o processamento e a criação de um bom acabamento superficial é muito difícil. Por fim, o material residual do fundo da peça irá criar uma maior espessura, o que vai levar a um tempo de ciclo maior.

4. Processo de “Melt Pushback”

Neste processo o polímero viscoso preenche a zona moldante, onde depois uma válvula, localizada na extremidade, abre e o material extra é empurrado para dentro da unidade de injeção. A vantagem principal desta abordagem consiste na redução de material desperdiçado e na possibilidade de produzir um bom acabamento superficial. Como desvantagem, é necessário um bico de injeção apropriado para o processo e a adição de um sistema para acomodar o retorno do material plástico excedente para a unidade de injeção. Os operadores têm de ter extrema atenção de não deixar a água entrar na unidade de injeção, o que poderia levar à contaminação do polímero a injetar ou mesmo à danificação do fuso de injeção. Ao longo do processo de injeção todas as etapas têm de estar com a pressão sob controlo, para garantir uma extração constante do material do núcleo da peça para a unidade de injeção. Outro ponto a ter atenção, é a diferença de

temperatura do material a entrar de novo no sistema de injeção. Como existe uma grande variação, tal poderá influenciar a injeção subsequente.

5. Processo de “*Overflow*”

Este processo foi desenvolvido para colmatar algumas limitações das outras variantes referidas. Numa primeira fase, a cavidade é completamente cheia com o material fundido e fechado por uma válvula, de modo semelhante à moldação por injeção convencional, a pressão de compactação é então aplicada a fim de compactar as peças. Após a compactação, a válvula que separa a zona moldante principal da cavidade do reservatório (para o material excedente), é aberta e a injeção da água empurra o material viscoso do núcleo da peça para dentro do “reservatório” ou encaminhado para a unidade de injeção. Após da injeção da água, da compactação e considerando a posição do injetor na parte inferior do molde, a água é removida por gravidade ou por evaporação.

Esta abordagem pode produzir bons acabamentos superficiais (*Class A*) e como este processo é o mais semelhante à injeção convencional, este método oferece uma maior janela para “jogar” com os parâmetros de processamento. Este processo requer pressões mais baixas, comparando com o processo de “*Short-Shot*”. Como desvantagem, o material excedente do “reservatório” tem de ser cortado do corpo principal da peça injetada, e depois reciclado por processos posteriores.

6. Processo de “*Flow*”

O processo de “*Flow*” é a combinação dos dois processos “*Short-Shot*” e “*Overflow*”. O material viscoso do núcleo da peça é empurrado por completo otimizando o arrefecimento desta peça. A cavidade do molde é parcialmente preenchida, com a posterior injeção de água, o polímero viscoso é empurrado e preenche por completo o resto da cavidade moldante. Na extremidade da cavidade do molde encontra-se uma válvula, que se abre e a água sairá de novo para o circuito de água. A maior vantagem deste método, é a poupança de material e um maior taxa de arrefecimento, comparando com os outros métodos propostos. As desvantagens principais, são a ocorrência de defeitos na ponta das peças injetadas (na zona da saída da água) e com pressões baixas pode verificar-se a infiltração de água entre a superfície interna do molde e a superfície da parte externa.

A Tabela 3 contém o resumo das principais vantagens e desvantagens de cada um das abordagens descritas acima.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens principais entre os processos (Michaeli & Jüntgen 2002)

Processo	Vantagens	Desvantagens
<i>Short-Shot</i>	- Poupança de material	- Maior ocorrência de defeitos superficiais
<i>Melt Pushback</i>	- Compactação com a injeção da água mais eficiente	- Possibilidade de perda de propriedades mecânicas do polímero
<i>Overflow</i>	- Compactação com a injeção da água mais eficiente	- Perda de espaço da zona moldante
<i>Flow</i>	- Poupança de material	- Maior complexidade na concepção do molde

3.4. IAA – Parâmetros de processamento

Tal como acontece nos métodos tradicionais, o processo de moldação por injeção assistida a água também pode ser definido por um ciclo que o caracteriza, representado em 7 etapas, como se pode verificar na Figura 17 (Kamal et al. 2009):

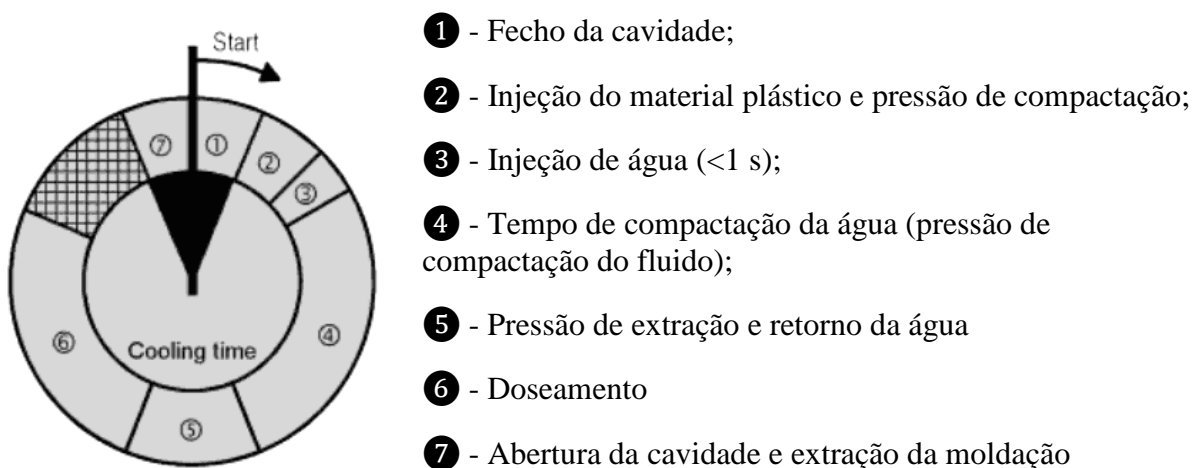


Figura 17 - Ciclo de moldação por injeção assistida por água (Kamal et al. 2009)

Conforme é possível verificar na Figura 18, a moldação por injeção assistida por água tem, em geral, três fases de processamento (Liu et al. 2007): enchimento com material fundido, injeção de água e compactação. A fase de arrefecimento decorre em simultâneo

com a fase de injeção de água e compactação, visto que, a partir do momento em que a água entra em contacto com o material fundido, este começa a solidificar.

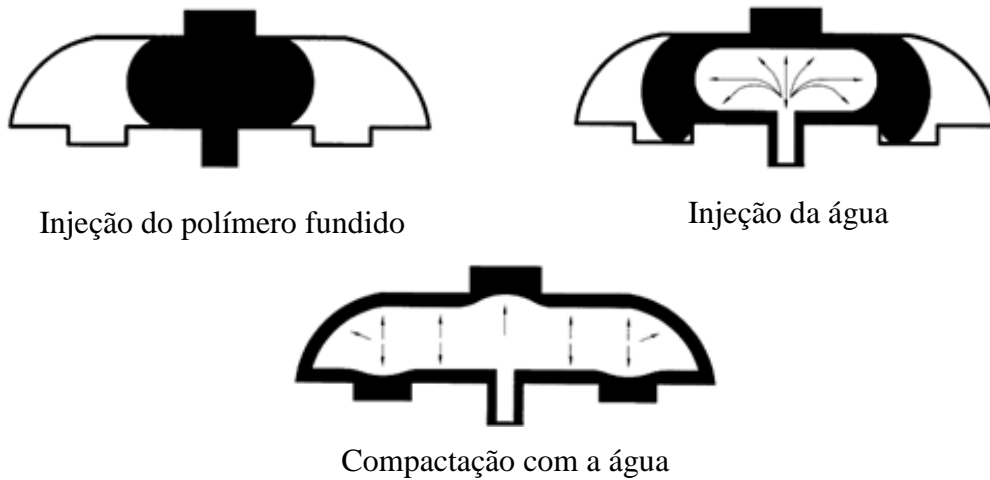


Figura 18 - Fases de processamento na injeção assistida por água (Liu et al. 2007)

Como referido anteriormente, para conseguir uma reprodutibilidade de peças com qualidade a partir do processo de “*Overflow*”, é necessário dispor de um caudal maior quanto possível, em conjunto com uma baixa pressão de retorno. Isto requer que a resistência ao escoamento de todo o sistema deva ser mantida num baixo nível (Protte & Konejung 2003).

A Figura 19 demonstra o perfil de pressão do processo da injeção assistida por água. Este gráfico está dividido em cinco fases, nomeadamente a injeção do polímero fundido, injeção da água, compressão, drenagem da água e extração da peça (Zhou et al. 2012).

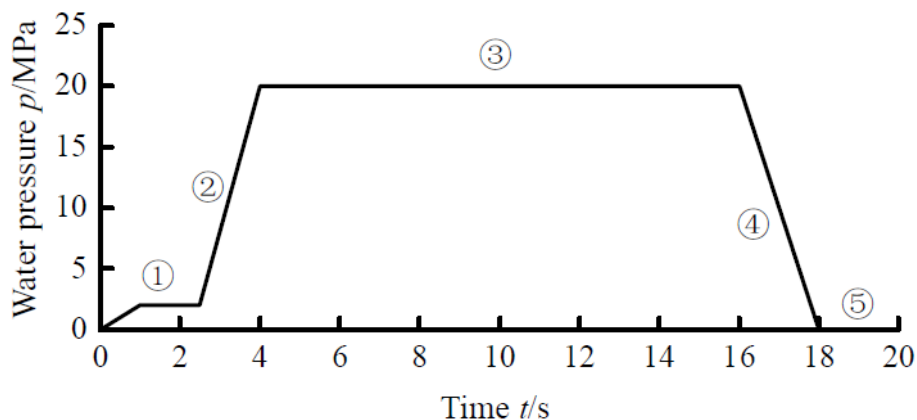


Figura 19 - Perfil de pressão do processo da injeção assistida por água (Zhou et al. 2012)

Conforme está demonstrado na Figura 19, para alcançar o perfil de pressão adequado à injeção assistida por água, a unidade de comando deverá permitir o controlo faseado do processo, de forma a permitir uma variação do valor da pressão.

A fim de evitar acumulação de material na periferia do injetor e ondulação nas paredes, a água deve ser previamente injetada a uma baixa pressão, seguindo-se um aumento da pressão de injeção, tão rapidamente quanto possível, para os valores de pressão necessários (Protte & Konejung 2003).

Assim, para utilizar a tecnologia de injeção assistida a água, torna-se necessário analisar os seguintes parâmetros de processamento:

- 1. Temperatura do material fundido** - quando se inicia a plasticização do material plástico, é necessário ter em consideração o intervalo de temperaturas de processamento sugeridas pelo fornecedor do material, para evitar que surjam situações de alteração das suas propriedades.
- 2. Temperatura do molde** – consiste na temperatura a que o aço da zona moldante deve estar, para que a peça seja produzida com qualidade. A gama de temperaturas de um molde depende da natureza do material plástico que se está a utilizar.
- 3. Velocidade de injeção** – Consiste na velocidade de avanço do fuso durante a fase de enchimento da zona moldante, correspondendo ao débito (ou caudal) com que o material é injetado para o interior do molde.
- 4. Pressão de injeção** – É dada pela pressão máxima que se desenvolve durante a fase de enchimento, resultante do esforço necessário para garantir o enchimento da zona moldante.
- 5. Pressão de compactação** – Esta variável também pode ser designada por segunda pressão ou pós-pressão, corresponde à pressão aplicada sobre a moldação após o final do enchimento, de forma a compensar a contração volumétrica que o material sofre durante a fase de arrefecimento.
- 6. Tempo de enchimento** – É caracterizado pelo tempo que é necessário para que o material plástico fundido preencha toda a zona moldante do molde.
- 7. Tempo de pausa “switch-over”** – Tempo necessário para decorrer a comutação de velocidade/pressão, o que significa que se deixa de controlar a velocidade de fluxo no processo, para se passar a controlar a pressão que está a ser aplicada ao material fundido. Caso se pretenda que a injeção de água seja imediata, deve considerar-se que este tempo é nulo.

8. **Tempo de injeção de água** – Resulta no tempo que é necessário garantir um fluxo de água constante, até que a parte oca da peça fique definida.
9. **Temperatura da água** – Consiste na temperatura a que a água se encontra, quando é injetada para dentro do molde, normalmente, utiliza-se a temperatura ambiente.

3.5. IAA – Sistema e abordagens de injeção

O sistema de injeção assistida por água é composto por vários componentes, onde um deles é a cabeça injetora. Este injetor, que está ligado por tubagens ao sistema principal, é o elemento de engenharia principal que permite o processo de injeção ocorrer. A utilização deste componente requer alguns cuidados a ter em conta, para promover ciclos de produção com sucesso.

Outra técnica adicional que pode ser utilizada em conjunto pelo processo de injeção assistida por fluido, é o processo de injeção assistida com projétil. Esta vertente demonstra várias vantagens para o processo de injeção assistida por água, contudo também apresenta algumas desvantagens. A injeção assistida por água com o auxílio a um projétil, também foi testada nos testes preliminares para posteriores análises de comparação.

3.5.1. Injetores de água e suas características

O injetor de água constitui uma interface decisiva entre a unidade de injeção de água e a peça moldada. É necessário garantir a vedação entre o injetor e o material fundido, a fim de evitar qualquer fuga durante a injeção da água ou na fase de compactação.

Não é possível utilizar um injetor estático com uma abertura estreita anelar para o processamento de injeção assistida a água. Em vez disso, é necessária uma secção transversal de abertura maior, para assegurar tanto a injeção rápida de água como a fiabilidade do seu retorno. A secção transversal dependerá também do tamanho da peça a moldar, uma vez que a abertura deve estar firmemente fechada durante a injeção do material fundido. Podem ser utilizados diferentes tipos de injetores para este tipo de processamento, conforme é possível verificar na Figura 20 e Figura 21.



Figura 20 - Possíveis tipos de injetores: Tipo A: injetor de abertura automática; Tipo B: injetor de funcionamento hidráulico (Protte & Konejung 2003)

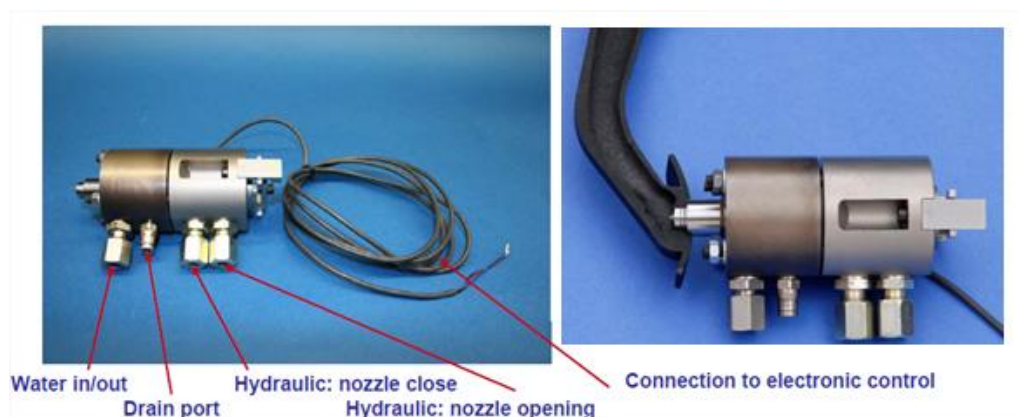


Figura 21 - Injetores hidráulicos

Em termos práticos, são conseguidos excelentes resultados com injetores de acionamento hidráulico, visto que estes injetores podem ser abertos e fechados de uma forma controlada, possibilitando assim um maior controlo do processo.

As secções transversais de injeção de água (\varnothing 8 a 10 mm) e o injetor de água devem ser suficientemente grandes para evitar perdas significativas de pressão. A linha de retorno da água deve ser executada perto do molde sob a forma de um *bypass*. Isto irá assegurar que a água está disponível à temperatura adequada, para o ciclo seguinte. A qualidade e temperatura da água utilizada no processamento influencia a qualidade da superfície interna da peça (Protte & Konejung 2003), isto é, a água utilizada no processo tem de ser controlada e pura, caso contrário poderá levar à produção de paredes internas deformadas e com baixa qualidade.

3.5.2. Injeção com auxílio de projétil

Este processo de injeção consiste na criação de secções vazadas por disparo de um projétil tipo “bala”, como se pode verificar na Figura 22. No entanto, para ser possível impulsionar o projétil é também necessário utilizar um sistema de injeção assistida por água ou gás. Esta “bala” é tipicamente fabricada com o mesmo polímero que é injetado no molde para o fabrico da peça/dispositivo, evitando a contaminação durante a reciclagem.



Figura 22 - Vazamento a partir de projétil (Battenfeld 2014)

Neste sentido, a cavidade do molde é parcialmente preenchida, segue-se a colocação do projétil na cavidade para servir de torpedo da água/gás que irá ser utilizada para definir o perfil vazado. Este projétil tem como principal função, forçar o plástico a partir do centro da cavidade contra as paredes do molde abrindo um vazio em forma de túnel, antes que ocorra a solidificação, como está exemplificado na Figura 23. Este processo beneficia da flexibilidade de poder ser utilizado em todos os materiais termoplásticos.

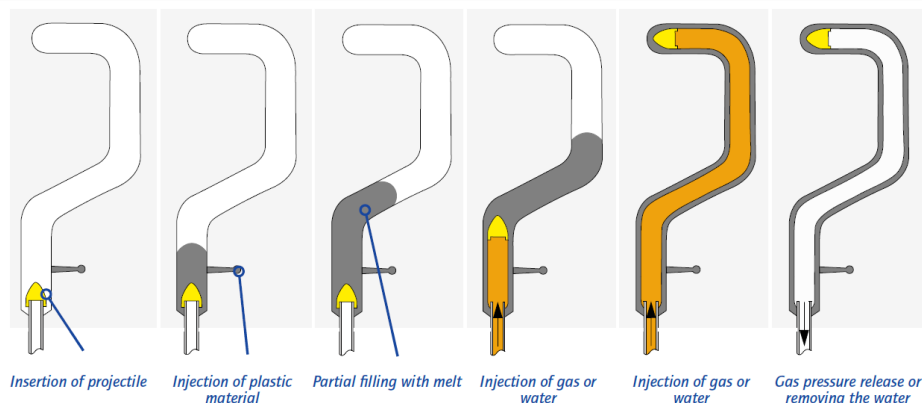


Figura 23 - Esquema exemplificativo da injeção com projétil (Battenfeld 2014)

A utilização de um projétil trouxe certas vantagens quando comparado com os processos de injeção direta de fluido, pois neste caso há limitações no diâmetro da secção a criar,

tendo como valores máximos de diâmetro de 20 a 25mm. A partir deste valor limite é necessário recorrer a um projétil.

Existe mais uma característica que dá destaque ao processo de injeção com projétil a qualidade do perfil da secção oca. Ao utilizar um projétil, a espessura da parede resultante é praticamente independente das propriedades reológicas do material. Com isto, as paredes interiores das peças vazadas a partir da injeção com projétil, serão sempre calibradas e constantes, em oposição à injeção direta de fluidos que conduz a paredes irregulares.

A injeção direta de fluido, em comparação com a injeção de projétil, não permite a remoção de material das zonas onde não há circularidade, isto é, se as peças a serem injetadas possuem uma secção de geometria não circular, a remoção da totalidade do material interior é praticamente impossível (Figura 24).

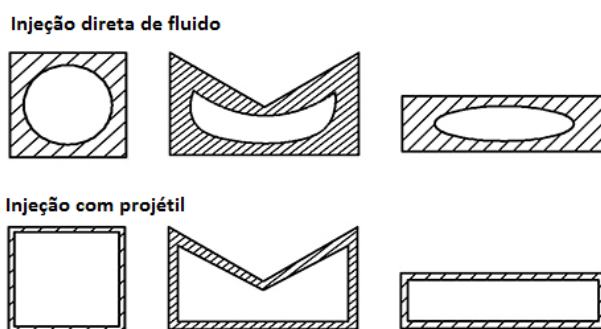


Figura 24 - Injeção em perfis não circulares (Myplasticsblog 2012)

Apesar do processo de injeção com projétil demonstrar grandes vantagens sobre a injeção direta de fluidos, esta possui uma grande desvantagem. Enquanto na injeção direta de fluido, a secção vazada pode variar de dimensões, no processo de injeção com projétil a secção vazada está sempre dependente da dimensão da “bala”, que normalmente é constante. Este facto impossibilita a variação da secção da peça. Assim, a produção de peças com secções vazadas de diâmetro acima dos 25 mm atualmente só pode efetuar-se para secções constantes, isto é, existe uma impossibilidade de criar peças de secções variáveis com diâmetros superiores a 25mm.

3.6. Resumo do capítulo

A partir de uma breve análise entre a injeção assistida por água ou por gás, torna-se evidente que o método mais favorável, sustentável e rentável é a injeção assistida por água. Contudo, apesar da tecnologia de injeção assistida por água demonstrar inúmeras vantagens, esta também apresenta algumas desvantagens. A Tabela 4 resume as vantagens e desvantagens principais desta tecnologia.

Tabela 4 - Vantagens e desvantagens do processo de injeção assistida por água (Michaeli & Jüntgen 2002)

Vantagens
<ul style="list-style-type: none">- Tempos de refrigeração significativamente mais rápidos, em comparação com injeção assistida por gás;- Não é necessária nenhuma medida para prevenir a ocorrência do efeito de espuma nas paredes internas das peças;- Peças com maiores dimensões/diâmetros podem ser produzidas com menores espessuras de paredes internas;- Processo mais sustentável e maior poupança de material.
Desvantagens
<ul style="list-style-type: none">- Ajustes ou otimizações necessárias para remover a água do interior das peças moldadas;- Necessidade da remoção subsequente da água residual do interior das peças moldadas, em caso a peça contenha curvas muito acentuadas;- Em certos casos existe a necessidade da entrada de injeção com dimensões elevadas, em comparação do processo de injeção assistida por gás;- Equipamento de custo elevado.

A injeção assistida por água é de facto a que oferece melhor performance na injeção de peças, em comparação da injeção assistida por gás, com reduções dos tempos de arrefecimento com valores entre 30% a 70% (Michaeli et al. 2001). Estas elevadas diferenças de tempo de arrefecimento dependem não só da dimensão e da geometria da peça, mas também do tipo de polímero a injetar.

A técnica de moldação com injeção assistida por água, não é um processo totalmente “perfeito” e demonstra ter muito para otimizar. Contudo, a injeção assistida por água é uma tecnologia “relativamente recente” e pouco explorada, por isso tem vindo a ser bastante investigada e testada, como são exemplo dos estudos e testes sobre a dinâmica do processo de enchimento da zona moldante (Volle & Vincent 2009; Liu & Wu 2007), estudos numéricos sobre o tempo de injeção, arrefecimento e qualidade superficial interior (Yang et al. 2013; Park et al. 2015), estudos do escoamento do polímero, quando sujeito a elevadas pressões de água (Ahmadzai & Behraves 2011; Lin & Liu 2009) ou mesmo estudos sobre injeção de compósitos (Liu et al. 2007).

A partir destas conclusões, o processo escolhido para executar esta dissertação proposta, foi o processo de moldação por injeção assistida por água utilizando com a abordagem do processamento por “*Overflow*”.

4. Estudo preliminar

Neste capítulo será demonstrado e explicado, com grande detalhe, o trabalho executado durante o desenvolvimento, produção, ensaios e conclusões dos resultados obtidos dos moldes protótipos. Estes moldes protótipo têm como objetivo proporcionar uma melhor compreensão do processo de injeção assistida por água e suas limitações e vantagens técnicas. Com base nos resultados obtidos a partir destes moldes protótipos, teremos as noções técnicas para projetar a nova abordagem de produção proposta nesta dissertação.

Ao longo do desenvolvimento, foram projetados e fabricados dois moldes protótipo industriais para testes preliminares. Foi decidido elaborar os estudos desta dissertação a partir de moldes protótipo industriais graças à parceria com a Moldetipo II, assim elaborando um estudo mais realistas à indústria dos moldes.

Um dos moldes apresenta um grau de complexidade relativamente baixo, com o intuito de produzir uma peça de geometria muito simplificada. Esta peça é um tubo flexível com uma secção constante para testar a injeção assistida por água e também com auxílio de projétil. A partir destes ensaios teremos dados para fazer comparações entre a utilização de projétil e sem projétil, tendo uma noção das vantagens e limitações desta aplicação.

O segundo molde teste apresenta um grau de complexidade maior, com o objetivo de produzir um componente de secções geometricamente mais variadas, para estudar o comportamento do processo de injeção assistida por água neste tipo de geometrias. Para transmitir a aplicabilidade deste processo de injeção, decidiu-se produzir um pedal de embraiagem de automóvel, contendo uma secção variável ao longo do componente.

4.1. Conceção dos moldes protótipo

O molde protótipo industrial 1 permite injetar um tubo com uma geometria relativamente simples, recorrendo aos métodos de injeção assistida por água e injeção assistida por projétil. Este tubo tem uma secção com diâmetro constante ao longo de um percurso variado, isto é, possui um percurso com declive e curvaturas. O desenho e conceção deste molde foram elaborados com a assistência de profissionais da área (Moldetipo II), assim como resultado final obteve-se a modelação apresentada na Figura 25.

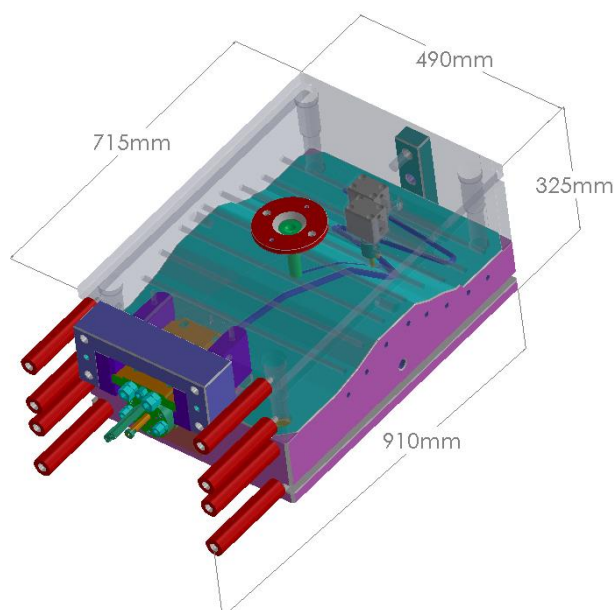


Figura 25 – Representação do molde protótipo industrial 1

Como referido anteriormente, adotou-se a abordagem do processamento por “*Overflow*”, onde a cavidade é completamente cheia com o material fundido e fechado por uma válvula, após a compactação a válvula que separa a zona moldante principal da cavidade do reservatório (para o material excedente), é aberta e a injeção da água empurra o material viscoso do núcleo da peça para dentro do “reservatório”.

Assim, este processo requer que seja criado na zona moldante, a cavidade da peça a moldar (Figura 26 - 2) com a cavidade para reter o material em excesso (Figura 26 - 4).

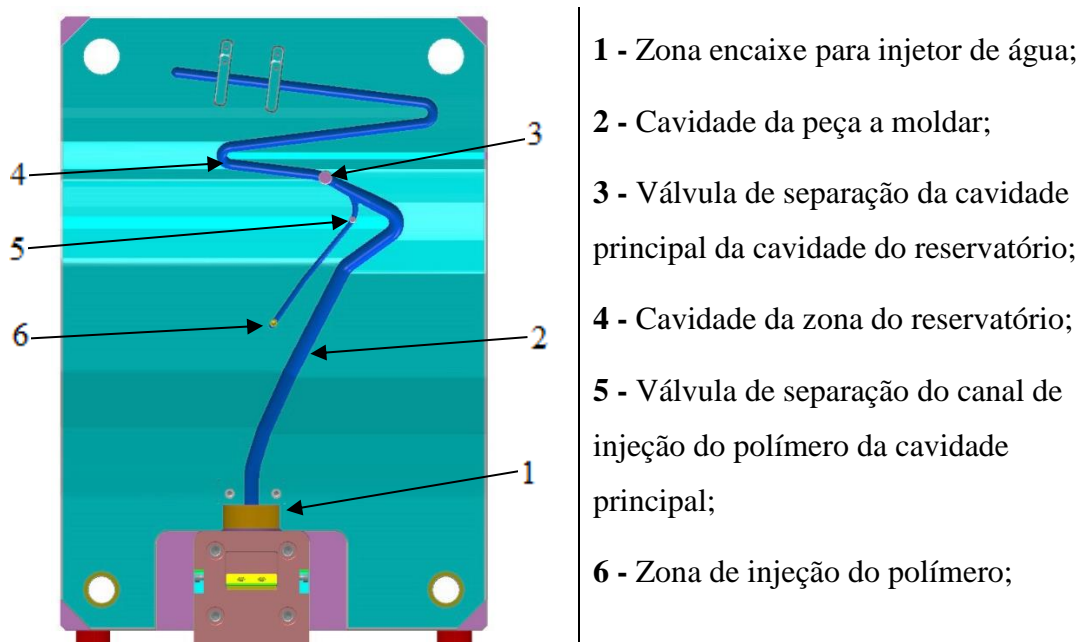


Figura 26 - Chapa zona moldante do molde protótipo industrial 1

Para este processo também é necessário adicionar válvulas para o controlo da abertura e fecho dos fluxos de água e polímero (Figura 26 - 3 e 5). Estas válvulas, que são atuadores hidráulicos, têm como objetivo de assegurar o preenchimento da cavidade principal (peça a moldar) (Figura 26 - 3) e prevenir a entrada de água para dentro da injetora (Figura 26 - 5).

Grande parte do volume de trabalho da indústria dos moldes implica uma produção direta para a indústria automóvel, sendo assim, decidiu-se projetar uma peça com bastante procura das grandes marcas deste setor e também para demonstrar a utilidade desta tecnologia num caso real. Trata-se de um pedal de embraiagem para um automóvel, apresentado na Figura 27.

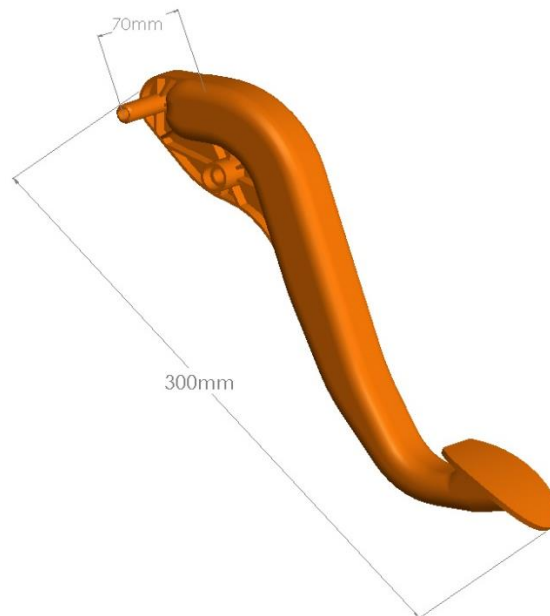


Figura 27 - Modelação do pedal de embraiagem

O desenho e conceção deste molde foram elaborados com a assistência de profissionais da empresa Moldetipo II. Como esta empresa queria testar outras vertentes da tecnologia de injeção assistida por água, foi lançado o desafio de criar o molde para a produzir o pedal de embraiagem recorrendo a esta tecnologia de injeção, mas também com a possibilidade de injeção multimaterial. A conceção do molde protótipo industrial 2 englobando a injeção multimaterial e com a injeção assistida por água, levou ao resultado apresentado na Figura 28.

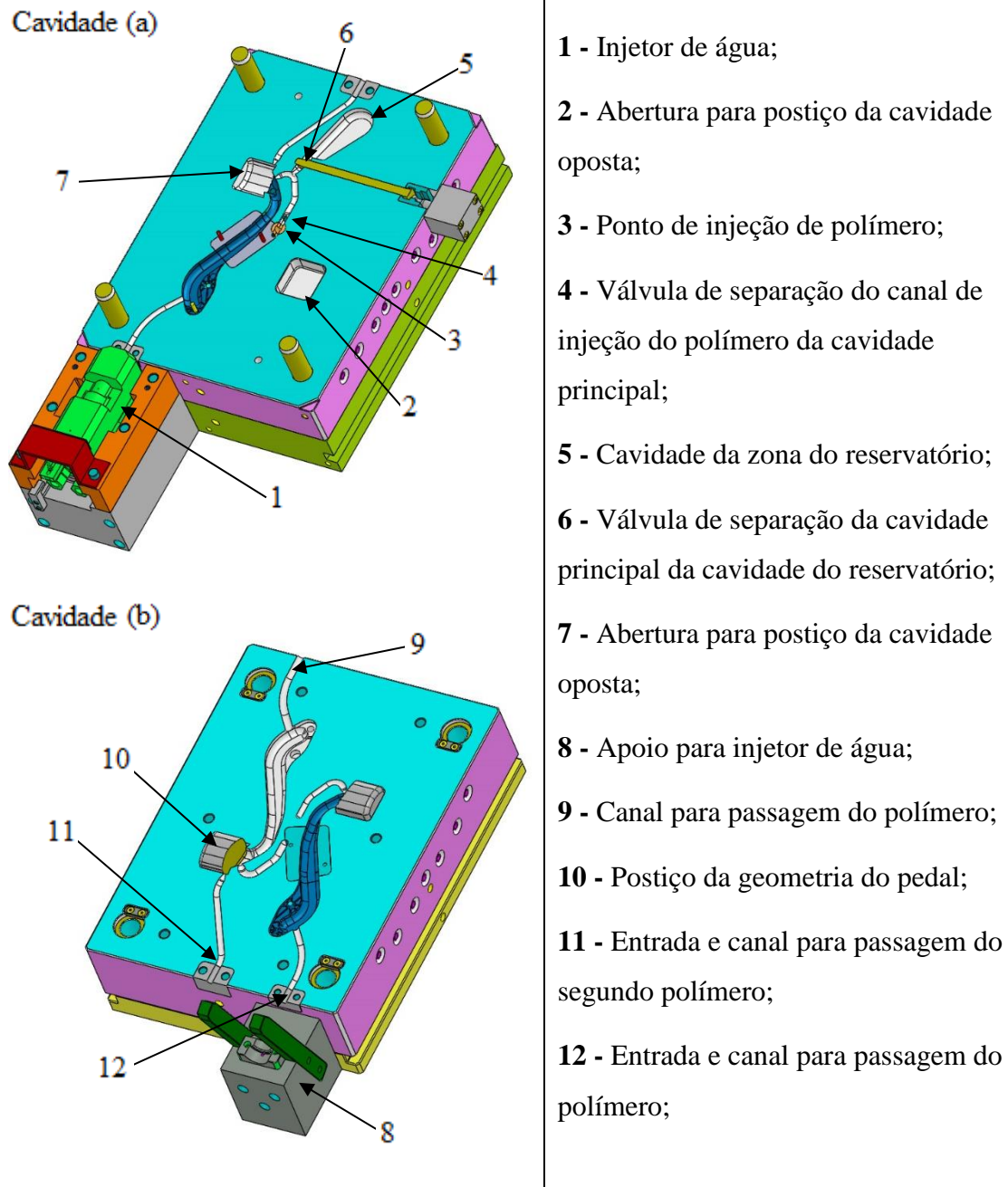


Figura 28 – Chapas moldantes do molde protótipo industrial 2

O desenvolvimento deste molde necessitou mais tempo e *know-how* do que um molde comum, pois o grau de complexidade é muito mais elevado. Para além dos dois métodos de injeção, também possui um sistema de rotação, fazendo com que o projeto seja ainda mais complexo.

O processo de injeção do material primário deste molde vai ocorrer de um modo muito semelhante ao molde protótipo industrial 1. O material primário é injetado até encher a zona moldante, seguidamente um jato de água pressurizada vai passar no seu interior

criando a secção vazada. O material em excesso é transportado para o reservatório (Figura 28 - 5), isto é, quando a injeção de água inicia, o pistão (Figura 28 - 6) abre permitindo o escoamento do material até ao reservatório. Após a injeção completa do material primário e com a criação da zona vazada pelo jato de água, segue-se a injeção do segundo material. Nesta etapa, o molde abre e com o auxílio do prato rotativo (ou KO), a zona moldante roda 180°, sendo de novo fechado. Neste processo de rotação a peça injetada mantém-se na cavidade (a) do molde. Segue-se então a injeção do segundo material. A geometria deste material é controlada por um postigo (Figura 28 - 10).

Contudo, para o desenvolvimento desta dissertação a abordagem da injeção multimaterial não será relevante, tendo isto em conta não serão referenciados quaisquer testes e análises sobre esse procedimento.

Após do projeto, seguiu-se a produção dos dois moldes protótipos industriais. A programação CAM, fabricação e montagem, foram efetuados por profissionais da área, mais especificamente pela empresa Moldetipo II. Para além da cavidade principal e da cavidade reservatório, ambos os moldes partilham outras características para o bom funcionamento do processo de injeção em estudo, que são as seguintes:

- **Circuito de água interna:** Para controlo da temperatura do molde;
- **Atuadores hidráulicos:** Para controlo do fecho e abertura dos fluxos de água/polímero;
- **Encaixe para bico de injeção de água:** Estrutura criada no molde para possibilitar a montagem do injetor de água. Esta estrutura para além de possibilitar o “encaixe” do injetor, também tem como função permitir a descida do injetor sempre que o molde abre e a subida sempre que o molde feche;
- **“Pés” de estrutura:** Como o molde necessita de um espaço extra para aparelhar o injetor de água, é necessário adicionar uns “pés” para pousar o molde no chão.

Já apresentado na Figura 25, o desenho CAD, mostra-se a materialização do respetivo molde na Figura 29, onde se avistam as duas partes do molde com a cabeça de injeção de água montada na estrutura.



Figura 29 - Chapas do molde protótipo industrial 1

Na Figura 30 apresenta-se a materialização do molde do respetivo desenho CAD da Figura 28. Nesta Figura 30, o molde já se encontra montado na estrutura e na unidade de injeção.

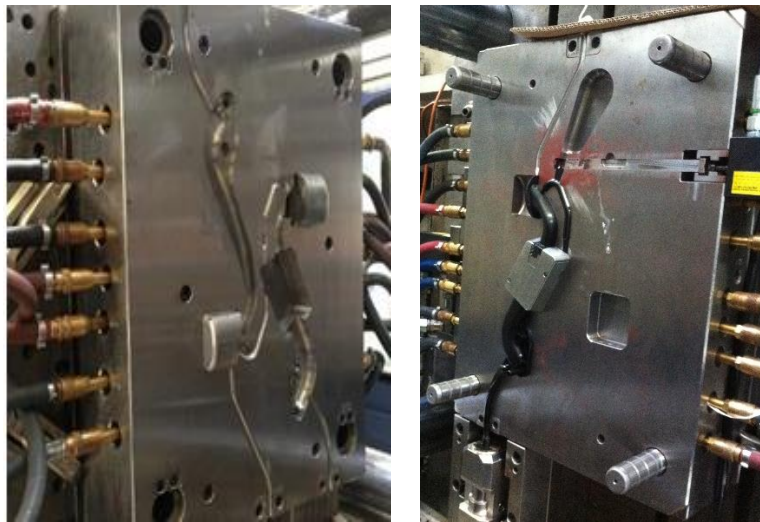


Figura 30 - Primeira versão do molde protótipo industrial 2

4.1.1. Retificações aos moldes protótipo

Durante os ensaios preliminares, o molde protótipo industrial 1 não apresentou necessidade de retificações ou alterações à estrutura. Contudo, e como seria de esperar, o molde protótipo industrial 2 apresentou necessidade de retificações e alterações da estrutura.

Com base nos ensaios preliminares o molde protótipo industrial 2 passou por um processo iterativo que consistiu em corrigir (retificar) por diversas ocasiões a respetiva zona moldante e elementos necessários ao correto funcionamento do molde como válvulas e mecanismos. Contudo, a fabricação, montagem e ajustes, foram executados com a colaboração da empresa Moldetipo II.

De facto, o processo de ensaios levou a que fosse necessário redimensionar a “bolsa de material” (reservatório), onde o material transportado do interior da peça pelo processo de injeção de água iria se alojar. Também foi redesenhado o sistema de abertura e fecho cavidades, para evitar o refluxo de polímero aquando da injeção de água. Como se pode verificar na Figura 30, a primeira versão do molde apresentou um dos referidos problemas durante a fase de injeção.

Após das modificações no molde, referidas anteriormente, obteve-se a versão final ilustrada na Figura 31. Refinou-se e adicionou-se mais uma válvula para o controlo de fluxo. A cavidade para o material excedente teve de ser redesenhada, como durante os ensaios de injeção o polímero aglomerado dentro da bolsa ficava fixa à cavidade, alargou-se, adicionou-se um ângulo de saída e implementou-se dois extratores, assim garantindo a extração total da peça.

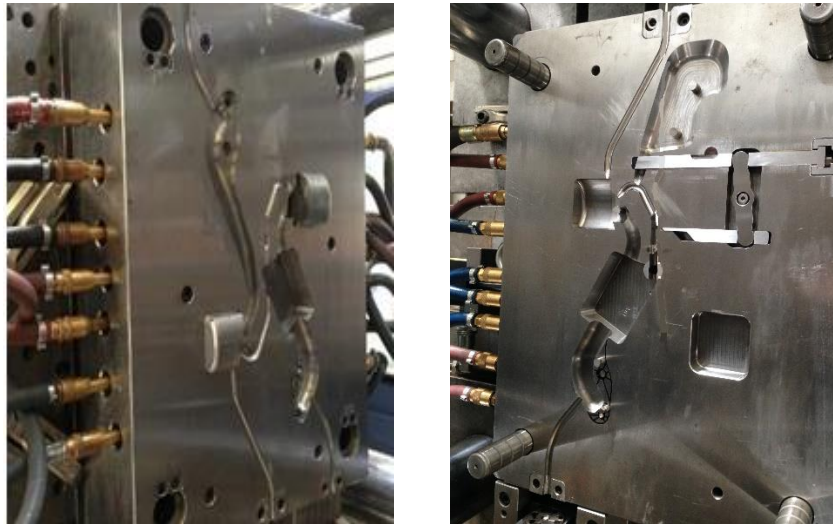


Figura 31 - Versão final do molde protótipo industrial 2

4.2. Ensaios e testes de injeção

Ao longo do capítulo 4, apresentou-se sumariamente esta tarefa que consiste na implementação da unidade de processamento de injeção assistida por água. Estes moldes protótipos industriais permitem produzir de forma flexível componentes de secção vazada e de secção não vazada, caso seja desejado. Para a primeira opção, produção de componentes de secção vazada, recorreu-se à implementação de uma unidade de injeção assistida por água (Figura 32) da marca “PMEfluidtec”, com as seguintes características:



Características:

- 210 bar;
- Controlador táctil;
- Tanque de óleo;
- Tanque de água (recirculação);
- Sensores de temperatura, nível e pressão.

Figura 32 - Sistema de injeção assistida por água

Este equipamento tem conectividade com módulo de injeção do segundo material, recebendo sinais analógicos do ciclo de injeção sendo, desta forma, é ativado no momento desejado. A interface entre o molde e o equipamento de injeção de água é o injetor de água, apresentado na Figura 33.

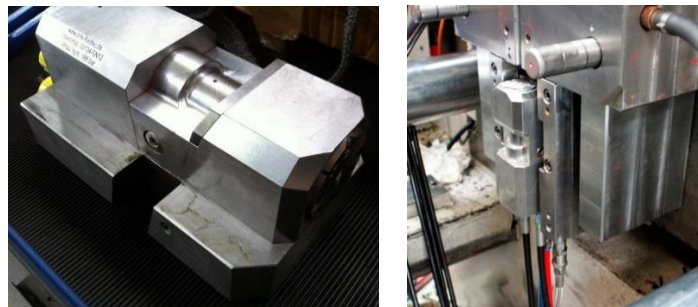


Figura 33 - Injetor de água

Com este equipamento também se pode utilizar o processo de injeção com auxílio de um “projétil” calibrado (Figura 34). Como proposto, irá ser efetuado testes com este projétil para comparações pormenorizadas versus à contraparte sem projétil. Também como referido a cima, tipicamente o material utilizado para a produção destes projeteis é igual ao material a injetar, assim os projeteis apresentados na Figura 34 foram produzidos por poliamida.



Figura 34 - Projétil calibrado

A unidade principal de injeção de polímero utilizado nesta dissertação foi uma “Euroinj D300” (Figura 35), considerado como um equipamento de media dimensão que apresenta as seguintes características discriminadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Características máximas do sistema de injeção Euroinj D300

Caraterísticas do sistema de injeção	
Força de fecho [t]	350
Fuso [mm]	70
Distância entre colunas [mm]	660 x 660
Dimensão dos pratos [mm]	1000 x 1000
Volume de injeção [g]	1170
Pressão do material [bar]	1690



Figura 35 - Unidade de injeção Euroinj D300

4.2.1. Material e processamento

Os materiais utilizados para o processamento dos componentes dos dois moldes foram selecionados em parceria da empresa Moldetipo II, resultando na utilização de dois materiais diferentes para os correspondentes moldes. Para o molde protótipo industrial 1 foi selecionado um termoplástico elastómero e para o molde protótipo 2 foi selecionado a poliamida 6.6 com 30% de fibra de vidro.

A ideia de selecionar dois materiais completamente diferentes, foi para beneficiar um estudo mais variado do processo de injeção assistida por água. Para o componente do molde protótipo 1 teve-se como objetivo criar um tubo flexível, enquanto no componente

do molde protótipo industrial 2 consiste num pedal de embraiagem, significando que necessita de um polímero extremamente resistente.

O termoplástico elastómero utilizado no molde protótipo industrial 1 foi a TPE TC5GPN, cujas propriedades estão discriminadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades técnicas da TPE TC8GPN (KRAIBURG 2016)

Propriedades técnicas – Elastómero termoplástico (TPE)	
Alongamento [%]	700
Densidade [g/cm³]	1,100
Tensão de Rotura [MPa]	11,5
Temperatura de moldagem [°C]	25 – 40
Temperatura de fusão [°C]	180 – 220
Dureza [Shore]	79

Após montagem do molde na máquina de injeção e acoplamento do sistema de injeção de água, procedeu-se à produção de várias peças teste foram otimizados os parâmetros de processamento e os tempos de ativação de cada fase (injeção de polímero, injeção de água). Na Figura 36 apresentam-se os parâmetros de temperatura utilizados e otimizados para o processamento de elementos com o molde protótipo industrial 1, utilizando o material TPE TC8GPN.



Figura 36 – Parâmetros de processamento para a injeção do TPE TC8GPN

Para a produção do componente do molde industrial 2 foi utilizado uma poliamida reforçada com fibra de vidro, como neste caso se trata de um pedal é necessário um maior reforço. As poliamidas, devido às características mecânicas que apresentam, são principalmente utilizadas em aplicações sujeitas a tensões devido a fricção e desgaste.

As poliamidas com maior aplicação são as PA 6, PA 6.6 e PA 12 que apresentam elevada tenacidade com bom comportamento ao desgaste e à fadiga. O fato de conciliarem uma elevada resistência mecânica, química e ambiental, torna este material indicado para aplicações de elevado carregamento, mesmo em condições de serviço severas (Centimfe 2003). Este tipo de polímeros tem uma aceitação muito boa à incorporação de fibras de vidro, cargas minerais, pigmentos, estabilizadores, lubrificantes e modificadores de impacto.

As PA em geral são utilizadas em peças sobretudo sujeitas a atrito dinâmico, sob a influência de tensões devido ao desgaste, como elementos de deslize, acoplamentos em esfera, rolamentos de esfera e rolos, cames, ferramentas elétricas, motores elétricos, bombas, etc. Têm grande aplicação na indústria automóvel, principalmente em peças no compartimento do motor, carcaças de máquinas elétricas como berbequins e serras e em todo o tipo de engrenagens. Com isto, escolheu-se PA 6.6 com 30% de fibra de vidro como material principal para o pedal de embraiagem, pois este componente tende a ser submetido a várias tensões ao longo de várias horas de uso. As propriedades da poliamida selecionada para este caso de estudo estão discriminadas na seguinte Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades técnicas das poliamidas (Shappe 2012)

Propriedades técnicas – Poliamida (PA 6.6)	
Módulo de elasticidade [GPa]	10.5
Alongamento [%]	3
Densidade [Mg/m³]	1,38
Tensão de Rotura [MPa]	265
Temperatura de moldagem [°C]	80 – 120
Temperatura de fusão [°C]	255 – 300
Dureza [Hv]	6 – 28

Após montagem do molde na máquina de injeção e acoplamento do sistema de injeção de água, procedeu-se à produção de várias peças teste foram otimizados os parâmetros de processamento e os tempos de ativação de cada fase (injeção de polímero, injeção de água). Na Figura 37 apresentam-se os parâmetros de temperatura utilizados e otimizados para o processamento de elementos com o molde protótipo industrial 2, utilizando o material PA 6.6.



Figura 37 - Parâmetros de processamento para a injeção da PA 6.6.

Para além dos parâmetros de temperatura da unidade de injeção, também foi necessário controlar a temperatura do molde. Neste caso foi mantido o molde a 80 °C, esta temperatura foi submetida com óleo aquecido dentro do circuito de arrefecimento.

4.2.2. Parâmetros da injeção de água

Os parâmetros introduzidos no equipamento de injeção assistida por água estão apresentados na seguinte Tabela 8. Os parâmetros a introduzir neste equipamento são repartidos por várias etapas, nomeadamente:

1. Injeção da bolha de água;
2. Injeção de água pós bolha;
3. Injeção da água para o vazamento;
4. Paragem da injeção;
5. Remoção da água por vácuo.

A primeira etapa é a injeção de uma pequena bolha de ar, apesar do processo ser à base da injeção de água, a água não estará em direto contacto na remoção do núcleo, mas sim uma

bolha de ar que irá “abrir caminho”. A segunda etapa consiste numa pequena injeção de água com uma menor pressão, para garantir que a criação da bolha de ar foi bem-sucedida.

A seguir destas duas etapas, segue-se a injeção de água que irá remover o material do núcleo e a compactação do componente a produzir. Esta etapa pode ser dividida em várias fases, dependendo da geometria da peça, isto é, consoante a variação da secção do componente poderá ser necessário aplicar mais ou menos pressão durante um determinado tempo.

Por fim, as etapas finais do processo consistem ser na paragem da injeção e de seguida a remoção da água do interior do componente produzido pelo efeito de vácuo, assim garantindo que a peça é extraída sem água no seu interior.

Tabela 8 - Parâmetros de processamento da injeção de água

Etapa	Molde protótipo industrial 1		Molde protótipo industrial 2	
	Pressão da injeção de água [bar]	Duração [s]	Pressão da injeção de água [bar]	Duração [s]
1 ^a	50	1	50	1,5
2 ^a	100	1	100	3
3 ^a	200	5	210	5
4 ^a	0	0.3	0	0.3
5 ^a	0	6	0	6

Ao analisar a Tabela 8 conclui-se que o processo de injeção assistida por água demorou cerca de 13 segundos para processar o componente do molde protótipo industrial 1 (tubo) e cerca de 16 segundos para processar o componente do molde protótipo industrial 2 (pedal). O processamento do componente do molde protótipo industrial 2 foi o mais demorado, pois como apresenta uma geometria mais robusta e com maior secção, necessitou mais pressão e tempo de injeção. A Figura 38 demonstra o gráfico referente a um ciclo de produção da injeção de água para a produção do componente do molde industrial 2 (pedal), nesta figura pode-se ver a pressão da água injetada versus o tempo.

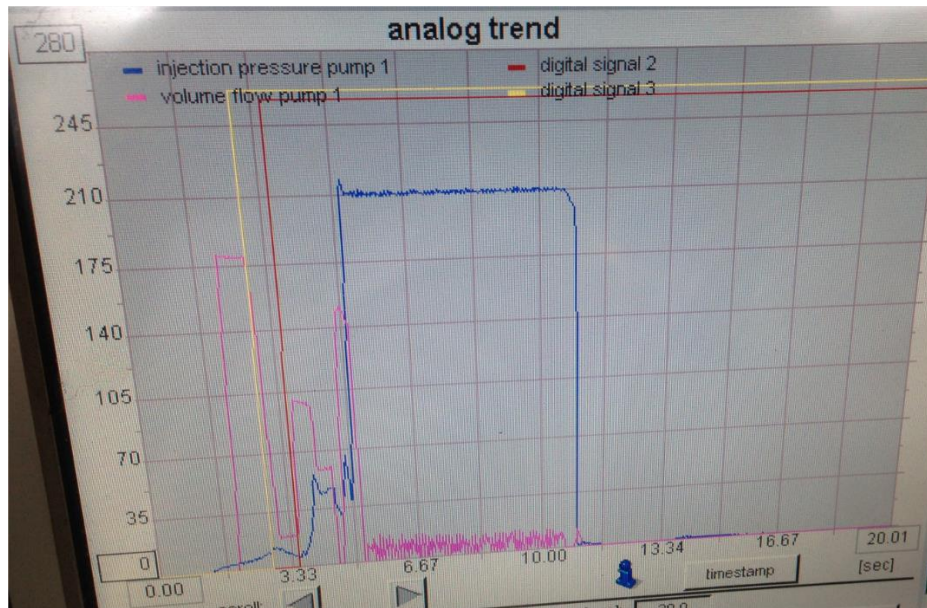


Figura 38 - Gráfico de processamento do componente do molde industrial 2

4.2.3. Primeira série de ensaios

Pode-se verificar na Figura 39 a) um processamento sem introdução de água, em que o componente ficou do lado da parte móvel do molde, sendo que a válvula não permitiu que o polímero passasse para a zona do componente destinada a albergar o material “impulsionado” pela água. Na Figura 39 b) apresenta-se um componente submetido a injeção de água em que parte da bolsa está preenchida com polímero. Salienta-se que foi projetada uma bolsa que permite, caso necessário, variação do seu volume.

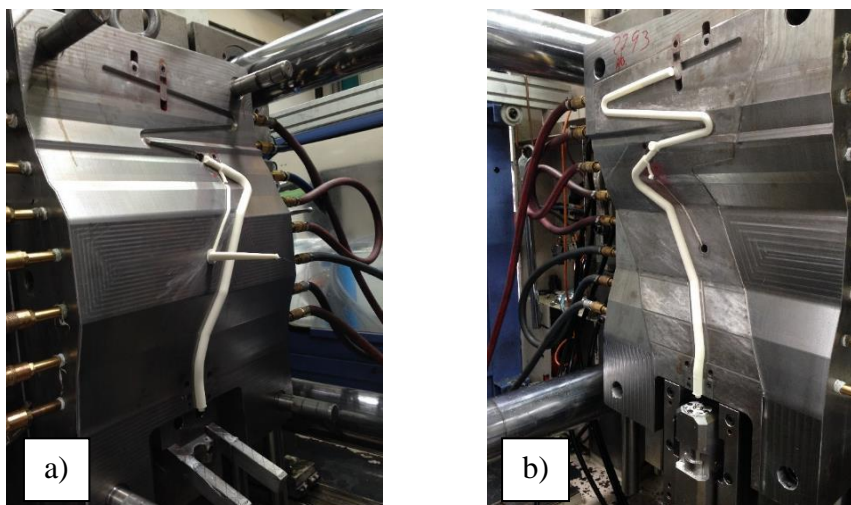


Figura 39 - Processamentos com molde protótipo industrial 1

Também foi elaborado ensaios de injeção com auxílio de um projétil. Este projétil apresenta uma geometria semelhante a uma “bala”, mas neste caso é feita de poliamida (PA) (Figura 34). Tal como referido anteriormente, o projétil é utilizado para garantir uma homogeneidade e rigor dimensional do interior do tubo. Para a utilização deste método é só necessário inserir o projétil no topo da cabeça de injeção de água (Figura 40).



Figura 40 - Injetor de água com auxílio a projétil

O objetivo ao processar o componente do molde protótipo industrial 1 com o auxílio de um projétil, foi para elaborar uma comparação da qualidade interna *versus* o método sem projétil, assim tendo um estudo do processo de injeção assistida por água mais completa.

No molde protótipo Industrial 2 pretendeu-se produzir o pedal apresentado, em desenho de modelação, na Figura 27. Como referido anteriormente, para este componente foi necessário conjugar várias técnicas de injeção num mesmo molde. Este componente foi produzido pelo processo de injeção assistida por água, criando uma secção vazada não constante, e após este processo foi de seguida injetado com outro material (bi-injeção). Para permitir a bi-injeção, a unidade piloto tem de possuir dois fusos de injeção, sendo que um destes é horizontal e outro vertical.

Após da injeção do material principal (PA 6.6) e da injeção do jato de água, o molde abre roda 180° e voltar a fechar e é injetado o segundo material (branco) sobre a primeira injeção. Na Figura 41 apresenta-se os elementos produzidos ainda acoplados à parte fixa do molde. Avistam-se os canais, a zona moldante da peça assim como a bolsa de material completamente preenchida.

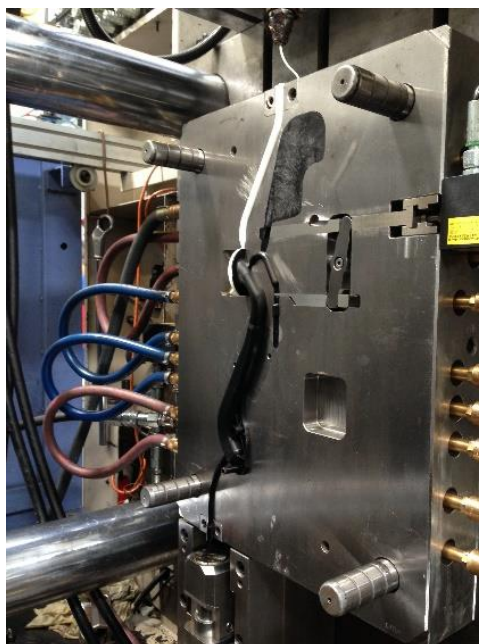


Figura 41 – Cavidade fixa do molde após o processo de injeção

4.3. Resultados

Na tarefa anterior, executou-se o processo de injeção nos dois moldes protótipos industriais e foram produzidas várias peças em cada um dos referidos moldes. Durante esta tarefa verificou-se alguns problemas na produção e defeitos nas peças produzidas, mas em geral a produção das peças foram bem-sucedidas.

Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos, testes de comparação por raio X dos componentes processados ao longo deste trabalho, assim como a verificação dimensional do pedal produzido.

A Figura 42 demonstra algumas das peças produzidas pelo processo de injeção no molde protótipo industrial 1. Na Figura 42 a) ilustra a produção do componente sem o processamento da injeção com água, como é necessário garantir uma boa injeção do polímero, foi executado testes sem o processo da água para otimizar os parâmetros de injeção. Após de garantirmos um boa injeção do polímero, seguiu-se para os testes de injeção com água e com auxílio de projétil, demonstrando o resultado final da produção na Figura 42 b).

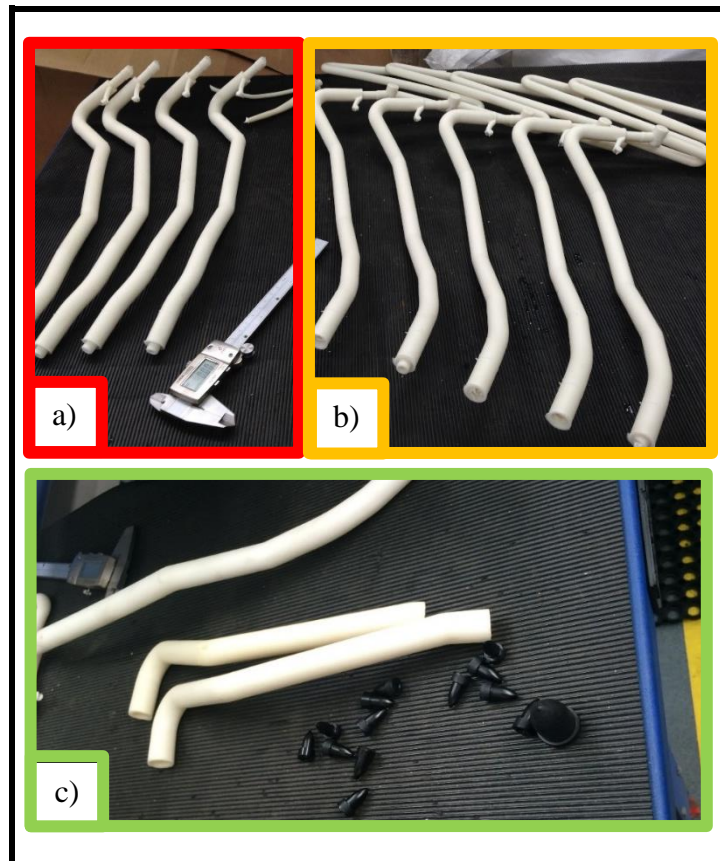


Figura 42 - Componentes injetados sem água, com água e com projétil

Como referido a cima, durante esta fase de produção de componentes dos moldes protótipos, ouve resultados positivos, mas também resultados menos favoráveis. Estes resultados menos positivos foram facilmente resolvidos, sendo a maior parte pela falta de otimização ou de refinamento do processo.

Na figura acima Figura 42 c) apresenta-se um elemento processado com sucesso, podendo-se avistar o material excedente removido, assim mostrando o produto final. No entanto, também ocorreram vários erros de produção, que mais adiante serão apresentados.

A Figura 43 demonstra algumas das peças produzidas pelo processo de injeção no molde protótipo industrial 2. Como é necessário garantir uma boa injeção do polímero, foi executado testes sem o processo da água para otimizar os parâmetros de injeção. Após de garantirmos um boa injeção do polímero, seguiu-se para os testes de injeção com água com/sem multimaterial, demonstrando o resultado final da produção na mesma figura.



Figura 43 - Vários componentes injetados do molde protótipo 2

4.3.1. Erros de produção

Durante os ensaios, ocorreram vários erros de produção, onde maioritariamente deram-se pela falta de otimização dos parâmetros de processamento, o que é normal numa primeira fase.

No molde protótipo industrial 1 ocorreu vários erros, mas todos os erros ocorridos derivaram da má utilização do projétil. Na Figura 44, é possível verificar a destruição do projétil durante o processo de produção e encontra-se partido em duas partes, o que leva à falta de garantia de qualidade desta peça. Este problema pode ocorrer, pelas elevadas pressões de injeção, pela má qualidade do projétil a utilizar (defeituoso) ou também pode resultar da falta de retificação das válvulas de abertura e fecho para a zona reservatório do material excedente, o que leva ao impedimento da passagem da totalidade do projétil e onde leva ao embate.

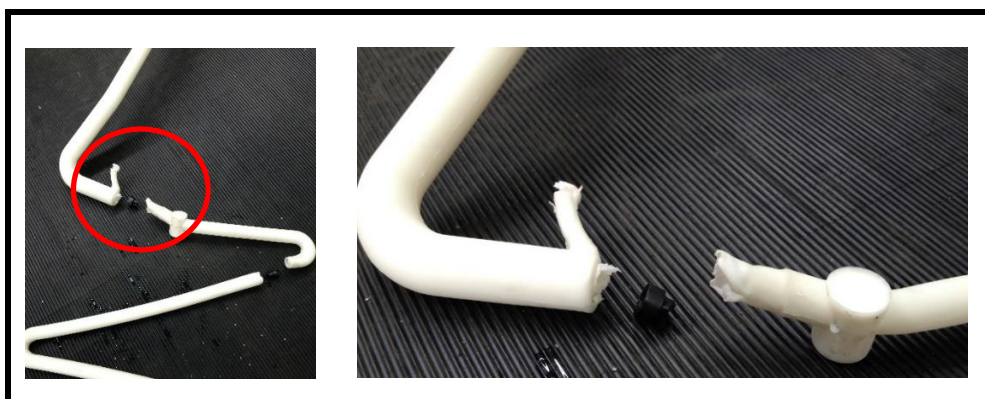


Figura 44 - Projétil danificado durante processo de injeção

Um erro verificado durante os ensaios de injeção, e comum de ocorrer, foi na má colocação do projétil no injetor de água, onde pode originar duas possíveis ocorrências, demonstradas na Figura 45.

Um das ocorrências é o não disparo do projétil (Figura 45 a)), isto é, caso o projétil não esteja bem centrado no injetor, o polímero irá preencher a cavidade toda do molde e também irá preencher o interior do projétil, assim impedindo a injeção da bolha de ar, que leva à não injeção da água. Outra ocorrência é o disparo do projétil desviado (Figura 45 b)), o que leva ao bloqueio do projétil ao longo do percurso de injeção e como resultado o vazamento não irá ter rigor dimensional desejado.

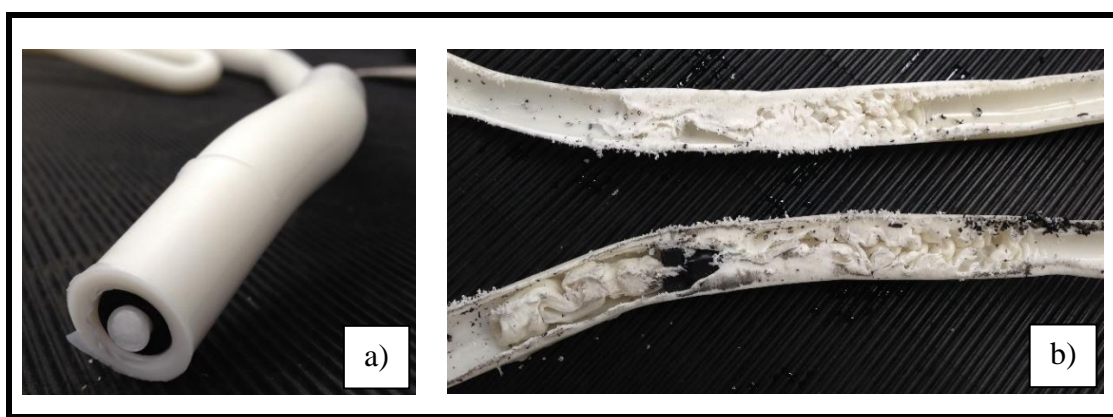


Figura 45 - Problemas derivados da má posição do projétil

No molde protótipo industrial 2 também se verificou a ocorrência de erros de produção, mas neste caso não foi possível corrigir os erros só pela otimização dos parâmetros de processamento, foi também necessário de alguma retificação.

Como referido anteriormente, foi necessário corrigir alguns aspetos do molde e otimização de parâmetros de processamento, para resolver os problemas que ocorreram durante os ensaios de injeção. Durante os primeiros ensaios de injeção, notou-se a necessidade de redimensionar a “bolsa de material” (reservatório), onde o material viscoso do interior do componente irá ser transportado e alojar até à extração. Pois, durante a fase de extração os componentes ficavam presos na zona do reservatório, assim redesenhou-se e retificou-se a cavidade para uma maior área e adicionou-se um ângulo para auxiliar na extração. Também foi redesenhado o sistema de abertura e fecho cavidades, para evitar o refluxo de polímero aquando da injeção de água, como se pode verificar na seguinte Figura 46.

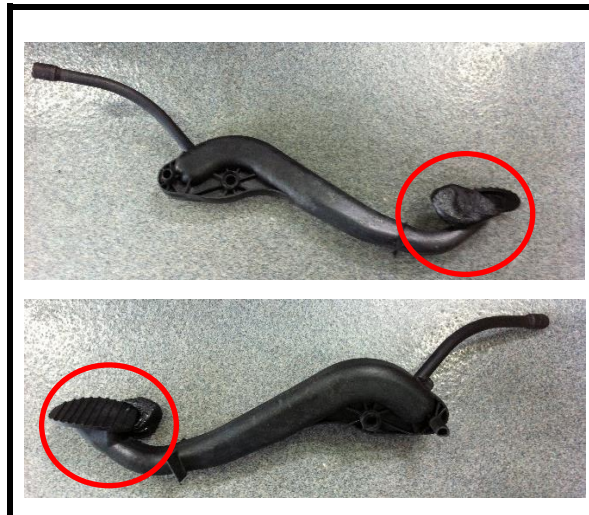


Figura 46 - Fuga de polímero do núcleo do componente

No entanto, a maioria dos problemas ocorridos durante os ensaios de injeção foram na injeção do segundo material (TPE). Contudo, para a correção destes problemas foram todos corrigidos a partir da otimização de parâmetros. As seguintes imagens ilustram os problemas obtidos.

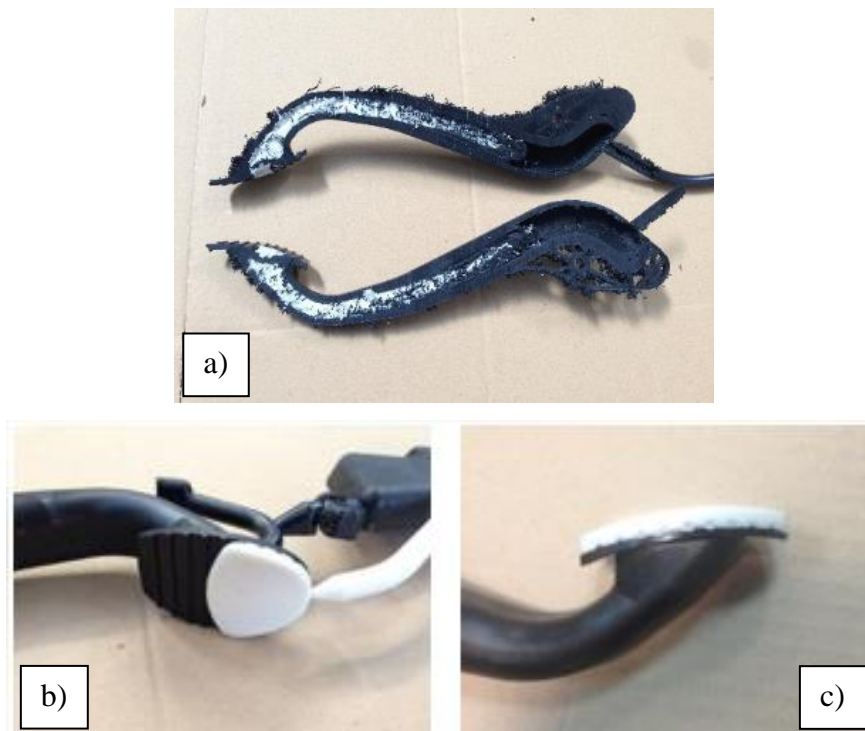


Figura 47 - a) Rutura da zona de contacto entre materiais; b) Insuficiência do preenchimento; c) Rebarba do TPE

Como referido, os defeitos ilustrados nas imagens a cima (Figura 47), foram todos corrigidos com a otimização dos parâmetros de injeção do segundo material. As imagens b) e c) da Figura 47 são comuns de ocorrer nos processos de injeção, contudo a imagem a) já é um erro característicos para este tipo de produção assistida a água. Com a injeção

de água, a parede entre o material secundário e primário, ficou muito frágil o que levou à sua rutura e preenchimento do seu interior com o TPE. As opções para a correção deste erro seria a redução da pressão da segunda injeção ou dar mais tempo de arrefecimento após a injeção primária.

4.3.2. Comparação da diferença de massa

A tecnologia de injeção assistida por água é vantajosa pela capacidade de otimizar o peso dos componentes produzidos, com isto decidiu-se comparar a diferença de peso entre cada componente maciço *versus* vazado.

No caso do componente do molde protótipo industrial 1 também se fez a análise entre a injeção com auxílio a projétil, apresentando-se as diferenças na Figura 48.

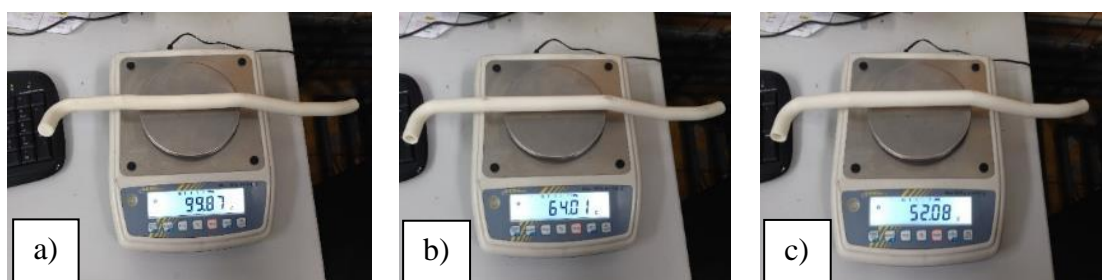


Figura 48 - Elemento: a) Sólido; b) Vazado com injeção assistida por água com projétil; c) Vazado com injeção assistida por água

A partir destas pesagens é possível verificar a diferença de volume removido pelo processo de injeção assistida por água e com auxílio de projétil. Este componente quando maciço apresenta um valor aproximado de 100g, com auxílio de projétil cerca de 64g e com o processo de água apresenta 52g. Assim conclui-se que com a utilização do processo injeção assistida por água pode otimizar um componente maciço, neste caso, em cerca de 48% no seu peso, isto tendo em conta que a aplicabilidade do componente não seja afetada por ter uma secção vazada, e com o auxílio do projétil torna-se cerca de 36% mais leve.

Entre a injeção assistida por água com projétil e sem projétil nota-se uma redução de peso sem o projétil, cerca de 19% mais leve, demonstrando que existe uma maior remoção de volume de material do interior do componente tubular.

A partir do processamento e análise dos diversos componentes obtidos do molde protótipo industrial 2, comparou-se as massas entre os tubos com secção sólida e vazada, apresentando-se as diferenças na Figura 49.

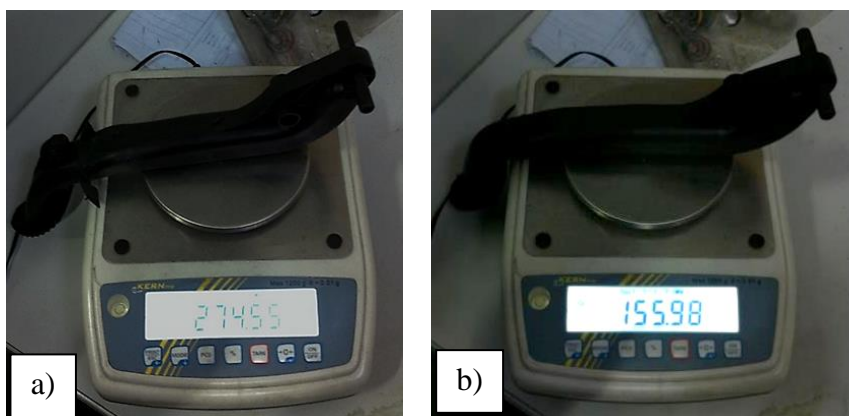


Figura 49 - Componente: a) Sólido; b) Vazada

A partir destas pesagens é possível verificar a diferença de volume removido pelo processo de injeção assistida por água. Pedal maciço apresenta um valor aproximado de 275g e com o processo de injeção assistida com água apresenta um valor 156g, o que significa que este componente torna-se cerca de 44% mais leve. Esta comparação também serve para ter uma ideia de quanto material poderia se “poupar”, caso fosse necessário produzir um componente do género, isto é, com uma secção de geométrica variada ao longo do corpo e onde a funcionalidade do componente não era posta em causa.

4.3.3. Análises dimensionais

Outra análise, que se achou relevante para esta dissertação, foi a análise dimensional dos componentes produzidos. Assim, decidiu-se elaborar análises e comparações à qualidade interior e exterior dos componentes vazados.

Para avaliação da estrutura interna de cada componente produzido a partir do molde protótipo industrial 1 utilizou-se a unidade de micro-tomografia computadorizada de raios X (μ -CT). Para os componentes produzidos do molde protótipo industrial 2 optou-se por um processo destrutivo, isto é, secionou-se o componente a meio.

O processo de micro-tomografia computadorizada de raios X (μ -CT) trata-se uma metodologia não destrutiva (MNT), que permite efetuar estudos de microscopia qualitativa e quantitativa tridimensional (3D) de objetos constituídos por materiais de complexidade variável mas não opacos aos raios-X. Possibilita o estudo pormenorizado das características estruturais e texturais tanto à superfície do objeto, como no seu interior, sem que seja necessário recorrer a qualquer tipo de preparação especial físico-mecânica

ou de tratamento químico da amostra. As aplicações da μ -CT abrangem os domínios científicos que necessitam de estudar materiais complexos a diferentes escalas de espaço e de tempo, com especial destaque para os materiais de engenharia, cujas propriedades estão fortemente dependentes das características referidas anteriormente. Apesar da sua aplicação crescente em muitos países, ainda surge de modo muito limitado nos estudos científicos realizados em Portugal.

Na Figura 50 a) apresenta-se o equipamento Skyscan da Bruker, procedendo à análise de um elemento injetado.

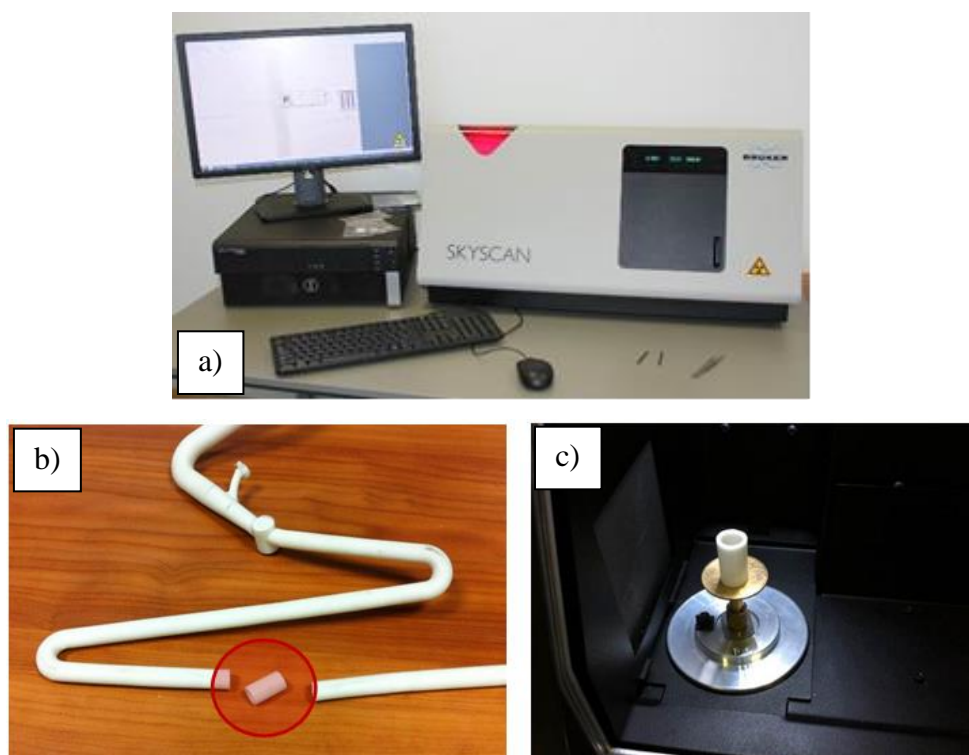


Figura 50 – a) Equipamento micro-tomografia; b) Extração da amostra; c) Amostra na plataforma do equipamento

Como forma de validação dimensional e verificação da qualidade dos elementos produzidos com auxílio de projétil, foram elaboradas micro-tomografias de raio X de amostras produzidas com e sem projétil, sendo que nas duas figuras seguintes se distingue claramente esta diferença.

A amostra foi seccionada a partir de um dos tubos produzidos (Figura 50 b)) e colocada na bandeja apresentada na Figura 50 c) a amostra do respetivo tubo e iniciou-se o varrimento de raios X. Fora analisadas duas secções, uma proveniente do tubo injetado apenas com água e outra secção recortada de um tubo injetado com projétil.

Desta forma, as figuras seguintes são o resultado da análise de uma secção retirada de ambos os tubos, de injeção direta de água (Figura 51 a)) e com o auxílio de projétil (Figura 51 b)). A partir destas imagens é possível comparar e concluir as grandes diferenças, em relação à qualidade interna, de cada um dos processos.

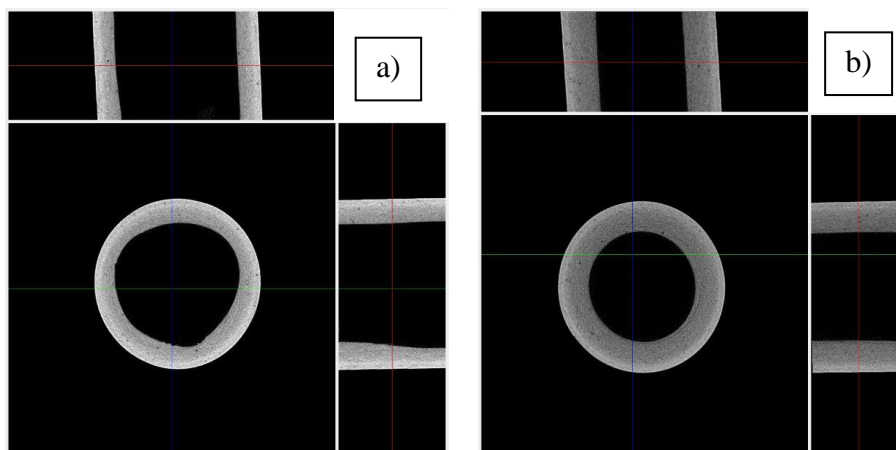


Figura 51 - a) Amostra por injeção direta de água; b) Amostra injetado com auxílio de projétil

Como se pode concluir, a partir das imagens Figura 51, a qualidade da superfície interna da injeção com auxílio de projétil apresenta uma parede interna uniforme, enquanto a injeção direta de água apresenta deformações ao longo da sua secção. Estas deformações provêm de uma maior remoção de material das paredes do componente, o que em certos casos, podem levar à produção de componentes frágeis, com maior probabilidade de rutura/quebra.

Como referido acima, para a avaliação da estrutura interna dos componentes produzidos do molde protótipo industrial 2, procedeu-se a cortes ao longo da secção e ao longo do corpo, como se pode verificar na seguinte Figura 52. A parede interna do componente apresenta uma espessura mínima de 4mm e 8mm na zona de maior espessura.



Figura 52 - Corte do pedal (visionamento da secção vaxada)

Para elaborar a análise dimensional do exterior do componente produzido, optou-se pela utilização de um sistema de digitalização, com esta técnica foi possível a comparação

direta do arquivo CAD com o arquivo gerado pela digitalização, possibilitando a identificação dos respectivos desvios.

Como no processo de injeção de plásticos o problema da alteração geométrica dos elementos obtidos relativamente ao pretendido é bastante comum. Como por exemplo empenos, retrações e outros fenómenos invalidam a utilização do elemento processado, se forem superiores à tolerância admissível. Com isto, decidiu-se só elaborar a comparação exterior do componente do molde protótipo industrial 2, pois o pedal é um componente onde os desvios dimensionais seriam mais relevantes para a industrial atual.

Na Figura 53 apresenta-se o equipamento utilizados para este estudo, *Comet 5* da *Steinbichler*, a demonstrar a digitalização de um componente produzido (pedal).



Figura 53 - Digitalização tridimensional do componente injetado

Os possíveis desvios dimensionais foram avaliados aplicando os conceitos da Engenharia inversa ao pedal, isto é, foi feita a digitalização 3D do pedal produzido e gerado o correspondente modelo CAD 3D sendo este comparado com o modelo cada 3D que deu origem ao molde. A Figura 54 mostra os desvios dimensionais obtidos, que ao analisar a podemos concluir que existe alguns desvios, maioritariamente entre 0.1 e 0.4 mm. Estes desvios provêm da contração e empenos dos componentes após injeção, também é de referir que os desvios de maior acentuação provêm da qualidade da nuvem de pontos, isto é, a qualidade gráfica (ruído) da digitalização do componente produzido.

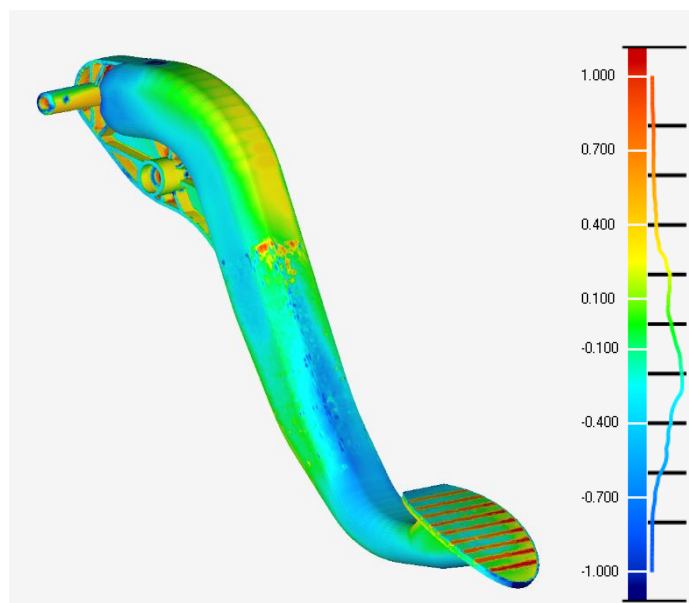


Figura 54 - Desvios dimensionais

4.4. Conclusões dos estudos preliminares

Ao analisar todos os resultados obtidos, a maioria dos erros ocorridos ao longo da produção deste componente, foram pela injeção auxiliada por projétil. A utilização de projétil traz uma maior probabilidade de falha ao projeto, mas com alguma otimização este método torna-se bastante viável.

Atualmente as entidades que utilizam esta vertente do projétil tendem a utilizar um sistema automatizado para colocar o projétil no injetor, assim garantindo sempre a posição certa e eliminando maioria dos erros a ocorrer. No nosso caso os projéteis foram colocados manualmente, o que levou à ocorrência de vários erros de produção.

Contudo, com os resultados obtidos, foi possível observar que as paredes internas dos componentes apresentam um rigor dimensional superior com a utilização de projétil. Para a produção de componentes com a necessidade de possuir elevado rigor dimensional, esta vertente é a mais indicada, mas caso este fator não seja relevante para a produção de um certo componente, a utilização do processo sem projétil é tão ou mais eficiente.

A produção do pedal, a partir do molde protótipo industrial 2, apresentou alguns erros provenientes da injeção do segundo material. Como a injeção de segundo material tinha uma pressão elevada e a superfície do componente ainda estava instável, isto é, ainda não se encontrava totalmente solidificada, houve a penetração do segundo material para

dentro do corpo do componente. Contudo este erro foi rapidamente corrigido pela manipulação dos parâmetros de processamento.

A partir da comparação dimensional, pode-se concluir que os desvios existentes entre o componente produzido *versus* o desejado são mínimos, assim concluindo que este tipo de processamento é bastante viável para rigor dimensional.

Com as comparações das pesagens, pode-se ver que este processo otimiza bastante o peso de cada componente, o que torna favorável para produção de componentes para a indústria automóvel. Também se notou uma maior remoção de volume sem o projétil, significando que a utilização de projétil não é viável para produção de componentes com um peso otimizado ou com secções variáveis.

5. O sistema Multi-Path.H₂O

Ao longo desta dissertação tem-se vindo a referir a injeção assistida por água como uma tecnologia ótima para produção de componentes tubulares, mas que no entanto está pouco explorada, significando que ainda tem muito para melhorar e/ou inovar o processo. Este argumento deriva da experiência de profissionais no ramo de produção de componentes e também tendo em base os estudos preliminares elaborado nesta dissertação.

A maior limitação conhecida por este processo, com base na pesquisa elaborada, estudos executados e pela opinião de empresas profissionais no setor dos componentes, é a dificuldade e/ou a impossibilidade de produzir componentes tubulares com várias ramificações. A partir desta pesquisa e troca de opiniões foi decidido criar um possível método que possibilita este tipo de produção, sendo o foco principal desta dissertação.

Ao longo deste capítulo serão descritos os pontos principais dos problemas existentes no processo de injeção assistida por água e os conceitos existentes para a correção deste problema dos canais ramificados. Também irá ser proposta uma possível resolução viável para este processo, com a sua explicação e ilustração do esquema.

5.1. IAA – Problemas atuais no processo

Apesar de esta tecnologia de injeção assistida de fluido direto (água ou gás), ou mesmo do auxílio de projéteis apresentar uma grande versatilidade na produção de peças ocas, este também apresentam as suas desvantagens e limitações características de cada processo. Contudo entre os processos descritos, estes apresentam uma limitação em comum: a impossibilidade de produzir peças vazadas com ramificações extensas, bifurcadas e com secções geometricamente complexas num só ciclo de injeção.

Como já explicado, na utilização do processo de injeção assistida por água, após da injeção do polímero segue-se o processo de injeção do jato de água no canal principal e durante esta fase o polímero do canal principal é impulsionado para o exterior. Contudo este jato de água injetado não vai redirecionar pelas ramificações (em certos casos), assim deixando as ramificações maciças e o canal principal vazado. A Figura 55 ilustra um exemplo do processo convencional da injeção assistida por água na produção de uma peça tubular com várias ramificações.

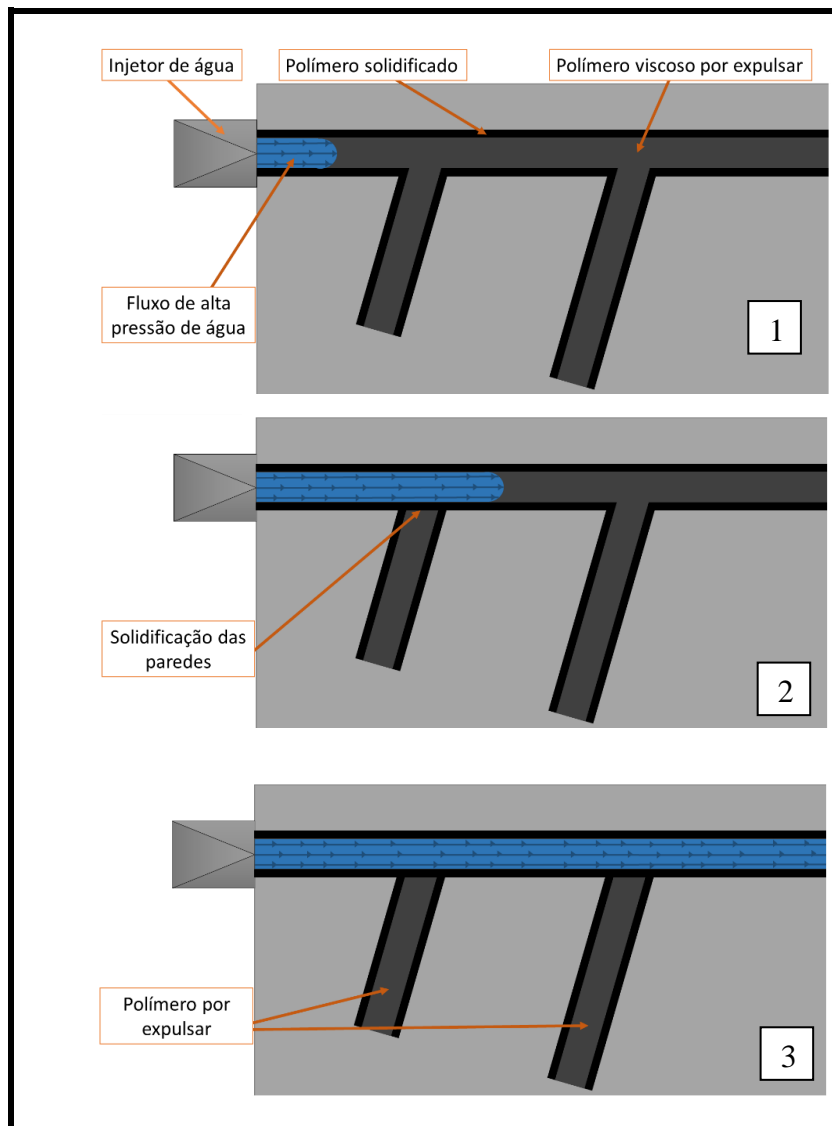


Figura 55 - Ilustração do processo convencional de injeção assistida por água

Atualmente é corrente a produção de peças vazadas com canais ramificados igualmente vazadas, recorrendo à tecnologia de injeção assistida por fluido. Para estes casos as ramificações bifurcadas não podem conter uma geometria complexa ou serem muito extensas ao longo da peça, pois as criações destas ramificações vazadas são moldadas a partir de um postigo e não pela remoção do núcleo polimérico derivada da injeção do jato de água. Com este método, significa que a secção vazada das ramificações está limitada pelas dimensões do postigo, impedindo a possibilidade de variar a geometria e a espessura da parede da secção vazada ao longo do processo de injeção, o que leva à necessidade de produzir de novo outro postigo.

No caso de existir a necessidade de produzir peças vazadas com ramificações bifurcadas com geometrias complexas e/ou extensas ao longo do canal principal, são empregues

processos adicionais pós-injeção (injeção de polímero e vazamento com jato de água) do canal principal e dos canais da ramificação. Estes processos consistem na adição (colagem ou solda) dos tubos das ramificações no canal principal, e em grande parte dos casos é necessário proceder a um processo de furação para criar um orifício para interligar o canal principal às ramificações. Estes processos subsequentes à injeção do corpo principal significam a necessidade da criação de moldes adicionais para produzir as partes da ramificação de secção vazadas. A Figura 56 demonstra um caso típico, onde a necessidade de criar um tubo com uma ramificação é necessário a produção independente de cada tubo e depois acoplados ao corpo principal. Com estes processos subsequentes adicionais, o processo de produção torna-se demorado e bastante dispendioso, por isso é desejável a criação de um processo que elimine estas etapas subsequentes, assim produzindo esta tipologia de peças num só ciclo de injeção.

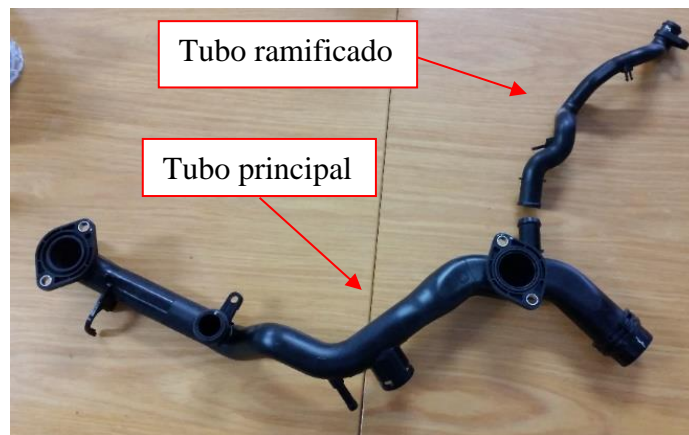


Figura 56 - Exemplo de tubo com ramificação por acoplar. Fonte: MoldetipoII, 2015

O principal objetivo deste projeto é a utilização da tecnologia de injeção direta de água, universalizar (produzir de forma *standard*) as secções das peças plásticas vazadas com ramificações extensas e de secções complexas e com uniformidade da espessura. As consequências são conseguir um processo que contribua para uma fabricação eco sustentável e uma produção menos demorada para peças desta tipologia. Assim, o alvo desta ideia é conceber um processo de injeção direta de água que possibilita a criação de secções vazadas de vários canais bifurcados num só ciclo de injeção com a eliminação de processos subsequentes, criando um processo de produção otimizada, rentável e sustentável.

5.2. Conceito e solução proposta

A solução para ser possível a produção de peças vazadas com ramificações extensas e bifurcadas, num só ciclo de injeção, seria com a aplicação de vários injetores para jato de água, estando estes canalizados para as respetivas ramificações por vazar. Para que esta metodologia seja viável, os vários fluxos de água provenientes das várias ramificações têm de se intercepar exatamente nas bifurcações, isto significa que cada corrente de água proveniente de cada canal ramificado tem de se intercepar no momento certo com a corrente de água do corpo da secção vazada principal. Caso estes fluxos não se interceparem exatamente nas bifurcações, pode ocorrer a solidificação das paredes das várias ramificações, assim impedindo o escape do fluxo de polímero das ramificações levando a não vazar a peça na totalidade, ou mesmo esta falta de interceção pode vir a danificar o equipamento.

Para que seja possível esta interseção no tempo adequado, é necessário manipular os tempos de injeção dos jatos de água de cada ramificação. Como as ramificações podem variar de geometria e comprimento, é necessário implementar “*delays*” nos fluxos de água nos canais de ramificação, de modo a garantir uma interceção nas bifurcações.

As seguintes figuras ilustram um esboço simplificado do sistema para o processo proposto, numa chapa moldante, onde neste caso a peça desejada a injetar é um tubo ramificado. Na ilustração da Figura 57, é de notar que nesta situação apresenta dois injetores de água, um para o canal principal e outro para um canal em forma de “V” para encaminhar o jato de água pelas respetivas ramificações.

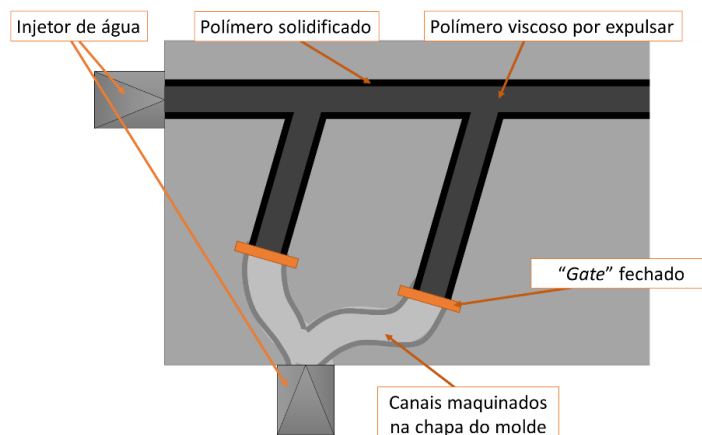


Figura 57 - Esquema do sistema proposto

A Figura 58 demonstra as fases do processo, onde o injetor projeta água pelos canais para as suas respectivas ramificações. É de notar que na etapa a), só uma “gate” (porta) abre, permitindo o fluxo entrar pela ramificação, antes da entrada do fluxo de água no canal principal. Como mencionado anteriormente, é necessário que a interseção dos fluxos ocorra exatamente nas zonas de bifurcação, e como a ramificação apresenta um comprimento maior do que o do canal principal até a zona de bifurcação, aplicou-se um “atraso” na injeção do jato de água pelo canal principal.

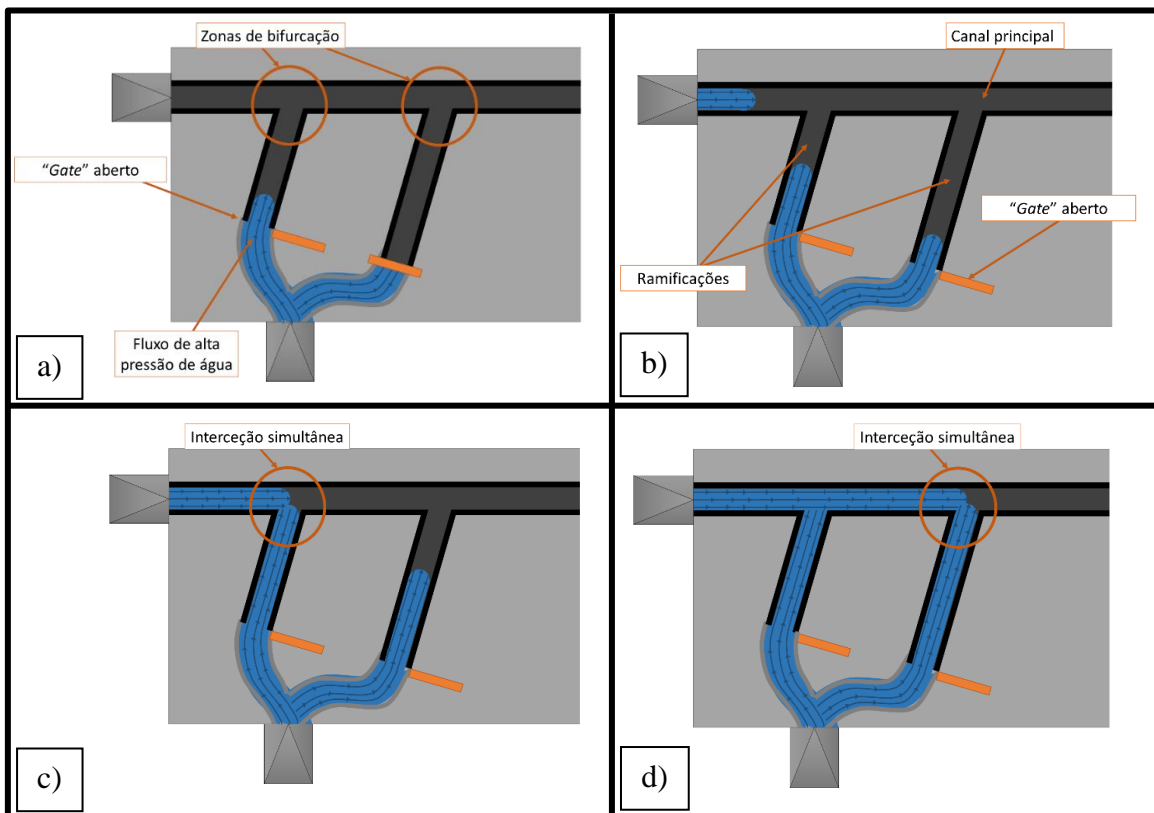


Figura 58 - Representação por etapas da injeção da água

Na etapa b) da Figura 58 ilustra a passagem do fluxo de água pelo canal principal e a abertura da “gate” segunda ramificação, assim garantindo os atrasos necessários para uma interseção exatamente na zona de bifurcação, como se pode ver nas etapas c) e d).

Após as interseções, o fluxo de água continua o seu percurso pelo canal principal até à expulsão de todo polímero viscoso do núcleo. Com a expulsão total do material viscoso interior, a água residual do interior do tubo é “aspirado” por vácuo, permitindo a reutilização da mesma.

Para controlar estes “delays” seria mais eficaz associar um sistema para o cálculo numérico (*software*) da interação entre fluxo da água que irá interagir com elementos

mecânicos, e este será um grande desafio a ultrapassar com o projeto Multi-Path.H₂O. O sistema para o cálculo numérico ou sistema de controlo (*software*) terá de ter a capacidade de calcular o tempo necessário do fluxo de água, com a influência do polímero viscoso, percorrer uma determinada distância. Com esta interpretação, o *software* irá calcular a diferença de tempo necessária aplicar para cada ramificação e enviar comandos de abertura/fecho das “*gates*”, garantindo uma interceção simultânea dos jatos de água nas zonas de bifurcação.

5.3. Conceção do conceito Multi-Path.H₂O

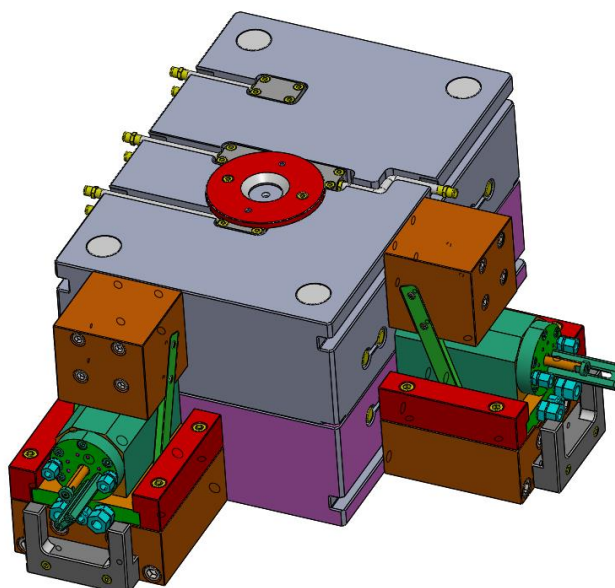


Figura 59 - Modelação final molde protótipo Multi-Path.H₂O

Com base nos desenhos esboço acima referidos, elaborou-se a modelação CAD 3D de um molde com o sistema proposto, tendo como resultado final a Figura 59.

O molde é composto por dois tipos de acessórios adicionais em relação aos que um molde convencional necessita, que são os quatro atuadores hidráulicos e os dois injetores de água. Fora destes dois componentes, o resto da estrutura do molde é, basicamente semelhante, a um molde convencional. O componente a ser injetado neste molde é o seguinte, representado na Figura 60, um tubo vazado com dois canais ramificados.



Figura 60 - Componente teste a injetar

Como primeira aproximação, decidiu-se testar a produção de um componente “simples” com a tipologia proposta na dissertação, isto é, componente vazado com mais que um canal ligado ao canal principal, assim criado mais do que uma bifurcação.

5.3.1. Estrutura do molde

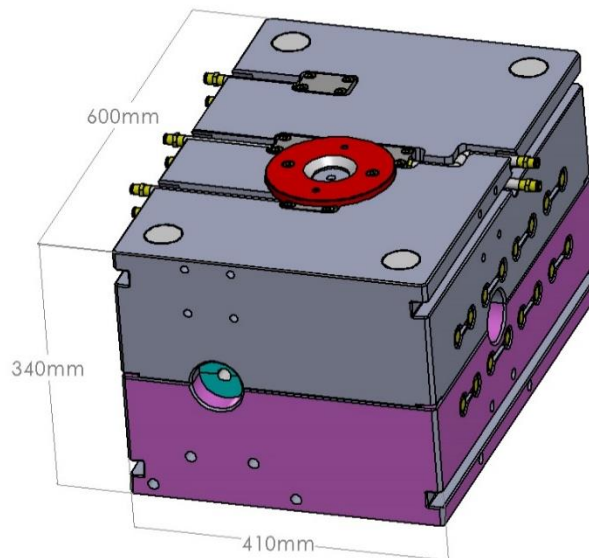


Figura 61 - Estrutura moldante Multi-Path.H₂O

A Figura 61 ilustra a estrutura do molde sem os injetores de água acoplados. Também é possível observar as dimensões do molde e pode-se considerar que é um molde de dimensões médias.

Como se tem vindo a referir, o processamento selecionado, para produzir estes componentes protótipo, é o processo “*Overflow*”. Assim a chapa moldante, demonstrada

na Figura 62, necessita de conter várias aberturas (Figura 62 - 4, 6 e 7) para implementação de válvulas de abertura/fecho para o controlo do fluxo dos fluidos. Estas aberturas localizam-se entre a cavidade do componente a injetar (Figura 62 - 2) e da cavidade aberta para o material em excesso se alojar, isto é, a criação de um “reservatório” (Figura 62 - 5).

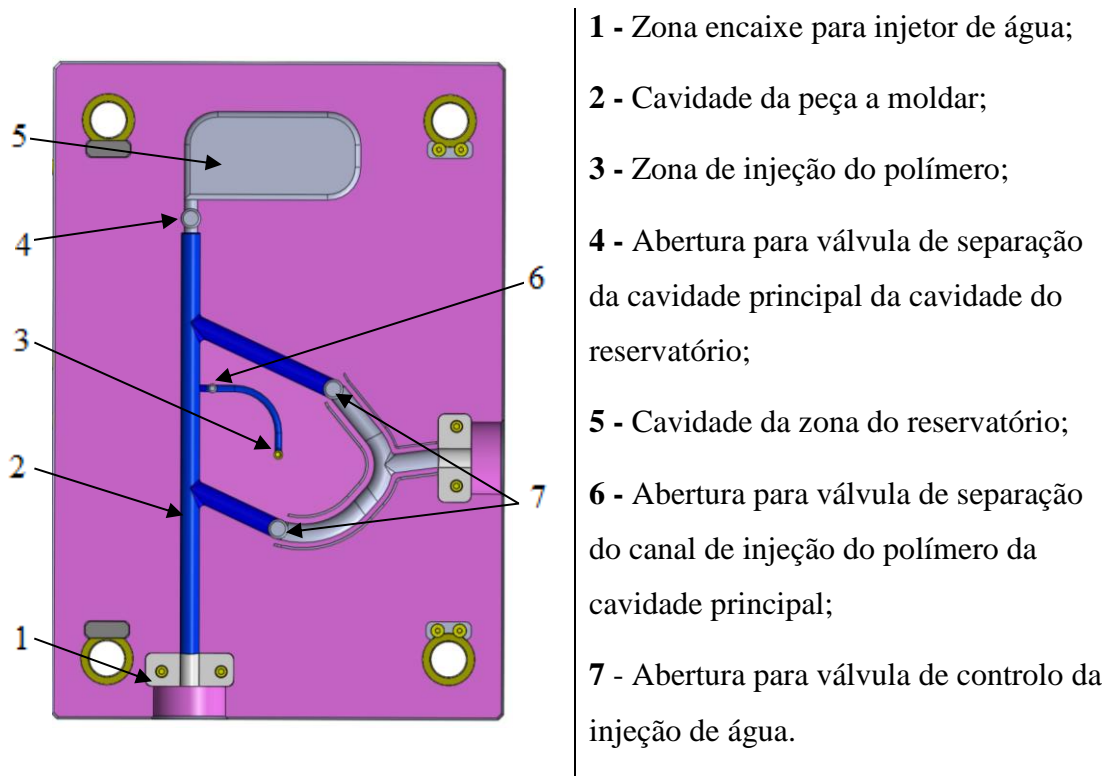


Figura 62 - Chapa moldante Multi-Path.H₂O

Nesta situação, também foi implementado uma abertura para inserir válvulas para o controlo da abertura/fecho do fluxo da água e do polímero (Figura 62 - 6 e 7). A abertura Figura 62 – 6 tem como objetivo de prevenir a entrada de água para dentro da injetora de polímero, e as aberturas localizadas na Figura 62 - 7 são específicas para este protótipo, tendo como objetivo controlar a injeção de água dos canais ramificados.

Estas válvulas de abertura e fecho dos fluxos são atuadores hidráulicos, representado na seguinte Figura 63. Estas válvulas, ou referido anteriormente como “*gates*”, consiste na elevação de um pistom que está a bloquear a passagem dos fluidos.

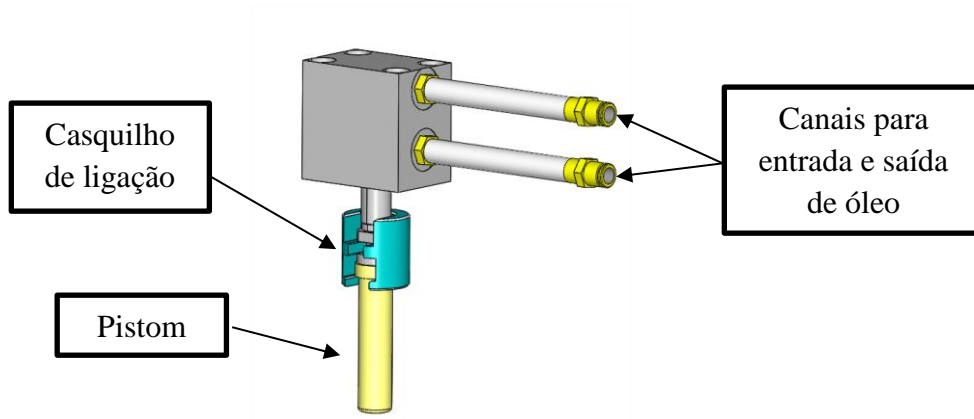


Figura 63 - Válvulas de controlo

Como em qualquer molde convencional, é sempre recomendado criar um sistema para controlo da temperatura do molde. Neste caso criou-se um circuito para passagem de água (ou óleo), assim garantindo uma temperatura constante nas chapas moldantes. A seguinte Figura 64 representa um corte de uma das chapas moldantes, expondo o circuito de fluido adotado.

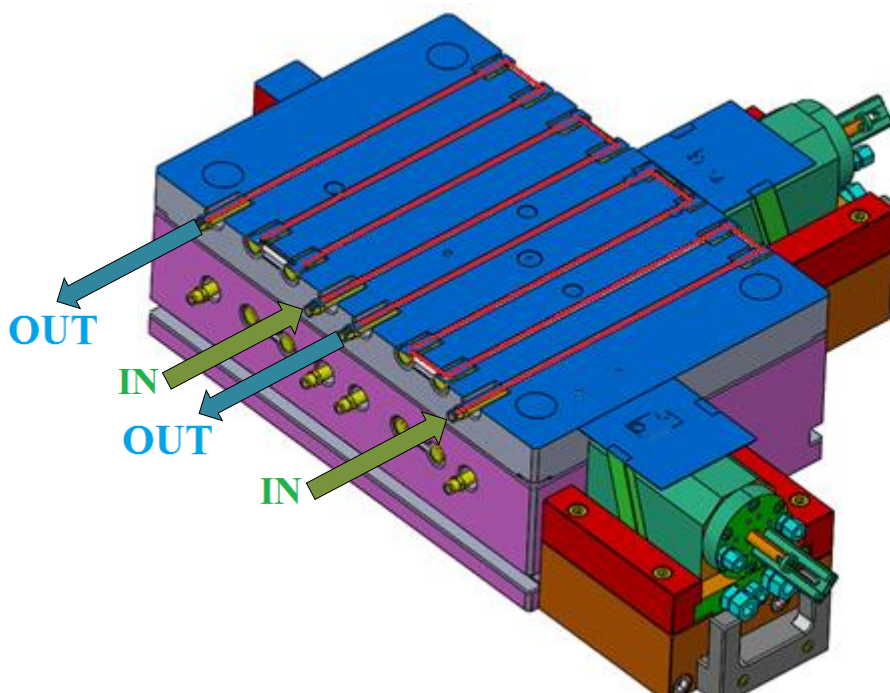


Figura 64 - Ilustração do circuito de arrefecimento

Como o molde apresenta dimensões ainda consideráveis, optou-se por criar dois circuitos de fluido para o controlo de temperatura do molde, assim garantindo um controlo mais estável e homogéneo.

5.4. Possíveis benefícios e limitações

Por consequência, possíveis vantagens e limitações poderão ocorrer com a utilização deste novo processo. Como o processo de injeção de água a criação da secção vazada depende essencialmente da reologia do polímero injetado (Jaruga et al. 2010). Tal significa que é possível variar e controlar as espessuras das paredes da geometria vazada variando a temperatura do molde, do polímero e tempo de arrefecimento do molde. Esta vertente também nos traz uma possibilidade de controlar individualmente cada espessura das respetivas ramificações, aplicando áreas de aquecimento controláveis nas zonas de ramificações.

Outro grande benefício da aplicação deste novo processo seria a redução de tempo de arrefecimento das peças injetadas, pois convencionalmente as ramificações simples são produzidas a partir de postigos moldantes. Caso seja aplicado a injeção direta de água, irá existir uma refrigeração direta da peça. Esta redução de tempo de arrefecimento iria criar um impacto direto no tempo de ciclo de injeção de cada peça, podendo mesmo reduzir o tempo de ciclo de 25% a 40% (Fleack 2007). Esta redução de tempo aplicado em casos de produção de grande escala representa uma grande poupança de tempo de produção.

Esta solução apresenta uma limitação relacionada com a utilização de projéteis, isto é, com este processo existe a impossibilidade de utilizar projéteis a assistir na criação das zonas vazadas, o que significa que será impossível (nesta primeira fase) utilizar os benefícios provenientes do projétil para produção de peças da tipologia proposta. A razão pela qual da impossibilidade da introdução de projéteis, dá-se pela dificuldade técnica das aplicar no sistema e existe uma elevada probabilidade de ocorrer choque entre os projéteis, que podem danificar a peças injetadas, molde ou mesmo o sistema em geral.

6. Conclusões e trabalhos futuros

A inovação proposta nesta dissertação poderá revolucionar, de certa forma, a indústria de produção de peças de secções vazadas e variáveis. O mercado que irá beneficiar deste novo método de produção será o do setor automóvel, de eletrodomésticos e de equipamentos (Bociaga 2007; Park et al. 2015; Liu et al. 2007). Atualmente, no setor automóvel e no de eletrodomésticos, tem-se vindo a aumentar a complexidade das geometrias e tem-se constatado grandes variações de diâmetros das tubagens. Estes factos têm reflexo nos processos de produção, pois tendem a ser problemáticos.

A ideia proposta nesta dissertação poderá ser a resposta para a produção de tubagens ou outros produtos para os referidos setores. Quando é referido sector dos equipamentos, significa um sector de produção de peças de pequeno e médio porte, onde as suas geometrias de perfis ocos poderão ser complexas, até ao ponto de ser necessário esta nova tecnologia. Um exemplo de equipamento geral comum é a produção de estruturas tubulares para substituição de metal, estes podem possuir grande complexidade na sua geometria e grandes variações de ramificações.

Deste trabalho fica patente que o projeto proposto é um grande desafio, que concilia a investigação com a inovação, que ao ser concluído terá necessariamente um grande impacto no fabrico de componentes ocos, permitindo alargar a tecnologia desenvolvida, a uma miríade de aplicações, com as vantagens enunciadas. A Moldetipo II, empresa que auxiliou na elaboração desta dissertação, demonstra bastantes conhecimentos e especialização na produção de peças de secção vazada com esta tecnologia. Como reconhecimento pela sua competência técnica foram premiados como melhores fabricantes de moldes em Dusseldorf (Alemanha) no evento “*16th Automotive award parts & components 2015*” (Silva 2015).

A Moldetipo II demonstra grande interesse nesta ideia e em inovar a sua produção sobre esta tipologia de peças e capitalizar ao máximo esta tecnologia. Contudo, para prosseguir este projeto é necessário um considerável investimento. Durante a escrita desta dissertação foi submetido uma candidatura ao programa “Portugal 2020”, projetos em co-promoção, tendo sido aprovado em Agosto de 2016, com um valor total de investimento de 1.018.675,19 € e com o prazo de execução de 36 meses. A revisão bibliográfica desta

tese suportou a elaboração da referida candidatura. Assim, durante os próximos 3 anos, desenvolveremos e implementaremos o conceito Multi-Path.H₂O.

Com a submissão da candidatura para o financiamento do projeto, foi elaborado pedido provisório de patente para o processo de produção proposto nesta candidatura, com o título “método de injeção assistida por água, gás ou por outro fluido para produção de componentes poliméricos com uma secção vazada” e com a referência nº 20161000017443 (ANEXO I). Também é de referir, com o desenvolver desta dissertação, foi elaborado um artigo científico, submetido, aprovado e já apresentado na conferência “International Conference on Automotive Composites – ICAutoC 2016” (ANEXO 2).

Bibliografia

- Ahmadzai, A.Z.I.A. & Behraves, A.H., 2011. Effect of processing parameters on water penetration in water assisted injection molding of ABS. *POLIMERY*, pp.232–239.
- Akro-Plastic, 2016. Akro-Plastic draws level the playing field with low-cost carbon fiber compounds. *CPRJ International*. Available at: <http://www.adsalecprj.com/Publicity/MarketNews/lang-eng/article-67022010/NewsArticle.aspx> [Accessed April 5, 2016].
- Battenfeld, 2014. What is fluid assisted injection molding. *Battenfeld*, p.16.
- Bociaga, E., 2007. Injection molding of polymer assisted water and gas and water. *Polimery*, 52(2), pp.88–93.
- Bom, T.J.D., 2014. *Comparação do desempenho de tecnologias alternativas de fabrico de moldes de injeção de plásticos*.
- Centimfe, 2003. *Manual do projetista para moldes de injeção de plásticos*,
- Covestro, 2015. Gas and water-assist injection (GIT and WIT). *Specialty injection molding methods for high-quality and competitive products*. Available at: <http://www.plastics.covestro.com/Engineering/Processing/Injection-molding/Gas-water-assist-molding.aspx> [Accessed December 13, 2015].
- Fleack, R., 2007. Water-Assist Injection Molding (WAIM). *PROSPECTOR*. Available at: <http://knowledge.ulprospector.com/1517/pe-water-assist-injection-molding/> [Accessed December 10, 2015].
- Goodship, V. ed., 2004. *Practical guide to injection moulding*, Shawbury, UK: Rapra Technology.
- Hopmann, C., Michaeli, W. & Becker, S., 2012. Analysis of Fluid-Assisted Injection Techniques by Use of Ultrasonic Measurements. *Plastics Engineering*, pp.10–14.
- Jaruga, T., Lubczyńska, K. & Gnatowski, A., 2010. Warpage of injection moulded parts as the result of mould temperature difference. , 44(1), pp.28–34.
- Kamal, M.R., Isayev, A. & Liu, S.-J. eds., 2009. *Injection Molding*, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9783446416857500027> [Accessed April 26, 2016].
- Knights, M., 2005. Water injection molding it's all coming together. In *Plastics Technology*. pp. 54–61.
- Knights, M., 2002. Water Injection Molding Makes Hollow Parts Faster, Lighter. *Plastics Technology*. Available at: <http://www.ptonline.com/articles/water-injection-molding-makes-hollow-parts-faster-lighter> [Accessed December 11, 2015].
- KRAIBURG, 2016. Custom-Engineered TPE and more. Available at: <http://www.kraiburg-tpe.com/pt/products/product-database?cid=150> [Accessed April 15, 2016].
- Lin, K.-Y. & Liu, S.-J., 2009. The influence of processing parameters on fingering formation in fluid-assisted injection-molded disks. *Polymer Engineering & Science*, 49(11), pp.2257–2263.


- Liu, S.-J., 2009. Water Assisted Injection Molding: A Review. *International Polymer Processing*, 24(4), pp.315–325. Available at: <http://dx.doi.org/10.3139/217.2255>.
- Liu, S.J., Lin, M.J. & Wu, Y.C., 2007. An experimental study of the water-assisted injection molding of glass fiber filled poly-butylene-terephthalate (PBT) composites. *Composites Science and Technology*, 67(7-8), pp.1415–1424.
- Liu, S.-J. & Wu, Y.-C., 2007. Dynamic visualization of cavity-filling process in fluid-assisted injection molding-gas versus water. *Polymer Testing*, 26(2), pp.232–242.
- Michaeli, W. & Jüntgen, T., 2002. The water injection technique (WIT) - Opportunities and challenges. In W. Michaeli & T. Jüntgen, eds. *Injection Moulding 2002*. Barcelona: iSmithers Rapra Publishing, pp. 73–83.
- Michaeli, W., Jüntgen, T. & Brunswick, A., 2001. WIT - En route to series production: First industrial application of the water injection technique. In *Kunststoffe Plast Europe*. pp. 37–39.
- Mieth, F. & Tromm, M., 2016. Multicomponent Technologies. In *Specialized Injection Molding Techniques*. Elsevier, pp. 1–51.
- Mohrbach, E., 1971. Plastic shoe heels - with compressed gas blown into the centre of the plastic mould mass. DE 2106546.
- Myplasticsblog, 2012. Bringing In New Technologies For Making Parts Lightweight. *Myplasticsblog*. Available at: <https://myplasticsblog.wordpress.com/tag/projectile-injection-technology/> [Accessed May 10, 2015].
- Park, H., Cha, B. & Rhee, B., 2015. Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Process Conditions on Residual Wall Thickness and Cooling and Surface Characteristics of Water-Assisted Injection Molded Hollow Products. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015.
- Parvez, M.A. et al., 2002. Gas-assisted injection molding: The effects of process variables and gas channel geometry. *Journal of Materials Processing Technology*, 121(1), pp.27–35.
- Protte, R. & Konejung, K., 2003. Water increases productivity. *Kunststoffe, Plast Europe*, 93(2), pp.25–28.
- Roth, D.-I.W., 2007. *Why Water- Assisted Injection Moulding? Advantages and Equipment*,
- Shah, S., 1997. Gas assisted injection molding: a technology overview. In *Journal of Injection Molding Technology*. United States: Soc of Plastics Engineers, Brookfield, CT, United States, pp. 96–103.
- Shappe, 2012. Custom-engineered TPE and more. Available at: <http://www.schappe.com/> [Accessed January 4, 2016].
- SHEMCO, 2005. *Guia Comprador de Moldes* 1st ed.,
- Silva, R., 2015. Moldetipo distinguida como melhor fabricante de moldes. *Jornal de Leiria*, p.20.
- Todd, R.H., Allen, D.K. & Alting, L., 1994. Manufacturing Processes Reference Guide. *Industrial Press, Inc*.
- Volle, N. & Vincent, M., 2009. Experimental study of water assisted injection molding. , i, pp.5–7.

- Yang, J.G., Zhou, X.H. & Niu, Q., 2013. Model and simulation of water penetration in water-assisted injection molding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(1-4), pp.367–375. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-012-4490-8>.
- Yasuike, A. et al., 1973. Moulded hollow (foamed) plastic articles - by injecting molten resin into moulding cavity, and introducing filling of fluid medium. DE 2461580.
- Zhou, H. et al., 2012. Simulation and Experiment Research on the Proportional Pressure Control of Water-assisted Injection Molding. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 25(3), pp.430–438.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Anexos

ANEXO A – Comprovativo Pedido de Patente

 Instituto Nacional da Propriedade Industrial
 Campo das Abelhas - 1149-026 Lisboa - Portugal
 Tel: +351 218818100 / Linha Azul: 808 200689 / Fax: +351 218876328 / Fax: +351 218862046 / E-mail: atm@inpi.pt / www.inpi.pt

Nº	CÓDIGO	DATA E HORA DE RECEÇÃO	MODALIDADE	PROCESSO RELACIONADO
20161000017443	0198	2016/03/11-17:00:45	PAT	109232 F

PAGAMENTO CONFIRMADO

PEDIDO DE PATENTE, MODELO DE UTILIDADE OU DE TOPOGRAFIA DE PRODUTOS SEMICONDUTORES

1 REQUERENTE																
<table style="width: 100%;"> <tr> <td>Código 2246586</td> <td>Nacionalidade PORTUGUESA</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Nome INSTITUTO POLITÉCNICO DE LEIRIA</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Endereço RUA GENERAL NORTON DE MATOS, APARTADO 4133</td> </tr> <tr> <td>Localidade LEIRIA</td> <td>Código Postal 2411-901</td> </tr> <tr> <td>Telefone 244830010</td> <td>Telemóvel</td> </tr> <tr> <td>E-mail WWW.MAISINCLUSIVO.IPLEIRIA.PT</td> <td>Fax</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Atividade (CAE)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">NIF</td> </tr> </table>	Código 2246586	Nacionalidade PORTUGUESA	Nome INSTITUTO POLITÉCNICO DE LEIRIA		Endereço RUA GENERAL NORTON DE MATOS, APARTADO 4133		Localidade LEIRIA	Código Postal 2411-901	Telefone 244830010	Telemóvel	E-mail WWW.MAISINCLUSIVO.IPLEIRIA.PT	Fax	Atividade (CAE)		NIF	
Código 2246586	Nacionalidade PORTUGUESA															
Nome INSTITUTO POLITÉCNICO DE LEIRIA																
Endereço RUA GENERAL NORTON DE MATOS, APARTADO 4133																
Localidade LEIRIA	Código Postal 2411-901															
Telefone 244830010	Telemóvel															
E-mail WWW.MAISINCLUSIVO.IPLEIRIA.PT	Fax															
Atividade (CAE)																
NIF																
Tipo de Representação Agente Oficial da Propriedade Industrial ou Procurador Autorizado Nome PATRÍCIA ALEXANDRA CORREIA MARQUES Exclusivo para este ato? NÃO Código 600055																
2 MODALIDADE / TIPO DE PEDIDO																
Modalidade: PEDIDO PROVISÓRIO DE PATENTE Realização de pesquisa pelo INPI: SIM																
3 EPIGRAFE OU TÍTULO																
MÉTODO DE INJEÇÃO ASSISTIDA POR ÁGUA, GÁS OU POR OUTRO FLUIDO PARA PRODUÇÃO DE COMPONENTES POLIÉMICOS COM UMA SECÇÃO VAZADA																
4 RESUMO																
5 FIGURAS																
6 INVENTORES																
<table style="width: 100%;"> <tr> <td>Nome DAVID SANTOS OLIVEIRA</td> <td>Nacionalidade PORTUGUESA</td> </tr> <tr> <td>Endereço</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Localidade</td> <td>Código Postal</td> </tr> <tr> <td>Telefone 915103581</td> <td></td> </tr> <tr> <td>E-mail DAVID.SANTOS.OLIVEIRA@IPLEIRIA.PT</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">NIF</td> </tr> </table>	Nome DAVID SANTOS OLIVEIRA	Nacionalidade PORTUGUESA	Endereço		Localidade	Código Postal	Telefone 915103581		E-mail DAVID.SANTOS.OLIVEIRA@IPLEIRIA.PT		NIF					
Nome DAVID SANTOS OLIVEIRA	Nacionalidade PORTUGUESA															
Endereço																
Localidade	Código Postal															
Telefone 915103581																
E-mail DAVID.SANTOS.OLIVEIRA@IPLEIRIA.PT																
NIF																
<table style="width: 100%;"> <tr> <td>Nome RUI MANUEL FERREIRA DA SILVA</td> <td>Nacionalidade PORTUGUESA</td> </tr> <tr> <td>Endereço</td> <td></td> </tr> </table>	Nome RUI MANUEL FERREIRA DA SILVA	Nacionalidade PORTUGUESA	Endereço													
Nome RUI MANUEL FERREIRA DA SILVA	Nacionalidade PORTUGUESA															
Endereço																

20161000017443 - 2016/03/11-17:00:45
1/2

Localidade [REDACTED] Telemóvel 919314203 Código Postal [REDACTED]
E-mail RUI.SILVA@MOLDETIPO.PT
NIF [REDACTED]

Nome ARTUR JORGE DOS SANTOS MATEUS Nacionalidade PORTUGUESA
Endereço [REDACTED]
Localidade [REDACTED] Telemóvel 961722390 Código Postal [REDACTED]
E-mail ARTUR.MATEUS@IPLEIRIA.PT
NIF [REDACTED]

Nome TELMO MACHADO SILVA MOLEIRO Nacionalidade PORTUGUESA
Endereço [REDACTED]
Localidade [REDACTED] Código Postal [REDACTED]
Telefone 244589895
E-mail TELMO.MOLEIRO@MOLDETIPO.PT
NIF [REDACTED]

7 REIVINDICAÇÃO DE PRIORIDADE

8 DOCUMENTOS ANEXOS

DOCUMENTO DO PEDIDO PROVISÓRIO DE PATENTE (16-0296EP.pdf)

9 OBSERVAÇÕES

10 TAXAS

Taxa	Importância
PEDIDO PROVISÓRIO DE PATENTE	0,00 €
PESQUISA EM PEDIDO PROVISÓRIO DE PATENTE	0,00 €
Total:	0,00 €

11 PAGAMENTO

Tipo de Pagamento Não aplicável. Requerimento isento.

12 ASSINATURA DO REQUERENTE OU MANDATÁRIO/REPRESENTANTE LEGAL

Assinatura/Nome Patrícia Alexandra Correia Marques

Nº B.I. [REDACTED]

Data 2016/03/11

Atenção: Os dados relativos ao nome e morada serão publicados no Boletim da Propriedade Industrial, de acordo com o previsto no Código da Propriedade Industrial, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 38/2003, de 5 de Março, ficando também incluídos nas bases de dados de marcas e patentes disponibilizadas neste portal.
Se desejar que a morada não seja conhecida pode optar por indicar um Apartado Postal.
Caso o requeira, poderá também aceder e retificar os seus dados. Para mais informações consulte a política de privacidade deste portal.

ANEXO B – Artigo Científico

International Conference on Automotive Composites

ICAutoC 2016

A. Elmarakbi and A.L. Araújo (Editors)

© ICMC 2016

APPLICATION OF AN INTEGRATED INJECTION APPROACH TO MANUFACTURING MULTIMATERIAL PRE-PREGS COMPONENTS

D. Oliveira*, C. Malça†, R. Felismina*, M. Silva*, J. Domingues*, A. Mateus*

*Centre for Rapid and Sustainable Product Development, Polytechnic Institute of Leiria
Centro Empresarial da Marinha Grande, Rua de Portugal, 2430-028 - Marinha Grande, Portugal
david.santos.oliveira@ipleiria.pt

† Department of Mechanical Engineering, Polytechnic Institute of Coimbra
Rua Pedro Nunes - Quinta da Nora, 3030-199 - Coimbra, Portugal
raimundo.felismina@ipleiria.pt; miguel.r.silva@ipleiria.pt; jorge.m.domingues@ipleiria.pt;
artur.mateus@ipleiria.pt; candida@isec.pt

Key words: Water assisted injection, Bi-injection, Pre-regs, Multimaterial, Hollow components

Summary: *Currently the automotive industry presents a great need for pre-preg polymeric matrix components, in particular those castings and of tubular types. The hollow section components have, in addition to low weight, a high flexural strength and may incorporate ducts with highly complex shape, submitted to elevated levels of internal pressure if reinforced with materials that promote adequate mechanical behavior. The manufacture of hollow section pieces is associated with the injection process assisted by a fluid - water, gas or both - with the aid of a projectile. This technology, despite the high demand, is costly and little explored, which justifies the lack of companies specializing in this production process. This work describes, through a case study of an automobile clutch pedal, the development of a methodology for the manufacturing of injected multimaterial parts with pre-peg fabrics and hollow section with the aid of the water assisted injection molding process. The possibility of performing the injection, with different thermoplastics, on a technical pre-preg fabrics (carbon, glass, kevlar or metal) allows for obtaining multimaterial components with high performance and hollow section, constant or not, which is very useful and advantageous for many industries but fundamentally for the automotive sector.*

1 INTRODUCTION

The methodology to be developed and implemented does not aim at replacing the main and well-established components manufacturing technologies made of composite materials such as molding in an autoclave, the vacuum bag molding and infusion. These processes continue to have very specific characteristics applicable to large size and simple geometry components. The production method proposed here can be understood as an option, highly competitive in the production of castings with high performance, high flexibility in geometrical design and higher functional requirement that, in some cases, may replace metal

components. The purpose of this work is therefore the production of composite parts by molding using the injection process upon technical fabric with high amount of fibers, which are pre-impregnated with thermoplastic materials. This implies the need to combine processes such as the injection assisted by water, the injection on fabric and the multimaterial injection.

3.1 Assisted injection moulding (AIM)

The polymer injection process is the most used process to produce a high number of plastic parts in reduced times. One of the industries that most uses this production process is the automotive industry [1]. Currently, the injection technology assisted by a fluid, which can be performed by direct injection method of water direct injection gas or, for both cases with the aid of a projectile, is used to manufacture polymer parts with hollow section and complex geometries. The process consists of injecting fluid at high pressure, after the mold closing and injection of polymer to the total filling of molding zone. The injection of fluid will force the expulsion of the polymer from the core into a reservoir [2]. This expulsion of material is not only possible thanks to high pressures of the fluid, but is also due to the fact that the polymer is still in a viscous state which facilitates its outflow. Liu and Wu [3] report the advantages and variants of the injection fluid assisted process in the production of polymeric components with hollow section recording faster injection cycles and greater savings of raw materials. The technology of injection assisted by fluid is an asset for the injection of plastic component industries, bringing greater productivity, speed and sustainability given the ability to produce lighter parts, hollow and complex geometry with functional and structural performance similar to bulk components [4]. These features are absolutely crucial for the automotive and aeronautic industries.

3.2 Water assisted injection moulding (WAIM) vs. Gas assisted injection moulding (GAIM)

The injection molding assisted by gas, patented in the 70s [5, 6] was the first approach to the process of injection assisted by fluid, which received much attention by the industries of the time [3, 7, 8]. However, the use of gas, usually nitrogen, is decreasing due to limitations such as low thermal conductivity, low heat capacity, the compressibility of the gas and the need to use a high purity gas compromising the process sustainability since nitrogen is a nonrenewable resource. In order to make the process of sustainable injection and reduce production costs in 1998 the Institute of Plastic Processing (IKV) replaced gas by water giving rise to WAIM technology. This emerging technology has received and continues to receive much attention by the plastic component production industries [3, 9] given the increase of productivity associated with it.

The WAIM reduces the cooling time and the consumption of raw materials of cast plastic parts [10] which, in turn, leads to new application fields for thermoplastic materials [11]. The water incompressibility allows better control of the process by placing more stringent requirements for water injection unit, since it is necessary to provide a volumetric flow continuously. The good thermal conductivity of water compared to gas occurs during the phases of compression and cooling, since the optimum performance of the water allows that the molten can be cooled therein, reducing thereby the cooling time [11]. Fleack [12] reports that using GAIM the part cooling is about 50% slower than in the WAIM since water has a coefficient of thermal conductivity higher than gas, which is a necessary condition for reducing the production time cycle. It was also reported, in a test performed by Engel, that

the injection timing of a hollow section of a handle chainsaw composed of nylon plus 30% of glass fiber was of 30 seconds using WAIM and 61 seconds for GAIM. The Ferromatik also performed comparison tests, concluding that by injecting a single piece of polypropylene, the process without fluid took 60 seconds to solidify the molded part, while using gas took 40 seconds and with water 30 seconds. Michaeli et al. [13] pointed out that in comparison with the GAIM, reductions from 30% to 70% in cooling time can be obtained with WAIM. These differences in the cooling time will depend not only on the size and geometry of the part, but also on the polymer type injected. Another major difference between these two injection processes is that WAIM allows for the production of parts with lower wall thickness. Fleack [12] indicated a reduction of about 25% in wall thickness when the WAIM is used which implies a significant reduction in the consumption of raw materials. Additionally, and given that water provides a very rapid solidification of the interior surface, the interior of castings produced by WAIM has a lower surface roughness than that observed in the gas injection parts [14].

The contraction and warpings that can occur during an injection process are fundamental aspects which determine the quality of the injected parts, especially if they are part of an assembly. Contraction is mainly affected by compaction pressure, decreasing with the increase of the fluid pressure, while warpings are a consequence of the cooling conditions as a result of the distribution of the residual wall thickness, the thermal conditions of the cavity and of the material injected. The distribution of the residual wall thickness along the flow path is one of the essential criteria for the production of plastic parts with a hollow section. In fact, the mechanical properties of the part are directly affected by the distribution of the residual wall thickness, as well as by phenomena of contraction and warpage [15]. The WAIM process is susceptible to the occurrence of such defects. However, they can be mitigated or even eliminated by proper selection of processing parameters, as shown by studies such as analysis on the influence of rates and flow pressures [11], on the dynamics of the filling process molding area [3, 15], on the injection time, cooling and inner surface quality [16, 17] of flow of the polymer when subjected to elevated water pressures [18, 19] or studies conducted about injection upon composites [20].

2 MOLD DEVELOPMENT AND CLUTCH PEDAL MANUFACTURING

It is well known that the mold industry devotes a large part of its production volume to the automotive industry, and one of the purposes of this work is to provide a deep understanding of injection technology assisted by water application in the production of castings of complex and variable geometry and of high functional and structural performance. For such an automobile, a clutch pedal was designed to demonstrate the usefulness of this technology in a real case. Figure 1a) illustrates the 3D Computer Aided Design (CAD) model of the pedal developed where the variable section can be observed. Figure 1b) corresponds to the pedal photorealism and shows the section that will be reinforced by a technical fabric with a high amount of pre-preg fiber and the two types of materials that characterize this particular component. These characteristics are a major challenge in designing the mold that will give rise to the pedal because using a single mold, it is necessary to integrate several injection techniques including the injection assisted by water, multimaterial injection (bi-injection) and injection of a technical fabric. The 3D CAD model of the mold designed to produce the clutch pedal and which contemplates injection assisted by water - variable hollow section - and bi-injection - multimaterial injection, is shown in figure 2. This figure illustrates

conveniently the complexity degree of the mold developed compared with a common mold associated with a single injection process. The material 1 is a polyamide (PA) 6.6 with 30% of glass fibers [21], the material 2 is the elastomer TPE TC8GPN B100 [22] and the technical fabric is the TISSU TPFL 520 g/m² [23] containing 65.6% of preimpregnated carbon fibers with 34.4% of PA12. The area where the technical fabric was placed was selected based on the results obtained from a previous study, using the the finite element method (FEM), which indicated what will be a critical area from a mechanical strength point of view.

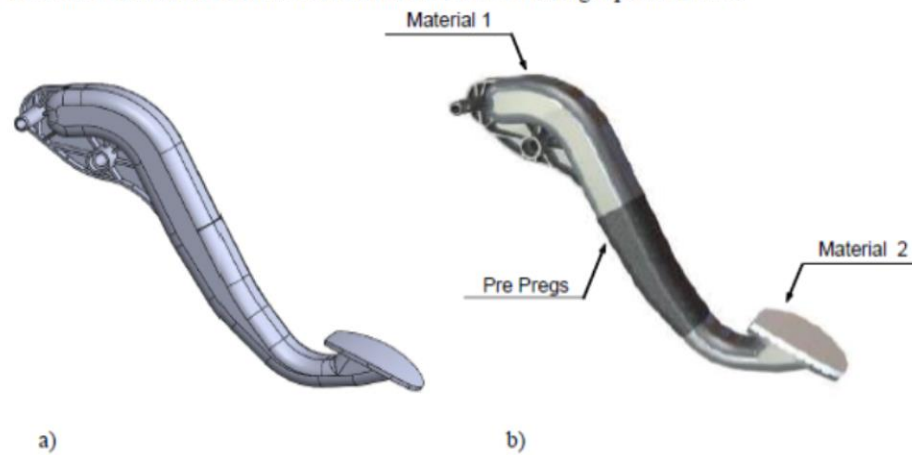


Figure 1: Clutch pedal modeling: a) 3D CAD model; b) Photorealism of component.

The injection process has the following sequence: the primary material is injected to fill the molding zone, and then a pressurized water jet will move inside creating a hollow section. Excess material is transported to the reservoir (1). Hence, when the water injection starts, the piston (2) opens allowing the flow of material to the reservoir. After complete injection of the primary material and with the cast area creation by the water jet, the injection of the second material starts. In this step, the mold opens and, with the aid of a rotating plate (or KO) [10, 24], the molding area rotates 180°, is closed again. In this rotation process the piece injected keeps in the fixed mold cavity. Then the injection of the second material follows. The geometry of this material is controlled by the dummy (3).

After the mold design, its programming Computer Aided Manufacturing (CAM), manufacturing and assembly followed. Figure 3 shows the parts fixed and mobile that composed the first version of the manufactured mold. As expected, and as a result of the preliminary tests carried out, the mold development went through an interactive process of corrections/adjustments/amendments of the molding zone and of the necessary elements for the proper functioning of the mold. Furthermore, it was necessary to resize the "material pouch", i.e. the cavity where the surplus material is housed, which was transported from the inside of the part by the water injection process. This cavity was enlarged, an output angle added and two extractors to ensure complete extraction of the part were included. To prevent reflux of polymer at the time of water injection, the opening and closing system was also redesigned.

After the implementation of the above modifications, the final version of the mold was

obtained. This version is shown in figure 4. The mold was then mounted on the injection machine (Euroinj D300), which is coupled to a water injection system (PMEfluidtec).

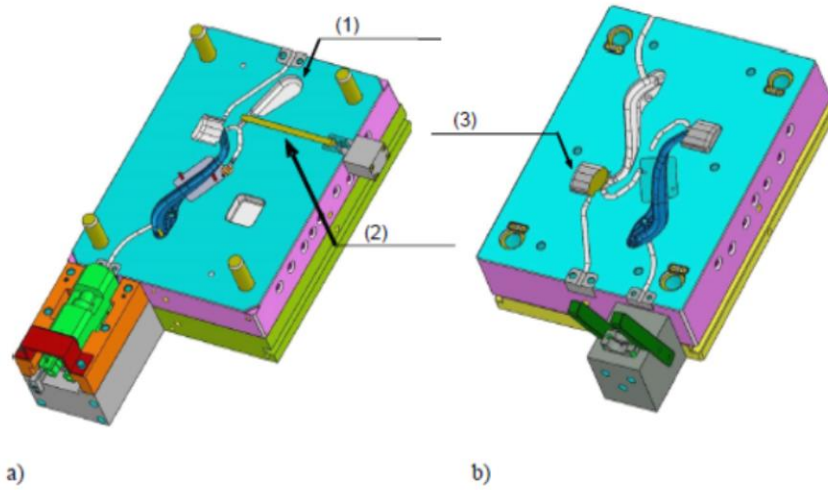


Figure 2: 3D CAD model of the mold to produce the clutch pedal: a) fixed part; b) mobile part.

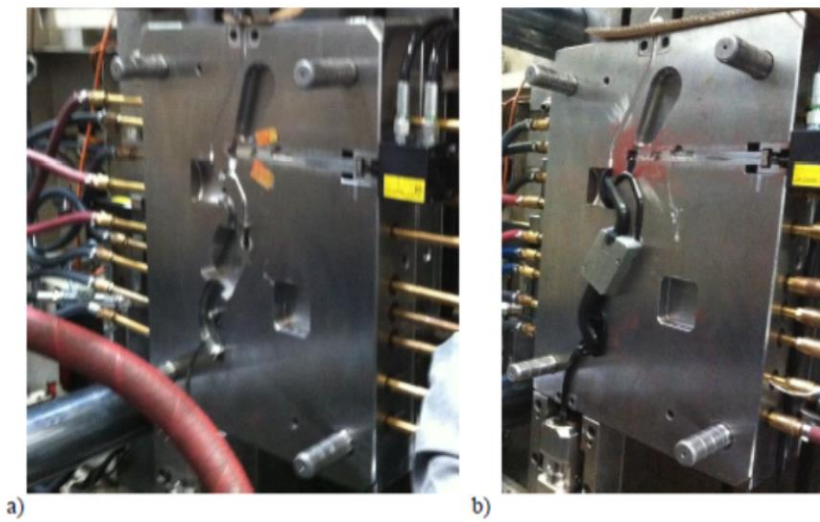


Figure 3: First version of the mold to produce the clutch pedal: a) fixed part; b) mobile part.

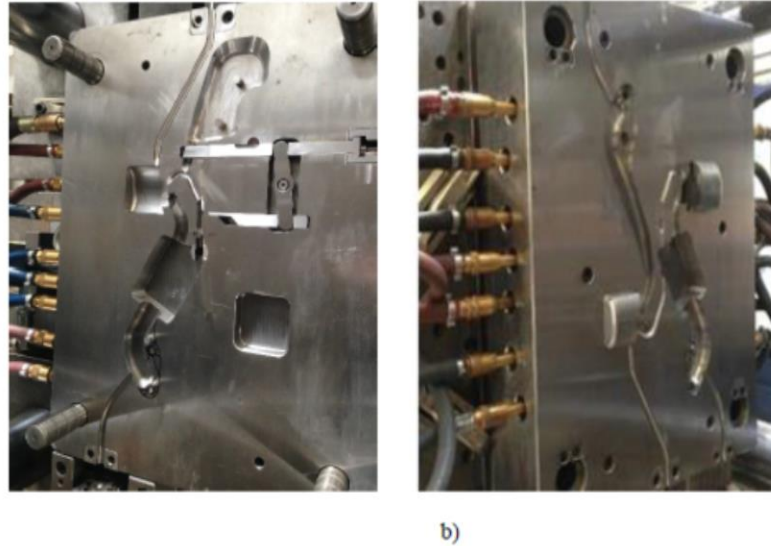


Figure 4: Final version of the mold to produce the clutch pedal: a) fixed part; b) mobile part.

As mentioned above, the production of a clutch pedal, the subject of this study, requires a combination of various techniques in the same injection mold since a component with a variable hollow section, with two-material and of high structural performance is desired. A PA 6.6 with 30% of glass fibers was selected as the main material for the clutch pedal, because this component will be undergo various stresses over several hours. The PA application is recommended in cases of parts subject to the dynamic friction under the influence of stresses which cause wear that happens in sliding guides, bearings, cams, electric motors, pumps, etc [21].

After injecting the variable hollow section of the clutch pedal produced by WAIM process, the mold opens, rotates 180°, recloses, and is then the elastomer TPE TC8GPN B100 is injected in the pedal front section. The elastomer will generate the necessary friction in contact with the user's foot. To allow for this bi-injection in a single mold, the pilot unit has two spindles, one horizontal and the other vertical. Figure 5a) shows the component produced still coupled to the fixed part of the mold. In addition the channels, the molding area of the workpiece and the "material pouch" completely filled can be observed.

The injection of technical fabrics is used in various industries and, of course, the automotive industry is one of them. This process has been primarily used in applications within the automobile. The fabric, having a significant thickness, implies some considerations in the mold construction, especially in joint areas, because the material gets stuck between these surfaces. The fabric on the injection process involves a few steps as: the previous fabric cutting with the desire configuration; the fixation of tissue on both sides of the mold (dummy) made by specific mechanisms to pierce the fabrics holding it, e.g. spikes; the injection molding on fabric itself, which should always be performed by a sequential valve system to ensure the quality of the final piece; and, after cooling the workpiece, it

proceeds to its extraction from the mold and the excess fabrics are cut. The excess tissue cut is usually carried out after the part extraction although solutions in which the fabric cutting is made inside the mold and the extracted piece is present in the final state already exist on the market [25].

The adhesion between the plastic and the tissue is promoted by the temperature at which the material is injected. A requirement of this technique is that the fabric supports the processing temperature of the injected polymer. Other considerations must be taken at the time of injection; speed and injection pressure are two intrinsic parameters and the control of one has significant implications on the other. The entry of the first material in the cavity must be made at low speeds so it does not move, bend or crease the fabric. However, this velocity should not be less than a threshold, because depending on material type for processing, below a certain speed the flow has much time to cool and its viscosity increases. To be injected, a more viscous material is necessary, and higher injection pressures are therefore needed, which can damage the fabric and the final piece look. Hence, it is necessary to test the parameters until reaching an ideal combination. Figure 5b) shows the fixing of technical fabric to the mobile part of the mold.

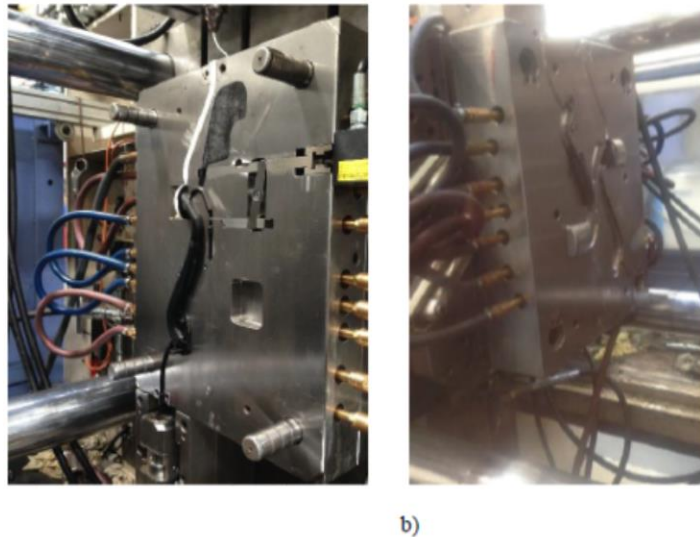


Figure 5: a) Mold fixed cavity after the injection molding process; b) Mold mobile cavity with the prepreg fixed by the dummy developed for the purpose.

Figure 6 illustrates some of the pieces produced by the combination of the three injection processes. As it was necessary to ensure a good injection of PA 6.6, injection of waterless parts for optimization of injection parameters were injected. After ensuring good quality in the injected parts, tests with water injection with and without the second material, and with and without injection of technical fabric were done. The final results, after the mold geometry and process parameters optimization as described above, are shown in figure 6. Figure 7a) shows the pedal produced by WAIM and multimaterial injection and figure 7b) the pedal

produced by the three injection processes combination: WAIM, IMM and injection upon pre pregs using a single mold.



Figure 6: Parts obtained by the several injection processes.



a)



b)

Figure 7: Clutch pedal produced by: a) WAIM + multimaterial injection; and b) WAIM + multimaterial injection + injection on pre-preg fabrics.

3 PRELIMINAR TESTS OF THE CLUTCH PEDAL MANUFACTURED

After pedal processing, some basic tests such as the comparison between the weight of a pedal with a bulk section, produced by a conventional injection process, and a pedal with a hollow section produced by WAIM, were performed. Figure 9 illustrates the pedal weighing procedure without and with a hollow section. The existence of a difference/saving of about 102 grams is observed between the workpieces. The pedal produced by WAIM is 37% lighter than that produced by the conventional process.

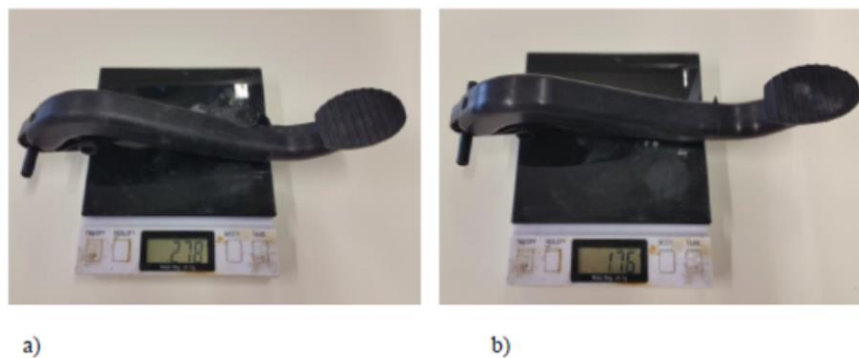


Figure 9: Pedal weight for a: or) bulk; and b) hollow section.

The possible dimensional deviations were evaluated by applying the concepts of reverse engineering to the pedal. The 3D scanning of the produced pedal was done and the corresponding 3D CAD model generated. This model is then dimensionally compared with the 3D CAD model that gave rise to the mold. Figure 10 shows the dimensional deviations obtained, which lie mostly between 0.1 and 0.4 mm. These deviations may be the result of contraction and warping phenomena resulting from the injection process. Deviations of greater emphasis stems from the poor quality of the acquired point cloud and the graphical quality of the digitization of its component products.

The structural performance of the clutch pedal produced by the combination between the processes WAIM with the multimaterial injection plus injection upon pre-preg fabrics was evaluated using the FEM, as well as the results compared with a conventional aluminum pedal. Figure 11 illustrates the stress distribution obtained for a conventional pedal and the pedal variable hollow section made of PA 6.6 with 30% glass fibers and reinforced with a pre-preg technical fabric that contains of carbon fibers impregnated with PA12. From figure 11 it can be concluded that the clutch pedal produced by molding has a strength equivalent to that presented by the pedal aluminum.

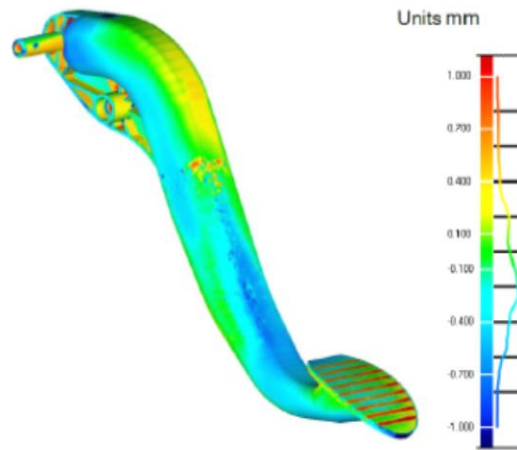


Figure 10: Dimensional deviations between the produced pedal and the 3D CAD model that gave rise to it.

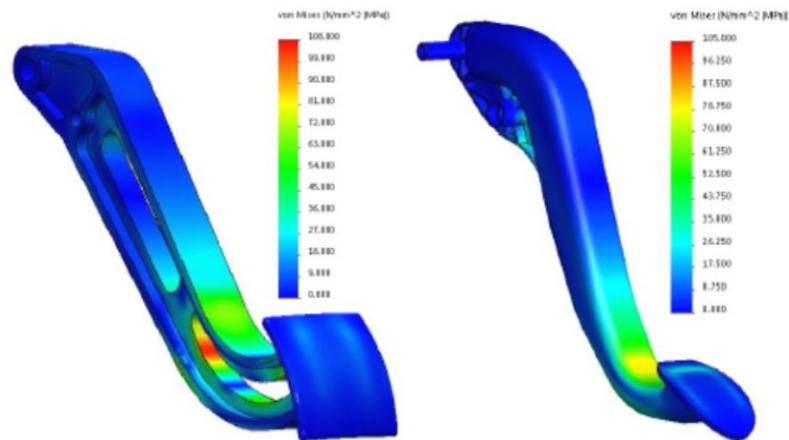


Figure 11: Stress field obtained for a) a conventional aluminum pedal; and b) a pedal produced by WAIM + multimaterial injection + injectionon pre-preg fabrics.

9 CONCLUSIONS

The possibility of molding by using technical fabric pre-impregnated with thermoplastic material combined with the multimaterial injection and with the injection assisted by water represent a set of immeasurable advantages in the production of parts with a hollow section,

constant or not, thin-walled and with high performance. In this study, through the development and production of a clutch pedal it was shown that it is possible to increase the tenacity of the produced components by controlling the material and geometry variables. The hollow section geometries having reduced weight exhibit high performance with regards to resistance to bending. In geometries with a hollow section submitted to flexion, the major stress of tension/compression is found at the outer zones of the section, i.e. at the points furthest from the neutral line. These outer zones are effectively the most requested zones and it is where its strengthening and increased mechanical strength is required. One way to do this is using prepreg fabric with thermoplastic. Depending on the prepreg fabric type, other additional properties can be promoted to the parts. The pipes with highly complex shape production for enhanced use of high pressure levels inside is a real need to which it is now possible to respond. The development of a molding process with higher productivity will become make the use of composite materials which will enhance the development of systems - vehicles and equipment - more evolved with lower mass and therefore with lower specific consumption more attractive.

REFERENCES

- [1] R.H. Todd, D.K. Allen, L. Alting. *Manufacturing Processes Reference Guide*. Industrial Press, Inc, 1994.
- [2] C. Hopmann, W. Michaeli, S. Becker. Analysis of Fluid-Assisted Injection Techniques by Use of Ultrasonic Measurements. *Plastics Engineering*, 10–14, 2012.
- [3] S.J. Liu, M.J. Lin, Y.C. Wu. An experimental study of the water-assisted injection molding of glass fiber filled poly-butylene-terephthalate (PBT) composites. *Composites Science and Technology*, 67(7-8), 1415–1424, 2007.
- [4] Akro-Plastic, 2016. Akro-Plastic draws level the playing field with low-cost carbon fiber compounds. *CPRJ International*. Available at: <http://www.adsalecprj.com> [Accessed April 5, 2016].
- [5] E. Mohrbach. Plastic shoe heels - with compressed gas blown into the centre of the plastic mould mass. DE 2106546, 1971.
- [6] A. Yasuike, et al. *Moulded hollow (foamed) plastic articles - by injecting molten resin into moulding cavity, and introducing filling of fluid medium*. DE 2461580, 1973.
- [7] S. Shah. Gas assisted injection molding: a technology overview. In *Journal of Injection Molding Technology*. United States: Soc of Plastics Engineers, Brookfield, CT, United States, 96–103, 1997.
- [8] M.A. Parvez et al. Gas-assisted injection molding: The effects of process variables and gas channel geometry. *Journal of Materials Processing Technology*, 121 (1), 27–35, 2002.
- [9] M. Knights. Water injection molding it's all coming together. In *Plastics Technology*, 54–61, 2005.
- [10] V. Goodship, ed. *Practical guide to injection moulding*, Shawbury, UK: Rapra Technology, 2004.
- [11] R. Protte, K. Konejung. Water increases productivity. *Kunststoffe, Plast Europe*, 93(2), 25–28, 2003.
- [12] R. Fleack, 2007. Water-Assist Injection Molding (WAIM). *PROSPECTOR*. Available at: <http://knowledge.ulprospector.com/1517/pe-water-assist-injection-molding/> [Accessed

- December 10, 2015].
- [13] W. Michaeli, T. Jüntgen, A. Brunswick, WIT - En route to series production: First industrial application of the water injection technique. In *Kunststoffe Plast Europe*, 37–39, 2001.
 - [14] Covestro, 2015. Gas and water-assist injection (GIT and WIT). *Specialty injection molding methods for high-quality and competitive products*. Available at: <http://www.plastics.covestro.com/Engineering/Processing/Injection-molding/Gas-water-assist-molding.aspx> [Accessed December 13, 2015].
 - [15] N. Volle, M. Vincent, *Experimental study of water assisted injection molding*. Conf. of Polymer Processing, Goa, 2009.
 - [16] J.G. Yang, X.H. Zhou, Q. Niu, Model and simulation of water penetration in water-assisted injection molding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(1-4), 367–375, 2013.
 - [17] H. Park, B. Cha, B. Rhee, Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Process Conditions on Residual Wall Thickness and Cooling and Surface Characteristics of Water-Assisted Injection Molded Hollow Products. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015.
 - [18] A.Z.I.A. Ahmadzai, A.H. Behraves. Effect of processing parameters on water penetration in water assisted injection molding of ABS. *Polimery*, 232–239, 2011.
 - [19] K.-Y. Lin, S.-J. Liu. The influence of processing parameters on fingering formation in fluid-assisted injection-molded disks. *Polymer Engineering & Science*, 49 (11), 2257–2263, 2009.
 - [20] S.-J. Liu, Y.-C. Wu Dynamic visualization of cavity-filling process in fluid-assisted injection molding-gas versus water. *Polymer Testing*, 26(2), 232–242, 2007.
 - [21] M. Ashby, K. Jonhson *Materials and Design The art and science of materials selection in product design*, Massachusetts: Elsevier, 2002.
 - [22] TPE-KRAIBURG, 2016. Custom-engineered TPE and more. Available at: <http://www.kraiburg-tpe.com/pt> [Accessed January 4, 2016].
 - [23] Shappe, 2012. Custom-engineered TPE and more. Available at: <http://www.schappe.com/> [Accessed January 4, 2016].
 - [24] Centimfe. *Manual do projetista para moldes de injeção de plásticos*, 2003.
 - [25] M.R. Kamal, A. Isayev, S.-J. Liu. *Injection Molding*, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG , 2009.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco