



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Marcelo da Silva Dias

**Estudo e otimização do processo de
injeção de plásticos com controlo
dinâmico de temperatura**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor Ricardo João Ferreira Simões

Professor Doutor António Manuel Brito

Outubro de 2018

DECLARAÇÃO

Nome: Marcelo da Silva Dias

Endereço eletrónico: a68583@alunos.uminho.pt Telefone: 93 74 24 555

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 14518647

Título da dissertação: Estudo e otimização do processo de injeção de plásticos com controlo dinâmico de temperatura

Orientadores:

Professor Doutor Ricardo João Ferreira Simões

Professor Doutor António Manuel Brito

Ano de conclusão: 2018

Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA TESE/TRABALHO.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Depois de terminada mais uma grande etapa da minha vida académica, é hora de realçar todos aqueles que deram o seu contributo (direto ou indiretamente) de forma a concluir esta fase com o maior sucesso possível.

Como não podia deixar de ser, o meu primeiro grande agradecimento, vai para a minha família, porque proporcionou-me esta possibilidade de ter uma formação académica com a qual espero singrar no mercado de trabalho. É minha vontade deixar um agradecimento muito especial aos meus amigos pois o seu apoio incondicional foi uma das chaves para o meu sucesso ao longo destes cinco anos.

Aos meus orientadores, Doutor António Brito e Doutor Ricardo Simões, o meu mais sincero agradecimento, pelo seu apoio e por toda a orientação e disponibilidade demonstrada ao longo de toda a dissertação.

Agradeço a toda a equipa de investigadores, do IPCA que partilhou comigo este primeiro ano de ingresso na investigação, em particular ao Engenheiro Luís Correia pelo acompanhamento na execução dos trabalhos executados e pela partilha da experiência nesta área de investigação.

Agradeço ao Centro Ciência Viva, de Guimarães, e a toda a sua equipa, pela disponibilização do equipamento e espaço necessários para executar o plano de trabalhos e em particular ao seu Coordenador Técnico Engenheiro Paulo Pereira pela disponibilidade e acompanhamento prestados ao longo do trabalho realizado.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia de Polímeros, o meu obrigado pelo acompanhamento quase permanente e pelos conselhos sustentados nas suas experiências.

E, por fim, quero agradecer a todos que fizeram com que fosse possível atingir este patamar.

RESUMO

As peças plásticas produzidas pela técnica de moldação convencional (CIM) podem apresentar vários defeitos, como linhas de soldadura, empeno, etc..., provocados pelo arrefecimento abrupto do fundido aquando da sua injeção no molde a temperaturas relativamente baixas. A indústria de injeção de plásticos tem como objetivo produzir o maior número de peças no menor tempo possível e é por essa razão que se impõem temperaturas do molde baixas que garantem ciclos de injeção reduzidos.

A técnica RHCM (*Rapid Heat Cycle Molding*), com diferentes variantes, aquece e arrefece a superfície do molde melhorando a qualidade da peça e evitando o aumento do tempo de ciclo de injeção. O aquecimento e arrefecimento somente da superfície do molde utilizando uma estratégia de controlo dinâmico de temperatura da superfície do molde, síncrono com o ciclo de injeção, é uma característica da técnica DMTC (*Dynamic Mold surface Temperature Control*), utilizada neste estudo. Realizou-se o aquecimento da superfície do molde por radiação infravermelho através de lâmpadas de halogéneo e arrefeceu-se circulando-se água por canais maquinados no molde. Pretende-se melhorar as propriedades mecânicas da moldação impondo-se temperaturas da superfície do molde elevadas utilizando o método de aquecimento anteriormente descrito.

Desenvolveu-se um molde para a produção de provetes de tração com ataques localizados em locais distintos, no centro ou no extremo da moldação, que conseqüentemente impõem orientações de fluxo diferentes durante o enchimento da peça permitindo estudar os seus efeitos nas propriedades da moldação.

Os provetes de termoplásticos semicristalinos, foram produzidos sob diferentes condições variando-se a temperatura de injeção e a temperatura do molde; parâmetros de processamento que permitem controlar de forma indireta as propriedades mecânicas das moldações.

As propriedades mecânicas da moldação obtidas pelas diferentes condições impostas durante o processamento foram avaliadas pelo ensaio de resistência à tração e sustentadas por ensaios à morfologia da peça. A estrutura interna da moldação será observada quanto ao grau de

cristalinidade e espessura da casca propriedades intrinsecamente correlacionadas com o comportamento mecânico descrito pela peça moldada.

Realizou-se ensaios óticos (microscopia de luz polarizada), mecânicos (testes de tração) e térmicos (DSC) de modo a quantificar os efeitos observados nas propriedades dos provetes produzidos.

Palavras-Chave: RHCM, DMTC, radiação infravermelho, superfície do molde, efeitos de processamento.

ABSTRACT

The plastic parts produced by the conventional molding technique (CIM) have various defects, welding lines, warpage, etc ... caused by the abrupt cooling of the melt when injected into the mold at relatively low temperatures. The plastics injection industry aims to produce the largest number of parts in the shortest possible time and it is for this reason that low mold temperatures are imposed that guarantee reduced injection cycles.

The Rapid Heat Cycle Molding (RHCM) technique, with different variants, heats and cools the surface of the mold, improving the quality of the part and avoiding an increase in the injection cycle time. Heating and cooling the mold surface using a dynamic mold temperature control strategy synchronized with the injection cycle is a feature of the DMTC technique (Dynamic Mold Surface Temperature Control), used in this study. The surface of the mold was heated by infrared radiation through halogen lamps and cooled by circulating water through channels machined in the mold. It is intended to improve the mechanical properties of the molding by imposing elevated mold surface temperatures using the above described heating method.

A mold to produce traction test specimens has been developed with localized gates at different locations at the center or end of the molding, which consequently impose different flow orientations during filling of the part to study its effects on the properties of the molding.

The semi-crystalline thermoplastic test pieces were produced under different conditions by varying the injection temperature and mold temperature; processing parameters that allow indirect control of the mechanical properties of the moldings.

The mechanical properties of the molding obtained by the different conditions imposed during the processing were evaluated by the test of tensile strength and supported by tests on the morphology of the part. The internal structure of the casting will be observed as to the degree of crystallinity and thickness of the shell properties intrinsically correlated with the mechanical behavior described by the molded part.

Optical (polarized light microscopy), mechanical (tensile tests) and thermal (DSC) tests were performed to quantify the observed effects on the properties of the produced samples.

Key words: RHCM, DMTC, infrared radiation, mold surface, processing effects.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas.....	xv
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Estrutura do documento	2
2 Estado da arte	5
2.1 Injeção de plásticos	5
2.2 Princípios método CIM	6
2.3 Princípios das tecnologias RHCM	7
2.4 Tecnologias de aquecimento da superfície do molde.....	9
2.4.1 Aquecimento do molde por convecção	9
2.4.2 Aquecimento do molde por radiação	11
2.4.3 Aquecimento por condução.....	15
2.4.4 Comparação entre as várias técnicas de aquecimento.....	20
2.5 Fluxo no molde.....	21
2.5.1 Camada Solidificada e Orientação	22
2.5.2 Cristalização	24
2.5.3 Influência da microestrutura nas propriedades da peça	26
3 Desenvolvimento do projeto	29
3.1 Estudo laboratorial preliminar com sistemas de controlo dinâmico de temperatura	29
3.2 Definição do sistema de controlo dinâmico de temperatura	31
3.3 Materiais e Equipamentos utilizados.....	32
3.3.1 Injetora e termostato.....	33
3.3.2 Peça em estudo	33
3.3.3 Molde	34
3.3.4 Manipulador pneumático.....	37
3.4 Construção do sistema RHCM.....	38
3.4.1 Lâmpadas de Halogéneo	39

3.4.2	Suporte das lâmpadas	39
3.4.3	Sistema elétrico	40
3.4.4	Sistema de monitorização da temperatura.....	42
3.5	Montagem e funcionamento do sistema RHCM	48
3.6	Material	52
3.6.1	Polipropileno, PP.....	52
3.7	Injeção de peças plásticas.....	52
3.8	Caraterização das moldações	54
3.8.1	Caracterização morfológica.....	54
3.8.2	Caraterização mecânica.....	58
4	Análise de resultados e discussão	61
4.1	Propriedades mecânicas	61
4.1.1	Influência da temperatura de injeção	61
4.1.2	Influência da localização do ataque	63
4.2	Grau de cristalinidade.....	65
4.3	Espessura da casca	66
4.3.1	Influência da temperatura de injeção	66
4.3.2	Influência da localização do ataque	67
5	Conclusões	71
5.1	Trabalhos Futuros.....	72
	Bibliografia.....	73
	Anexos.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Máquina de moldação de plástico por injeção .	5
Figura 2 - Ciclo do processo de injeção de plásticos .	6
Figura 3 - Esquema das mudanças de temperatura do molde durante os processos 1-RHCM e 2-CIM de um polímero amorfo.	8
Figura 4 - Molde com canais para fluido circulante.....	10
Figura 5 - Vários desenhos de canais incluindo (a) forma de leque (b) forma de tubo.	11
Figura 6 - Aquecimento externo do molde através de uma fonte de calor infravermelha .	12
Figura 7 - Princípio de aquecimento da superfície do molde por efeito de proximidade .	13
Figura 8 - Esquema de aquecimento por indução externa e interna. Esquerda: sistema externo para aquecimento por indução; direita: integração de um indutor num inserto do molde .	14
Figura 9 - Aquecimento resistivo elétrico com corrente elétrica de baixa frequência. LF indica baixa frequência.	18
Figura 10 - Aquecimento (a) ou arrefecimento (b) através do efeito Peltier.	19
Figura 11 - Perfil de velocidades na secção transversal.	21
Figura 12 - Formação da camada solidificada com o avanço da frente de fluxo em tempos sucessivos.	22
Figura 13 – Dependência da espessura da camada solidificada no comprimento de fluxo e com a pressão de retenção.	23
Figura 14 – Dependência da espessura da camada solidificada com a temperatura do fundido	23
Figura 15 – Orientação molecular na secção transversal ao longo do comprimento de fluxo	24
Figura 16 - Grau de cristalinidade em função da temperatura da parede e do fundido .	25
Figura 17 -Efeito dos parâmetros de produção nos parâmetros de processamento e propriedades da moldação.	26
Figura 18 - Efeito da orientação na tensão de rotura (à esquerda) e de cedência (à direita)...	27
Figura 19 - Equipamento de injeção de bancada Clarke 25.	29
Figura 20 - Novo molde projetado no Software SolidWorks.....	30
Figura 21 - Esquema ilustrativo da montagem do sistema RHCM de aquecimento por radiação IV.	31

Figura 22 - Injetora Dr.Boy 22M (esquerda), termorregulador Conair Churchill TC90-9 (direita).....	33
Figura 23 - Desenho do sistema de alimentação de cada par de provetes de impacto (esquerda) e de tração (direita) e respectivas dimensões dos provetes.....	34
Figura 24 – Desenho 3D em SolidWorks do molde.....	35
Figura 25 - Molde (esquerda) e placa da cavidade (direita).....	35
Figura 26 - Desenho 3D do molde e dimensões, (1) altura do molde, (2) largura do molde e (3) largura placa da cavidade.	36
Figura 27 - Desenho 2D da parte móvel do molde (vista de frente) e pontos de leitura da temperatura (pontos vermelhos).....	37
Figura 28 - Manipulador pneumático de três eixos e respectivos comando de controlo dos movimentos.	38
Figura 29 – Desenho CAD do suporte de lâmpadas e molde projetados.	39
Figura 30 - Lâmpada de halogéneo para emissão de radiação IV.....	39
Figura 31 - Desenho 3D em SolidWorks do suporte de lâmpadas e respectivas dimensões exteriores.	40
Figura 32 - Cabo de secção de 1,5 mm ² sem cobre e revestido com fibra de vidro/silicone (1), bornes cerâmicos (2), lã cerâmica (3) e ponteiros integralmente metálicas (4).	41
Figura 33 - Desenhos do sistema elétrico das ligações com 2 lâmpadas.	42
Figura 34 - Tecnologias de medição de temperatura: (a) câmara termográfica, (b) termómetro de laser, (c) termómetro de contacto e (d) sistema de aquisição de dados de temperatura do termopar.	43
Figura 35 - Variação dos valores da temperatura da superfície do molde alterando o ângulo de medição.	43
Figura 36 - Variação dos valores da temperatura da superfície do molde com a presença e ausência das lâmpadas de halogéneo.	44
Figura 37- Medição da temperatura à superfície do molde com o uso do termómetro de contacto.	45
Figura 38 -Sistema de aquisição de dados de temperatura Priamus para leitura dos termopares.	45
Figura 39 - Variação da temperatura do molde registada pelos termopares ao longo do tempo. Molde aquecido por termorregulador a 80°C.....	46
Figura 40 - Variação da temperatura do molde registada pelos termopares ao longo do tempo. Molde aquecido por lâmpadas de halogéneo.	47

Figura 41 – Termopar da posição um colocado no exterior do molde paralelamente ao suporte de lâmpadas.	47
Figura 42 - Gráfico de variação da temperatura do molde registada pelos termopares ao longo do tempo. Molde aquecido por lâmpadas de halogéneo utilizando termopar norte no exterior.	48
Figura 43 - Equipamento de controlo necessário para o funcionamento do sistema RHCM: (1) Interface injetora, (2) Sistema Priamus, (3) Suporte de lâmpadas, (4) Controlador manipulador pneumático, (5) Termorregulador	49
Figura 44 - Representação dos 3 eixos do manipulador pneumático.	49
Figura 45 - Ciclo de injeção do método CIM (à esquerda) e RHCM (à direita).....	50
Figura 46 - Sequência do processo de aquecimento: abertura do molde (à esquerda), descida do sistema de aquecimento (ao centro), por fim subida do sistema e fecho do molde (à direita).	51
Figura 47 - Provetes de impacto (esquerda) e de tração (direita) injetados.	53
Figura 48 - Defeito de vazios verificado nos provetes de impacto injetados.....	53
Figura 49 - Micrótopo Leitz 1401 (à esquerda) e Microscópio de Transmissão Olympus (à direita).	55
Figura 50 - Medição da espessura da casca através do ensaio de microscopia de luz polarizada.	55
Figura 51 - Representação pela linha a tracejado do corte efetuado no provete de tração para obtenção da amostra.	56
Figura 52 - Preparação da amostra. Corte da amostra entre a zona intermédia dos dois ataques.	57
Figura 53 - Curva do comportamento térmico do polipropileno.	57
Figura 54 -Equipamento utilizado: (a) Balança, Perkin-Elmer, AD-4 Autobalance, (b) Prensa de cadinho, Netzsch e (c) DSC, Netzsch 200 F3 Maia.	57
Figura 55 - Máquina de tração Zwick/Roell Z005.....	58
Figura 56 - Gráfico do comportamento mecânico de um polímero, (1) zona aproximada da determinação do módulo de elasticidade, (2) tensão de cedência, (3) tensão de rotura.....	58
Figura 57 – Tensão e deformação de cedência dos provetes injetados no extremo, à esquerda e direita, respetivamente.	62
Figura 58 - Tensão e deformação de cedência dos provetes injetados no meio, à esquerda e direita, respetivamente.	63

Figura 59 - Tensão e deformação de cedência dos provetes injetados a 200°C, à esquerda e direita, respetivamente.	64
Figura 60 - Tensão e deformação de cedência dos provetes injetados a 230°C, à esquerda e direita, respetivamente.	65
Figura 61 – Variação do grau de cristalinidade com a temperatura de injeção.....	66
Figura 62 – Espessura da casca de provetes injetados no extremo e no meio, à esquerda e à direita respetivamente.	66
Figura 63 - Gráficos da espessura da casca de provetes injetados a 200 e 230°C, à esquerda e à direita respetivamente.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de Diferentes Métodos de Aquecimento Rápido do Molde Baseado no Tipo de Transferência de Calor.....	20
Tabela 2 - Plano de injeções para sistema RHCM protótipo.....	30
Tabela 3 - Especificações da injetora Boy 22M.....	36
Tabela 4 - Temperaturas de injeção e da superfície do molde.....	50
Tabela 5- Características do homopolímero SABIC® PP 579S.....	52
Tabela 6 - Plano de injeções dos provetes de tração e condições de processamento.....	54

1 INTRODUÇÃO

A moldação por injeção é um dos processos de produção de peças plásticas mais utilizados nos dias de hoje devido aos rácios elevados de produção, ser altamente reprodutível, produzir peças com tolerâncias dimensionais apertadas e ter um baixo custo laboral [1] [2].

Na moldação por injeção tradicional a etapa de arrefecimento ocupa dois terços do tempo de ciclo de injeção sendo usual impor-se temperaturas do molde baixas de modo a reduzir o tempo de ciclo e custos de operação [3] [4]. O arrefecimento brusco do material injetado quando entra em contacto com a cavidade do molde provoca defeitos na moldação tais como linhas de soldadura, marcas de fluxo, tensões residuais, empenos, etc., tem também como consequência a necessidade de aplicar-se pressões elevadas tornando muito difícil a injeção de peças de paredes finas [4]. A solução mais barata seria aumentar a temperatura do molde passando um fluído aquecido, acima da temperatura de amolecimento do material, evitando o arrefecimento brusco e os defeitos associados. O problema é que o tempo necessário para aquecer e posteriormente arrefecer a moldação é muito extenso tornando esta alternativa pouco viável.

Recentemente tem-se verificado a necessidade de produzir peças cada vez mais finas, mais leves e ao mesmo tempo com melhores propriedades mecânicas [5]. Consequentemente a indústria tem vindo a explorar novas tecnologias que dêem resposta aos problemas suprarreferidos e simultaneamente permitam manter os tempos de ciclo do processo reduzidos. A alternativa encontrada é a técnica de moldação Rapid Heat Cycle Molding (RHCM). Em contraste com a técnica CIM, em que a temperatura do molde é constante e o controlo da temperatura do molde é realizado pela circulação de um fluído por canais de arrefecimento; nesta nova técnica a temperatura do molde é controlada por um sistema de controlo dinâmico de aquecimento e arrefecimento da temperatura da superfície do molde Dynamic Mold surface Temperature Control (DMTC). É possível assim obter peças com elevada qualidade superficial, sem linhas de soldadura, linhas de fluxo, etc. defeitos inerentes ao processo de moldação por injeção tradicional (CIM).

Há muitas variantes da tecnologia RHCM, neste projeto utilizou-se lâmpadas de halogéneo para aquecer a superfície do molde e circulou-se água por canais maquinados no molde para o arrefecer. Estes dois métodos de transferência de calor são controlados pelo utilizador, com o auxílio de um sistema de aquisição de dados de temperatura que regista e fornece os valores de temperatura da superfície do molde.

1.1 Objetivos

O que se pretende com este trabalho de dissertação é obter moldações com melhores propriedades mecânicas através da elevação da temperatura da superfície do molde. A utilização da técnica RHCM de lâmpadas de halogéneo integradas num sistema de moldação por injeção tradicional foi o método selecionado que permite aquecer a superfície do molde à temperatura requerida. A integração do sistema bem como o seu funcionamento também será avaliada neste trabalho.

As realizações de ensaios permitiram avaliar o impacto das condições de processamento nas propriedades finais da moldação e são um dos objetivos deste estudo. O estudo da influência da localização do ataque na moldação é um fator do processo de fluxo durante a injeção da peça que também será estudado devido às diferentes orientações que poderá induzir e consequentemente afetar as propriedades mecânicas da moldação. As temperaturas de injeção e da superfície do molde e sua influência nas propriedades mecânicas das peças moldadas também são objeto de análise.

1.2 Estrutura do documento

De modo a cumprir os objetivos propostos, a tese está organizada em 5 capítulos:

- Capítulo 1: Introdução: Neste capítulo, será feita uma introdução relativa ao tema abordado neste trabalho para além de que é apresentada a técnica utilizada, o sistema Rapid Heat Cycle Molding.

- Capítulo 2 – Estado da Arte: Serão referidos alguns estudos realizados na área em estudo, assim como algumas informações sobre a relação entre as condições de processamento da injeção e as propriedades das moldações obtidas.
- Capítulo 3 - Desenvolvimento da tecnologia RHCM: Neste capítulo, falar-se-á da seleção dos materiais necessários para a construção do sistema e sua montagem. Descreve-se os equipamentos utilizados ao longo da parte experimental, a metodologia utilizada para o funcionamento do sistema RHCM, plano de trabalhos para o sistema e para a injeção de peças e, por fim, o procedimento dos ensaios de caracterização realizados.
- Capítulo 4 - Discussão dos resultados: Serão abordados os resultados obtidos bem como a discussão desses resultados dos ensaios de caracterização mecânica e morfológica. Discutir-se-á as várias condições estudadas, fazendo-se um relacionamento entre parâmetros do processo e propriedades mecânicas e morfológicas.
- Capítulo 5 – Conclusão e Trabalhos futuros: Serão apresentadas as conclusões obtidas com a realização do projeto, assim como uma série de propostas para a continuidade dos estudos realizados.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Injeção de plásticos

O processo de moldação por injeção é um processo de transformação de plásticos responsável por cerca de um terço dos produtos plásticos produzidos, sendo que 70% é transformado por extrusão ou processos derivados. Objetos de uso corrente e peças técnicas são exemplos de produtos plásticos obtidos pelo processo de injeção.

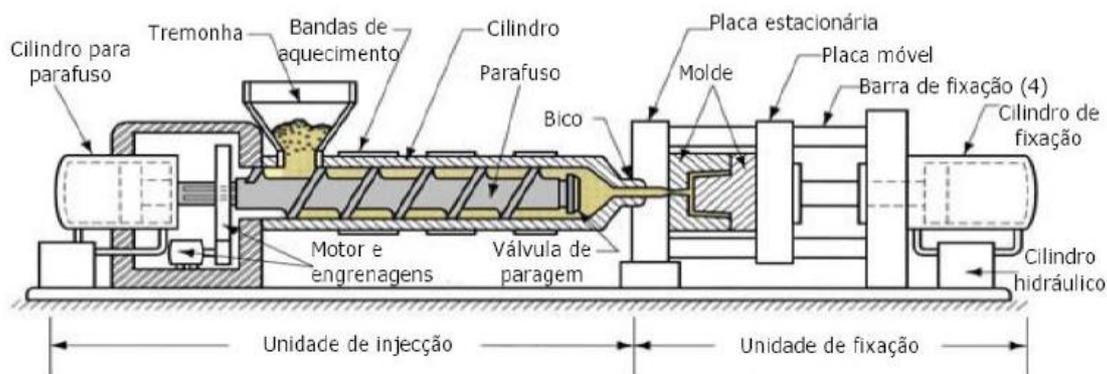


Figura 1- Máquina de moldação de plástico por injeção [6].

A projeção da indústria de moldação por injeção deu-se em 1868, quando John Wesley Hyatt venceu um concurso para encontrar um substituto do marfim para as bolas de bilhar. A primeira máquina de injeção foi patenteada em setembro de 1872 por I.S. e J.W. Hyatt, tendo sido registada em Nova York com o título de “Processos e equipamento para a manufatura de piroxilina”. Com o advento da 2ª Guerra Mundial, a indústria de moldação por injeção de plástico expandiu devido à necessidade de produtos baratos e em massa. Em 1946, John Hendry recebeu uma patente para a sua máquina de moldação por injeção tipo parafuso, revolucionando a indústria. Esta tecnologia permitiu alcançar ciclos mais rápidos, calor uniformemente distribuído e custos energéticos mais baixos, fornecendo um material homogeneamente fundido [7] [8].

O processo de moldação por injeção tem quatro etapas principais; plasticização, injeção, compactação e arrefecimento. Na etapa de plasticização, os grânulos de matéria-prima plástica são retirados da tremonha e derretidos por ação de um parafuso e através do cilindro aquecido. Depois de bastante fundido acumular-se no bico, o parafuso injeta o fundido no molde fechado

por movimento horizontal (etapa de injeção). Logo após a injeção, inicia-se a etapa de compactação que aplica pressão para compensar a contração térmica.

Para remover a peça do molde, o material fundido precisa solidificar, pelo que necessitará de ser arrefecido. Na última etapa, o molde é aberto e o produto solidificado é ejetado por mecanismos de ejeção. Uma máquina de injeção de plástico é mostrada na Figura 1 e o ciclo de processo é mostrado na Figura 2. As etapas do ciclo são controladas pelos parâmetros da máquina que podem ser agrupados em quatro áreas principais: pressão, temperatura, distância e tempo. A pressão de injeção, compactação, contrapressão; a temperatura do molde, bico, cilindro; a distância de injeção, ejeção e por último o tempo de injeção, arrefecimento, compactação são alguns dos parâmetros mais importantes. Em aplicações reais, a pressão e a temperatura são os principais para lidar com ajustes necessários [9].

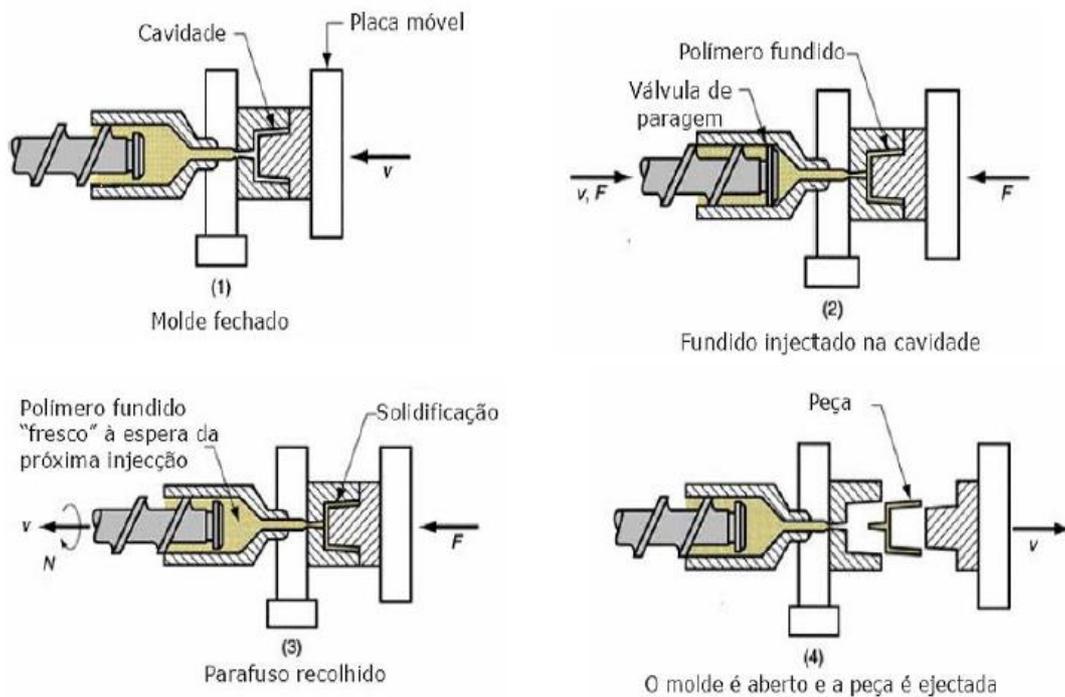


Figura 2 - Ciclo do processo de injeção de plásticos [6].

2.2 Princípios método CIM

Na moldação por injeção convencional (Conventional Injection Molding, CIM) a temperatura imposta ao molde é constante durante todo o ciclo de moldação. O controlo da temperatura constante do molde é efetuado através da passagem de um fluido refrigerante pelos canais de arrefecimento do molde durante todo o ciclo de moldação. Assim, a fim de alcançar alta

produtividade e baixos custos operacionais, define-se uma temperatura do fluido refrigerante normalmente muito baixa de modo a arrefecer rapidamente o polímero fundido e, assim, encurtar o tempo de ciclo. No entanto, a temperatura fria do molde faz com que o polímero fundido que entra nas cavidades quentes solidifique mais cedo na fase de enchimento. A camada de material solidificado nas superfícies da cavidade diminuirá a capacidade do polímero fundido em preencher o molde e, aumentará a resistência ao fluxo. Muitos estudos mostraram que a camada solidificada prematuramente é a principal causa de muitos problemas nas peças injetadas por CIM. Defeitos superficiais como; grande tensão residual e deformações; baixa resistência mecânica, além de dificultar a injeção de peça finas e de dimensão microscópica. Uma maneira eficaz de resolver esses problemas é elevar a temperatura do molde durante a etapa de enchimento e compactação. No entanto, a temperatura elevada do molde irá prolongar a fase de arrefecimento e, conseqüentemente, diminuir a produtividade. Portanto, há um paradoxo entre produtividade e qualidade, quanto à elevação da temperatura do molde para o CIM.

2.3 Princípios das tecnologias RHCM

Nos últimos anos, a procura por produtos com melhor desempenho mecânico e muito mais finos, mais leves, com maior precisão e boa estética tem vindo a aumentar continuamente com o rápido crescimento da indústria automóvel e de dispositivos eletrónicos. Há grandes desafios e dificuldades para produzir tais peças com o CIM, devido aos seus problemas inerentes resultantes da estratégia de controlo de temperatura constante do molde. Por esta razão, é proposta uma nova tecnologia de moldação por injeção, a chamada Rapid Heat Cycle Molding (RHCM) [4].

Na moldação por injeção de RHCM, a temperatura do molde é mutável e é adotada uma estratégia de controlo dinâmico de temperatura do molde (DMTC). De acordo com a temperatura do molde, o processo de moldação por injeção de RHCM pode ser dividido em etapas de aquecimento, manutenção de temperatura alta, arrefecimento, manutenção de temperatura baixa. Um gráfico de registos da temperatura do molde para moldação por injeção convencional e moldação por injeção RHCM de todo um ciclo de injeção é mostrado na Figura 3.

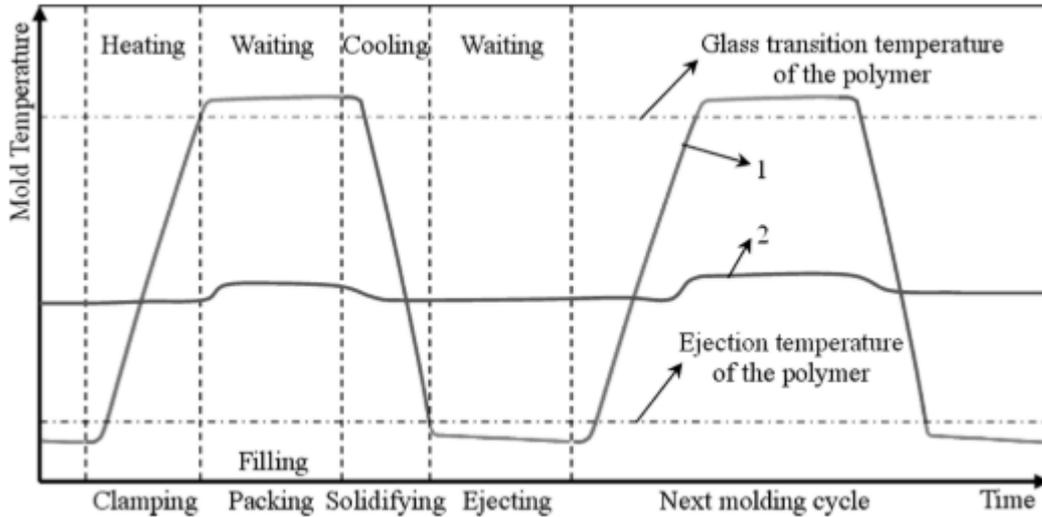


Figura 3 - Esquema das mudanças de temperatura do molde durante os processos 1-RHCM e 2-CIM de um polímero amorfo [4].

No processo de moldação por injeção de RHCM, o molde é aquecido até a temperatura de não-fluxo do polímero antes do fundido preencher a cavidade do molde. Durante a fase de enchimento e compactação, a temperatura do molde deve ser sempre maior do que a de não-fluxo para evitar a formação da camada solidificada perto da parede da cavidade e melhorar a capacidade de fluxo do polímero fundido. No final da etapa de compactação, o molde é arrefecido rapidamente para solidificar o polímero fundido até à temperatura de ejeção para remoção da peça. Posteriormente o molde será aquecido novamente para iniciar o próximo ciclo de injeção. Na moldação por injeção RHCM, as taxas de aquecimento e arrefecimento são dois fatores cruciais que afetam bastante o tempo do ciclo de moldação ou a eficiência da moldação por injeção. Portanto, um sistema de controlo de temperatura de molde altamente eficaz é muito importante para esta nova tecnologia de moldação [10].

Embora a maioria das investigações sobre aquecimento rápido e arrefecimento de moldes tenha surgido depois de 1990, alguns empreendimentos anteriores datam do início da década de 1960. Naquela época, Johnson revelou que os moldes aquecidos permitiam que as orientações moleculares induzidas pelo fluxo relaxassem quando a cavidade do molde fosse preenchida. Este estudo muito inicial demonstrou a capacidade de melhorar a qualidade da peça, mas também que era um processo impraticável, consequência do aquecimento e arrefecimento demorados do molde. O número de estudos sobre aquecimento e arrefecimento rápidos de moldes aumentou drasticamente nos últimos anos, especialmente após a década de 1990 [11] [12].

2.4 Tecnologias de aquecimento da superfície do molde

No processo RHCM, a temperatura da superfície do molde deve ser superior à temperatura de não-fluxo do polímero durante a injeção e, em seguida, arrefecida rapidamente para abaixo da temperatura de deflexão térmica para moldação por injeção. O método de aquecimento usado num sistema RHCM depende das exigências específicas do processo de moldação por injeção. Os métodos de aquecimento do molde irão ser classificados de acordo com o tipo de transferência de calor: convecção, radiação e condução.

2.4.1 Aquecimento do molde por convecção

Existem duas formas de aquecimento do molde por convecção, aquecimento interno e externo da superfície da cavidade. O meio convectivo (por exemplo, gás ou líquido aquecido) impõe um fluxo de calor convectivo na interface fluido-sólido. O fluido aquecido pode ser circulado dentro de canais maquinados no molde ou diretamente introduzido na superfície do molde a partir da cavidade.

Aquecimento interno

O método de aquecimento convectivo interno tem sido amplamente utilizado na indústria tradicional de moldação por injeção para controlo da temperatura constante do molde. Alguns esforços anteriores no aquecimento rápido do molde foram baseados neste método. No aquecimento convectivo interno, o óleo aquecido tem sido o meio de aquecimento mais utilizado [13] [14]. No entanto, a eficiência destes sistemas de aquecimento é bastante lenta e leva mais de alguns minutos para fornecer uma mudança de temperatura de 100°C; devido à baixa condutividade térmica e à baixa temperatura de ebulição do óleo. Para superar a temperatura de aquecimento limitada do óleo, podem ser utilizados gases de alta temperatura. Um método particularmente interessante é o método de aquecimento a gás [15] [16]. Com um desenho apropriado dos canais de gás e o uso destes para passar fluidos de arrefecimento, o método anteriormente referido é capaz de fornecer uma rápida mudança da temperatura do molde, superior a 100°C em apenas algumas dezenas de segundos. Outros fluidos, incluindo ar quente e vapor, também podem ser usados em aquecimento convectivo interno. Em particular, o método de aquecimento a vapor gerou recentemente algum interesse na indústria.

Meister e Drummer [17] investigaram a influência da temperatura do molde no comprimento do fluxo de um molde em forma de espiral, para o qual a secção transversal da espiral tinha uma dimensão de $0,3 \times 1,5$ mm. O sistema de controlo de temperatura RHCM usava água como fluido circulante e tinha um dispositivo de aquecimento e arrefecimento de circuito que permitia uma temperatura do fluido de até 200°C. A combinação do isolamento do molde e dos canais de arrefecimento conformados possibilitou mudanças de temperatura particularmente rápidas na cavidade (Figura 4).

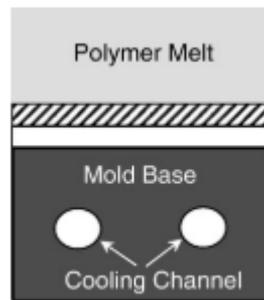


Figura 4 - Molde com canais para fluido circulante [18].

Aquecimento externo

O método externo é, em geral, limitado a meios gasosos (por exemplo, ar quente). No entanto, Hendry [19] divulgou um método para aquecer a superfície da cavidade do molde por meio de vapor condensado, drenando o condensado na cavidade imediatamente antes da etapa de injeção, embora a viabilidade prática deste método seja desconhecida.

A técnica de aquecimento externo da superfície da cavidade por controlo da temperatura de molde assistido por gás (GMTC) é geralmente utilizada para atingir uma temperatura superior da superfície do molde antes da injeção do polímero fundido e consequente preenchimento da cavidade. Um esquema dos tipos canais é representado na Figura 5. O sistema compreende um sistema de controlo de temperatura por água e um sistema de controlo da temperatura do molde assistido por gás. Também é utilizado um sistema de controlo de aquecimento/arrefecimento de água que pode pré-aquecer e arrefecer o molde alternando entre água quente e fria. O sistema GMTC é constituído por um soprador de ar quente de alta potência, placa de molde e inserto de molde. A função do soprador de alta potência é fornecer um fluxo de ar quente à cavidade do molde.

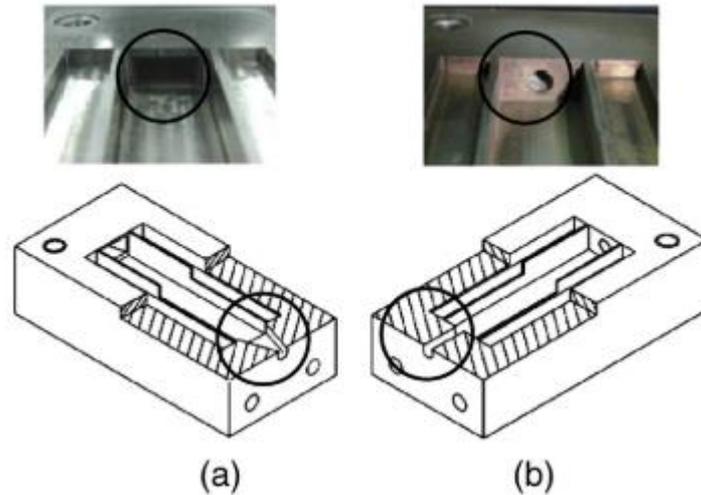


Figura 5 - Vários desenhos de canais incluindo (a) forma de leque (b) forma de tubo [18].

Durante o processo de injeção, a cavidade do molde é pré-aquecida usando ar quente comprimido. A temperatura e o tempo a que o ar é injetado na cavidade irá gerar uma temperatura ótima predeterminada na parede do molde. Além disso, o canal de fluxo de gás quente da cavidade do molde pode ser fabricado em várias formas para aumentar a eficiência do aquecimento e garantir uma distribuição da temperatura uniforme em toda a superfície moldante [18].

2.4.2 Aquecimento do molde por radiação

O uso de radiação para aquecimento rápido de moldes tem sido quase exclusivamente focado no aquecimento infravermelho. Existem, no entanto, outras formas de aquecer o molde por ondas eletromagnéticas e sem contacto direto com o molde. O aquecimento por efeito de proximidade, aquecimento dielétrico e o método de aquecimento por indução são outras variantes do aquecimento do molde por radiação.

Aquecimento infravermelho

A fonte infravermelha é um corpo a uma temperatura mais alta que transfere a energia para a superfície do molde com uma temperatura mais baixa através de radiação eletromagnética de acordo com a lei de Stefan-Boltzmann. A gama de comprimentos de onda úteis para aquecimento por infravermelhos varia tipicamente entre 800 e 3000 nm.

Chang e Hwang [20] investigaram um sistema de aquecimento infravermelho rápido, prático e de baixo custo para moldação por injeção, e conseguiram elevar a temperatura da superfície do molde de 83°C para 188°C em 15 s. Saito et al. [21] usaram uma fonte externa de radiação infravermelha por algumas dezenas de segundos para aquecer uma superfície de molde, reduzindo a birrefringência da peça moldada. Yao e Kim [22] descobriram que o comprimento de enchimento de uma peça de moldada por injeção de parede fina aumentava significativamente quando se usava um sistema de aquecimento infravermelho. Yu et al. [23] usaram o aquecimento infravermelho para aquecer localmente a temperatura de uma cavidade do molde e obtiveram boa replicação dos micro detalhes e observaram que o aquecimento por mais de 10 s poderia resultar no preenchimento completo das micro cavidades quando a temperatura do molde era de 80°C.

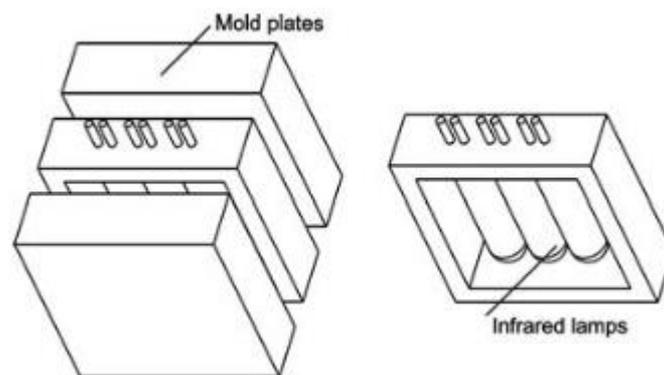


Figura 6 - Aquecimento externo do molde através de uma fonte de calor infravermelha [11].

Semelhante a uma bobina de aquecimento por indução, as lâmpadas infravermelhas podem ser instaladas num suporte de lâmpadas que pode ser movido para dentro e para fora do espaço entre as duas placas do molde; [20] [24] este princípio é mostrado na Figura 6. Um problema deste método de aquecimento é que a uniformidade de temperatura da superfície do molde não é tão boa, devido ao tamanho relativamente grande de uma lâmpada típica e à natureza discreta da fonte de calor. Chang e Hwang [20] também usaram um refletor para concentrar a energia infravermelha em áreas localizadas de um molde, como jito, canais de alimentação, ataques e microestruturas.

Efeito de proximidade

Com base no efeito de proximidade, método semelhante ao aquecimento por indução, como mostrado na Figura 7. Yao et al. [25] usaram aquecimento por proximidade de alta frequência

para aquecer um molde com uma cavidade de 25 mm³ e 50 mm³. A cavidade do molde pode ser aquecida rapidamente da temperatura ambiente para 240°C em 5 s com uma potência de calor aparente de 93 W/cm². Nenhum dos métodos requer uma camada de isolamento elétrico abaixo da superfície do molde em comparação com o método de aquecimento elétrico resistivo. Ao mesmo tempo, o aquecimento de proximidade não precisa de uma bobina elétrica dentro ou perto do molde, o que significa que o molde pode ser aquecido quando fechado durante a injeção. No entanto, o aquecimento de proximidade não é adequado para aquecer uniformemente uma superfície de molde complexa devido à sua fraca flexibilidade.

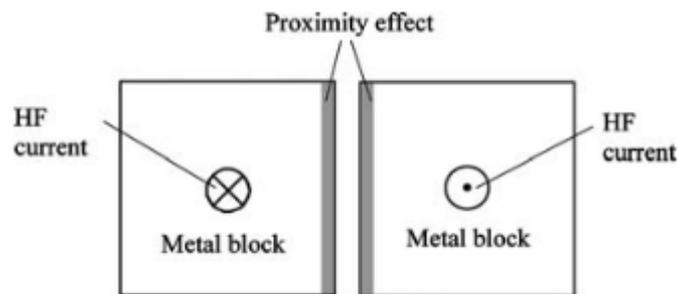


Figura 7 - Princípio de aquecimento da superfície do molde por efeito de proximidade [11].

Aquecimento dielétrico

Baseado na rotação do dipolo, o aquecimento dielétrico é usado para aquecer um material dielétrico, por exemplo, um polímero, através de radiação eletromagnética de alta frequência. Akopyn [26] [27] investigou o aquecimento uniforme de uma peça uniformemente espessa num micro-ondas convencional, selecionando um material de molde dielétrico que possui uma sensibilidade térmica relativa igual à do material de trabalho. Erwin e Suh [28] descreveram um novo material de moldação para aquecimento dielétrico, concluiu-se que este processo poderia eliminar o tempo de aquecimento e arrefecimento associado ao processo convencional de moldação por injeção; aquecimento e arrefecimento foram realizados num período de tempo na ordem de 1 s. O uso de aquecimento dielétrico para aquecer rapidamente um molde, implica que o mesmo deva ser feito de um material dielétrico, o que limita o desenvolvimento desta forma de aquecimento. No entanto, este método é capaz de aquecer polímero e um molde de metal ao mesmo tempo e é um bom complemento para o aquecimento por indução. Além disso, muitos polímeros não são adequados para o processo de aquecimento dielétrico, a menos que alguns aditivos sejam usados.

Aquecimento por indução

O aquecimento por indução é o resultado de perdas por correntes de Eddy na cavidade do molde de metal (condutor), que são geradas com um campo de corrente alternada. O calor é gerado diretamente no molde atingindo altas taxas de aquecimento. O aquecimento por indução combinado com o arrefecimento a água é amplamente utilizado nos sistemas RHCM de moldação por microinjeção. A maior diferença em relação ao aquecimento resistivo elétrico é que este método é muito mais flexível ao aquecer o molde, a bobina de aquecimento não contacta com a superfície do molde e a sua energia é focada na superfície do molde e não na base. Existem duas soluções diferentes para o aquecimento por indução: os indutores podem estar localizados externamente ou internamente do molde, visualmente representado na Figura 8. A localização interna de uma bobina é consideravelmente mais difícil e é mais comum usar uma bobina externa para aquecer a superfície de molde. Fazer isso impõe um limite para a temperatura pré-aquecida antes que o molde seja fechado.

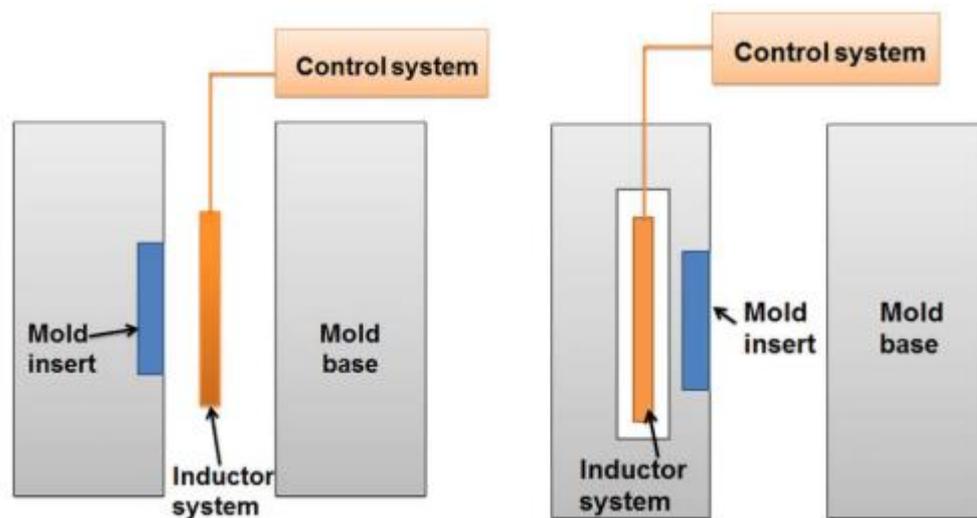


Figura 8 - Esquema de aquecimento por indução externa e interna. Esquerda: sistema externo para aquecimento por indução; direita: integração de um indutor num inserto do molde [29].

Chang et al. [30] aplicaram uma bobina de indução com múltiplas voltas externas para aquecer uma superfície de molde com micro-proporções, esta bobina poderia elevar a temperatura da superfície do molde a uma taxa de cerca de $20^{\circ}\text{C}/\text{s}$. Chen et al. [31] usaram o aquecimento por indução com arrefecimento por líquido refrigerante para obter controlo dinâmico da temperatura da superfície do molde, o que eliminou as marcas das linhas de soldadura da superfície. Este método é particularmente útil para a replicação de detalhada de pormenores em moldação por microinjeção. Chen et al. [32] também investigaram a eficiência do aquecimento

por indução num micro-molde com um arranjo de microcanais de 30 μm a 50 μm de largura e 120 μm e 600 μm de profundidade. Verificou-se que o aquecimento rápido da superfície do molde com a temperatura subindo de 60°C para entre 100°C e 140°C por aquecimento por indução leva cerca de 2 s a 3,5 s, enquanto a temperatura do molde retorna a 60°C em cerca de 70 s a 110 s. O aumento da temperatura do molde através de aquecimento por indução melhorou a precisão da replicação de peças com micro-detahes sem aumentar significativamente o tempo de ciclo.

É preciso ter cuidado ao projetar o molde e a geometria da bobina, e a selecionar a frequência atual e o sistema de controlo para o aquecimento por indução. Quando a cavidade do molde é quase plana, é a melhor escolha em relação aos outros métodos de aquecimento, alcançando uma temperatura predefinida mais rapidamente. No entanto, as bobinas de aquecimento por indução usadas para aquecer a superfície do molde precisam ser projetadas adequadamente para alcançar uma distribuição uniforme de temperatura. O diâmetro e a forma da bobina podem afetar significativamente a eficiência de aquecimento e ambos dependem da cavidade do molde. Além disso, o molde precisa ser aquecido e arrefecido, esses ciclos levam muito mais tempo do que os regulares. Como reduzir esse tempo tornou-se um dos tópicos mais estudados. A outra desvantagem é a vida útil reduzida do molde devido à fadiga térmica.

2.4.3 Aquecimento por condução

No aquecimento por condução ou contacto, um corpo a baixa temperatura é aquecido ao entrar em contacto com um corpo em alta temperatura. É uma técnica de aquecimento importante para plasticizar materiais termoplásticos no processamento de polímeros em geral, não se limitando à injeção. Para fins de plasticização, o material termoplástico é aquecido a uma temperatura alvo, acima da temperatura de amolecimento do material. Muitas vezes, é realizado de maneira contínua e o arrefecimento do material termoplástico não é necessário durante essa etapa. Para tais aplicações, o aquecimento por condução é energeticamente eficiente e económico.

Aquecimento por contacto

O uso de aquecimento por contacto entre corpos sólidos para aquecimento rápido do molde é limitado por vários limites físicos do processo de condução de calor. Como a condução de calor é um processo de difusão, a penetração de calor numa secção espessa é um processo lento. Apenas cascas finas podem ser aquecidas rapidamente por este método. Além disso, a taxa de

aquecimento é diretamente dependente da diferença de temperatura imposta entre os corpos em contacto, abrandando com a diminuição da diferença de temperatura. Para geometrias complexas da casca, existem preocupações adicionais no contacto uniforme entre os corpos em contacto. O contacto não uniforme resulta em resistência térmica e, conseqüentemente, diferentes fluxos de calor na superfície de contacto. Por estas razões, o aquecimento por contacto é, em geral, adequado apenas para moldes de casca fina com geometrias simples e com alta condutividade térmica. O aquecimento e arrefecimento por contacto foram usados com sucesso na moldação por compressão em moldes quase planos. No entanto, mesmo com geometrias simples, o uso de aquecimento por moldação por contacto em moldação por injeção apresenta desafios adicionais devido ao procedimento de operação mais complexo e à maior carga. O desenho apropriado do molde de casca fina juntamente com um apoio para suportar a pressão elevada e, facilitar o aquecimento e arrefecimento seletivos, são essenciais.

Stumpf e Schulte [33] divulgaram um desenho de um molde no qual uma região interna fina do molde adjacente a uma cavidade de molde oca é aquecida por condução através de uma região externa volumosa mantida a uma temperatura mais elevada. Após a injeção, a região interna fina do molde juntamente com a parte moldada é arrefecida independentemente da região externa. Yao et al. [34] investigaram experimentalmente o uso de duas estações, uma quente e outra fria, para o rápido aquecimento e arrefecimento de moldes planos. Relataram que moldes de alumínio com uma espessura de 1,4 mm poderiam ser aquecidos rapidamente da temperatura ambiente para 200°C em cerca de 3 s com uma estação quente a 250°C.

Aquecimento por condução passiva

O aquecimento passivo da superfície do molde pela entrada de polímero fundido pode ser considerado um caso especial de aquecimento por contacto. Em vez de entrar em contacto com um corpo sólido aquecido, a superfície do molde é coberta por um polímero fundido quente. Neste caso, o principal mecanismo de transferência de calor é também a condução de calor, tal como no caso em que dois corpos sólidos com temperaturas diferentes contactam entre si. De facto, o efeito de aquecimento passivo está presente em qualquer processo de moldação em que exista uma diferença de temperatura entre o polímero e o molde. No entanto, para conseguir um aumento de temperatura útil da superfície do molde por aquecimento passivo, o projeto e a seleção de material para a parte da superfície do molde são vitais. Para aumentar o efeito de aquecimento passivo deve-se seleccionar um material isolante com baixa condutividade térmica para a superfície do molde. A menor condutividade térmica resulta ainda numa menor

difusividade térmica, reduzindo a perda de energia no polímero fundido e permitindo que a temperatura da superfície do molde aumentada dure por mais tempo. [35] [36] Em geral, o aumento da temperatura da superfície do molde devido ao aquecimento passivo é moderado; no entanto, uma utilização adequada deste efeito pode resultar num atraso significativo da formação da camada solidificada, melhorando assim a qualidade da moldação. Por outro lado, a tensão térmica gerada na estrutura em camadas é relativamente moderada em comparação com o aquecimento elétrico resistivo numa estrutura multicamada similar. A uniformidade de aquecimento para formas complexas também pode ser prontamente obtida. O aquecimento passivo tem vantagens e desvantagens equilibradas podendo encontrar aplicações crescentes na indústria de moldação de precisão.

Aquecimento resistivo elétrico

No aquecimento elétrico resistivo, o calor é gerado de acordo com a primeira lei de Joule. Por razões de segurança normalmente são impostos, tensão baixa e corrente alta. Isto requer que o elemento de aquecimento tenha uma resistência apropriada; se muito alto, gerar-se-á calor insuficiente, mas se muito baixo, resultará essencialmente num curto-circuito. Infelizmente, a maioria dos bons materiais de aquecimento resistivo são muito frágeis ou requerem uma geometria específica (por exemplo, fios resistivos). No caso do aquecimento rápido do molde, é desejada uma camada de aquecimento metálica. No entanto, os metais são excelentes condutores elétricos e, portanto, é difícil obter alta resistência a menos que a geometria seja longa e fina. Por exemplo, para uma tira de aço de 5 cm de comprimento e 2,5 cm de largura com uma resistividade típica de $25 \mu\Omega \text{ cm}$, os cálculos mostram que é necessária uma espessura de camada de $5 \mu\text{m}$ para gerar uma potência de aquecimento de $100 \text{ W} / \text{cm}^2$ com 110 V. A resistência correspondente é de aproximadamente $0,1 \Omega$. Observe que aquecedores flexíveis de filme fino estão comercialmente disponíveis, tipicamente feitos de um padrão metálico de película fina em ziguezague para aumentar a resistência, inserida entre duas camadas de isolamento (por exemplo, poliimidas). Um esquema do aquecimento rápido do molde por aquecimento resistivo elétrico de baixa frequência é ilustrada na Figura 9.

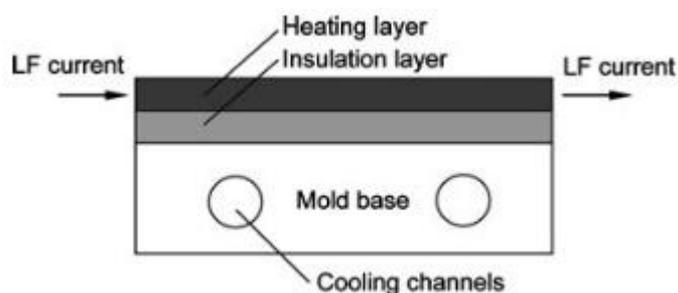


Figura 9 - Aquecimento resistivo elétrico com corrente elétrica de baixa frequência. LF indica baixa frequência. [11]

Para este método, é necessária uma camada de isolamento logo abaixo da fina camada de aquecimento resistivo. A utilização de um filme fino como uma camada de aquecimento em aplicações de moldação por injeção, é, no entanto, questionável. Qualquer pequeno arranhão na superfície pode resultar numa falha catastrófica devido ao aquecimento não uniforme e à tensão local gerada. A situação piora na produção real devido ao desgaste da superfície do molde. Além disso, devido à baixa resistência, a resistência de contacto em qualquer junção de conexão pode ser significativa, resultando num aquecimento desnecessário e num modo de falha adicional. De acordo com Yao e Kim [37] para um molde multicamadas, a espessura da camada de aquecimento (até 2 mm) não afeta significativamente o desempenho de aquecimento. Portanto, a etapa crítica para o aquecimento resistivo é identificar um material rígido, resistente e durável com uma resistividade relativamente alta. Para o exemplo anterior, se a resistividade for aumentada para 5 mΩ cm, a espessura de aquecimento aumentaria agora para 1 mm.

De facto, embora nenhum dos resultados fossem discutidos na literatura aberta, algumas das grandes empresas da indústria de plásticos realizaram uma quantidade significativa de trabalho experimental em meados da década de 1980 para procurar material resistivo viável adequado para o aquecimento rápido do molde. Aparentemente, um avanço ainda é esperado nesta área. A situação pode ser alterada no futuro, com novas descobertas obtidas em campos interdisciplinares, particularmente relacionados com materiais funcionais.

Aquecimento termoelétrico

O aquecimento termoelétrico baseia-se no efeito Peltier. Quando a corrente elétrica é passada através de um circuito formado por dois condutores diferentes, um efeito de arrefecimento é observado numa junção, enquanto noutra junção verifica-se um aumento da temperatura. Essa mudança de temperatura nas junções é chamada de efeito Peltier. A direção da transferência de

calor pode ser invertida, trocando a polaridade da fonte de alimentação. Portanto podem ser realizados, aquecimento e arrefecimento sequencial por um único dispositivo termoelétrico. Por esta razão, os dispositivos termoelétricos parecem ser úteis em aplicações de aquecimento e arrefecimento de moldes e podem ser adequados para o controlo de temperatura in situ, se puder ser obtida uma resposta térmica rápida. A Figura 10 esquematiza o princípio de funcionamento de efeito de Peltier.

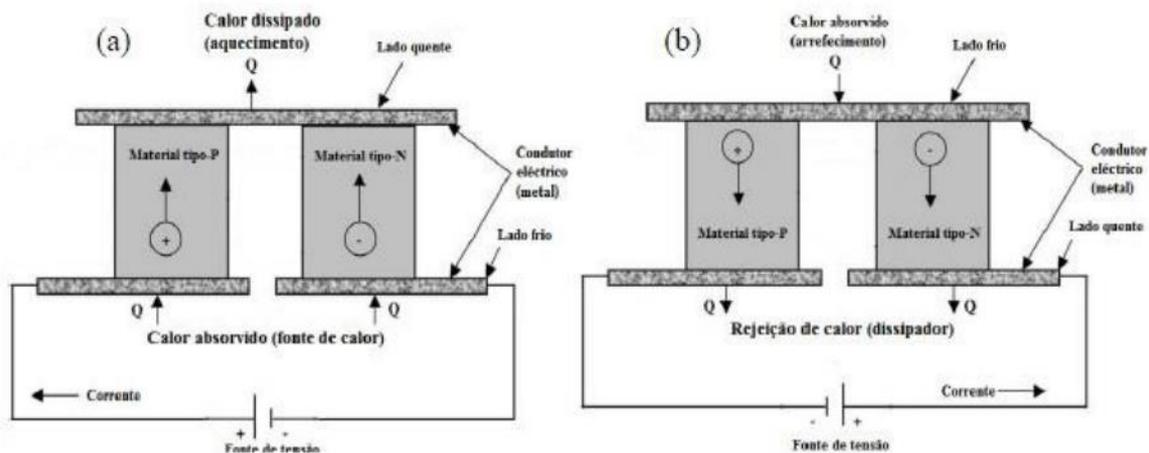


Figura 10 - Aquecimento (a) ou arrefecimento (b) através do efeito Peltier. [38]

Kim e Wadhwa [39] usaram dispositivos termoelétricos comercialmente disponíveis para aquecimento de moldes. Estes dispositivos eram compostos por blocos semicondutores montados numa placa de metal, usada como superfície do molde. A principal limitação deste dispositivo de aquecimento termoelétrico é que o calor gerado numa junção é conduzido rapidamente para a outra junção, devido ao pequeno espaço envolvido e à boa condutividade térmica do material utilizado. A taxa de aquecimento e arrefecimento da moldação relatada com aquecimento termoelétrico foi bastante lenta (por exemplo, 80°C em 20s) no dispositivo de Kim e Wadhwa. [39] Whiteside et al. [40] também usaram um dispositivo Peltier para aquecimento do molde, mas concluíram que o dispositivo não tinha a potência e o tempo de resposta para controlar adequadamente a temperatura da cavidade. Para um dispositivo termoelétrico ser utilizado na indústria de moldação por injeção, são necessários novos desenvolvimentos sobre a eficiência do dispositivo, como a criação de um dispositivo com junções eletricamente condutoras, mas isoladas termicamente.

2.4.4 Comparação entre as várias técnicas de aquecimento

A Tabela 1 fornece uma comparação resumida entre diferentes métodos de aquecimento rápido de um molde com base no tipo de transferência de calor e outras propriedades características.

Tabela 1 - Comparação de Diferentes Métodos de Aquecimento Rápido do Molde Baseado no Tipo de Transferência de Calor. Tabela adaptada de “The use of variotherm systems for microinjection molding” Su, Quanliang, Zhang, Nan, Gilchrist, Michael D. 2016, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 133, pp. 1-17. 10974628. [12]

Specific name	Maximum temperature	Heating velocity	Location	Cost	Influence on mold lifetime	Heating uniformity	Ability for heating complex mold	Coating helpful	Any special requirement on mold material	Difficulty for thermal measurement
Convection heating	H ^a	M	Internal	M/L	M/H	H	H	No	No	L
Water heating	L	H	Internal	M/L	M/L	H	H	No	No	L
Steam heating	H	H	Internal	M	M/H	H	H	No	No	L
Air heating	M	M/H	External	M	M/L	H/M	M	No	No	M
Radiation heating	M	H	External	H	M	M	M	Yes	Yes/No	M
Proximity heating	L	H	Internal	M	L	L	L	No	Yes	H
Dielectric heating	M	Decided by Polymer	Internal	M/H	L	M	M	No	No	H
Conduction heating	M	H	Internal	M	M/H	M	M	No	No	M
Flame heating	M	H	External	M/H	H	M	M	No	No	M
Induction heating	M	H	Both	H	M/H	M	M	Yes	Yes/No	H

^aH, high; M, medium; L, low.

2.5 Fluxo no molde

Depois de deixar os canais de alimentação, o fundido flui para dentro da cavidade e está sujeito a processos de fluxo e arrefecimento simultaneamente. O padrão de fluxo descrito na secção transversal é o representado na Figura 11 [41] [42].

É possível distinguir-se o perfil de velocidades nas áreas anteriores à frente de fluxo e a própria frente de fluxo. Atrás da frente de fundido, é possível distinguir-se duas regiões de parede a parede na secção transversal. A camada solidificada ou a casca é formada a seguir à parede fria do canal do molde, devido ao arrefecimento do fundido. O fluxo é impossibilitado nessa região da camada solidificada de material. Na região interior, no núcleo, o material fundido continua a fluir.

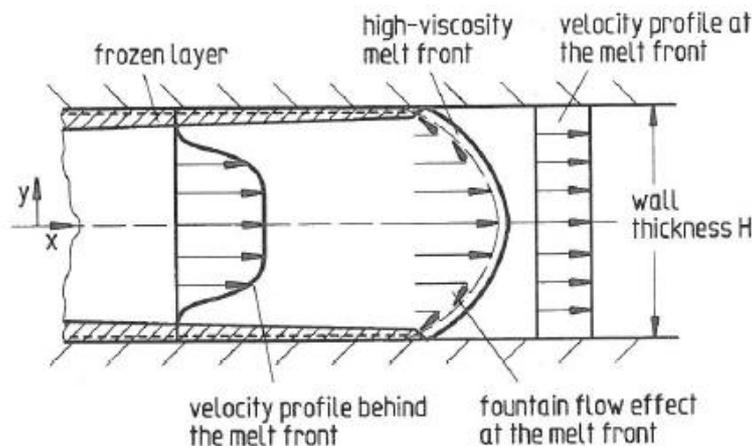


Figura 11 - Perfil de velocidades na secção transversal.

O maior gradiente de velocidades (taxa de corte) é verificado na vizinhança da camada solidificada, mas devido à grande viscosidade do fundido nesta área, esta não está situada exatamente na fronteira da camada. Na área de maior gradiente de velocidade, o fundido é sujeito a uma força de corte especialmente forte, que orientam as moléculas ou cargas embebidas na direção do fluxo. Por esta razão, é esperada orientação máxima na secção imediatamente abaixo da superfície da moldação.

Devido à constrição causada pela camada externa solidificada, a velocidade máxima nesta área é consideravelmente maior do que na frente de fluxo. Consequentemente, partículas fundidas inicialmente situadas a alguma distância da frente podem alcançá-la em breve. Isto leva a um fluxo perpendicular à parede na frente do fluxo, um fenómeno chamado de efeito de fluxo de fonte [43]. Devido ao efeito de fluxo de fonte, a frente de fluxo fria, muito viscosa estira-se

como uma película na direção oposta à do fluxo e pressiona a parede. O contacto com a parede fria do molde faz com solidifique instantaneamente. Este estiramento da película altamente viscosa na frente do fundido induz uma orientação adicional.

2.5.1 Camada Solidificada e Orientação

Diversas propriedades relacionadas à qualidade da moldação são fortemente influenciadas pelos processos de fluxo e arrefecimento que ocorrem na fase de enchimento [44]. Uma camada solidificada forma-se quando o fundido quente arrefece na parede fria do molde [45]. Por causa dos processos de fluxo, essa camada é orientada principalmente na direção do fluxo. A espessura desta camada aumenta continuamente durante a fase de enchimento (Figura 12). Na figura, cada linha (sólida ou tracejada) é a espessura da camada solidificada num tempo posterior, ao longo do comprimento do fluxo. A parede do molde é uniformemente espessa (H4) na maior parte do seu comprimento, mas mais fina (H-2, 1,5 e 1,3) perto do final do seu comprimento de 210 mm. Se observarmos um ponto ao longo desse caminho de fluxo, vemos que a camada solidificada engrossa rapidamente no início, com uma taxa de aumento que diminui gradualmente [46].

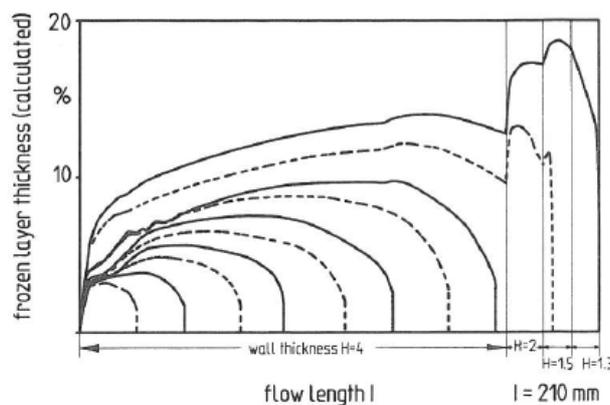


Figura 12 - Formação da camada solidificada com o avanço da frente de fluxo em tempos sucessivos. [47]

A maneira como a camada solidificada é distribuída ao longo do percurso do fluxo também é importante (figura 13). No final do enchimento, a espessura da camada solidificada tem a forma parabólica. A espessura relativamente fina da camada solidificada perto do ataque resulta do fornecimento contínuo de material fundido quente nessa área; e a sua espessura fina no final do caminho de fluxo resulta do menor tempo de arrefecimento nesse local. Os dois efeitos anteriormente mencionados levam à forma parabólica. A Figura 13 também mostra que a

espessura da camada solidificada não depende da segunda pressão. Isso não é surpreendente, uma vez que a camada solidificada já está acumulada quando a unidade é comutada para a segunda pressão.

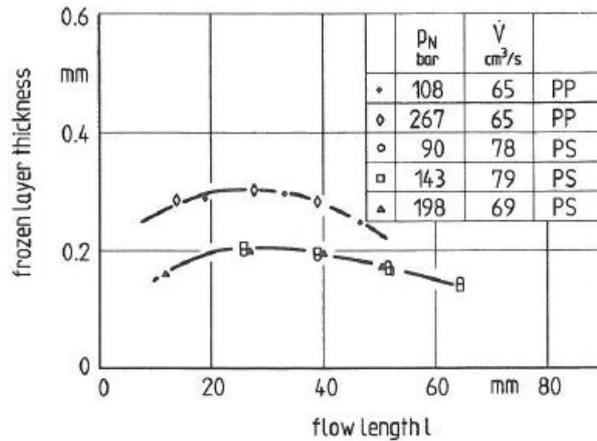


Figura 13 – Dependência da espessura da camada solidificada no comprimento de fluxo e com a pressão de retenção. [47]

A espessura da camada solidificada depende da temperatura, no entanto (Figura 14) [48]. A altas temperaturas de fundido, a camada solidificada é mais fina porque o arrefecimento é mais lento.

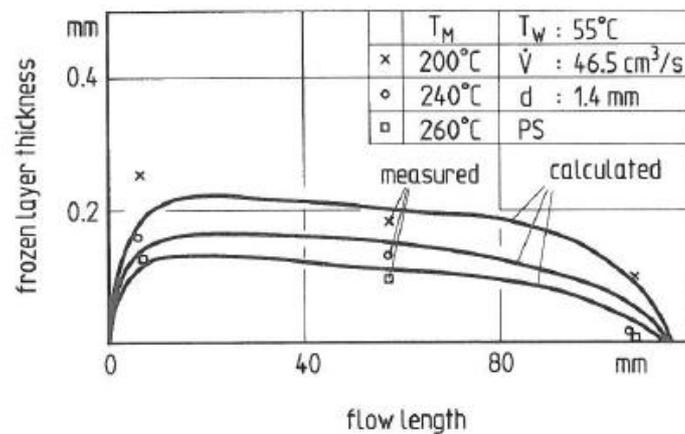


Figura 14 – Dependência da espessura da camada solidificada com a temperatura do fundido [47].

O grau de orientação, ou seja, o alinhamento de macromoléculas ou cargas embutidas, tais como fibras, causadas pelo fluxo é maior nesta camada solidificada do que em qualquer outro ponto da seção transversal. As propriedades mecânicas da moldação dependem fortemente da quantidade e direção da orientação. Na direção da orientação, as propriedades mecânicas são mais altas e na direção perpendicular mais baixas.

A Figura 15 é uma representação útil da distribuição da orientação na seção transversal da peça. A orientação na direção do fluxo é maior na parede porque a película viscosa estirada da frente de fluxo está na superfície da moldação. Um segundo pico de orientação na direção do fluxo pode ocorrer como consequência da taxa de corte da camada imediatamente no interior da parede, na área de transição entre a camada solidificada e o fluido fundido. Quanto mais tempo o material flui através da seção, mais alto o valor máximo relativo. Por esse motivo, o grau de orientação diminui com o aumento do comprimento do caminho do fluxo. No centro do canal de fluxo, onde o fundido não está sujeito a corte, não há orientação.

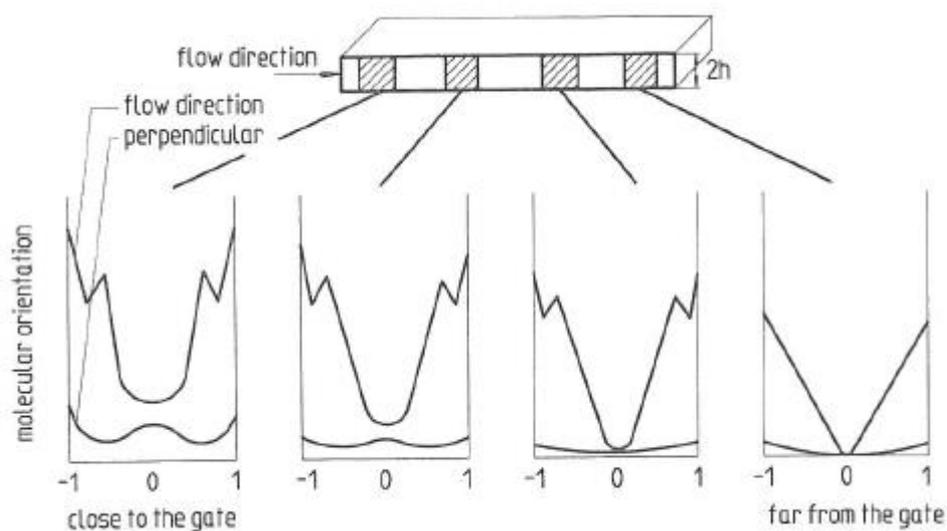


Figura 15 – Orientação molecular na seção transversal ao longo do comprimento de fluxo [47].

2.5.2 Cristalização

As macromoléculas de muitos materiais poliméricos adotam um arranjo ordenado e formam áreas cristalinas. As moléculas não estão dispostas em estruturas regulares ao longo de todo o seu comprimento, mas em seções distribuídas aleatoriamente. Portanto, partes das macromoléculas também podem ser encontradas num estado desordenado (amorfo). Plásticos deste tipo são chamados semicristalinos. Estruturas semicristalinas são formadas durante o processo de arrefecimento. Condições térmicas e efeitos de fluxo são importantes para a formação de cristais.

O grau de cristalinidade determina várias propriedades da moldação. Por exemplo, existe uma relação direta entre o grau de cristalinidade e o peso da peça. Outras características, como

resistência à tração, módulo de Young e resistência ao impacto, aumentam proporcionalmente com o grau de cristalinidade. O grau de cristalinidade é definido como a relação entre o material cristalizado e o material capaz de ser cristalizado. Existem vários métodos para determinar o grau de cristalinidade experimentalmente.

Dependência do grau de cristalinidade em vários parâmetros do processo

O principal fator que influencia o grau de cristalinidade é a taxa de arrefecimento. O grau de cristalinidade é menor para taxas de arrefecimento mais altas. Com arrefecimento mais rápido, as moléculas têm menos tempo para se organizar; pelo contrário, o arrefecimento mais lento permite que as macromoléculas adotem um padrão mais regular, de modo a formarem áreas cristalinas maiores.

Os efeitos de outros parâmetros do processo também refletem a importância do arrefecimento (Figura 16). O grau de cristalinidade aumenta com a temperatura mais alta da parede porque o arrefecimento é mais lento e as condições são mais propícias à cristalização. A influência da temperatura do fundido no grau de cristalinidade é menor que o da temperatura da parede.

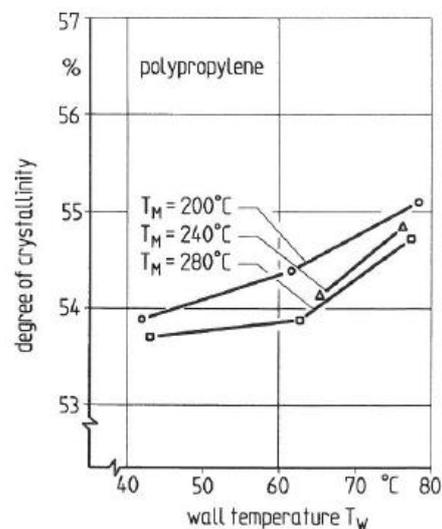


Figura 16 - Grau de cristalinidade em função da temperatura da parede e do fundido [47].

No entanto, como os gradientes de temperatura no processo de moldação por injeção são sempre grandes, as diferenças no grau de cristalinidade são pequenas.

2.5.3 Influência da microestrutura nas propriedades da peça

Os parâmetros de injeção de uma peça e sua qualidade propriedades estão fortemente relacionadas [49]. Nas secções anteriores, discutiu-se a influência das variáveis do processo nas características morfológicas, como orientação, espessura da camada solidificada e grau de cristalinidade.

No entanto, apenas as propriedades macroscópicas de uma moldação são relevantes. Estas propriedades são determinadas pela sua microestrutura, independentemente do processo pelo qual foi alcançada. Demonstrar-se-á nesta secção como as conclusões sobre as qualidades das propriedades de uma moldação podem ser tiradas da sua estrutura interna.

A Figura 17 descreve os eventos como uma série de causas e efeitos [50]. Os parâmetros do processo são o resultado dos parâmetros de produção definidos na máquina; eles são valores físicos que determinam o estado físico do processo enquanto a peça é formada. As microestruturas são uma função dos parâmetros do processo. Nota-se que diferentes parâmetros de processamento podem produzir propriedades estruturais semelhantes. A morfologia determina as propriedades, isto é, o comportamento mecânico da moldação.

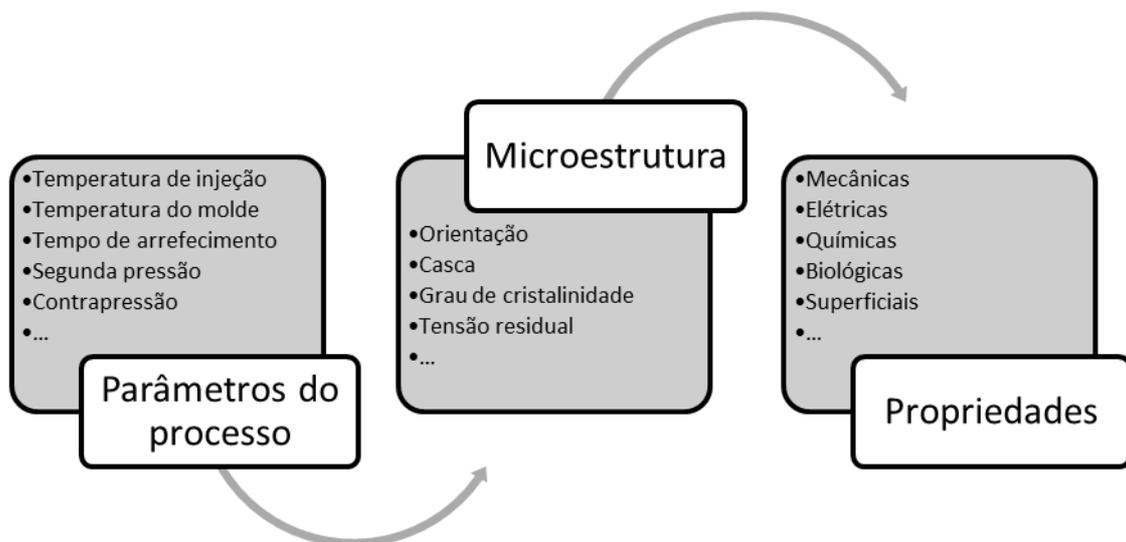


Figura 17 -Efeito dos parâmetros de produção nos parâmetros de processamento e propriedades da moldação.

As propriedades mecânicas são de especial interesse para o projeto de moldações por injeção. Portanto, apresentar-se-á alguns exemplos de correlações entre morfologia e propriedades da peça.

Os efeitos de orientação têm forte influência no comportamento mecânico. Com o aumento da orientação molecular, o módulo de Young é mais alto na direção de orientação e é mais baixo na perpendicular a esta. Conclui-se que a orientação causa um comportamento mecânico mais anisotrópico [51]

A tensão de rotura e a tensão de cedência (Figura 18) aumentam com o aumento da orientação. Ambas as propriedades mostram um aumento linear com orientação [52]. A amostra da tensão de rotura foi analisada de duas maneiras diferentes. Primeiro, os valores para a secção transversal completa foram medidos e, em seguida, apenas os valores para a camada central. As diferenças entre os valores correspondentes foram uma medida da resistência à tração da camada solidificada. Esta experiência demonstrou que a camada solidificada altamente orientada deu uma importante contribuição para a resistência.

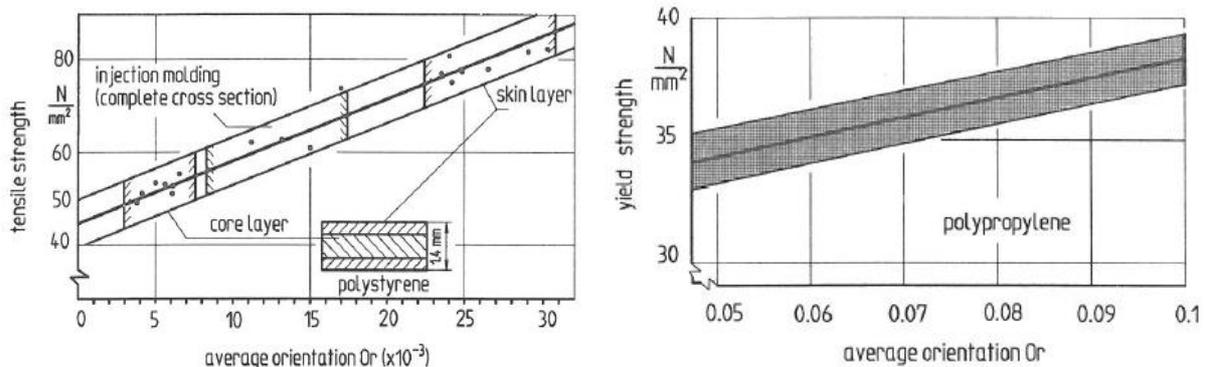


Figura 18 - Efeito da orientação na tensão de rotura (à esquerda) e de cedência (à direita). [47]

Conclui-se que, para o projeto prático do molde, o ataque deve ser localizado de forma que a direção de carregamento principal da moldação durante o uso corresponda à direção do fluxo durante a produção. As configurações da máquina devem ser definidas para garantir que a orientação seja a mais alta possível.

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

3.1 Estudo laboratorial preliminar com sistemas de controlo dinâmico de temperatura

Previamente ao desenvolvimento de sistema RHCM para o trabalho de dissertação, pretendeu-se realizar alguns estudos preliminares nesta temática, onde se desenvolveu e incorporou um sistema de controlo dinâmico de temperatura em pequena escala num equipamento de injeção de bancada (ver Figura 19). O objetivo passou por criar de uma forma contextual ao projeto e numa escala mais reduzida, um sistema de aquecimento e arrefecimento protótipo, que permite-se fazer um estudo inicial sobre os parâmetros do processo utilizados e propriedades da peça obtidos através desta primeira abordagem e mais tarde comparar e validar os resultados obtidos com sistema RHCM em maior escala.



Figura 19 - Equipamento de injeção de bancada Clarke 25. [53]

A injetora originalmente faz-se acompanhar por um molde de injeção com uma geometria específica e incapacitada de sofrer qualquer alteração, por exemplo, para a incorporação de um sistema de aquecimento e arrefecimento no seu interior. Por este motivo, e sabendo que o objetivo desta componente prática passa, não só pela introdução de um sistema de controlo dinâmico de temperatura no interior do molde, mas também pela análise das propriedades mecânica das amostras produzidas, foi necessário projetar um novo molde em aço. Assim, procedeu-se à substituição do molde que atualmente se encontra incorporado no equipamento

pelo novo molde projetado e maquinado, cuja cavidade tivesse a forma de um provete impacto representado na Figura 20.

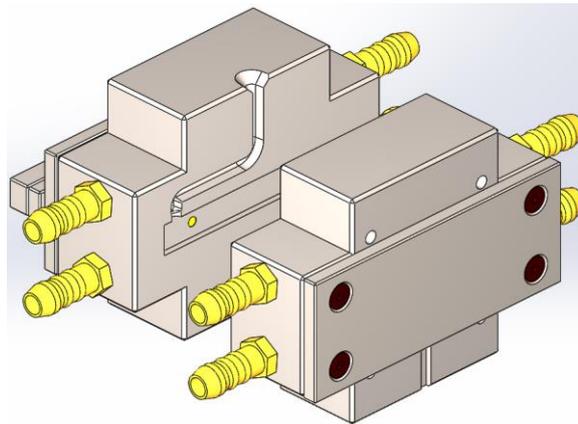


Figura 20 - Novo molde projetado no Software SolidWorks.

O controlo dinâmico da temperatura do molde realizou-se aquecendo-o através de resistências elétricas e o arrefecimento por circulação de água nos canais maquinados no molde. A tecnologia de aquecimento do molde utilizada permitiu atingir temperaturas de 160°C e pôr em prática o seguinte plano de injeções com três temperaturas do molde e duas temperaturas de injeção apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Plano de injeções para sistema RHCM protótipo.

Ensaio	Temperatura de Injeção	Temperatura do Molde
A		40°C
B	200°C	120°C
C		160°C
D		40°C
E	180°C	120°C
F		160°C

O material utilizado foi um polipropileno homopolímero e a peça injetada apresentou excelentes propriedades mecânicas proporcionalmente ao aumento da temperatura do molde. Os primeiros resultados obtidos revelaram-se promissores, mas ao mesmo tempo surge a dúvida quanto à sua confiança visto as injeções terem sido ativadas manualmente, sem qualquer sistema de controlo/ instrumentação ou medição de parâmetros de processamento. Nesta

injetora de bancada os únicos parâmetros de processamentos controláveis quantitativamente são a temperatura de injeção e a temperatura do molde desconhecendo-se os restantes (como pressões de injeção, força de fecho, etc) e, portanto, carece de rigor. Houve assim a necessidade de realizar novas injeções numa injetora industrial para validação dos resultados obtidos.

3.2 Definição do sistema de controlo dinâmico de temperatura

Neste subcapítulo é feita uma abordagem mais detalhada à tecnologia de controlo dinâmico de temperatura a ser incorporada, nesta primeira fase do projeto de dissertação, no molde de injeção, e nomeadamente o sistema de aquecimento e de arrefecimento. O principal objetivo passa por analisar a influência desta tecnologia no processo de moldação por injeção e na qualidade das peças finais obtidas, em comparação com o sistema tradicional.

Desta forma, verificou-se que o sistema de aquecimento por radiação infravermelho (IV) seria o mais apropriado para induzir temperatura à superfície da zona moldável, devido ao facto de este ser um sistema capaz de se adaptar facilmente a qualquer molde (aplicação externa), dependendo do limite máximo das dimensões do molde.

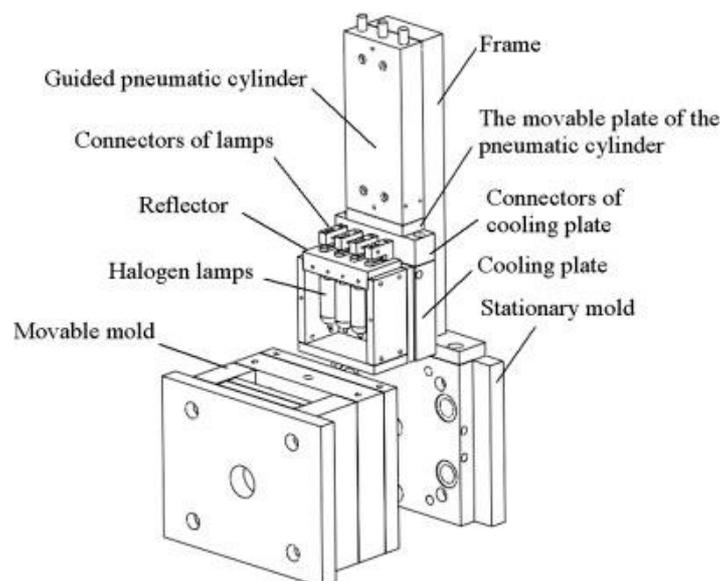


Figura 21 - Esquema ilustrativo da montagem do sistema RHCM de aquecimento por radiação IV. [54]

Esta tecnologia tem como base a utilização e incorporação de lâmpadas de halogéneo numa estrutura metálica que se encontra acoplada a um braço robótico. Estas lâmpadas emitem uma radiação IV quando deslocadas para a zona que divide a parte fixa e móvel do molde, no momento de abertura do molde. Promovendo o aquecimento uniforme e eficaz de ambas as

superfícies do molde perpendiculares ao sistema de lâmpadas. A figura 21 exemplifica a aplicação desta tecnologia para promover o aquecimento da superfície do molde.

Quanto ao arrefecimento da peça, definiu-se que o sistema mais apropriado para promover um arrefecimento rápido e eficaz do molde, e naturalmente da peça, seria o tradicionalmente utilizado nos moldes de injeção, ou seja, através do fluxo de água “fria” no interior dos canais maquinados no molde. Este sistema é tipicamente utilizado nos moldes atualmente produzidos e não exige um grande investimento na sua maquinaria, em comparação, por exemplo, com os canais conformáveis.

Na figura acima apresentada é possível verificar a forma de atuação desta tecnologia. No momento em que o molde abre, a estrutura composta pelas lâmpadas de halogéneo desce e promove o aquecimento da zona moldável, cavidade e bucha, através da incidência de radiação infravermelha na superfície de ambas estruturas. Quando é atingida a temperatura pretendida na superfície do molde, ao fim de um período de tempo, a estrutura eleva-se e o molde fecha. É então iniciado o ciclo de moldação e a respetiva etapa de enchimento. Durante esta etapa o molde mantém-se quente, e, no final dessa etapa é iniciado o processo de arrefecimento do molde, onde um fluxo de água percorre os canais de arrefecimento no interior do molde. A peça é arrefecida até à temperatura de ejeção, molde abre e a peça é extraída. Terminado o ciclo, a estrutura com as lâmpadas volta a ocupar o espaço entre as duas metades do molde, promovendo um novo aquecimento da sua superfície e dando assim início a um novo ciclo de moldação.

3.3 Materiais e Equipamentos utilizados

Os equipamentos necessários para a produção da peça e controlo do processamento estão à disposição no Centro de Ciência Viva, em Guimarães, tendo sido apenas necessário desenvolver o molde e o sistema de lâmpadas adaptando-os ao equipamento existente.

O material e equipamento utilizado, descrito genericamente, foi o seguinte:

- Injetora
- Termorregulador
- Manipulador pneumático
- Molde
- Suporte lâmpadas

- Lâmpadas
- Polímero termoplástico
- Tecnologias de controlo da temperatura

3.3.1 Injetora e termorregulador

A máquina de injeção que se utilizou para o processamento dos provetes foi uma Dr. Boy 22M de 22 toneladas (220 kN de força de fecho), adquirida pelo Centro de Ciência Viva, em Guimarães. Esta máquina tem diâmetro do parafuso de 24 mm e permite atingir pressões de injeção de 160 bar. Para promover o arrefecimento do molde utilizou-se um termorregulador, da Conair Churchill TC90-9, que permite o fluxo de água nos canais de arrefecimento do molde. Os dois equipamentos podem ser observados na Figura 22.



Figura 22 - Injetora Dr.Boy 22M (esquerda), termorregulador Conair Churchill TC90-9 (direita).

3.3.2 Peça em estudo

O intuito do presente trabalho de dissertação é estudar as propriedades mecânicas das peças injetadas e relacioná-las com as condições de processamento e sustentar os resultados com ensaios de caracterização ótica e térmica. A necessidade de realizar ensaios mecânicos normalizados determinou o desenho da cavidade do molde incluindo a geometria de provetes de impacto e tração como peças alvo deste estudo. A área projetada da cavidade também foi condicionada pela geometria do suporte de lâmpadas anteriormente fabricado.

Dois provetes de tração e dois provetes de impacto, injetados aos pares consoante a posição do bico. Em cada par de provetes há dois pontos de injeção diferentes, um no meio de um provete e outro no extremo do provete oposto, de modo a estudar o efeito da orientação do fluxo nas propriedades da peça. Na Figura 23 observa-se os pares de provetes injetados e suas dimensões. A moldação é constituída por um sistema de alimentação, que dá origem a duas peças, numa posição do bico são injetados dois provetes de tração com uma espessura de 2 mm e na posição perpendicular à anterior são injetados dois provetes de impacto com uma espessura de 4 mm.

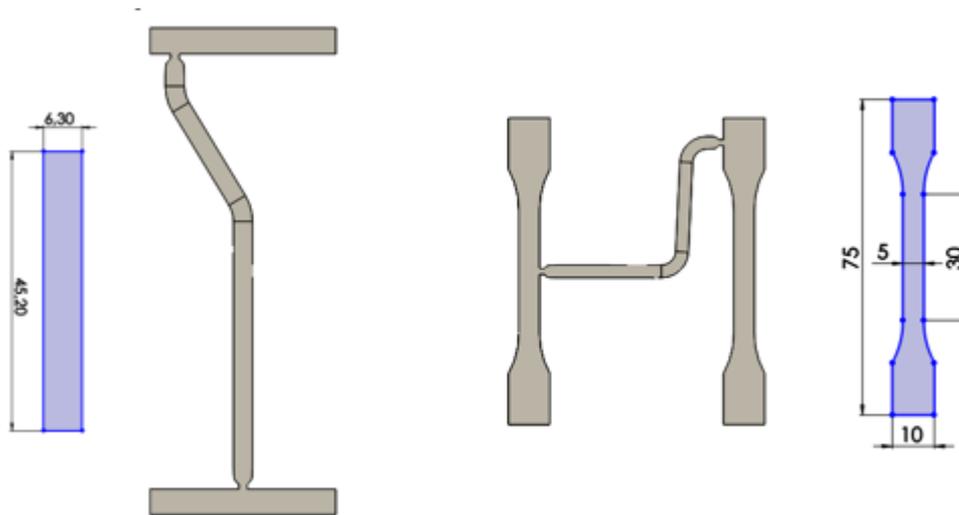


Figura 23 - Desenho do sistema de alimentação de cada par de provetes de impacto (esquerda) e de tração (direita) e respectivas dimensões dos provetes.

3.3.3 Molde

O molde foi projetado e fabricado de raiz tendo em conta a geometria da peça a injetar e do suporte lâmpadas, o posicionamento dos termopares incorporados no molde e as especificações da injetora. O molde que se usou foi um molde com as dimensões 176 x 156 x 156 mm³, ver na Figura 24. A cavidade do molde foi projetada considerando a área de aquecimento do sistema RHCM com as lâmpadas de halogéneo. No desenvolvimento do suporte de lâmpadas definiu-se uma área interna retangular útil para o aquecimento da superfície das placas do molde limitando a disposição dos provetes a essa área. Desta forma a placa que incorpora a cavidade da moldação na parte móvel detém área suficiente para englobar a área projetada dos provetes.

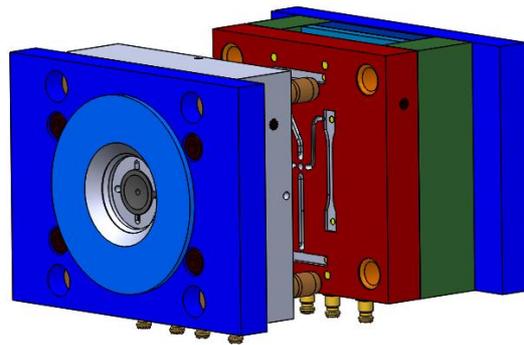


Figura 24 – Desenho 3D em SolidWorks do molde.

Um dos objetivos deste trabalho é estudar a influência da localização do ataque no meio ou no extremo nas propriedades mecânicas da moldação. O dimensionamento dos canais de alimentação e a localização dos ataques para a injeção da moldação em diferentes locais de modo a permitir o fluxo do material fundido para dentro da peça foram aspectos considerados no desenho da cavidade, observe a placa da cavidade na Figura 25.

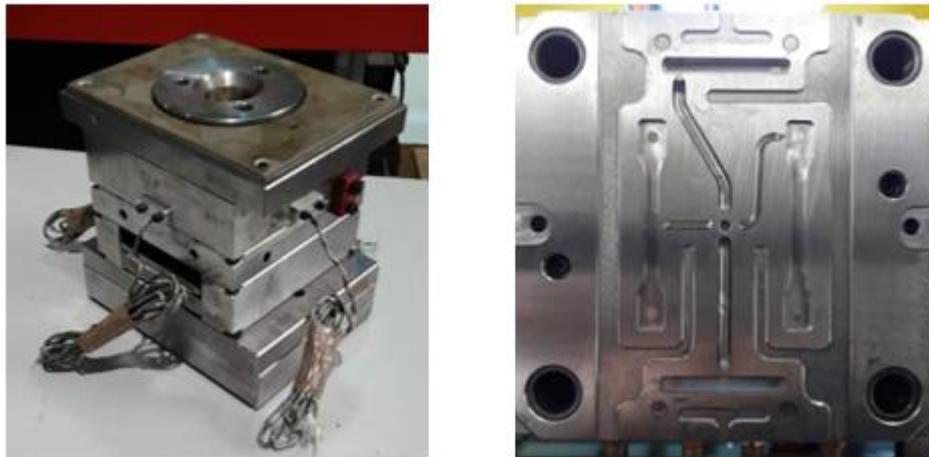


Figura 25 - Molde (esquerda) e placa da cavidade (direita).

As dimensões do molde foram determinadas de acordo com as características técnicas da injetora, Boy 22M utilizada (ver Anexo 2). A altura do molde foi definida de acordo com a distância mínima e máxima entre placas (ver Tabela 3), definindo-se uma altura de 205 mm dentro desta gama de valores, dimensão um da Figura 26. Determinou-se uma largura do molde, dimensão dois da Figura 26, de 206 mm por forma a não intersetar as barras de junção da injetora. Selecionou-se um injetor para o molde com raio de curvatura de 40 mm, superior ao do bico da injetora.

Tabela 3 - Especificações da injetora Boy 22M.

Caraterística	Unidades (mm)
Distância mínima entre placas	200
Distância máxima entre placas	400
Distância entre as barras de junção	254
Raio de curvatura do bico de injeção	36

Evitando-se uma possível folga entre estes dois componentes durante a etapa de injeção do fundido e consequentemente o fluxo do material por esse espaço.

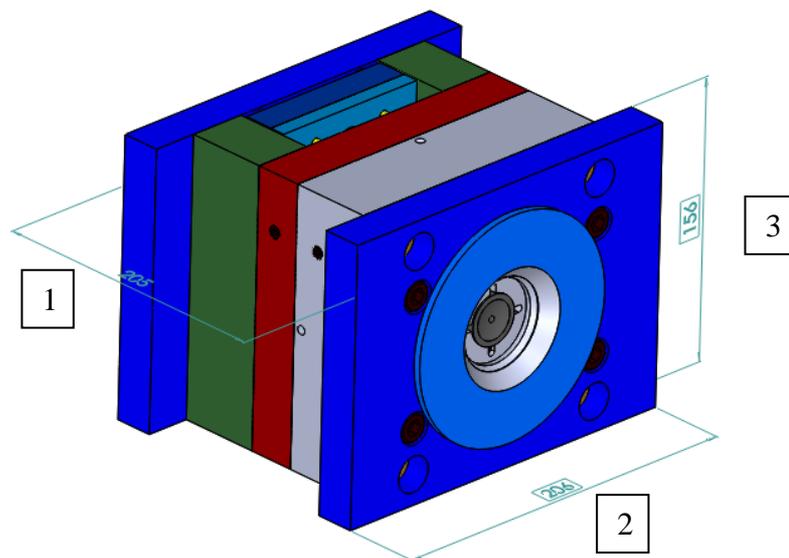


Figura 26 - Desenho 3D do molde e dimensões, (1) altura do molde, (2) largura do molde e (3) largura placa da cavidade.

Desenhou-se o molde prevendo-se a colocação de termopares em locais estratégicos. É importante que se possa controlar a temperatura da superfície da cavidade, para que se tenha um controlo do processo, pois o processo de injeção passa a estar relacionado com esta temperatura. Assim, optou-se pela colocação de quatro termopares o mais próximo possível da superfície, paralelamente a esta. Os termopares seleccionados para o molde foram termopares do tipo K, TC 402, fornecidos pela Resitec, estes vão permitir ter uma leitura da temperatura do molde até um máximo de 400°C durante o funcionamento do sistema de aquecimento. Os locais seleccionados para leitura de temperatura, correspondem à zona central de cada um dos provetes. Os furos efetuados permitiram colocar os termopares a 2.5 mm da superfície. Na

Figura 27 pode-se ver o local onde foram feitos os furos, assim como os pontos onde se pretende obter a leitura da temperatura.

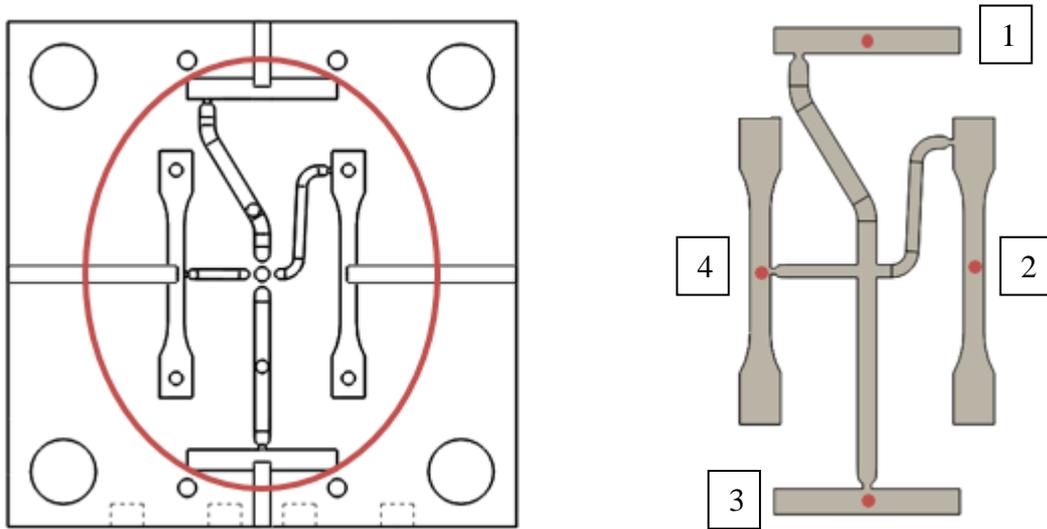


Figura 27 - Desenho 2D da parte móvel do molde (vista de frente) e pontos de leitura da temperatura (pontos vermelhos).

É importante saber a temperatura em toda a cavidade, pois pretende-se obter uma temperatura uniforme, algo difícil de alcançar devido à tecnologia selecionada, porque esta, como referido na literatura, tem como desvantagem obter a uniformidade pretendida. Assim a leitura em quatro pontos diferentes da superfície da cavidade permite observar a diferença de temperaturas entre respetivos locais.

3.3.4 Manipulador pneumático

No presente trabalho, recorreu-se à utilização de um manipulador cartesiano pneumático, PIKO, fabricado pela Asitech e disponível no Centro de Ciência Viva, em Guimarães. Este tipo de equipamento, é normalmente utilizado para remoção de peças plásticas e separação de jitos, na indústria de plásticos. Este manipulador apresenta movimentos, nos três eixos cartesianos, eixo do X, eixo do Y e eixo do Z, que podem ser ajustados, para a aplicação que se pretende. No presente caso, aproveitou-se as funções do manipulador para aproximar as lâmpadas da superfície do molde de modo eficaz e automático.



Figura 28 - Manipulador pneumático de três eixos e respetivos comando de controlo dos movimentos.

O movimento utilizado, foi um movimento vertical, mantendo os outros dois eixos fixos, e assim procedeu-se a pequenos ajustes manuais de modo a minimizar a distância das lâmpadas à superfície do molde. Para o ajuste do curso que o robô foi necessário ajustar os limitadores, que funcionam como batentes e limitam assim o curso dos movimentos. Na Figura 28 pode-se observar o braço robótico de três eixos e o respetivo comando. Quando delimitado o curso que o manipulador pneumático deve fazer, pode-se controlar os movimentos através de um comando que possibilita o controlo de todos os movimentos e, ao mesmo tempo, tem interface com a máquina de injeção. A sequência de movimentos, a ativação e desativação dos mesmos são também controlados por um comando.

3.4 Construção do sistema RHCM

O sistema RHCM de lâmpadas de halogéneo será integrado no manipulador pneumático referido no subcapítulo anterior. Nessa medida foi desenvolvido um desenho CAD em 3D do suporte de lâmpadas no programa *SolidWorks*, permitindo prevenir qualquer problema que posteriormente possa surgir na montagem.

O desenho do sistema de suporte lâmpadas é relativamente simples, englobando um braço, o suporte das lâmpadas e um circuito elétrico que permite ligar e desligar as lâmpadas; como se pode observar na Figura 29.

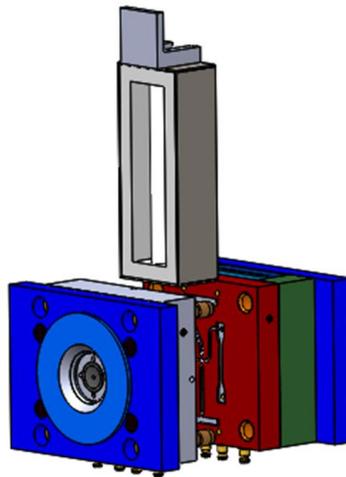


Figura 29 – Desenho CAD do suporte de lâmpadas e molde projetados.

3.4.1 Lâmpadas de Halogéneo

As lâmpadas de halogéneo são parte fundamental do sistema de aquecimento da superfície do molde transmitindo calor por radiação infravermelha. As lâmpadas selecionadas para o estudo foram lâmpadas de 1000 W (a 230V) cada uma, fabricada pela Ceflar. Cada lâmpada tem 180 mm de comprimento de zona de aquecimento, 11 mm de diâmetro e pode atingir temperaturas superiores a 2000°C, ver Figura 30. Estas lâmpadas com tubos de quartzo emitem mais energia por unidade de área em relação às fontes de calor mais tradicionais e a energia pode ser focada, concentrada e dirigida até uma determinada posição.



Figura 30 - Lâmpada de halogéneo para emissão de radiação IV.

3.4.2 Suporte das lâmpadas

Após a seleção das lâmpadas foi necessário projetar o suporte de lâmpadas com as dimensões necessárias para o acoplamento apropriado de duas unidades com 1000W cada. Este

componente será deslocado para uma zona intermédia entre as duas placas do molde no momento da sua abertura havendo a possibilidade de embater nas guias do molde localizadas nessa região. Portanto a condição anteriormente referida condicionou as dimensões definidas para o suporte de lâmpadas de modo a evitar qualquer obstáculo ao seu movimento. O suporte tem a geometria de um prisma retangular de dimensões 201,80 x 80 x 50 mm³, aberto no meio, onde as lâmpadas são colocadas em locais maquinados para esse efeito, ver Figura 31.

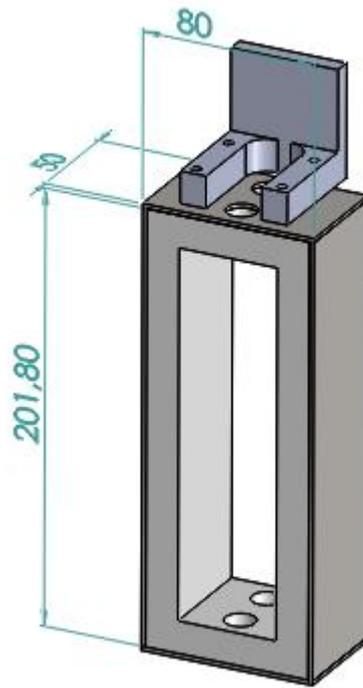


Figura 31 - Desenho 3D em SolidWorks do suporte de lâmpadas e respectivas dimensões exteriores.

3.4.3 Sistema elétrico

O sistema elétrico foi dimensionado tendo em conta o número máximo de lâmpadas, 2 na totalidade, o que perfaz uma potência total de 2000 W (2 x 1000W). Optou-se pela seleção de um circuito monofásico.

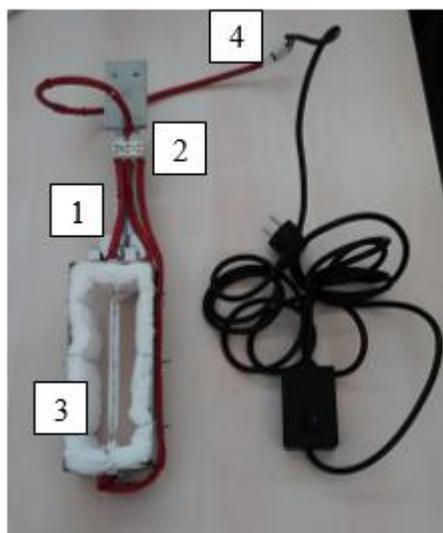


Figura 32 - Cabo de secção de 1,5 mm² sem cobre e revestido com fibra de vidro/silicone (1), bornes cerâmicos (2), lâmina cerâmica (3) e ponteiros integralmente metálicos (4).

A construção do sistema elétrico teve em consideração as altas temperaturas emitidas pelas lâmpadas durante o processo de aquecimento da superfície do molde utilizando-se material apropriado nas zonas expostas ao calor. Portanto na construção do sistema utilizou-se um cabo de secção de 1,5 mm² sem cobre e revestido com fibra de vidro/silicone, bornes cerâmicos, lâmina cerâmica nas zonas do suporte expostas à radiação e ponteiros integralmente metálicos. A Figura 32 apresenta os componentes anteriormente mencionados.

O circuito monofásico é constituído por uma fase elétrica (L1), um neutro (N) e a terra (E) integrados fisicamente no borne cerâmico. O interruptor está ligado à fase (L1), conectando ou desconectando o circuito à rede. O circuito integra duas lâmpadas de 1000W cada (I.R.1 e I.R.2), ligadas em paralelo tendo em comum dois nós, o nó 1 ligado ao interruptor SW1 e o nó 2 conectado ao neutro N, como é possível observar no desenho do circuito elétrico da Figura 33. Esta forma de ligação permite o funcionamento independente de cada lâmpada, isto é, caso uma funda, ou seja, removida a passagem da corrente por uma ou outra lâmpada estará sempre garantida. As lâmpadas estão acopladas a um suporte metálico que devido à natureza do material também conduz corrente elétrica. Por norma de segurança ligou-se o suporte metálico à terra (E) para escoar qualquer sobrecarga elétrica passível de surgir durante o funcionamento do circuito elétrico.

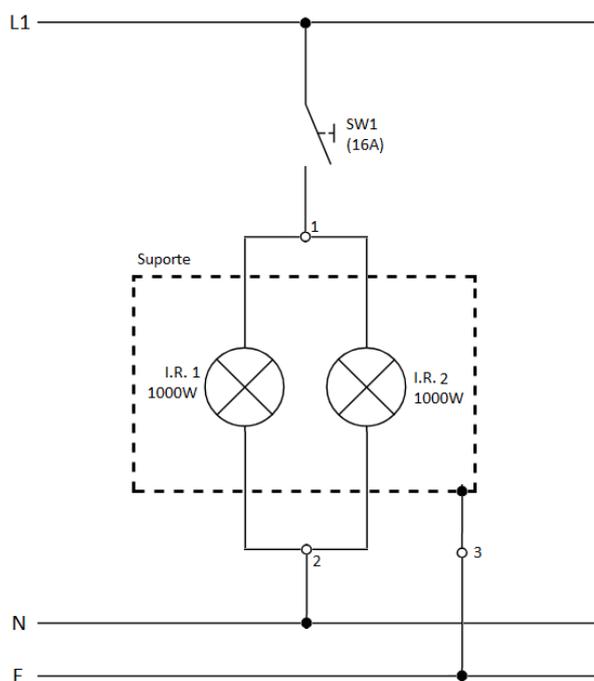


Figura 33 - Desenhos do sistema elétrico das ligações com 2 lâmpadas.

3.4.4 Sistema de monitorização da temperatura

O plano de injeções inclui quatro temperaturas da superfície do molde diferentes 40, 80, 120, e 140 °C sendo o controlo rigoroso da temperatura da superfície do molde de extrema importância no processo de injeção dos provetes, tendo em conta que este parâmetro e a sua influência nas propriedades da peça é um dos objetos de estudo deste trabalho. As tecnologias de medição da temperatura do molde inicialmente selecionadas foram a câmara termográfica e logicamente os termopares inseridos no molde, uma vez que o projeto do mesmo previa a incorporação destes. As medições com estas duas tecnologias apresentaram falhas e deste modo recorreu-se a outros métodos de medição. Testaram-se ao todo quatro tecnologias de medição de temperatura observando-se graus de incerteza diferentes: câmara termográfica, termopares, termómetro de laser e termómetro de contacto (Figura 34). Selecionou-se o método de medição considerado mais próximo da realidade e com maior grau de certeza.

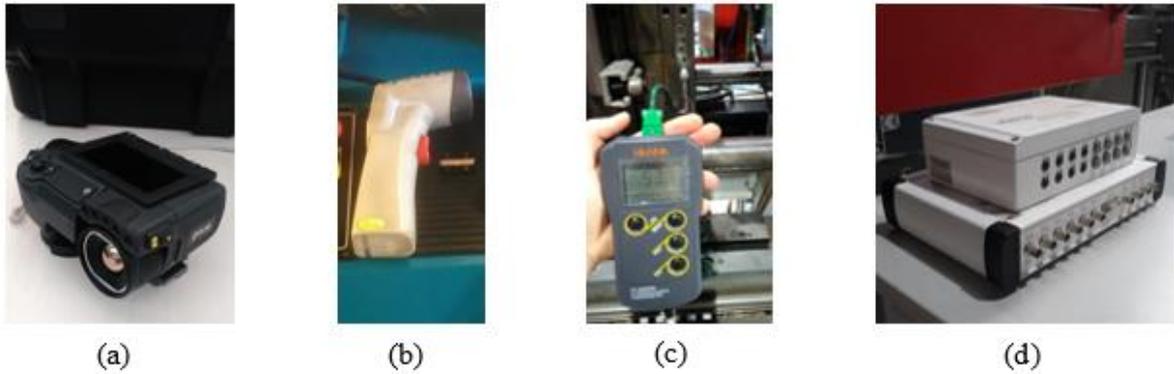


Figura 34 - Tecnologias de medição de temperatura: (a) câmara termográfica, (b) termómetro de laser, (c) termómetro de contacto e (d) sistema de aquisição de dados de temperatura do termopar.

Câmara termográfica e termómetro a laser

Todos os objetos emitem energia infravermelha, conhecida como assinatura de calor. Uma câmara infravermelha deteta e mede a energia infravermelha dos objetos. A câmara converte os dados infravermelhos numa imagem eletrónica que mostra a temperatura aparente da superfície do objeto medido. O princípio de funcionamento anteriormente descrito é o mesmo para o termómetro a laser diferindo apenas o display das leituras; no primeiro é apresentado o valor da temperatura de um ponto enquanto no segundo método é apresentado uma matriz de cores cada uma correspondendo a uma temperatura num ponto.

De facto, antes da realização deste estudo considerou-se que esta tecnologia seria a melhor para medir a temperatura à superfície dos corpos. Na realidade verificou-se que havia variação nas medições consoante a posição que a câmara era colocada em relação à superfície do molde e também com a presença e ausência das lâmpadas de halogéneo.

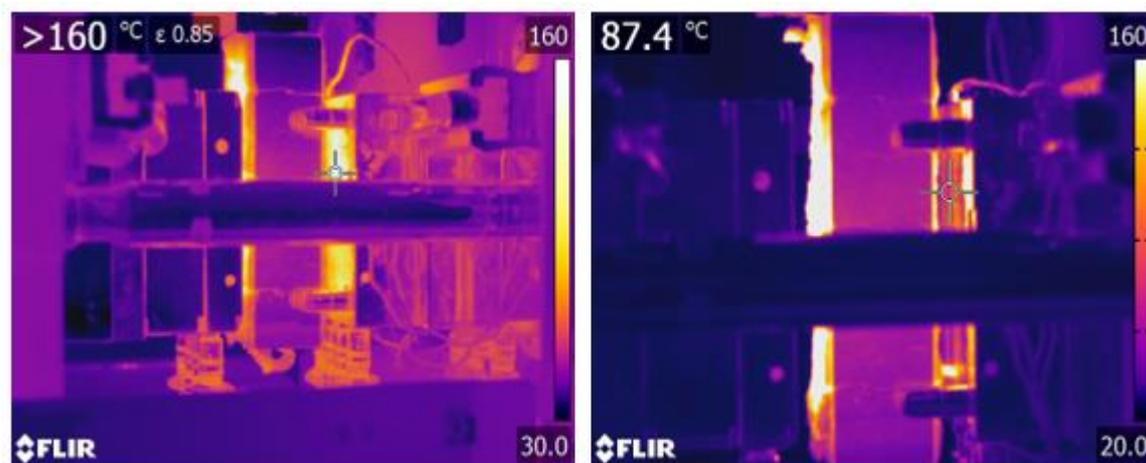


Figura 35 - Variação dos valores da temperatura da superfície do molde alterando o ângulo de medição.

A superfície do molde é de aço com um certo polimento e devido a essa característica do material há radiação das lâmpadas que é refletida e posteriormente detetada pelos sensores da câmara. A quantidade de radiação refletida que chega à câmara depende do ângulo que esta faz com a superfície do molde e por conseguinte registou-se grande disparidade de valores de temperatura consoante a posição da mesma, como se pode observar na Figura 35.

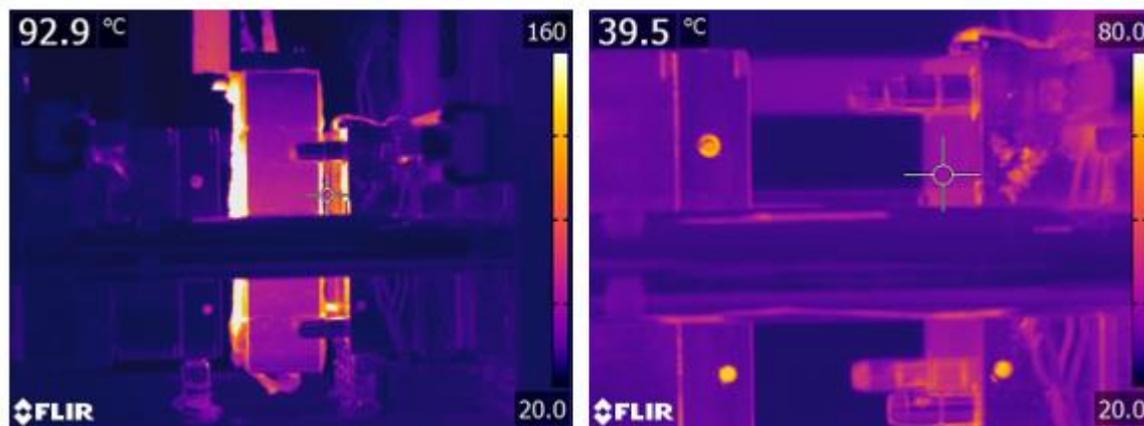


Figura 36 - Variação dos valores da temperatura da superfície do molde com a presença e ausência das lâmpadas de halogéneo.

A leitura registada pela câmara termográfica fixando um ponto da superfície de molde com a presença das lâmpadas de halogéneo é diferente do que com a ausência destas para o mesmo ponto, Figura 36. Este facto e o anteriormente referido contribuíram para descartar estas duas tecnologias de medição de temperatura para o controlo da temperatura da superfície do molde durante a execução do plano de injeções.

Termómetro de contacto

Um termómetro de contacto é um dispositivo de medição de temperatura que opera em contacto direto entre a extremidade magnética do termómetro e a superfície do material de aço a uma temperatura desconhecida a ser determinada. Neste caso para medir a temperatura à superfície do molde utilizou-se uma extremidade achatada com o objetivo de maximizar o contacto entre as duas superfícies e conseqüente obter uma leitura mais exata. O molde foi aquecido até aproximadamente $78 \pm 3^\circ\text{C}$, medição efetuada pelos termopares colocados no interior do molde a 2,5 mm da superfície da aquecida, através da circulação de fluido circulante a 80°C aquecido pelo termorregulador. Após deixar estabilizar a temperatura do molde durante 15 minutos procedeu-se à medição da temperatura da superfície do molde com o termómetro de contacto, registando-se uma temperatura de $61,5^\circ\text{C}$ (Figura 37).



Figura 37- Medição da temperatura à superfície do molde com o uso do termómetro de contacto.

Termopares

Os termopares são sensores compostos por dois metais que geram forças eletromotrizes ou tensão elétrica quando há diferenças de temperatura entre eles (efeito Seebeck). A quantidade de tensão produzida é aproximadamente proporcional à diferença de temperaturas entre as duas junções.

Para a leitura da evolução da temperatura da superfície recorreu-se ao equipamento aquisição de dados Priamus Toll Box. Este sistema é composto por duas unidades portáteis de medição, Figura 38, onde se conectou os quatro termopares. Os termopares foram ligados às unidades físicas que têm uma interface com o computador, onde são transmitidos sinais diretamente da unidade de medição para o computador, permitindo assim ter o controlo em tempo real da temperatura nos quatro locais seleccionados.



Figura 38 -Sistema de aquisição de dados de temperatura Priamus para leitura dos termopares.

Os termopares foram colocados no interior do molde a 2,5mm da superfície do molde segundo as posições na Figura 27 da secção 3.2.3 Molde. As temperaturas registadas pelos termopares aquando da utilização do termorregulador para aquecimento do molde aproximavam-se bastante da temperatura de 80°C imposta pelo mesmo havendo uma diferença de apenas 2 a 3°C, ver Figura 39.

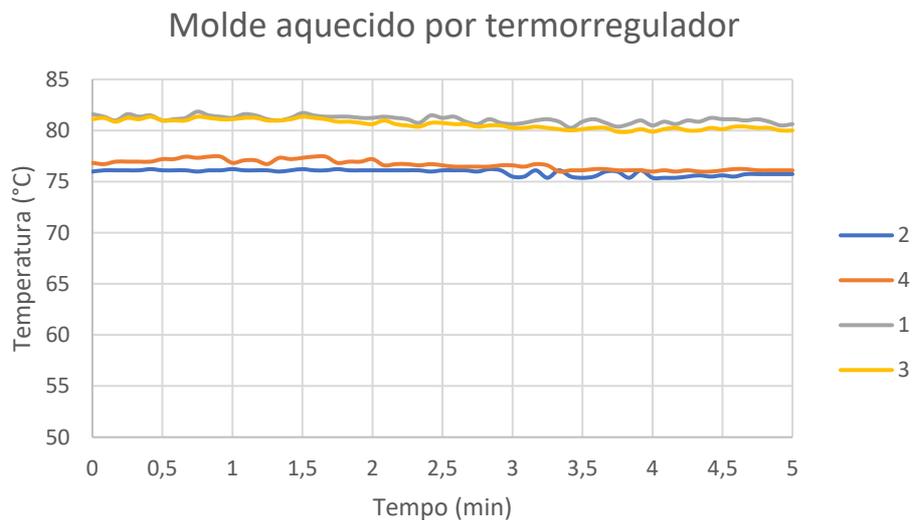


Figura 39 - Variação da temperatura do molde registada pelos termopares ao longo do tempo. Molde aquecido por termorregulador a 80°C.

Nas condições de processamento em que se pretendia atingir os 120°C de temperatura da superfície do molde utilizaram-se as lâmpadas de halogéneo como tecnologia de aquecimento após um aquecimento previamente realizado pelo termorregulador até aos 80°C, desligando-se este sistema a essa temperatura transitando-se exclusivamente para o aquecimento por radiação IV. Os termopares colocados no interior do molde registaram uma variação mínima ao longo de 10 minutos de aquecimento do molde realizado pelas lâmpadas como se pode observar no gráfico da Figura 40.

Apesar das perdas de energia devido à distância de 15mm entre as lâmpadas e a superfície moldante que se pretende aquecer, esperava-se um incremento de temperatura superior ao verificado, no longo intervalo tempo de aquecimento, e por essa razão este método de medição de temperatura com os termopares no interior do molde foi rejeitada.

Molde aquecido por lâmpadas

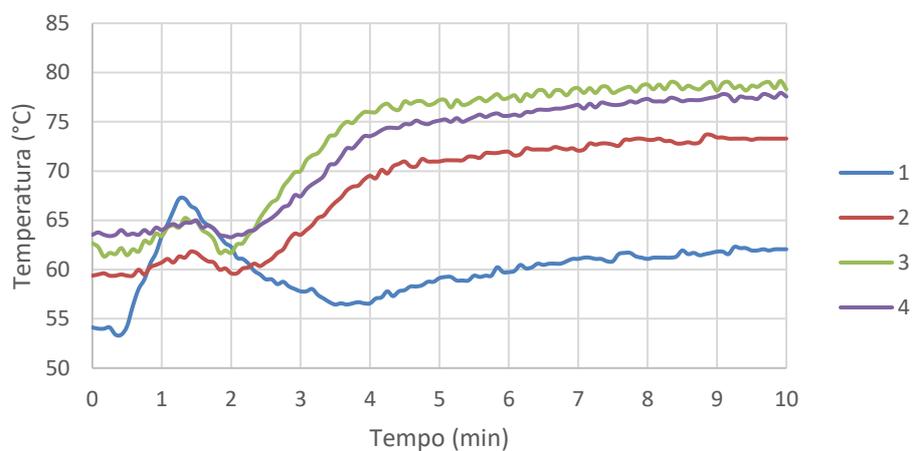


Figura 40 - Variação da temperatura do molde registada pelos termopares ao longo do tempo. Molde aquecido por lâmpadas de halogéneo.

A solução encontrada foi retirar o termopar na posição um e coloca-lo a medir a temperatura no exterior em paralelo com a superfície do molde aquecida e à mesma distância que esta das lâmpadas de radiação infravermelha, como demonstrado nas imagens da Figura 41.



Figura 41 – Termopar da posição um colocado no exterior do molde paralelamente ao suporte de lâmpadas.

A temperatura medida será assumida como sendo a temperatura da superfície do molde aquecida por este sistema de aquecimento. No gráfico da Figura 42, deve-se destacar em particular a variação da temperatura do termopar número um quando se pretende aquecer a superfície do molde até aos 120°C utilizando as lâmpadas de radiação IV.

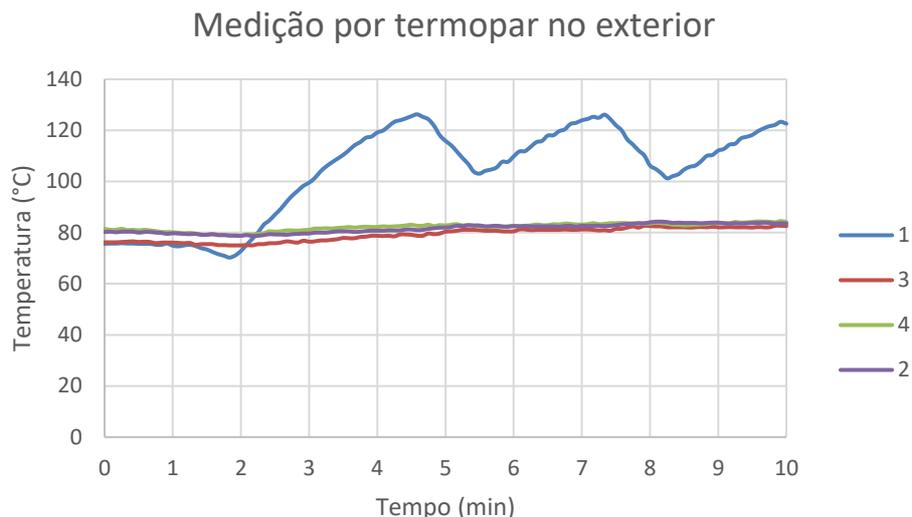


Figura 42 - Gráfico de variação da temperatura do molde registada pelos termopares ao longo do tempo. Molde aquecido por lâmpadas de halogéneo utilizando termopar norte no exterior.

De todas as soluções de medição e controlo da temperatura da superfície do molde ao dispor, considera-se que a utilização do termopar no exterior do molde é o método que mais se aproxima da realidade.

3.5 Montagem e funcionamento do sistema RHCM

O passo seguinte ao desenvolvimento e produção dos componentes que integram o sistema de RHCM selecionado é a sua montagem. O local disponibilizado e com todas as condições necessárias à montagem dos componentes e injeção das peças através do sistema RHCM por lâmpadas de halogéneo foram as instalações do CVV, em Guimarães.

A primeira etapa foi substituir o molde anteriormente montado, na injetora a utilizar, pelo molde do projeto de tese desenvolvido de acordo com os dados técnicos da Boy 22M. Concluída a colocação do molde conectou-se-lhe o termorregulador através do encaixe de mangueiras entre estes dois componentes. Possibilitando a circulação de um líquido de refrigeração nos canais maquinados do molde com uma temperatura imposta pelo termorregulador controlando assim a temperatura do molde por este método, ver Figura 43.

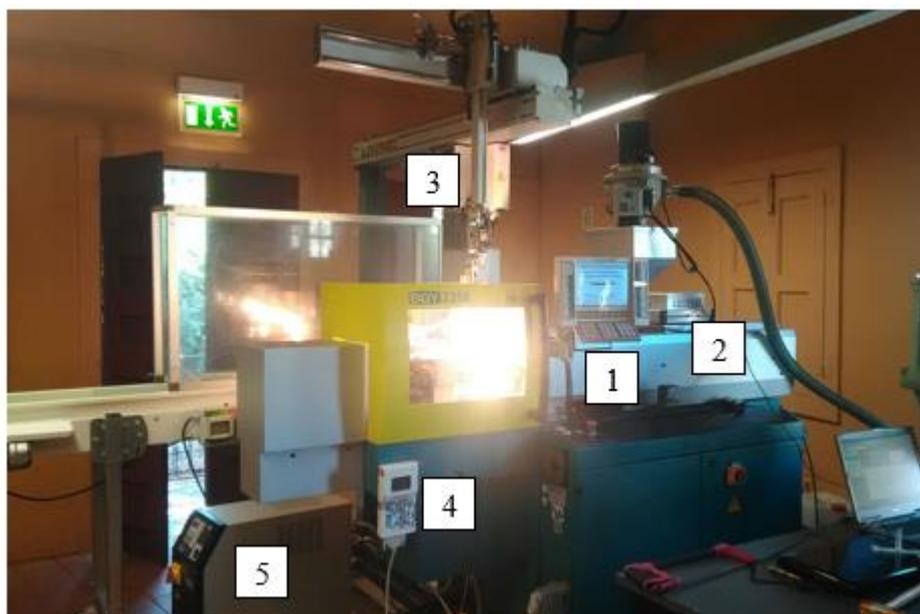


Figura 43 - Equipamento de controlo necessário para o funcionamento do sistema RHCM: (1) Interface injetora, (2) Sistema Priamus, (3) Suporte de lâmpadas, (4) Controlador manipulador pneumático, (5) Termorregulador

Posteriormente fixou-se o suporte das lâmpadas ao manipulador pneumático, através de parafusos, e ajustou-se os limitadores dos três eixos, delimitando o percurso a efetuar, de modo a obter apenas um movimento de subida e descida do sistema RHCM. Neste caso, o limitador do eixo do Y, foi colocado ao máximo, impedindo assim o movimento nesse eixo.



Figura 44 - Representação dos 3 eixos do manipulador pneumático.

O limitador do eixo do X, foi colocado de modo a aproximar ao máximo as lâmpadas da superfície do molde definindo-se uma distância de 15 mm das placas do molde em relação ao suporte das lâmpadas evitando-se qualquer contacto resultante da vibração induzida pela deslocação deste componente. Por último o limitador do eixo do Z foi posicionado de maneira a que o conjunto das lâmpadas ficasse bem centrado em relação à superfície do molde a aquecer. Os três eixos de movimentos possíveis manipulador pneumáticos estão definidos na imagem

da Figura 44. A instalação do sistema de aquisição de dados de temperatura dos termopares inseridos no molde para registo da temperatura do molde realizou-se posteriormente.

Tabela 4 - Temperaturas de injeção e da superfície do molde.

Ensaio	Temperatura de Injeção	Temperatura do Molde
A	200°C	40°C
B		80°C
C		120°C
D		140°C
E	230°C	40°C
F		80°C
G		120°C
H		140°C

O método de aquecimento da superfície do molde variava consoante as temperaturas da superfície do molde definidas. Tentou-se repetir as condições anteriormente testadas com o sistema de RHCM protótipo, mas, devido à incapacidade de se atingir a temperatura da superfície do molde de 160°C aqueceu-se apenas até aos 140°C; aqueceu-se também a 80°C para encurtar a grande diferença de temperaturas entre os 40 e 120°C e consequentemente estudar a diferença de propriedades obtidas. A temperatura de injeção do polipropileno de 200 e 230°C foi definida considerando a temperatura de injeção recomendada pelo fabricante, mencionada no subcapítulo posterior. As temperaturas de injeção e da superfície do molde utilizadas podem ser observadas na Tabela 4.

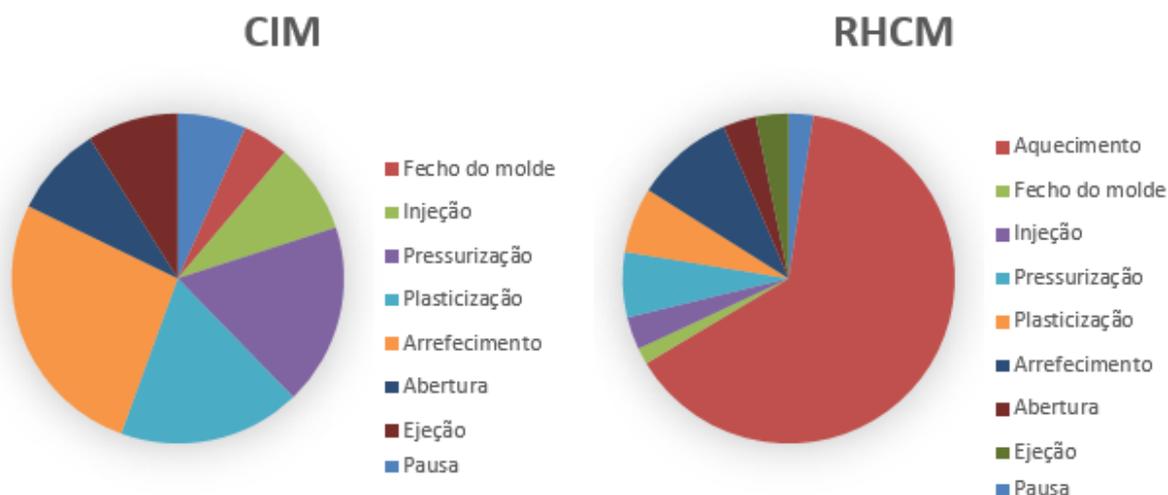


Figura 45 - Ciclo de injeção do método CIM (à esquerda) e RHCM (à direita).

O procedimento utilizado para a injeção dos provetes injetados à temperatura do molde de 40 e 80°C é semelhante ao tradicional em que a temperatura do molde é constante durante todo o ciclo de injeção, utilizando-se o termorregulador como tecnologia de aquecimento prévio do molde manteve-se as respectivas temperaturas durante o arrefecimento.

O ciclo de moldação por injeção com o sistema RHCM engloba mais uma etapa em relação ao método tradicional CIM nomeadamente a etapa de aquecimento da superfície do molde. O tempo total do ciclo de injeção registado para os dois métodos são 45s no método de injeção tradicional e 2m45s no método de injeção RHCM, respetivamente. O aumento significativo do tempo de ciclo no último método deve-se sobretudo ao tempo de aquecimento da superfície do molde utilizando as lâmpadas de halogéneo ocupando quase 2/3 do tempo do ciclo de injeção (Figura 45).

Nos restantes provetes injetados com temperatura do molde de 120 e 140°C o molde é aquecido com auxílio do termorregulador até aos 80°C num primeiro momento, desligando-se ao atingir esta temperatura e passando-se a aquecer o molde com as lâmpadas de halogéneo até se atingir os 120 e 140°C, respetivamente. O suporte de lâmpadas é deslocado verticalmente para fora da zona intermédia das placas, o molde fecha, o material é injetado, a segunda pressão é aplicada e o arrefecimento é realizado sem nenhuma intervenção das tecnologias de aquecimento utilizadas. O molde seguidamente abre, as peças são ejetadas e as lâmpadas são novamente deslocadas para baixo para iniciar um novo ciclo injeção. A sequência de movimentos do suporte lâmpadas pode ser observado na Figura 46.

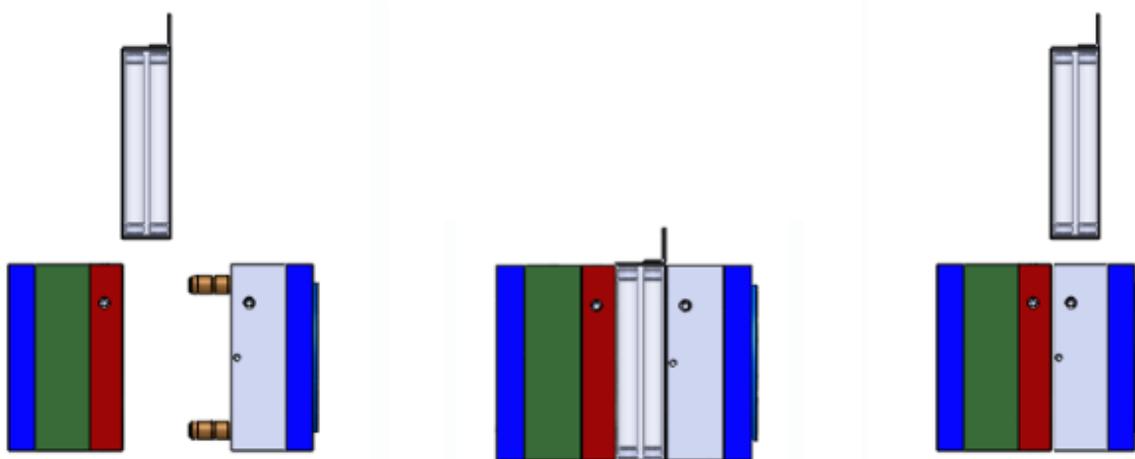


Figura 46 - Sequência do processo de aquecimento: abertura do molde (à esquerda), descida do sistema de aquecimento (ao centro), por fim subida do sistema e fecho do molde (à direita).

3.6 Material

3.6.1 Polipropileno, PP

No presente estudo, utilizou-se o termoplástico, Polipropileno (PP), com o grade SABIC® PP 579S, fornecido pela Augusto Guimarães & Irmão Lda. Este grade, caracteriza-se por ser um polipropileno homopolímero, com excelentes propriedades de fluxo, uma alta rigidez e baixa tendência para empenamento. Na Tabela 5 pode-se observar algumas das características do grade do material (mais detalhes nas fichas técnicas, Anexo 1).

Tabela 5- Características do homopolímero SABIC® PP 579S.

Características	Valor	Unidade
Massa volúmica	905	kg/m ³
MFI	47	g/10min
Temperatura de processamento	200 - 250	°C
Tensão de cedência	35	MPa
Resistência ao impacto	3	kJ/m ²
Aparência	Grânulos	

3.7 Injeção de peças plásticas

O intuito do presente trabalho de dissertação é estudar as propriedades mecânicas das peças injetadas relaciona-las com as condições de processamento e sustentar os resultados com ensaios de caracterização ótica e térmica. Consequentemente as peças injetadas foram provetes de impacto e tração, representadas na Figura 47.

As primeiras peças a serem injetadas foram os provetes de impacto e desde logo verificou-se que apresentavam defeito de vazios. Alterou-se parâmetros de injeção, pressões (2º pressão e contrapressão), velocidade de injeção e aumentou-se a temperatura do molde. O melhor que se conseguiu foi com o molde a 60°C. A peça saía sem defeito num primeiro momento, mas após arrefecer algum tempo os vazios voltavam a surgir.

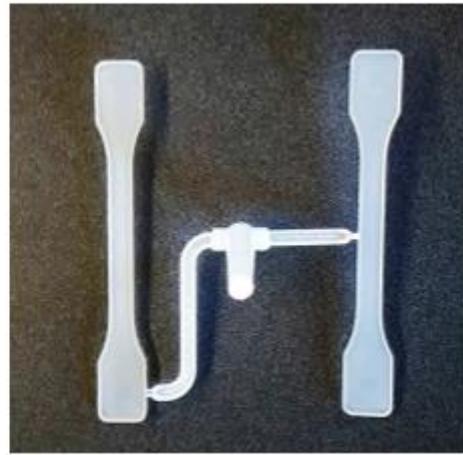
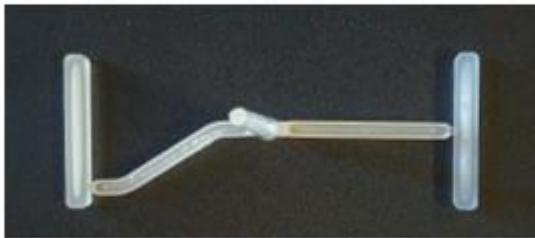


Figura 47 - Provetes de impacto (esquerda) e de tração (direita) injetados.

Realizou-se um arrefecimento mais rápido colocando os provetes numa bacia com água e gelo e o defeito continuou a persistir. O defeito de vazios pode ser observado com mais detalhe na Figura 48. Desta forma passou-se para a injeção dos provetes de tração e descartou-se a injeção de provetes de impacto.

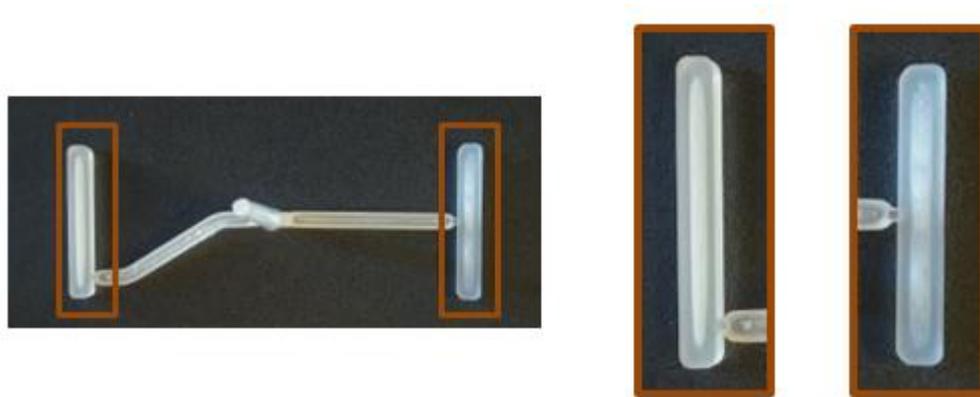


Figura 48 - Defeito de vazios verificado nos provetes de impacto injetados.

Os provetes de tração injetados inicialmente apresentavam o mesmo defeito, mas com a alteração dos parâmetros de injeção alcançou-se peças sem defeito. Observou-se que à medida que se aumentava a temperatura do molde iam aparecendo vazios e, portanto, foi necessário reajustar contrapressão e segunda pressão de injeção. O tempo de arrefecimento da peça definido também aumentou naturalmente com o aumento da temperatura do molde. Na tabela 6 é possível observar os parâmetros modificados ao longo da execução do plano de injeções. O controlo da qualidade da moldação foi realizado através do peso das peças injetada. O peso é aproximado constante ao longo do processo rondando 0,890g.

Tabela 6 - Plano de injeções dos provetes de tração e condições de processamento.

Condições	1	2	3	4	5	6	7	8
Temperatura de injeção (°C)	200	230	230	230	200	200	200	230
Temperatura do molde (°C)	40	40	120	80	80	120	140	140
Tempo de arrefecimento (s)	7	7	30	30	30	30	30	30
Lâmpada IR	sem	sem	com	sem	sem	com	com	com
Contrapressão (bar)	0	0	15	15	15	15	15	15
2ª Pressão (bar)	40	40	20	20	20	20	20	20

3.8 Caracterização das moldações

Na caracterização das moldações estudar-se-á a microestrutura das peças injetadas através da análise da espessura da casca e do grau de cristalinidade. O somatório de todos os fatores relevantes nas propriedades mecânicas, particularmente que afetam a resistência à tração dos provetes injetados, serão expressas pelos resultados do ensaio respetivo.

3.8.1 Caracterização morfológica

Espessura da casca

As propriedades óticas dos plásticos dependem do material específico do polímero ou copolímero, da formulação (corantes, cargas e outros aditivos) e da cristalinidade dos materiais. Mas também processos de degradação mecânicos e químicos, as condições mecânicas e tratamentos de temperatura aplicados durante o processamento influenciam as propriedades óticas de polímeros.

Os ensaios de microscopia ótica dos polímeros permitem observar as microestruturas das peças injetadas e através da sua compreensão é possível determinar qual o fenómeno físico ou

químico por detrás da característica observada. Existem diferentes tipos de ensaios de microscopia ótica e cada um permite observar características distintas das peças.

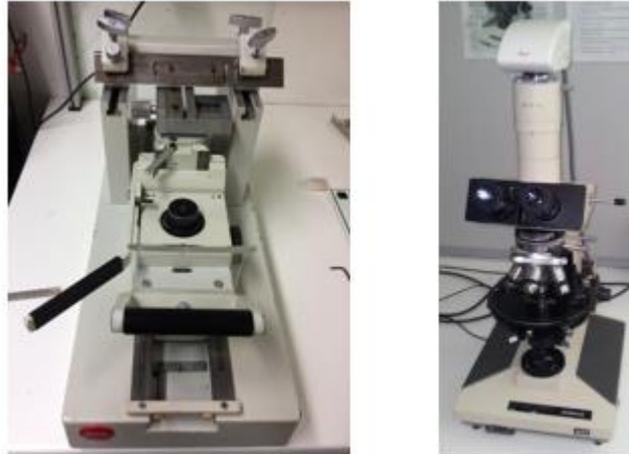


Figura 49 - Micrótomo Leitz 1401 (à esquerda) e Microscópio de Transmissão Olympus (à direita).

A microscopia de luz polarizada é um método útil para gerar contraste em amostras birrefringentes e para determinar aspetos qualitativos e quantitativos de eixos cristalográficos presentes em vários materiais.

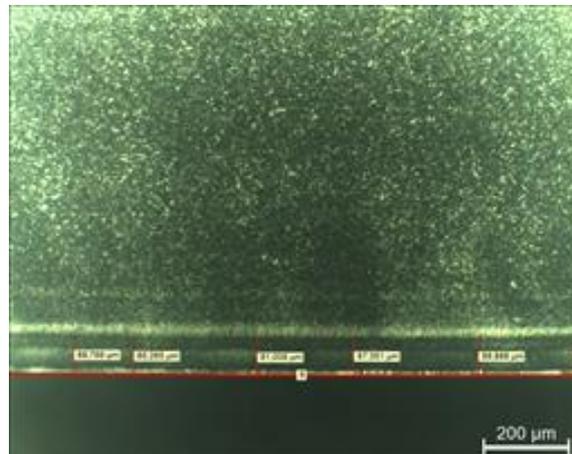


Figura 50 - Medição da espessura da casca através do ensaio de microscopia de luz polarizada.

Neste estudo pretendeu-se medir a espessura da casca da peça injetada (Figura 50) realizando-se os ensaios de microscopia de luz polarizada. O estudo microscópico foca-se na casca porque deduz-se que é uma microestrutura que tem um peso relevante nas propriedades mecânicas da peça, nomeadamente na tensão e deformação de cedência obtidos pelo ensaio de tração.

Para a realização deste tipo de ensaios, é necessário a preparação de amostras. As amostras foram cortadas recorrendo a um Micrótopo Leitz 1401, Figura 49, onde foi possível obter amostras com espessura de 15 μm , cortando secções perpendiculares à largura do provete e colineares com a direção do fluxo dos provetes de tração, observadas na Figura 51. Posteriormente esta é colocada numa lâmina de vidro, com balsamo de Canadá. Depois é prensada de modo a eliminar bolhas e seguidamente analisada no microscópio.

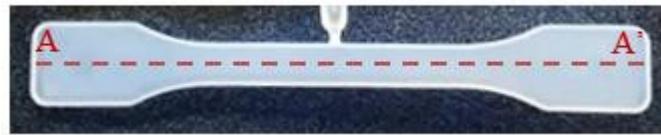


Figura 51 - Representação pela linha a tracejado do corte efetuado no provete de tração para obtenção da amostra.

Grau de cristalinidade

A análise DSC mede a quantidade de energia absorvida ou libertada por uma amostra quando aquecida ou arrefecida, fornecendo dados quantitativos e qualitativos sobre processos endotérmicos (absorção de calor) e exotérmicos (libertação de calor). Permite medir a variação de entalpia de fusão dos polímeros e a partir daí é possível calcular o seu grau de cristalinidade. Através do cálculo deste último dado, pretende-se observar uma relação entre os resultados dos ensaios mecânicos de tração e a percentagem de estruturas cristalinas existentes na peça.

$$\chi_c = \frac{\Delta H_{\text{registado}}}{\Delta H_{\text{PP}}^*} \times 100 \quad (1)$$

Onde $\Delta H_{\text{registado}}$ é o calor de fusão da amostra e ΔH_{PP}^* é calor de fusão do PP 100% cristalino.

A realização do ensaio de DSC e obtenção da entalpia de fusão seguiu a norma ISO11357-3. Realizou-se o corte da amostra removendo uma secção do provete de tração na zona intermédia, entre a localização dos dois ataques (centro e extremo), uma vez que aí a orientação do fluxo é semelhante, Figura 52. No programa de temperaturas definiu-se uma temperatura inicial do ensaio de 30°C imposta durante um minuto e posteriormente aumentou-se até aos 200°C à velocidade de 10°C/min durante dezassete minutos.



Figura 52 - Preparação da amostra. Corte da amostra entre a zona intermédia dos dois ataques.

Elevando-se a temperatura acima da temperatura de fusão do polipropileno foi possível obter a entalpia de fusão através da área abaixo do pico exotérmico, Figura 53, calculando-se o grau de cristalinidade pela Equação 1.

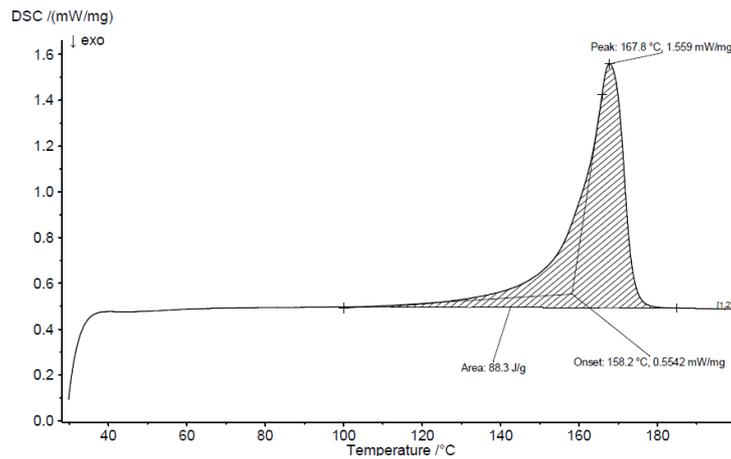


Figura 53 - Curva do comportamento térmico do polipropileno.

O material e equipamento utilizados para a realização do ensaio de DSC estão abaixo mencionados. Os equipamentos estão representados na Figura 54.



(a)



(b)



(c)

Figura 54 -Equipamento utilizado: (a) Balança, Perkin-Elmer, AD-4 Autobalance, (b) Prensa de cadinho, Netzsch e (c) DSC, Netzsch 200 F3 Maia.

3.8.2 Caracterização mecânica

O comportamento mecânico de plásticos sujeitos a cargas durante intervalos de tempo curtos pode ser estudado ensaiando-os à tração uniaxial em condições normalizadas; estes ensaios são realizados com velocidade de deslocamento (ou deformação) constante.



Figura 55 - Máquina de tração Zwick/Roell Z005.

Os ensaios de tração realizaram-se seguindo a norma ISO 20753 na máquina de tração Zwick/Roell Z005, Figura 55. Neste ensaio, fizeram-se dez testes para cada uma das condições, a uma velocidade de 25 mm/s, e 40 mm de distância entre amarras. Este foi realizado à temperatura ambiente.

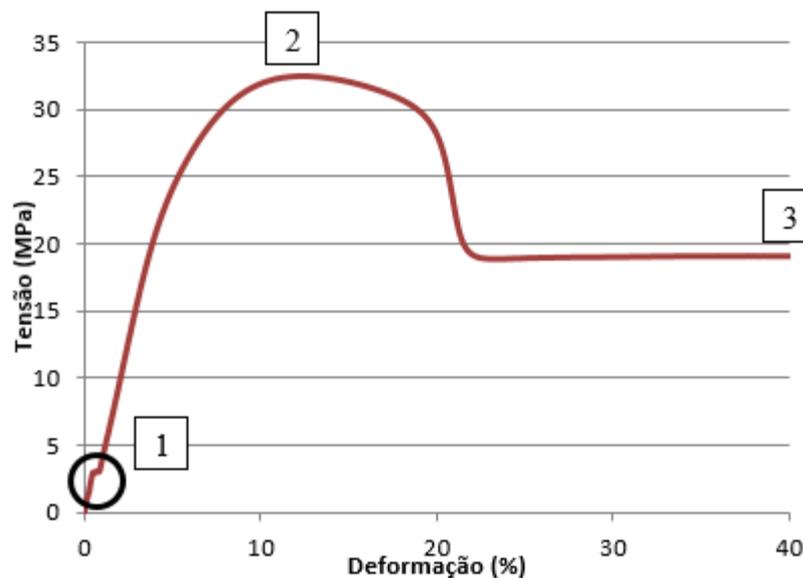


Figura 56 - Gráfico do comportamento mecânico de um polímero, (1) zona aproximada da determinação do módulo de elasticidade, (2) tensão de cedência, (3) tensão de rotura.

O ensaio de tração tem particular interesse neste trabalho de dissertação pois expressa sob a forma do comportamento mecânico da peça o resultado da soma de todos os fatores que sob alguma forma influenciaram as condições do seu processamento, tais como, parâmetros de processamento, meio ambiente, localização do ataque etc. O comportamento mecânico descrito por cada conjunto de amostras processadas nas mesmas gamas de temperatura de injeção e de temperatura do molde serão posteriormente sustentadas com os ensaios de óticos e térmicos.

A curva de comportamento mecânico obtida pelo ensaio de tração fornece dados de propriedades mecânicas importantes, tais como, módulo de elasticidade, tensão de cedência, deformação de cedência, tensão de rotura e a correspondente deformação de rotura. A tensão de cedência e de rotura e as deformações correspondentes, são valores possíveis de retirar diretamente da curva descrita pelo material representados pelos números 2 e 3 na Figura 56. O módulo de elasticidade é obtido indiretamente calculando o declive da reta a 0,2% de deformação, aproximadamente na zona delimitada pelo círculo sinalizado pelo número 1 na Figura 56. A determinação do módulo de elasticidade é pouco confiável devido à existência de escorregamento da amostra presa pelas amarras no início do ensaio tração, descrevendo aquele espécie de degrau na curva do gráfico da Figura 56.

Neste trabalho de dissertação considerou-se importante analisar as propriedades mecânicas do material na fase elástica deste, isto é, a fase na qual o material recupera as suas dimensões originais após retiradas dos esforços externos sobre ele. Analisou-se a tensão de cedência e a deformação respetiva descartando-se o módulo de elasticidade devido à variabilidade do seu valor.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho de dissertação injetou-se provetes de tração sob diferentes parâmetros de processamento variando-se as temperaturas de injeção e da superfície do molde. A localização do ataque, no meio ou num dos extremos de cada provete respectivo, é uma condição imposta pelo desenho dos canais de alimentação da peça e é uma variável analisada ao longo deste estudo.

No capítulo anterior afirmou-se que o ensaio de tração expressa sob a forma do comportamento mecânico da peça o resultado da soma de todos os fatores que sob alguma forma influenciaram as condições do seu processamento, tais como, parâmetros de processamento, meio ambiente, localização do ataque etc, e posteriormente sustentar-se-ia os resultados com os ensaios de óticos e térmicos. Os dois últimos tipos de ensaios anteriormente referidos permitem tirar conclusões sobre a microestrutura dos provetes injetados, espessura da casca e grau de cristalinidade.

4.1 Propriedades mecânicas

Os ensaios de tração realizados aos provetes de tração injetados permitiram analisar as propriedades mecânicas da peça através dos valores de tensão e deformação de cedência obtidos. Numa primeira fase do presente subcapítulo o foco recairá no estudo da influência das temperaturas de injeção fixando-se o local de ataque da peça e posteriormente analisar-se-á o efeito da localização do ataque dentro da mesma temperatura de injeção. A influência da variação da temperatura da superfície do molde nas propriedades mecânicas é estudada integralmente em todas as análises anteriormente mencionadas.

4.1.1 Influência da temperatura de injeção

Na análise das propriedades mecânicas dos gráficos das figuras abaixo a localização do ataque é fixada, estudando-se a influência da temperatura de injeção e, dentro da mesma temperatura de injeção a influência da variação da temperatura da superfície do molde na peça.

Como representado na Figura 57 os valores de tensão de cedência no seu global estão próximos dos 30MPa observando-se um ligeiro aumento de 7 e 9% com o aumento da temperatura da superfície do molde, dos 40°C para os 140°C, na temperatura de injeção de 200 e 230°C, respetivamente. A deformação de cedência tende a diminuir com o aumento da temperatura da superfície do molde rondando os 11%.

A única exceção observada é aquando da temperatura de injeção de 200°C se aumenta a temperatura da superfície do molde dos 40°C para os 80°C, neste caso a deformação de cedência aumenta, mas repare-se que a gama do desvio padrão é relativamente grande nos 40°C podendo ser superior do que a deformação de cedência aos 80°C em alguns casos.

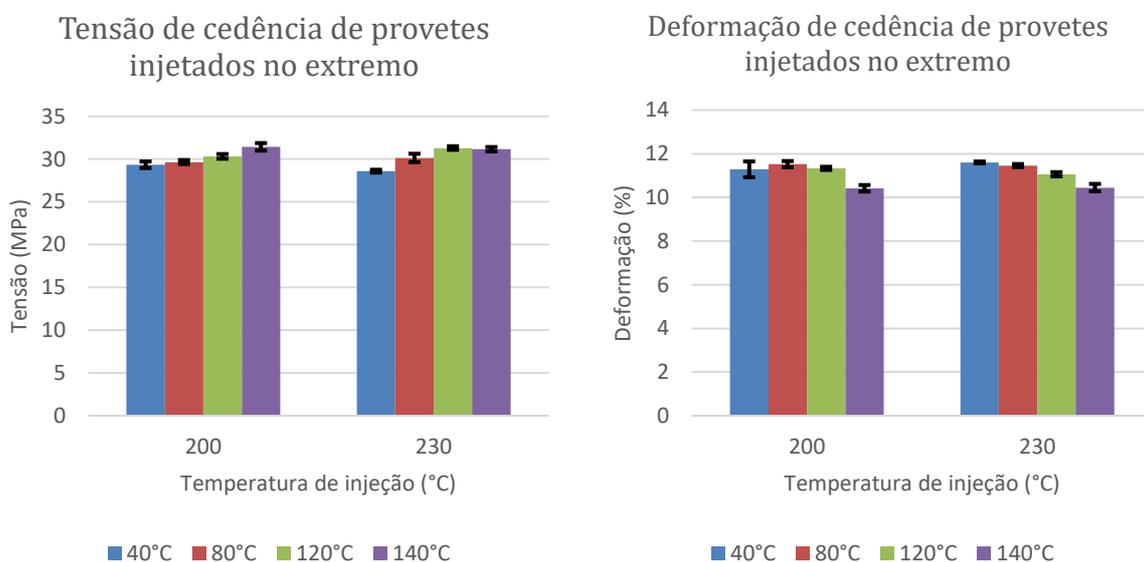


Figura 57 – Tensão e deformação de cedência dos provetes injetados no extremo, à esquerda e direita, respetivamente.

No entanto entre os 40 e 140°C verifica-se uma diminuição de aproximadamente 9% da deformação de cedência em ambas as temperaturas de injeção. O comportamento mecânico observado nos gráficos da Figura 56 tende a tornar-se mais rígido com o aumento da temperatura da superfície do molde e os valores de tensão e deformação de cedência são muito próximos entre as duas temperaturas de injeção.

Os valores de tensão e deformação de cedência observadas anteriormente nos provetes injetados no extremo são próximos dos provetes injetados no meio (Figura 58). Verifica-se também uma tendência semelhante, nas temperaturas de injeção de 200°C, do aumento de 6 % e diminuição

11% das tensões e deformações, respectivas, com o aumento da temperatura da superfície do molde dos 40°C para os 140°C.

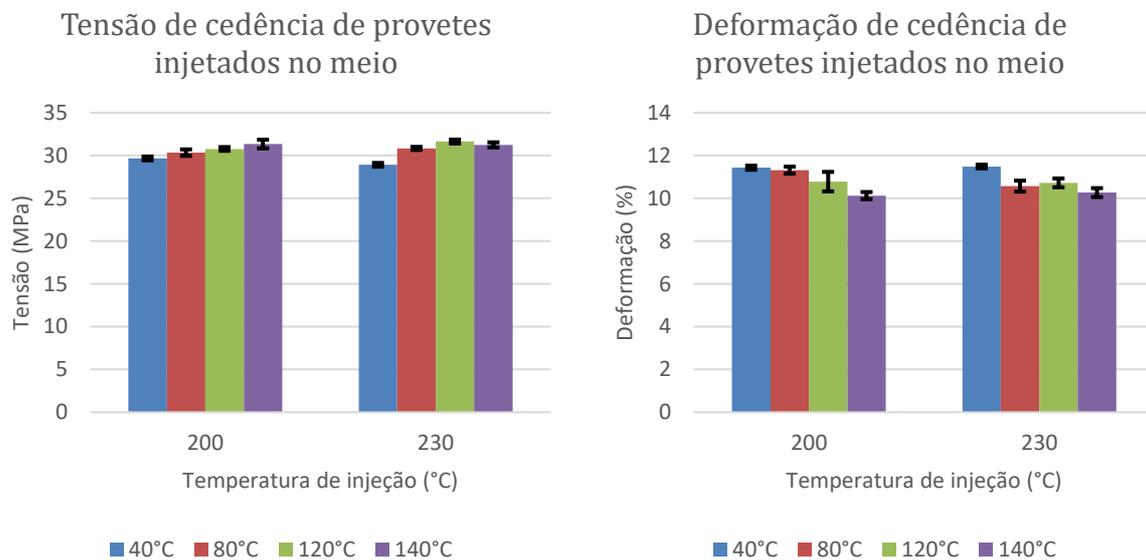


Figura 58 - Tensão e deformação de cedência dos provetes injetados no meio, à esquerda e direita, respetivamente.

Tendo como referência a temperatura de injeção de 230°C, a variação dos valores de tensão de cedência é ligeiramente contrária à prevista, das temperaturas da superfície do molde de 120 a 140°C, diminuindo 1%. A tendência da deformação é conforme o esperado diminuído cerca de 4%, mas repare-se que o valor de deformação para os 120°C é 1% superior ao valor registado para os 80°C. No entanto, considera-se que o comportamento dos provetes em geral converge para as hipóteses iniciais tendo em conta as barras de erro e as diferenças diminutas observadas.

4.1.2 Influência da localização do ataque

A geometria da cavidade permitiu injetar um par de provetes de tração com localizações de ataques diferentes, um é injetado no meio e o oposto é injetado no extremo, mas as condições de processamento a que ambos estão sujeitos são as mesmas, uma vez que são injetados em simultâneo. Desta forma o único fator variável é a localização do ataque, tal como se pode observar nos gráficos das figuras 59 e 60.

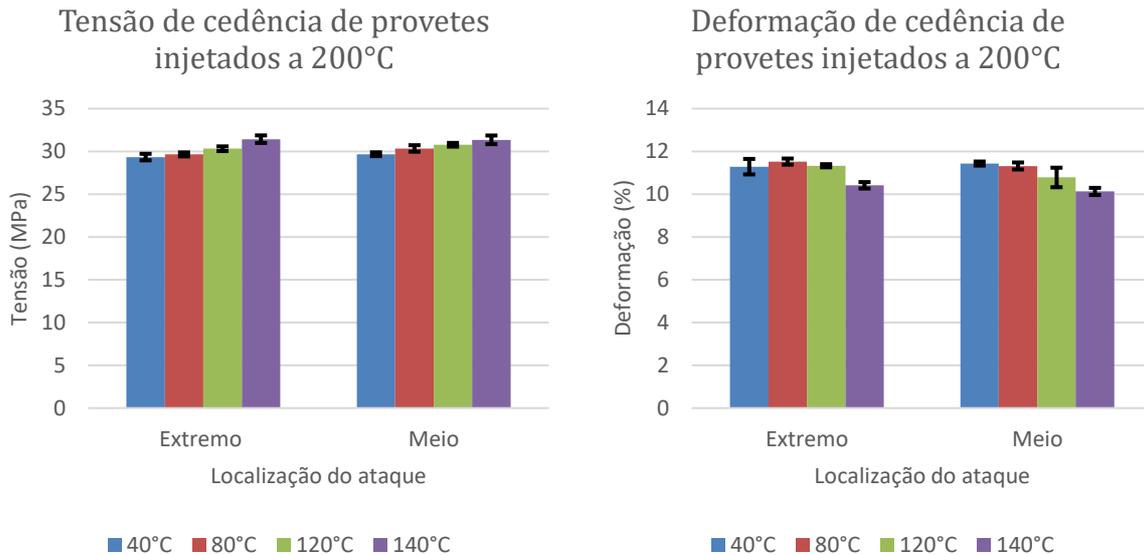


Figura 59 - Tensão e deformação de cedência dos provetes injetados a 200°C, à esquerda e direita, respetivamente.

A variação da tensão e deformação de cedência com a temperatura da superfície do molde é semelhante para os dois tipos de provetes injetados em locais diferentes, tal como o previsto. No entanto os valores de tensão e deformação de cedência deviam de ser superiores e inferiores, para os provetes injetados no extremo em relação aos injetados no meio, respetivamente.

Devido à natureza do ensaio de resistência à tração, a aplicação de uma velocidade de deslocamento constante na direção longitudinal ao provete, esperava-se que nos provetes injetados no extremo a orientação do fluxo nessa direção fosse mais desenvolvida do que nos provetes injetados no meio e, portanto, maior anisotropia de propriedades mecânicas no eixo longitudinal e conseqüentemente melhores propriedades. Outros dois aspetos que se previam afetar negativamente as propriedades mecânicas dos provetes injetados no meio são o facto de se considerar o ataque uma zona mecanicamente frágil resultado das tensões residuais geradas nessa zona durante o enchimento da peça e por outro lado na zona do ataque as propriedades são isotrópicas devido ao efeito de chafariz imposto pelo fluxo de material nessa região.

O comportamento mecânico mencionado anteriormente é válido para as duas temperaturas de injeção de 200 e 230°C e respetivos gráficos.

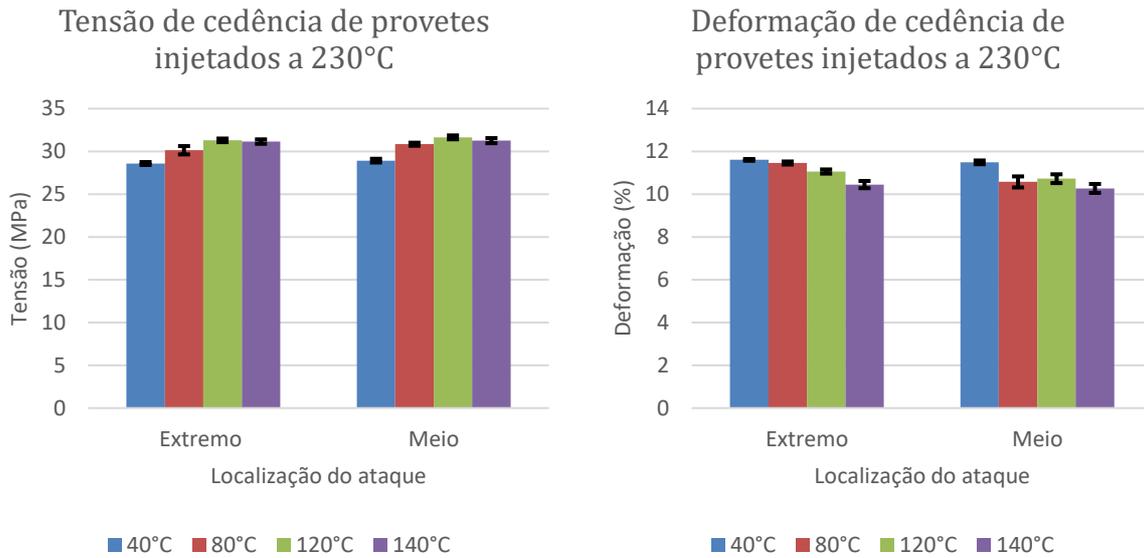


Figura 60 - Tensão e deformação de cedência dos provetes injetados a 230°C, à esquerda e direita, respetivamente.

4.2 Grau de cristalinidade

Observando-se do grau de cristalinidade de gráfico da Figura 61 para os 200 e 230°C verifica-se um aumento gradual do grau de cristalinidade com o aumento progressivo da temperatura da superfície do molde dos 40°C até aos 140°C. Esta variação vai em linha com as propriedades mecânicas registadas. O aumento do grau de cristalinidade registado, é prova da existência de estruturas cristalinas mais desenvolvidas, induzindo o comportamento progressivamente mais rígido observado nos provetes, com o aumento da temperatura da superfície do molde.

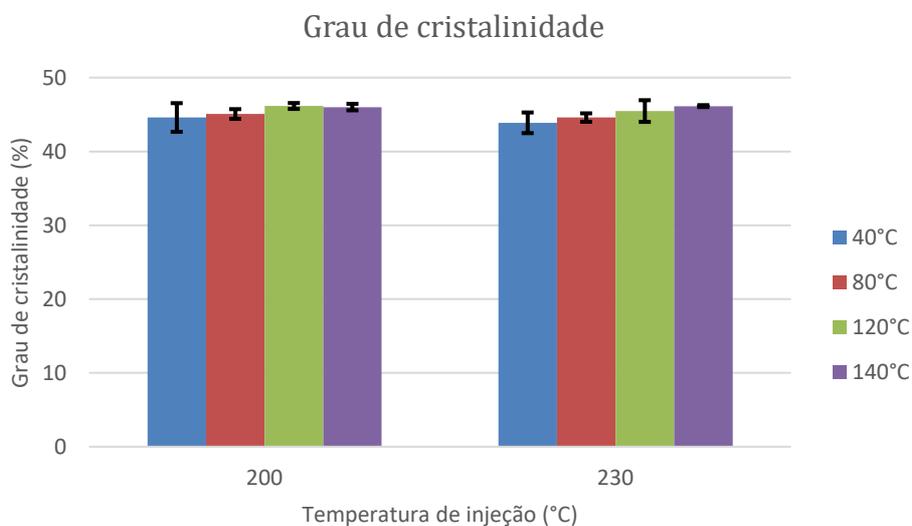


Figura 61 – Variação do grau de cristalinidade com a temperatura de injeção.

O aumento percentual do grau de cristalinidade observado, entre as temperaturas da superfície do molde extremas de 40 e 140°C, é de 3 e 5% para as temperaturas de injeção de 200 e 230°C, respetivamente. Apesar da diferença de 2% entre as variações entre os 200 e 230°C não se consegue afirmar que o aumento da temperatura de injeção tem um peso relevante no aumento do grau de cristalinidade para esta gama de temperaturas de injeção. O aumento é pouco significativo e o intervalo do erro associado a algumas temperaturas da superfície do molde pode alterar a confiança nalgumas comparações do grau de cristalinidade.

4.3 Espessura da casca

A espessura da casca será estudada segundo a temperatura de injeção e a localização do ataque, variando conjuntamente a temperatura da superfície do molde seguindo a análise efetuada nas propriedades mecânicas.

4.3.1 Influência da temperatura de injeção

Previa-se que aumentando a temperatura da superfície do molde a espessura diminuísse de forma proporcional, esta variação pode ser observada dos 40°C para os 80°C para qualquer um dos gráficos da Figura 62.

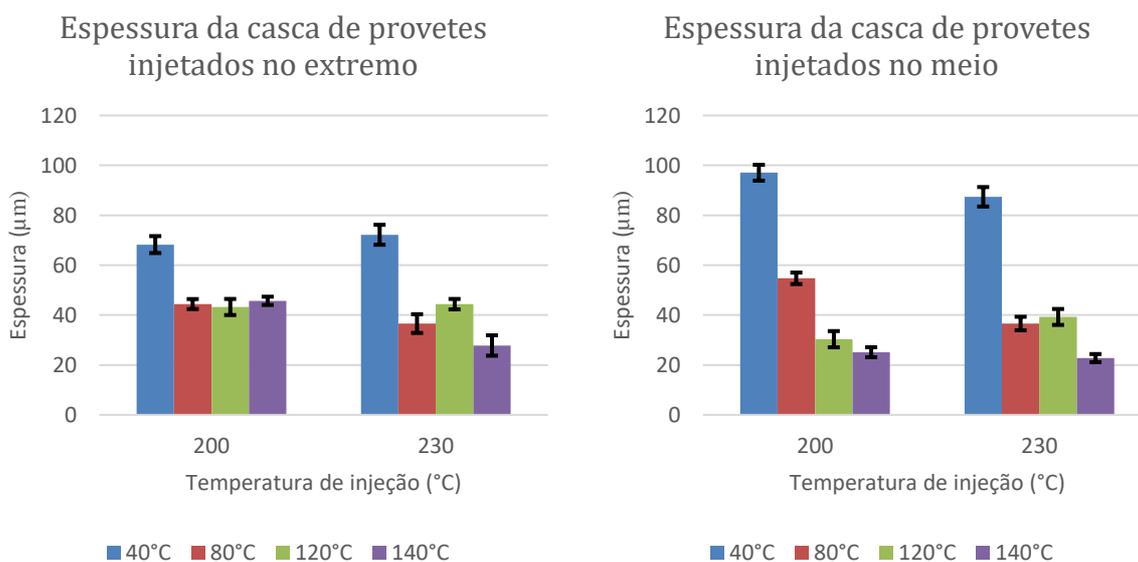


Figura 62 – Espessura da casca de provetes injetados no extremo e no meio, à esquerda e à direita respetivamente.

A variação da espessura da casca observada nos provetes injetados no extremo não segue uma lógica bem definida em ambas as temperaturas de injeção. Nos 200°C de temperatura de injeção há um ligeiro aumento de 6% da espessura dos 120°C para os 140°C, apesar de relativamente baixo, é inesperado. A 230°C de temperatura de injeção a espessura da casca aumenta 21% dos 80°C para os 120°C. No entanto, comparando os valores da espessura da casca dos 80°C para os 140°C verifica-se uma diminuição de 24% desta.

O comportamento observado nos provetes injetados no extremo a 230°C, anteriormente descrito, é semelhante ao dos provetes injetados no meio. Apesar de haver um aumento da espessura da casca dos 80°C para os 120°C, cerca de 7%, verifica-se que esta variação é pouco significativa ao incluir-se os erros associados a estas duas temperaturas da superfície do molde. A 200°C de temperatura de injeção a espessura diminui linearmente com o aumento da temperatura da superfície do molde. Registou-se uma diferença de espessura da casca de 74% entre as temperaturas da superfície do molde de 40 e 140°C.

No geral verifica-se que os valores globais da espessura da casca dos provetes injetados, são ligeiramente superiores à temperatura de injeção 200°C, dentro da mesma localização do ataque. À medida que se aumenta a temperatura do fundido o arrefecimento é mais lento e, portanto, a casca diminui.

4.3.2 Influência da localização do ataque

Observando os gráficos da Figura 63 verifica-se que os valores globais da espessura da casca são diferentes consoante o local do ataque, sendo que os valores dos provetes injetados no extremo são globalmente inferiores aos injetados no meio.

Um fator que pode explicar este fenómeno pode estar associado ao percurso percorrido pelo fundido. Uma vez que a espessura da casca varia de forma parabólica com o percurso do fluxo do fundido ao longo do provete e apesar de se ter definido uma região de medição da casca intermédia entre os dois ataques, no ensaio de microscopia de luz polarizada. Desta forma o percurso percorrido pelo fundido nessa região pode ser diferente, dependendo da distância do ataque ao local medido, induzindo desenvolvimentos da espessura da casca diferentes, consoante o ataque no meio ou no extremo do provete

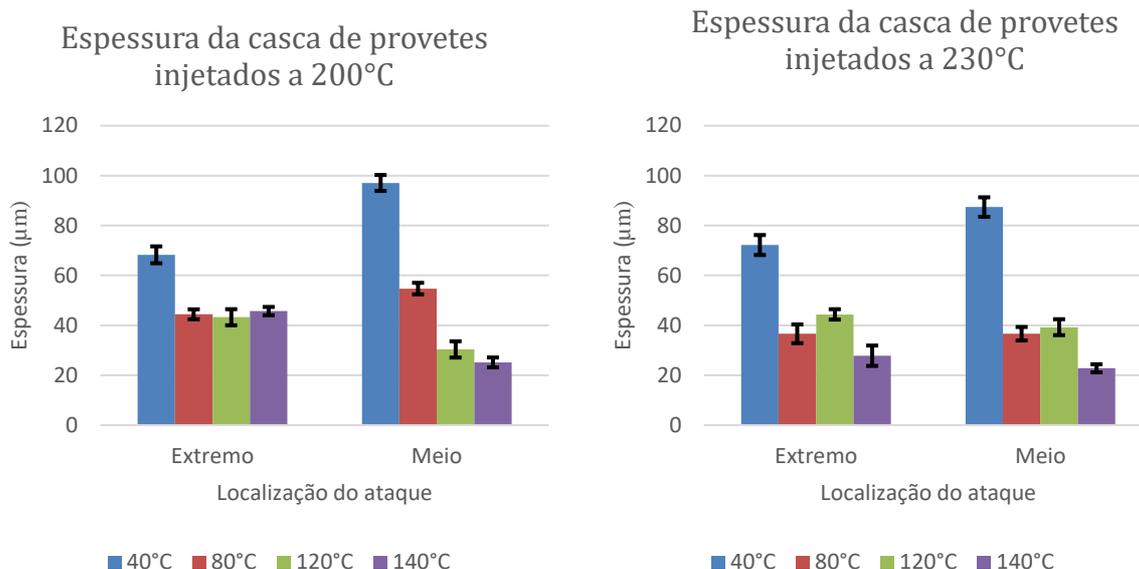


Figura 63 - Graficos da espessura da casca de provetes injetados a 200 e 230°C,  esquerda e  direita respetivamente.

A variação da espessura da casca com a temperatura da superfie do molde  semelhante para ambas as localizações dentro da mesma temperatura de injeção. Tendo em conta que os provetes são injetados aos pares e, portanto, em simultâneo apesar das localizações de ataque diferentes as condições de processamento são praticamente iguais. Como consequência os valores da espessura da casca podem divergir, mas a variação  semelhante com a temperatura da superfie do molde.

A espessura da casca tende a diminuir com aumento da temperatura da superfie do molde, com exceção aos 120°C. Ao longo do estudo da espessura da casca tem-se verificado que a esta temperatura o comportamento diverge do previsto. A causa deste desvio pode estar relacionada com a transição de tecnologias de aquecimento da superfie do molde. O termorregulador  utilizado para aquecer a superfie do molde até aos 80°C de temperatura e as lâmpadas são utilizadas aos 120°C. Associando a incerteza da determinação da temperatura da superfie do molde a partir dos 120°C deduz-se que a temperatura real pode ser inferior  medida e da os valores de espessura de casca incoerentes a esta temperatura.

Os resultados dos ensaios mecânicos realizados demonstram uma variação linear da tensão e deformação de cedência da moldação com o aumento da temperatura da superfie do molde. Portanto a variação da espessura da casca por vezes incoerente observada não tem um peso relevante nas propriedades mecânicas registadas. Tendo em conta proximidade do

comportamento do grau de cristalinidade e das propriedades mecânicas infere-se que o primeiro tem maior peso do que a espessura da casca nas propriedades mecânicas da moldação.

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação de mestrado traçou como objetivos principais, o desenvolvimento e teste de um sistema RHCM quando aplicado a um processo de moldação por injeção convencional. Para além do desenvolvimento da tecnologia RHCM, caracterizaram-se as peças injetadas a nível mecânico, térmico e ótico. Esta caracterização permitiu estudar as diferentes propriedades mecânicas obtidas na moldação e correlacionar com os parâmetros do processo injeção.

O sistema desenvolvido permitiu elevar a temperatura da superfície do molde, acrescentando um novo parâmetro ao processo de injeção, a temperatura de superfície. Foi notório durante os testes de eficiência do sistema que, para o sistema de 2 lâmpadas, a velocidade máxima de aquecimento obtida, foi de 0,33 °C/s. Estes valores ficaram aquém das expectativas, aquando da comparação com valores de outros trabalhos de investigação. Estes valores podem ter sido influenciados pela emissividade térmica do molde (que são fatores cruciais na eficiência deste tipo de sistema RHCM).

Através dos ensaios de microscopia de luz polarizada, observaram-se as alterações no desenvolvimento morfológico das peças injetadas. Desde logo, com este ensaio, concluiu-se que a espessura da cascada moldação tende a diminuir com o aumento da temperatura da superfície do molde. Isto está em concordância com a variação dos valores de tensão com o aumento da temperatura da superfície do molde.

A análise das propriedades térmicas através do DSC permitiu avaliar o grau de cristalinidade da moldação. Verificou-se um aumento linear do grau de cristalinidade com o aumento da temperatura da superfície do molde refletindo-se nas propriedades mecânicas da peça. Nomeadamente um aumento da tensão e diminuição da deformação de cedência.

A nível do comportamento mecânico, efetuaram-se ensaios de tração, de modo a estudar as propriedades mecânicas do PP. Observou-se um ligeiro aumento da tensão e diminuição da deformação de cedência com o aumento da temperatura da superfície do molde. A localização do ataque no meio ou no extremo e a temperatura de injeção revelaram ter um peso relativamente pequeno nas propriedades mecânicas da moldação observando-se comportamentos muito próximos.

De um modo geral, o processo RHCM, a melhora o comportamento mecânico da moldação na fase elástica, aumentando ligeiramente a resistência à tensão de cedência, tornando viável a sua utilização em peças cujos requisitos são estarem sujeitas a esforços indo isto ao encontro dos objetivos definidos inicialmente.

A técnica de moldação por injeção RHCM de aquecimento do molde por radiação infravermelha emitida por lâmpadas de halogéneo revelou-se um método pouco eficiente devido ao longo tempo de aquecimento. A sua utilização num ambiente competitivo como o industrial deverá ser considerada com muita cautela, uma vez que o tempo de produção da peça é um fator económico muito importante na produção em massa.

5.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros propõe-se a continuidade de estudos com a aplicação do sistema RHCM. Os trabalhos são:

- Ao nível do sistema RHCM, fazer uma melhoria do sistema, incorporando refletores na região intermédia das lâmpadas que se possa aumentar a otimizar a quantidade da radiação infravermelha emitida bem como direcioná-la para locais estratégicos, de modo a aumentar a eficiência do aquecimento do molde.
- Testar também novos materiais para o molde de modo a estudar a influência da emissividade térmica do material na eficiência deste tipo de sistema.
- Por fim, automatizar o sistema criado, ou seja, colocar o processo em produzir em automático.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Wang, G. Zhao, H. Li and a. Y. Guan, "Research on optimization design of the heating/cooling channels for rapid heat cycle molding based on response surface methodology and constrained particle swarm optimization," vol. 38, p. 6705 – 6719, 2011.
- [2] F. Johannaber, *Injection Molding Machines: A User's Guide*, 3rd edition ed., Hanser Gardner Publications, 1994.
- [3] S. C. Chen, H. S. Peng, J. A. Chang and a. W. R. Jong, "Rapid mold surface heating/cooling using electromagnetic induction technology," p. pages 771–776, julho 2005.
- [4] Wang, Guilong, Zhao, Guoqun, Li, Huiping, Guan and Yanjin, "Research of thermal response simulation and mold structure optimization for rapid heat cycle molding processes, respectively, with steam heating and electric heating," *Materials and Design*, vol. 31, pp. 382-395, 2010.
- [5] S. Chen, P. S. Minh and a. J. Chang, "Gas-assisted mold temperature control for improving the quality of injection molded parts with fiber additives," vol. 38, p. 304 – 312, 2011.
- [6] M. C. Paiva, *Apontamentos de Introdução aos Polímeros - 4º Capítulo : Transformação de polímeros*.
- [7] A. Brito, *Aplicação de Computadores ao Projecto de Moldes de Injeção de Termoplásticos*, Guimarães, 1984.
- [8] Bryce and D. M., *Plastic injection molding : ...mold design and construction fundamentals*, Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, cop. 1998.
- [9] Karasu, Kemal, M., Cakmakci, Mehmet, Cakiroglu, B., Merve, Ayva, Elif, Demirel-Ortabas and Neslihan, "Improvement of changeover times via Taguchi empowered SMED/case study on injection molding production," *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 47, pp. 741-748, 2014.
- [10] Wang, Guilong, Zhao, Guoqun, Li, Huiping, Guan and Yanjin, "Research on a new variotherm injection molding technology and its application on the molding of a large

- LCD panel," *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, vol. 48, pp. 671-681, 2009.
- [11] Wang, Jian, Mao and Qianchao, "Methodology Based on the PVT Behavior of Polymer for Injection Molding," *Advances in Polymer Technology*, vol. 32, pp. 474-485, 2012.
- [12] Su, Quanliang, Zhang, Nan, Gilchrist and M. D., "The use of variotherm systems for microinjection molding," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 133, pp. 1-17, 2016.
- [13] Kukla, C., Loibl, H., Detter and H., "Kunststoffe," vol. 88, p. 1331–1336, 1998.
- [14] Fu, G., Loh, N. H., Tor and S. B., "Microsyst Technol," vol. 11, p. 1267–1271, 2005.
- [15] Yim and S. J., "US Patent". Patent 6 638 048, 2003.
- [16] Rhee, B. O., Kim, C. S., Lee, K., Kang and M. H. SPE, "SPE Tech Pap," p. 875–878, 2005.
- [17] Meister, S., Drummer and D., "Sci. World J," vol. 1, 2013.
- [18] Chen, S. Chung, Chien, R. Der, Lin, S. Hsia, Lin, M. Chung, Chang and J. An, "Feasibility evaluation of gas-assisted heating for mold surface temperature control during injection molding process," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 36, pp. 806-812, 2009.
- [19] Hendry and J. W., "US Patent". Patent 4 201 742, 1980.
- [20] Chang, P. C., Hwang and S. J., "J. Appl. Polym. Sci.". Patent 102, 3704, 2006.
- [21] Saito, T., Satoh, I., Kurosaki and Y. Polym., "Polym. Eng. Sci.". Patent 42, 2418, 2002.
- [22] Yao, D., Kim and B. Polym., "Polym. Plast. Technol. Eng.". Patent 41, 819, 2002.
- [23] Yu, C., M., Young, B., W., Hsu, M. and P., "Mater. Sci. Eng. A". Patent 460, 288, 2007.
- [24] D. Yao, S. C. Chen, Kim and B. H. Adv., "Adv. Polym. Technol.". Patent 27, 233, 2008.
- [25] Yao, D., Kimerling, T. E., Kim and B., "Polym. Eng. Sci.". Patent 46, 938, 2006.
- [26] Akopyan, L. and R., "U.S. Pat.". Patent US698,435,2B1, 2006.
- [27] Akopyan and R. L., "U.S. Pat.". Patent US712,214,6B2, 2006.
- [28] Erwin, L., Suh and N. P., "Polym. Eng. Sci.". Patent 16, 841, 1976.
- [29] Ridder, H., Heim, P and H., "Kunststoffe Int". Patent 99, 12, 2009.
- [30] Chang, J. A., Chen, S. C., Cin and J. C., "Society of Plastics Engineers," p. p 1295, 2006.

- [31] Chen, S., Jong, W., J. Chang, Chang and Y., "Int. Polym. Process," 2006.
- [32] Chen, S. C., Jong, W. R., Chang and J. A., "J. Appl. Polym. Sci.". Patent 101, 1174, 2006.
- [33] Stumpf, H., Schulte and K., "US Patent". Patent 5 824 237, 1998.
- [34] D. Yao, Yi, A. Y., Li, L., Nagarajan and P. ASME, "ASME J Manuf Sci Eng". Patent 128, 837–843, 2006.
- [35] Liou, M. J., Suh and N. P., "Polym Eng Sci". Patent 29, 441–447, 1989.
- [36] Lee, N., Han, J., J. Lim, Choi, M., Han, Y., Hong, J., Kang and S., "Jpn J Appl Phys 2008,". Patent 47, 1803–1805, 2008.
- [37] Yao, D., Kim, Polym and B., "Polym Eng Sci". Patent 42, 2471–2481, 2002.
- [38] Rocha and R. F. P. da, "“Aproveitamento do Calor dos Gases de Escape para Geração de Energia Eléctrica – EconomicUM”," Braga: Universidade do Minho, 2011.
- [39] Kim, B. H., Wadhwa and R. R., "Polym Plast Technol Eng". Patent 26, 1–22, 1987.
- [40] Whiteside, B. R., Martyn, M. T., Coates, P. D., Allan, P. S., Hornsby, P. R., Greenway and G., "Plast Rubber Compos". Patent 32, 231–239, 2003.
- [41] Leibfried and D., "Untersuchungen zum Werkzeugfüllvorgang beim Spritzgießen thermoplastischer Kunststoffen," Ph.D Thesis, Institute for Plastics Processing at Aachen University of Technology, 1973.
- [42] Kamal, M.R., Kenig and S., "The Injection Molding of Thermoplastics, Part I: Theoretical Model," Polym. Eng. Sci., 1972.
- [43] Gogos, C. H. CF, Schmidt and LR, The Process of Cavity Filling Including the Fountain Flow in Injection Molding, Polym. Eng. Sci., 1986, pp. 1457-1466.
- [44] Sanou, M, C. B, Cohen and C, Glass Fiber Filled Thermoplastics, II. Cavity Filling and Fiber Orientation in Injection Molding, Polym. Eng. Sci., 1985, pp. 1008-1016.
- [45] Chen, BS, Liu and WH, Numerical Simulation and Experimental Investigation of Injection Mold Filling with Melt Solidification, Polym. Eng.Sci., 1989, pp. 1039-1050.
- [46] Pleßmann, K. Menges, G., Cremer, M., Fenske, W., F. W, Netze, C. Offergeld, H. Pötsch, G. Stabrey and H, Einfluß der inneren Struktur auf die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen, 1990, pp. 200-205.
- [47] G. Pötsch and W. Michaeli, Injection Molding: An Introduction, Hanser Publishers, 1995.

- [48] Berghaus, U., Cremer, M., Küppers, M., Netze and C. P. G, Bauteileigenschaften-gezielt produziert (1990) 15., at Aachen University of Technology: Kunststofftechnisches Kolloquium des IKV (Institut für Kunststoffverarbeitung), Aachen [Proceedings of the 15th Colloquium on Techniques for Synthetic Materials of the Institute for Plastics Processing (IKV)].
- [49] Cox, HW, Mentzer and C.C., Injection Molding: The Effect of Fill Time on Properties, Polym. Eng. Sci., 1986, pp. 488-498.
- [50] P. K. Michaeli, W., Koske, J. Heine, J., Cremer, M., Günzel, R., Klee and D., Fertigungsparameter bestimmen Formteileigenschaften mit, Kunststoffe, 1991, pp. 1141-1144.
- [51] Kacir, L., Ishai, O and M. Narkis, Oriented Short Glass-Fiber Composites. IV. Dependence of Mechanical Properties on the Distribution of Fiber Orientations, Polym. Eng. Sci., 1978, pp. 45-52.
- [52] Menges, G., Ries, H., Wiegmann and T., Innere Eigenschaften von spritzgegossenen Formteilen aus Polypropylen, Kunststoffe, 1987, pp. 433-438.
- [53] Limited and C. R. C. & C. (UK). [Online]. Available: <http://crclarke.co.uk/products/25-injection-moulding-machine>. [Accessed 5 10 2018].
- [54] Chang, P. Chi, Hwang and S. Jye, "Experimental investigation of infrared rapid surface heating for injection molding," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 102, pp. 3704-3713, 2006.
- [55] Olympus, [Online]. Available: <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/techniques/polarized/berekcompensator/>. [Accessed 23 10 2018].
- [56] Kim, S., Shiau, C. S., Kim, B. H., Yao and D., "Polym. Plast. Technol. Eng.". Patent 46, 1031, 2007.

ANEXOS

Anexo 1 – Ficha técnica do material SABIC® PP 579S

SABIC® PP 579S

PP homopolymer for Injection moulding

Description:

This grade has been specially developed for use in thin-walled, antistatic containers. The material has outstanding flow properties and a high stiffness, enabling high production rates. Special characteristics are low tendency for warpage, high lot to lot consistency, good contact transparency and high gloss. It is formulated with a combined processing and antistatic additive package.

Health, Safety and Food Contact regulations:

Material Safety Data Sheets (MSDS) and Product Safety declarations are available on our Internet site <http://www.SABIC-europe.com>

The product mentioned herein is in particular not tested and therefore not validated for use in pharmaceutical/ medical applications.

This grade material is UL registered under File E 111275 (www.ul.com)

IMDS ID: 7172624

Typical values

Revision 20140109

Properties	Unit (SI)	Values	Test methods
Polymer properties:			
Melt flow rate (MFR) at 230 °C and 2.16 kg	g/min	47	ISO 1133
Density	kg/m ³	906	ISO 1183
Formulation			
Anti static agent	-	Yes	-
Nucleating agent	-	No	-
Mechanical properties:			
Tensile test			ISO 527-2 1A
stress at yield ¹⁾	MPa	38	
strain at yield ¹⁾	%	8	
tensile modulus ²⁾	MPa	1760	
Izod Impact notched			ISO 180/1A
at 23 °C	kJ/m ²	2.6	
Charpy Impact notched			ISO 179/1eA
at 23 °C	kJ/m ²	8.0	
Hardness Shore D	-	70	ISO 868
Thermal properties:			
Heat deflection temperature ³⁾	°C	66	ISO 75
at 1.80 MPa (HDT/A)	°C	80	
at 0.45 MPa (HDT/B)			
Wicat softening temperature ⁴⁾	°C	168	ISO 306
at 10 N (VST/A)	°C	86	
at 50 N (VST/B)			

Anexo 2 – Dados técnicos da injetora Boy 22 M.

Gancho						
Aperto do gancho	kN	220				
Força de fecho do molde	kN	17,6				
Força de abertura do molde	kN	40				
Carga máxima de abertura do molde	mm	200				
Distância máxima da placa	mm	400				
Distância mínima da placa	mm	200				
Distância entre as barras de junção	mm	254				
Diâmetro das barras de junção	mm	40				
Força do ejector para dentro e para fora	kN	18,1 / 12,0				
Carga do ejector	mm	80				
Peso total máximo do molde	kg	250				
Peso total máximo da secção móvel do molde	kg	150				
Unidade de Injecção						
		Padronizada		Alternativa		
		Cilindro de ø 60 com adaptador		Cilindro de ø 75		
Diâmetro do parafuso	mm	18	22	24	28	32
Taxa L/D do parafuso	—	20	17,5	22	18,6	16,3
Taxa de descarga em profundidade	—	2,18	2,00	2,05	2,25	2,20
Pressão de injecção especial	bar	2587	1732	1455	1069	818
Volume de carga teórico	cm ³	20	30	36	49	64
Peso da injecção com poliestireno	g	19,43	28,45	34,08	47	61,6
Capacidade de injecção	g/s	35,07	49,70	59,37	87,04	102,00
Capacidade de plastificação	g/s	4,87	6,05	7,98	11,79	13,13
						n = 380 U/min
Aperto do parafuso	Nm					
Motor	80 cm ³ /U	130 ³⁾				
	100 cm ³ /U			220	220	220
	160 cm ³ /U			360	360	360
Velocidade do parafuso	U/min					
Motor	80 cm ³ /U	500				
	100 cm ³ /U			400	400	400
	160 cm ³ /U			250	250	250
Força de injecção	kN	65,82				
Carga do parafuso	mm	80				
Força de retrocesso do parafuso	kN	45,7				
Força de pressão do bico de injecção	kN	48				
Carga do bico de injecção	mm	180				
Capacidade de aquecimento (1)	W	1250 + 650 + 700 + 450 + 200 = 3250 ø 18				
		1400 + 750 + 750 + 450 + 200 = 3550 ø 22				
		2400 + 1250 + 1250 + 700 + 200 = 5800 ø 24-32				
Capacidade da enchedora	L	13				
Peso máximo da enchedora	kg	35 (inclusive fora de dispositivos adicionais periféricos)				
(1) Cilindro padronizado ø 18, 22						
(2) Alternativa ø 24, 28, 32						
(3) À pressão hidráulica de 120 bar						
11 / 2010		22 A	22 AV			1.1 / 1

Anexo 3 – Tensão e deformação de cedência dos ensaios de resistência à tração.

Local ataque	Meio							
Temperatura de injeção (°C)	200				230			
Temperatura sup. molde (°C)	40	80	120	140	40	80	120	140
Tensão (MPa)	29.67	30.35	30.78	31.35	28.92	30.84	31.64	31.26
DP (MPa)	0.22	0.38	0.22	0.51	0.22	0.18	0.23	0.30
CV (%)	0.8	1.2	0.7	1.6	0.8	0.6	0.7	1.0

Local ataque	Extremo							
Temperatura de injeção (°C)	200				230			
Temperatura sup. molde (°C)	40	80	120	140	40	80	120	140
Tensão (MPa)	29.34	29.65	30.31	31.43	28.59	30.14	31.29	31.15
DP (MPa)	0.38	0.23	0.27	0.44	0.17	0.49	0.21	0.26
CV (%)	1.3	0.8	0.9	1.4	0.6	1.6	0.7	0.8

Local ataque	Meio							
Temperatura de injeção (°C)	200				230			
Temperatura sup. molde (°C)	40	80	120	140	40	80	120	140
Deformação (%)	11.43	11.32	10.78	10.13	11.29	11.52	11.33	10.42
DP (%)	0.10	0.16	0.46	0.17	0.36	0.14	0.07	0.15
CV (%)	0.8	1.4	4.2	1.7	3.2	1.2	0.6	1.4

Local ataque	Extremo							
Temperatura de injeção (°C)	200				230			
Temperatura sup. molde (°C)	40	80	120	140	40	80	120	140
Deformação (%)	11.49	10.57	10.73	10.27	11.60	11.46	11.06	10.45
DP (%)	0.09	0.26	0.21	0.21	0.04	0.07	0.10	0.17
CV (%)	0.8	2.4	1.9	2.0	0.4	0.6	0.9	1.6

Anexo 4 – Tabela da variação do grau de cristalinidade.

Temperatura de injeção (°C)	200				230			
Temperatura sup. molde (°C)	40	80	120	140	40	80	120	140
Deformação (%)	44.6	45.07	46.16	46.01	43.88	44.59	45.47	46.14
DP (%)	1.94	0.66	0.4	0.44	1.4	0.57	1.47	0.13
CV (%)	4.3	1.5	0.9	1.0	3.2	1.3	3.2	0.3

Anexo 5 – Tabelas da variação da espessura da casca.

Local ataque	Meio							
Temperatura de injeção (°C)	200				230			
Temperatura sup. molde (°C)	40	80	120	140	40	80	120	140
Deformação (%)	97.06	54.73	30.34	25.12	87.41	36.63	39.26	22.77
DP (%)	3.19	2.31	3.26	1.99	3.90	2.71	3.19	1.63
CV (%)	3.3	4.2	10.8	7.9	4.5	7.4	8.1	7.2

Local ataque	Extremo							
Temperatura de injeção (°C)	200				230			
Temperatura sup. molde (°C)	40	80	120	140	40	80	120	140
Deformação (%)	68.26	44.42	43.24	45.71	72.19	36.61	44.38	27.81
DP (%)	3.39	2.00	3.23	1.66	4.00	3.76	2.08	4.09
CV (%)	5.0	4.5	7.5	3.6	5.5	10.3	4.7	14.7