



Henrique Manuel Pinto

Desenvolvimento de uma tecnologia não convencional de moldação: Rapid Heat Cycle Molding system

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia







Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Henrique Manuel Pinto

Desenvolvimento de uma tecnologia não  
convencional de moldação: Rapid Heat Cycle  
Molding system

Tese de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor António Manuel Brito

## DECLARAÇÃO

Nome: Henrique Manuel Pinto

Endereço eletrónico: henrique.pinto@live.com Telefone: 00351 918338870

Número do cartão do cidadão: 13764136

Título dissertação: **Desenvolvimento de uma tecnologia não convencional de moldação: *Rapid Heat Cycle Molding system.***

Orientador: Doutor António Manuel Brito

Ano de conclusão: 2013

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

Ciclo de Estudos Conducente ao Grau de Mestre em Engenharia de Polímeros

Declaro que concedo à Universidade do Minho e aos seus agentes uma licença não-exclusiva para arquivar e tornar acessível, nomeadamente através do seu repositório institucional, nas condições abaixo indicadas, a minha dissertação, no todo ou em parte, em suporte digital.

Declaro que autorizo a Universidade do Minho a arquivar mais de uma cópia da dissertação e a, sem alterar o seu conteúdo, converter a dissertação entregue, para qualquer formato de ficheiro, meio ou suporte, para efeitos de preservação e acesso.

Retenho todos os direitos de autor relativos à dissertação, e o direito de a usar em trabalhos futuros (como artigos ou livros).

Concordo que a minha tese ou dissertação seja colocada no repositório da Universidade do Minho com o seguinte estatuto:

- Disponibilização imediata do conjunto do trabalho para acesso mundial

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.

Ao meu orientador, Doutor António Brito, o meu mais sincero agradecimento, pelo seu apoio e por toda a orientação e disponibilidade demonstrada ao longo de toda a dissertação.

Agradeço ao Doutor António Pontes pela sua disponibilidade e pelos conselhos sábios na direção da escolha deste tema.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia de Polímeros, o meu obrigado pelo acompanhamento quase permanente e pelos conselhos sustentados nas suas experiências, os quais se encarregaram do meu acesso total à matéria-prima essencial para concluir este trabalho prático.

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



## Resumo

O crescente interesse na moldação por injeção e na procura de soluções otimizadas de fabrico, com a função de melhorar o aspeto e qualidade das peças injetadas, levou à criação de sistemas de aquecimento do molde, por parte da indústria, para alcançar tais objetivos. Este sistema permite introduzir um novo parâmetro de injeção, a temperatura da superfície ( $T_s$ ), que traz vantagens ao processo.

No presente trabalho desenvolveu-se um sistema de aquecimento Rapid Heat Cycle Molding (RHCM), para aplicar na moldação por injeção convencional. O sistema selecionado foi o aquecimento Infrared (IR), ou seja, aquecimento por infravermelhos. Este sistema requer a utilização de lâmpadas de halogéneo, as quais emitem radiação infravermelha, promovendo assim, o aquecimento quando se aproximam da superfície da cavidade. O sistema é acoplado a um robot pneumático que faz o movimento de aproximação das lâmpadas à superfície da cavidade, e por isso promove o seu aquecimento durante um determinado tempo, até uma temperatura pretendida. Após desenvolvido do sistema, realizaram-se ensaios ao mesmo, para testar a sua eficiência.

Depois de testado o sistema procedeu-se a injeção das peças. O material selecionado foi Polipropileno (PP) com pigmentos metálicos. Os parâmetros de injeção selecionados para o estudo foram a segunda pressão, com valores de 40, 60 e 80 bar, e a temperatura de superfície, com valores de 70°C, 90°C e 110°C.

Por fim caracterizaram-se as moldações a nível mecânico e morfológico, e relacionaram-se com os parâmetros de injeção estudados. Esta caracterização permitiu analisar a influência do sistema RHCM comparativamente ao método convencional.

**Palavras-chave:** RHCM; Aquecimento por infravermelhos; Temperatura da superfície; Pigmentos metálicos.



## **Abstract**

The growing interest in injection molding and the demand for optimized manufacturing solutions that can improve the appearance and quality of the molded parts, led to the creation of the heating mold systems, by the industry, in order to achieve those improvements. This system allows to introduce a new injection parameter, the surface temperature ( $T_s$ ), which brings advantages to the process.

In this work was developed a heating system Rapid Heat Cycle Molding (RHCM), for application in conventional injection molding. The heating system selected was Infrared (IR), which is heating by infrared. This system requires the use of halogen lamps, which emit infrared radiation, thereby promoting heat when approached of the cavity surface. The system is coupled to a pneumatic robot that makes the approach movement of the lamps to the cavity surface, and promotes heating during a certain time until a desired temperature. After the system was developed, it was performed some experiences to test their effectiveness.

After the test of the system, it was proceeded to the injection of parts. The selected material was Polypropylene (PP) with metallic pigments. The injection parameters selected for the study were, the second injection pressure, with the values of 40, 60 and 80 bar, and the surface temperature, with the values of 70 ° C, 90 ° C and 110 ° C.

Finally the injected parts were characterized at the mechanical and morphological level, and was established a relation to the injection parameters studied. This characterization allowed to analyze the influence of RHCM system comparatively to the conventional method.

**Keywords:** RHCM; InfraRed Heating; Surface temperature; Metallic pigments



## **Índice**

Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	v
Abstract .....	vii
Índice de Figuras .....	xiii
Índice de Tabelas .....	xvii
Abreviaturas.....	xix
<b>1. Capítulo 1</b>	
1.1. Introdução.....	2
1.2. Objetivos .....	3
1.3. Conteúdo .....	4
1.4. Organização do trabalho .....	5
<b>2. Capítulo 2</b>	
2.1 Princípio das tecnologias RCHM.....	8
2.2. Interesses para o projeto .....	9
2.3. Variantes do processo do controlo de temperatura do molde.....	10
2.3.1. Aquecimento elétrico .....	11
2.3.1.1. Corrente de baixa frequência.....	11
2.3.1.2. Aquecimento por indução.....	12
2.3.1.3. Aquecimento por proximidade.....	14
2.3.4. Aquecimento por convecção (água, vapor, óleo ou gás) .....	15
2.3.4.1 Aquecimento com vapor.....	15
2.3.4.2. Aquecimento com água quente.....	17
2.3.4.3. Aquecimento com óleo.....	18
2.3.4.4. Aquecimento com gás quente .....	18

2.3.5. Aquecimento por radiação.....	19
2.3.6. Aquecimento dielétrico (micro-ondas) .....	21
2.3.7. Aquecimento termoelétrico (Peltier Effect).....	21
2.3.8. Aquecimento por resistências elétricas .....	23
2.4. Comparação entre as várias técnicas de aquecimento .....	27
2.5. Considerações no projeto do molde.....	29
<b>3. Capítulo 3</b>	
3.1. Desenvolvimento do sistema de aquecimento RHCM.....	32
3.2. Materiais e Equipamentos utilizados .....	33
3.2.1. Injetora e termorregulador .....	33
3.2.2. Peça em estudo.....	34
3.2.3. Molde .....	34
3.2.4. Robot.....	36
3.3. Construção do sistema RHCM .....	38
3.3.1. Lâmpada Halogéneo .....	39
3.3.2. Suporte das lâmpadas.....	39
3.3.3. Refletor .....	41
3.3.4. Sistema elétrico.....	42
3.3.5. Sistema de monitorização da temperatura.....	44
3.4. Montagem e funcionamento do sistema RHCM.....	44
3.6. Material.....	49
3.6.1. Polipropileno, PP .....	49
3.6.2. Pigmento .....	49
3.7. Injeção de peças plásticas .....	50
3.8. Caracterização das moldações .....	52
3.8.1. Caracterização morfológica .....	53

3.8.2.Caracterização mecânica.....54

**4. Capítulo 4**

4.1. Resultados dos ensaios do sistema RHCM ..... 58

4.2. Propriedades morfológicas..... 62

4.2.1. Microcopia de luz polarizada .....62

4.2.2. Microcopia de campo claro .....68

4.3. Propriedades mecânicas ..... 72

**5. Capítulo 5**

5.1. Conclusão ..... 82

5.2. Trabalhos futuros..... 84

Bibliografia ..... 85

Anexos..... 88



## Índice de Figuras

Figura 1- Fluxograma do trabalho efetuado ao longo da dissertação.....	5
Figura 2 - Fase de enchimento em moldação por injeção convencional (à esquerda) e fase de enchimento em moldação por injeção com o sistema RCHM (à direita) [1].....	8
Figura 3 - Comparação entre o ciclo de moldação por injeção convencional e a injeção com RHCM [6] .....	9
Figura 4 - Aquecimento elétrico com corrente de baixa frequência [8].....	11
Figura 5 - Princípio do aquecimento por indução [11]. .....	12
Figura 6 - Tecnologia de aquecimento por indução (aplicação externa (à esquerda) e esboço de uma bobine de indução, para aplicação externa [11]. .....	13
Figura 7 - Molde com bobine em volta do mesmo, e canais de arrefecimento do molde com aquecimento por indução externa (vista de cima e vista em corte) [12]. .....	13
Figura 8 - Princípio do aquecimento por proximidade [13].....	14
Figura 9 - Molde desenhado para aplicação de aquecimento de proximidade [8].....	15
Figura 10 - Estrutura de um molde para aquecimento a água, vapor ou óleo e disposição dos canais de arrefecimento/aquecimento no molde [5]. .....	16
Figura 11 - Sistema de aquecimento do molde a vapor [15]. .....	17
Figura 12 - Sistema para aquecimento a gás [16]. .....	19
Figura 13 - Lâmpada de halógeno usada no sistema IR [19]. .....	20
Figura 14 - Sistema de aplicação de aquecimento por infravermelhos [18]. .....	20
Figura 15 - Aquecimento (a) ou arrefecimento (b) através do efeito Peltier [19]. .....	22
Figura 16 - Estrutura de um molde para aplicação de módulos termelétricos (A), posição do molde (B) canais de arrefecimento (C), camada isoladora (D) e placa do molde (E), à esquerda, e módulo termelétrico (disponível comercialmente), à direita [20]. .....	23
Figura 17 - Sistema para aquecimento por resistências elétricas [21]. .....	24
Figura 18 - Posicionamento dos canais de aquecimento e arrefecimento na cavidade [21].....	25
Figura 19 - Resistência elétrica produzida pela Hotsys [22]. .....	26
Figura 20 - Máquina de moldação por injeção Dr. Boy A22 e termorregulador Piovan. ....	33
Figura 21 - Dimensões do provete, à esquerda, e moldação completa de dois provetes e um sistema de alimentação, à direita. ....	34

Figura 22 - Molde utilizado, parte fixa (à esquerda) e parte móvel (à direita). .....	35
Figura 23 - Desenho 2D da parte móvel do molde (vista de frente) e pontos de leitura da temperatura (pontos vermelhos). .....	36
Figura 24 - Manipulador pneumático de 3 eixos PIKO, da Asitech. ....	37
Figura 25 - Limitadores de movimento, eixo do X (à esquerda), eixo do Y (ao centro) e eixo do Z (à esquerda). .....	37
Figura 26 - Diferentes vistas do desenho 3D do sistema RHCM desenvolvido. ....	38
Figura 27 - Lâmpada e respetivas dimensões, 18 mm (d), 110 mm (l) e 75 mm (a). ....	39
Figura 28 - Placa de alumínio para colocação das lâmpadas .....	40
Figura 29 - Suporte das lâmpadas final construído e montado. ....	40
Figura 30 - Desenho 3D do refletor, em diferentes vistas. ....	41
Figura 31 - Desenho 3D das dobradiças, em diferentes vistas .....	41
Figura 32 - Material elétrico utilizado no sistema, ficha macho trifásico (a), cabo multifilar trifásico (b), disjuntor (c) e ligadores (d). ....	42
Figura 33 - Desenhos do sistema elétrico das ligações, com 3 lâmpadas (a) e com 6 lâmpadas (b). ....	43
Figura 34 - Sistema Priamus para leitura dos termopares. ....	44
Figura 35 - Imagens reais do sistema acoplado ao robot, em diferentes vistas. ....	45
Figura 36 - Ciclo de injeção convencional (à direita) e ciclo de injeção com sistema RHCM (à esquerda). ....	46
Figura 37 - Equipamento de controlo necessário para o funcionamento do sistema, ecrã da máquina de injeção (1), sistema Priamus (2), computador (3), disjuntor (4) e comando de controlo do robot (5). ....	46
Figura 38 - 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) ...	47
Figura 39 - Aparência dos pigmentos metálicos .....	50
Figura 40 - Provete de tração e zonas onde se retiraram as amostras. ....	53
Figura 41 - Micrótopo Leitz 1401 (à esquerda) e Microscópio de Transmissão Olympus (à direita). ....	54
Figura 42 - Máquina de tração Zwick Roell .....	55
Figura 43 - Gráfico das velocidades de aquecimento e arrefecimento, para o sistema de 3 lâmpadas. ....	58

Figura 44 - Gráfico das velocidades de aquecimento e arrefecimento, para o sistema de 6 lâmpadas. ....	60
Figura 45 - Gráfico das velocidades de aquecimento e arrefecimento, para diferentes tipos de material para o refletor.....	61
Figura 46- Imagens de microscopia de campo claro, da condição A1 (cima) e B1 (baixo).....	68
Figura 47 - Gráfico dos valores médios do módulo de elasticidade para as condições A, F e E..	72
Figura 48 - Gráficos relativos à tensão de cedência (à esquerda) e deformação de cedência (à direita), para as condições A, F e E.....	73
Figura 49 - Gráficos relativos à tensão de rotura (à esquerda) e deformação de rotura (à direita), para as condições A, F e E.....	74
Figura 50 - Gráfico dos valores médios do módulo de elasticidade para as condições A, B, C e D. ....	76
Figura 51 - Gráficos relativos à tensão de cedência (à direita) e deformação de cedência (à esquerda), para as condições A, B, C e D. ....	77
Figura 52 - Gráficos relativos à tensão de rotura (à esquerda) e deformação de rotura (à direita), para as condições A, B, C e D. ....	78



## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Características de algumas técnicas RHCM. ....	27
Tabela 2 - Comparação entre as técnicas RHCM, segundo critérios de performance [8]. ....	28
Tabela 3 - Elementos constituintes para moldes de RHCM [8]. ....	29
Tabela 4 – Plano de experiencias do sistema aquecimento (RHCM) ....	48
Tabela 5 – Características de material PP Capilen R50 ....	49
Tabela 6 – Características do pigmento metálico, Sparkle Silvet. ....	50
Tabela 7 – Condições e variáveis estudadas durante o processamento.....	51
Tabela 8 – Condições de processamento utilizados.....	52
Tabela 9 - Imagens de microscopia de luz polarizada da secção transversal das condições A, F e E.....	63
Tabela 10 - Imagens de microscopia de luz polarizada da secção transversal das condições A, B, C e D.....	65
Tabela 11- Imagens em microscopia de campo claro das condições A e B .....	69
Tabela 12 - Imagens em microscopia de campo claro das condições C e D. ....	70



## **Abreviaturas**

RHCM- Rapid Heat Cycle Molding

IR- Infrared

Ts- Temperatura de Superfície

PP- Polipropileno

PPP- Polifenileno

PET- Politereftalato de etileno

PLA- Poli Ácido Láctico

PEEK- Poliéter-éter-cetona

Tc- Temperatura Cima

Tb- Temperatura baixo



# **Capítulo 1**

---

## **Introdução**

## 1.1. Introdução

A moldação por injeção convencional mudou o mundo dos materiais termoplásticos, devido à grande produtividade do processo, liberdade de geometrias das peças e à boa estabilidade das peças, entre outras. Dentro dos vários fatores na moldação por injeção, como o material, a geometria da peça e o molde, é seguro afirmar que um dos parâmetros mais críticos é o controlo da temperatura do molde, a qual influencia a pressão e a velocidade de injeção. O controlo da temperatura é importante para a qualidade das peças. Muitos estudos têm sido feitos sobre este tema, que mostram que a qualidade da peça pode ser melhorada com o aumento da temperatura do molde durante o enchimento da moldação [1].

A evolução da indústria de plásticos em materiais técnicos com pouca fluidez, geometrias de peças complicadas, juntamente com a necessidade de reduzir custos e aumento da produtividade converte o processo de *Rapid Heat Cycle Molding* (RHCM) como uma solução para alcançar as exigências e produtividade máxima que se requerem nas novas aplicações [2].

O *RHCM* é um método inovador na moldação por injeção de termoplásticos e foi desenvolvido por Ono Sangyo, nos últimos anos, registando esta tecnologia como RHCM™ e Heat&Cool™. Esta tecnologia permite que os defeitos que aparecem normalmente nas peças plásticas através da injeção convencional desapareçam. É possível assim obter peças com elevada qualidade superficial, sem linhas de soldadura, linhas de fluxo, etc. Para além disto, operações secundárias como a pintura que traz problemas ambientais e necessitam equipamentos com custos elevados podem ser eliminados. Com a aplicação desta tecnologia é possível reduzir na energia, no material e nos custos de produção [3].

Este novo processo tem como princípio o aquecimento da superfície da cavidade do molde até uma temperatura elevada mas sempre menor que a temperatura do fundido. Esta deve ser ligeiramente superior à temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) para polímeros amorfos e ter uma temperatura elevada para os polímeros semicristalinos, de seguida o molde mantém a alta temperatura durante a fase de enchimento e compactação, e finalmente ocorre o arrefecimento rápido até a peça solidificar para que possa ser extraída [1].

Esta tecnologia engloba, em alguns casos, um determinado *design* do molde RHCM, um controlador de temperatura RHCM e um *know-how* do processo de injeção. O *design* do molde RHCM é baseado nos moldes convencionais com particular destaque para os canais de

aquecimento e arrefecimento da cavidade, o que permite um controlo preciso da temperatura do molde, devido ao aquecimento através das diferentes formas de transferência de calor. Porém, para atingir a qualidade juntamente com a redução dos custos, é crucial possuir algum conhecimento de todo o processo [4].

A aplicação desta técnica é normalmente aplicada em molduras de LCD, lentes óticas, micro-engrenagens, *covers* para computadores portáteis, *trimplates* para autorrádios, etc.

Esta descoberta provocou um grande impacto na indústria de moldação por injeção, e levou as empresas a investir neste método, desenvolvendo os seus próprios sistemas de controlo de temperatura.

## **1.2. Objetivos**

Este trabalho surgiu com a necessidade de procurar soluções otimizadas de fabrico de peças plásticas com o principal objetivo de obter peças de melhor qualidade do que as obtidas pelo método convencional de injeção. Uma das soluções é o uso de técnicas não convencionas de processamento, como a tecnologia RHCM que permite elevar a temperatura do molde durante a fase de injeção, trazendo assim benefícios de um modo geral a todo o processamento das peças.

Assim este trabalho propõe o desenvolvimento de uma das tecnologias RHCM, para aplicação no processo de injeção convencional. De um modo geral, este trabalho requer a construção de um sistema que permita aumentar a temperatura da superfície do molde para melhorar a fase de enchimento. Posteriormente segue-se a realização de ensaios experimentais de modo a testar o funcionamento de todo o sistema.

Este trabalho focar-se-á nos seguintes objetivos:

- Desenvolver o estado da arte sobre as várias tecnologias RHCM existentes.
- Selecionar um caso de estudo.
- Desenvolver e projetar um dos sistemas selecionados para aplicação em moldação por injeção convencional.
- Realizar ensaios experimentais através do processamento de peças com aplicação da tecnologia RHCM.

- Estudar, analisar e comparar as propriedades de peças injetadas com a tecnologia RHCM e pelo método convencional de injeção.

### **1.3. Conteúdo**

Em cada capítulo abordar-se-á um assunto diferente, e apresentar-se-á de seguida uma breve síntese de cada um deles.

- Capítulo 1: Introdução: Neste capítulo, é feita uma introdução ao assunto principal desta dissertação, o sistema Rapid Heat Cycle Molding, uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo, e a apresentação de um fluxograma alusivo às várias fases deste trabalho
- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: Pesquisa bibliográfica que suporte o trabalho a ser efetuado, onde é referido o princípio de funcionamento do sistema e as várias técnicas da tecnologia RHCM.
- Capítulo 3 - Desenvolvimento da tecnologia RHCM: Neste capítulo, falar-se-á da elaboração de soluções construtivas em modelação 3D, seleção dos materiais necessários para a construção do sistema e, por fim, à sua montagem.
- Capítulo 4 - Procedimento experimental: Neste capítulo, descreve-se os equipamentos utilizados ao longo da parte experimental, a metodologia utilizada para o funcionamento do sistema RHCM, plano de experiências para o sistema e para a injeção de peças e, por fim, o procedimento dos ensaios de caracterização realizados.
- Capítulo 5 - Apresentação e discussão dos resultados: No capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos para o estudo efetuado ao sistema e os resultados obtidos para os 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 6 – Conclusão e Trabalhos futuros: Neste capítulo apresenta-se as conclusões finais alcançadas, tendo em conta os objetivos propostos. Por fim proceder-se-á a uma breve descrição de possíveis trabalhos futuros de modo a continuar o estudo efetuado nesta dissertação

#### 1.4. Organização do trabalho

Na figura 1, vê-se um fluxograma que representa, de forma estruturada como foi abordado o trabalho efetuado ao longo da dissertação. Neste, são apresentadas as principais fases ordenadas que envolveram todo o estudo.

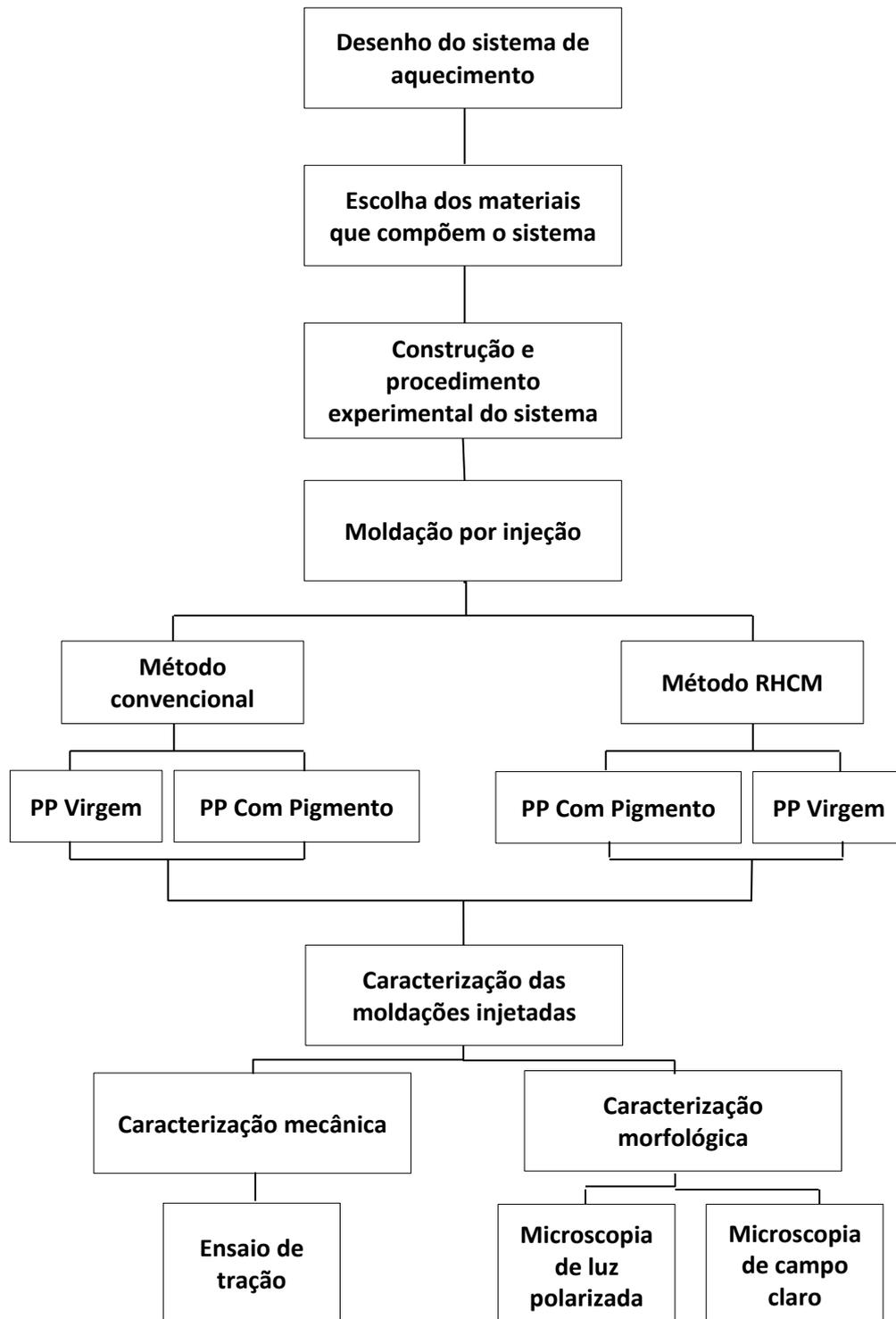


Figura 1- Fluxograma do trabalho efetuado ao longo da dissertação.



## **Capítulo 2**

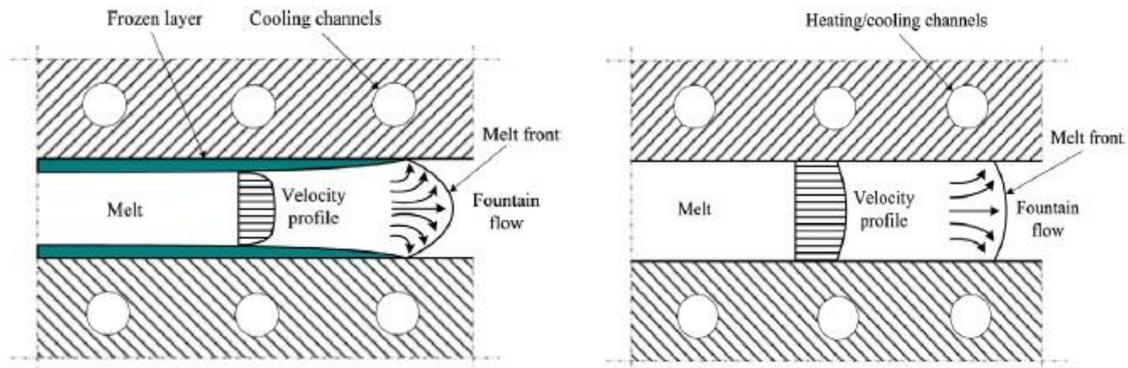
---

### **Revisão bibliográfica**

## 2.1 Princípio das tecnologias RCHM

A principal diferença entre moldação por injeção convencional e o método RCHM é o controlo da temperatura do molde. No processo RCHM o molde é aquecido e arrefecido rapidamente até determinada temperatura sem aumentar o tempo do ciclo de injeção. Neste sentido, as técnicas de aquecimento e arrefecimento são o fator chave para a aplicação de sucesso do RCHM.

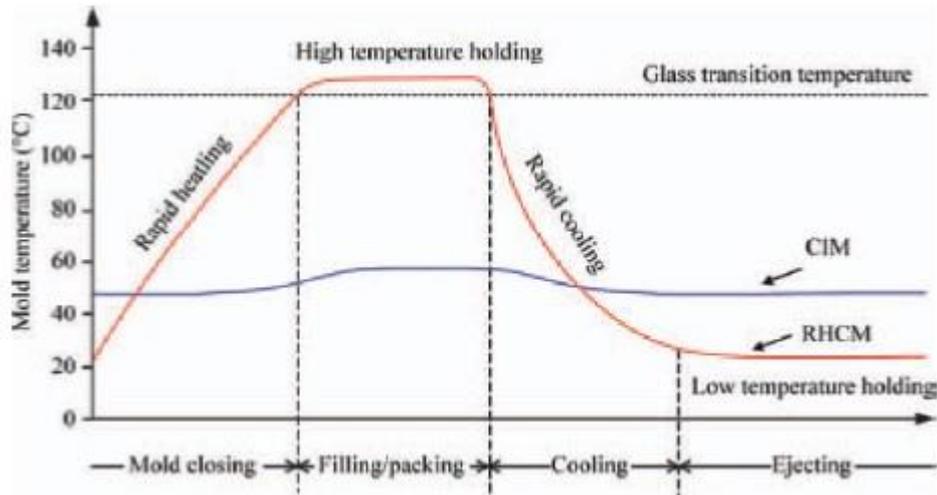
Depois do processo de aquecimento do molde, o fundido é injetado na cavidade do molde. Como o molde é aquecido até uma temperatura elevada, o polímero não solidifica quando entra em contacto com as paredes da cavidade do molde. O mesmo não se observa no processo de injeção convencional. Na figura em baixo pode-se observar a diferença da fase de enchimento do processo convencional, figura 2 (à esquerda), e do processo RCHM, figura 2 (à direita), e também é visível que o perfil de velocidades é mais uniforme no processo RCHM do que no processo convencional [1].



**Figura 2 - Fase de enchimento em moldação por injeção convencional (à esquerda) e fase de enchimento em moldação por injeção com o sistema RCHM (à direita) [1].**

Devido a diminuição da resistência ao fluxo no processo RCHM, o polímero fundido enche a cavidade de modo, fácil e rápido, sendo que o tempo de enchimento e pós-pressão do processo RCHM ser menor do que no processo convencional [5]. Depois da fase de enchimento estar completa, o molde é arrefecido rapidamente até à solidificação do polímero, para quando se atingir uma temperatura baixa a peça é extraída do molde.

De acordo com a variação da temperatura do molde, o ciclo de injeção do processo RHCM, pode ser dividido em quatro fases: aquecimento rápido, manutenção da alta temperatura, arrefecimento rápido, manutenção da temperatura baixa, como pode ser observado na figura 3 [6].



**Figura 3 - Comparação entre o ciclo de moldação por injeção convencional e a injeção com RHCM [6]**

## 2.2. Interesses para o projeto

De modo a resolver o problema da solidificação prematura do material, durante a fase de injeção, aplica-se a nova tecnologia RHCM. Esta tecnologia permite variar a temperatura do molde através de técnicas de aquecimento e arrefecimento rápido. Devido ao aquecimento do molde o polímero fundido apresenta um melhor escoamento e uma replicação perfeita da geometria da peça moldada. Esta tecnologia ajuda ainda a prevenir a solidificação prematura do fundido quando este entra em contacto com as paredes frias do molde (como acontece na moldação injeção convencional), ajudando também numa melhor interação entre as frentes do material fundido. Esta tecnologia tem grande influência na qualidade da peça final.

Aumentando a temperatura do molde com a tecnologia RHCM, é possível prevenir defeitos como linhas de soldadura, linhas de fluxo, efeito de jato, chupados, que normalmente aparecem na moldação por injeção convencional [7].

Com este processo a orientação molecular do fundido é minimizada e isto leva à produção de peças moldadas mais isotrópicas. Como resultado a peça apresenta baixos níveis

de birrefringência, menores tensões residuais, melhores propriedades óticas, e maior precisão e estabilidade dimensional [8].

Como a melhoria da replicação da superfície se dá devido ao aumento da fluidez do polímero na fase de enchimento, é possível obter peças com espessuras finas (*thin-wall parts*) e também peças com microestruturas (aperfeiçoamento de pequenos detalhes nas moldações).

Com a aplicação desta tecnologia é possível aumentar a qualidade do acabamento superficial das peças, especialmente de peças feitas com polímero reforçado com fibras, eliminando a exposição das fibras à superfície. O brilho das peças aumenta significativamente, com polímeros virgens e, principalmente, com polímeros reforçados. Pode-se assim eliminar operações de acabamentos, como pintura de plásticos, que se trata de um processo bastante dispendioso [6].

A tecnologia RHCM permite a moldação de peças com polímeros de alto desempenho, como o PPP, e com polímeros reforçados com grandes quantidades de fibras, pois estes polímeros apresentam altas viscosidades e são difíceis de processar. Pode ainda servir para outras aplicações como otimização da cristalização. Em polímeros com baixa cristalização como o PET, PLA e PEEK, a tecnologia RHCM pode facilitar e otimizar o desenvolvimento de esferulites, encontrando uma cristalização máxima das estruturas cristalinas [8].

Para além dos interesses referenciados em cima é possível aplicar a tecnologia RHCM combinado com bi-injeção ou com injeção de espumas microcelulares (MuCell). Este tipo de combinações permite reduzir defeitos em peças fabricadas pelos mesmos processos, isoladamente [9]. Na injeção de polímeros biodegradáveis como o PLA juntamente com outros polímeros (ex: ABS/PLA), é possível obter peças mais estáveis e também melhorar algumas propriedades [10].

### **2.3. Variantes do processo do controlo de temperatura do molde**

Depois de ter surgido a ideia de aquecimento localizado e temporário das zonas moldantes começaram a surgir propostas, de várias empresas que mostraram interesse nesse desenvolvimento e, assim, iniciaram uma investigação nesta área, criando as suas próprias tecnologias de controlo de aquecimento/arrefecimento do molde. Quanto mais rápido e eficiente for o aquecimento/arrefecimento do molde, juntamente com a eficiência de transferência de

calor entre o molde e a peça, mais produtivo será o processo. O molde neste tipo de técnicas é importante na medida que quanto melhor for a condutividade térmica dos aços que compõem o molde melhor será a performance da técnica.

Dentro das várias formas de promover o aquecimento do molde tem-se:

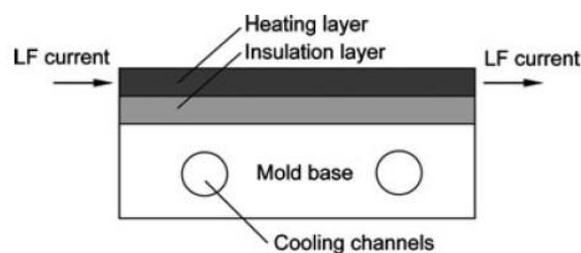
### **2.3.1. Aquecimento elétrico**

O aquecimento através de energia elétrica tem como objetivo transformar energia elétrica em energia calorífica. Existem resistências com corrente de baixa frequência que podem ser de corrente contínua ou de corrente alternada, e com corrente de alta frequência tendo-se aquecimento por indução e aquecimento por proximidade (*proximity heating*) [8].

#### **2.3.1.1. Corrente de baixa frequência**

Quando se trata de corrente de baixa frequência pode-se estar a falar de películas finas de aquecimento, apresentando como desvantagem serem algo frágeis ou seja podem ser danificadas facilmente pondo em causa a uniformidade do aquecimento e geram-se tensões localizadas. Posto isto, o passo principal é identificar um material para a camada que apresente boa dureza, durável e com resistividade alta.

Na figura 4 pode-se observar parte da estrutura de molde de injeção multicamada aquecido através de aplicação de corrente de baixa frequência. O grande desafio deste tipo de aquecimento é prevenir a falha entre a camada de aquecimento e a camada isoladora durante o ciclo térmico [8]. Esta técnica ainda requer ajustes e alguns estudos pois a sua aplicação ainda não provou ser suficientemente favorável.

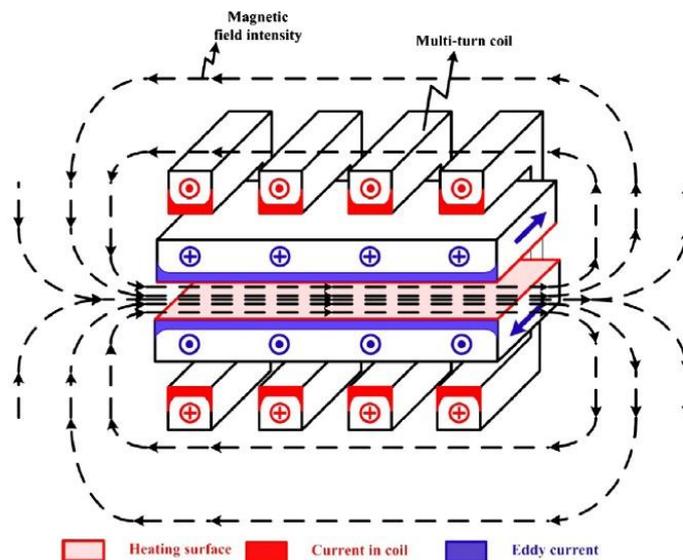


**Figura 4 - Aquecimento elétrico com corrente de baixa frequência [8].**

### 2.3.1.2. Aquecimento por indução

No aquecimento por indução a peça (ou induzido) é introduzida no campo magnético alternado e gerado por uma bobine (ou indutor) percorrida por uma corrente elétrica alternada, esta alternância do campo magnético gera correntes elétricas superficiais na peça (correntes de Eddy) que provocam o respetivo aquecimento muito rápido, por efeito de Joule, ver figura 5.

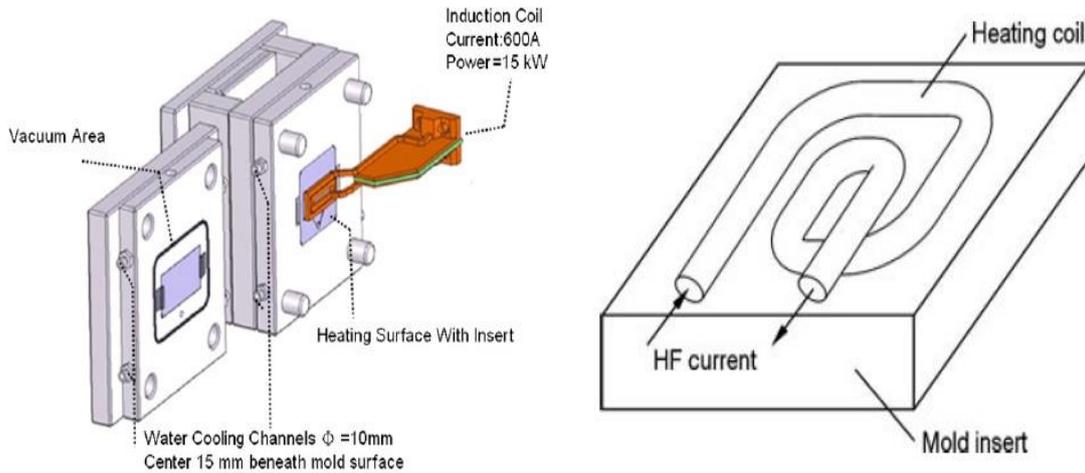
No aquecimento por indução tem-se uma bobina elétrica de alta frequência (figura 5) que, quando aproximada da superfície do molde, faz com que esta aqueça até determinada temperatura [11].



**Figura 5 - Princípio do aquecimento por indução [11].**

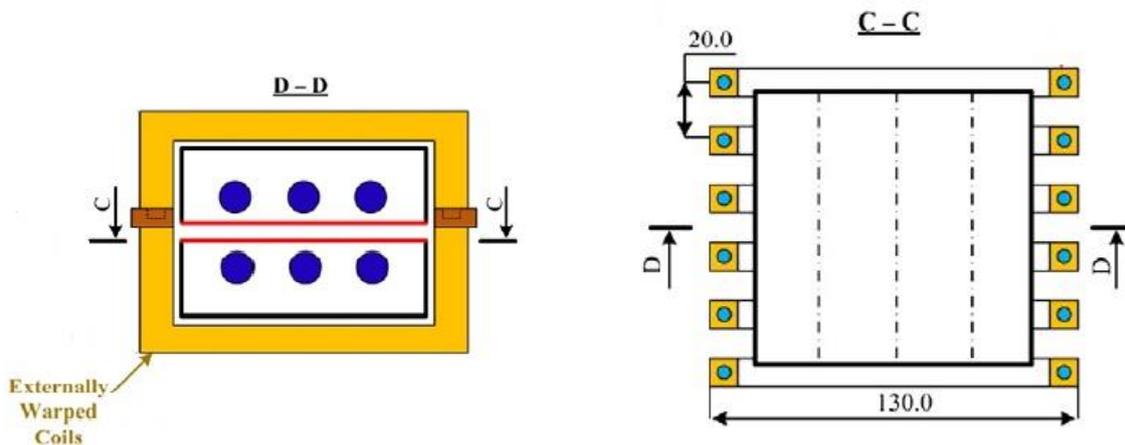
A aplicação deste sistema pode ser feita de três modos diferentes: aplicação da indução externa, indução interna e indução em volta do molde (formato “gaiola”). Dependendo do sistema a aplicar deve se ter algumas considerações, como um robot ou um pneumático que faça aproximar a bobine da superfície do molde (figura 6). No caso da indução externa, na indução em volta do molde (“gaiola”), se for para moldes de grandes dimensões o custo aumenta, tanto o do molde como a da bobine.

S-C Chen *et al* investigou um sistema de aquecimento por indução eletromagnético combinado com arrefecimento a água, em microinjeção. A transferência de calor para aumentar a temperatura da cavidade foi feita através da aproximação de uma bobine elétrica à superfície do molde. Neste estudo aumentou-se a superfície de 60°C para 140°C em 3,5s [11].



**Figura 6 - Tecnologia de aquecimento por indução (aplicação externa (à esquerda) e esboço de uma bobine de indução, para aplicação externa [11].**

*H.-L. Lin et al.* aplicou uma bobine em volta do molde de modo a aquecer o mesmo. Neste trabalho estudou-se a aplicação da bobine com diferentes modelos, em série e em paralelo, com diferentes números de voltas da bobine (5,6 e 7 voltas) e também variando a distância entre placas do molde (1 a 6 mm). Na figura 7 vê-se o molde usado neste estudo, onde a bobine foi desenhada em volta do molde, e os canais de arrefecimento na cavidade para ajudar a arrefecer todo o sistema, moldação e bobine.



**Figura 7 - Molde com bobine em volta do mesmo, e canais de arrefecimento do molde com aquecimento por indução externa (vista de cima e vista em corte) [12].**

Com este estudo conclui-se que o facto de alterar o modelo da bobine em volta do molde, permitiu aumentar significativamente a velocidade de aquecimento, sendo que alterar o modelo da bobine de paralelo para série, permitiu alterar a velocidade de aquecimento de 1,8 °C/s para 8,0 °C/s [12].

Este método, quando aplicado externamente (técnica mais usada), tem como vantagem a não alteração interna do molde para promover o seu aquecimento, sendo que a sua aplicação interna ou em formato “gaiola” é mais difícil de projetar. Este tipo de aquecimento apresenta também como vantagem as velocidades de aquecimento rápidas.

No entanto tem como desvantagem a criação do projeto da bobina, pois esta deve ser cuidadosamente pensada e desenhada para promover um aquecimento uniforme em toda a superfície moldável, quando se trata de aplicação externa. Quando se trata de aplicação interna e em “gaiola”, para além da desvantagem referida para a bobine, há um acréscimo acresce dos custos com o projeto do molde [12].

### 2.3.1.3. Aquecimento por proximidade

O aquecimento por proximidade tem como princípio básico a proximidade das placas do molde voltadas uma para a outra com uma pequena folga entre elas formando-se um circuito elétrico de alta frequência. Devido ao efeito da proximidade, a corrente elétrica de alta frequência flui em direções opostas, e tende posteriormente a fluir para as zonas interiores, ou seja, entre o circuito, provocando assim o aquecimento da superfície de moldação [13].

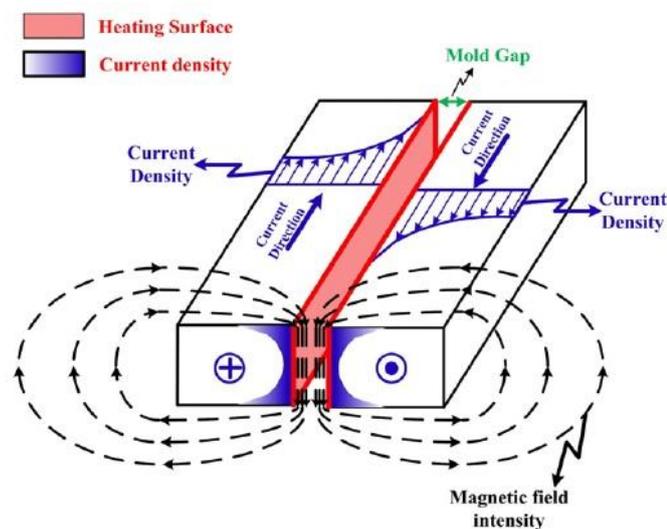
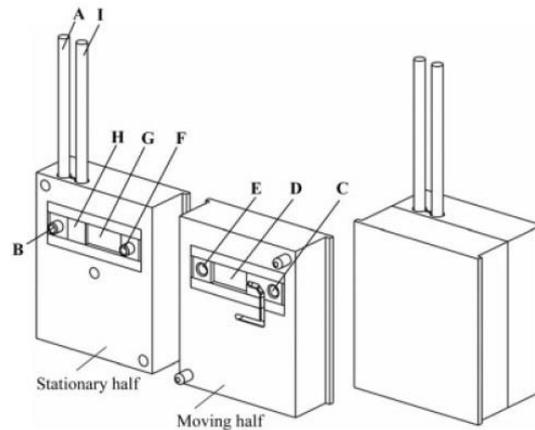


Figura 8 - Princípio do aquecimento por proximidade [13].

Quando se trata do projeto do molde o material das placas deve ter em conta que sejam aços de alta resistência e que tenham elevada permeabilidade magnética. Uma outra consideração a ter em conta é criação de “air pockets” nas cavidades e buchas para melhorar as transferências de calor. Neste método deve ser usado também um isolamento elétrico no molde [8].

Como vantagem tem a velocidade de aquecimento rápida. Uma das desvantagens que este método apresenta é o facto deste sistema de transmissão de potência, de alta de frequência, estar diretamente ligado a perdas de energia.



**Figura 9 - Molde desenhado para aplicação de aquecimento de proximidade [8]**

### **2.3.4. Aquecimento por convecção (água, vapor, óleo ou gás)**

Outro método de aquecimento das superfícies de moldação é através de transferência de calor por convecção. Neste tipo de transferência de calor temos trocas de calor entre um fluido e um sólido, que neste caso é o aço do molde.

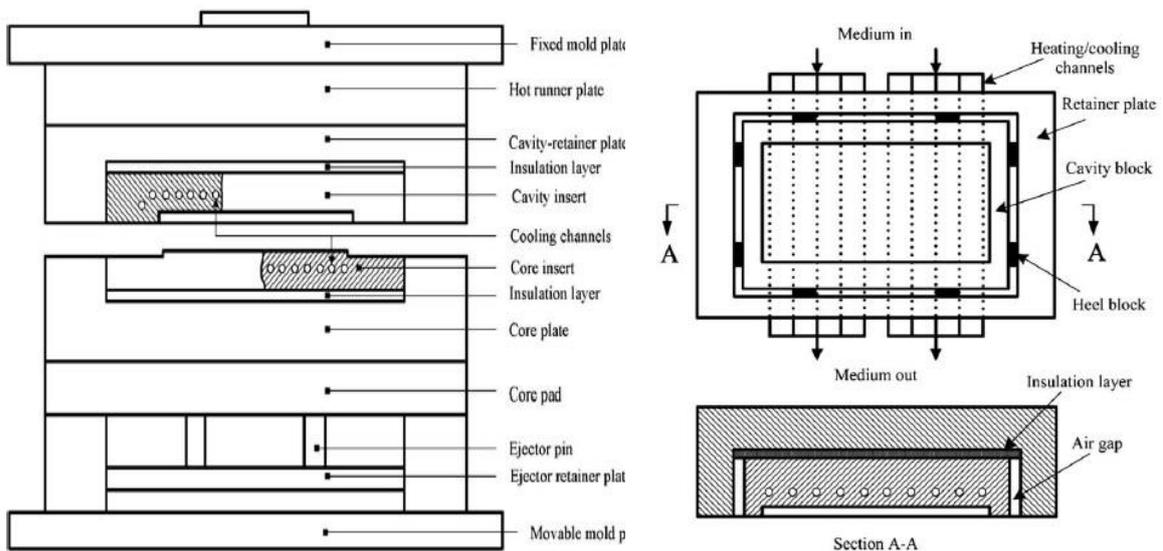
Este tipo de aquecimento pode ser feito com recurso a diferentes fluidos como água, vapor, óleo e gás. Também pode ser aplicado no molde interna ou externamente.

O aquecimento por convecção é dos métodos mais utilizados para promover o aquecimento do molde (também conhecido como processo Variotherm). Na maioria dos casos é a sua aplicação é feita internamente no molde.

#### **2.3.4.1 Aquecimento com vapor**

A tecnologia *RHCM* por aquecimento através de vapor de água com arrefecimento, a faz com que a água largamente aplicado, na indústria dos plásticos, sobretudo nos componentes eletrónicos. Quando se trata de aquecimento por vapor, o vapor saturado a altas temperaturas e altas pressões circula através dos canais de aquecimento no interior do molde, ajudando assim a elevar a temperatura da mesma durante a fase de enchimento da moldação [14].

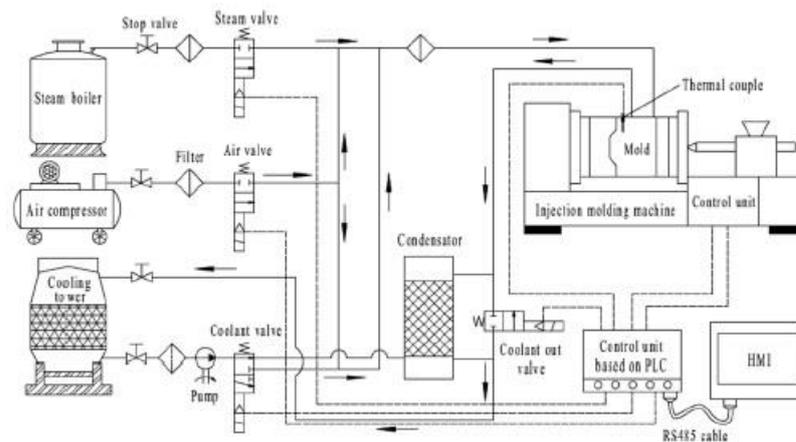
Neste tipo de aquecimento, a eficiência na transferência de calor, a uniformidade da temperatura na cavidade do molde e a resistência da estrutura do molde de injeção para uma peça específica, depende maioritariamente do *layout* (disposição) dos canais de aquecimento/arrefecimento (quando se trata de aquecimento por convecção, normalmente, os canais que têm como função aquecer o molde têm também como função arrefecer o molde). Assim o mesmo *layout* requer especial atenção de modo a obter uma melhor performance da tecnologia *RHCM* [5]. Neste tipo de aquecimento é também usual a utilização de uma placa isoladora entre a cavidade e a placa da cavidade, evitando assim perdas de calor. Esta aplicação requer que as mangueiras suportem as elevadas pressões exercidas pelo vapor de água a elevadas temperaturas [1]. Na figura 10 é possível observar um molde para aplicação de aquecimento por vapor, água ou óleo.



**Figura 10 - Estrutura de um molde para aquecimento a água, vapor ou óleo e disposição dos canais de arrefecimento/aquecimento no molde [5].**

Em comparação com a moldação por injeção convencional, neste tipo de aquecimento de moldes, o molde deve ter os canais mais próximos entre si e mais próximos da superfície da cavidade e assim reduzir o tempo de ciclo e aumentar a eficiência nas transferências de calor, tanto no aquecimento como no arrefecimento [1].

O sistema de aquecimento através de vapor requer uma unidade de controlo que permita ter um maior controlo sobre o processo. Na figura 11 está representado o sistema de aquecimento a vapor.



**Figura 11 - Sistema de aquecimento do molde a vapor [15].**

O processo de controlo da temperatura do molde através de vapor consiste, numa unidade de vapor, unidade de água, unidade de ar, unidade de válvulas e uma unidade de controlo. O conjunto dos sistemas descritos são normalmente integrados em controladores de temperatura disponíveis comercialmente.

Para aumentar a eficiência na transferência de calor, no fim da fase de arrefecimento, com água, abre-se a válvula de ar para forçar a saída da água dos canais, dando posteriormente lugar ao vapor de alta temperatura, pois assim ocorre um melhor contato do vapor com as paredes dos canais [14].

Este processo tem como vantagem a aplicação desta técnica em peças de geometrias mais complexas quando comparado com outros processos de aquecimento. Pelo facto dos canais de arrefecimento e aquecimento serem os mesmos, o método torna-se mais uniforme e eficaz e outra vantagem é que consome muito menos energia comparado com o aquecimento a óleo. Como desvantagens, temos o investimento inicial, pois requer custos com o molde, sistema gerador de vapor de água, mangueiras especiais que aguentem com as altas pressões geradas pelo vapor, ou requer algumas medidas de segurança.

#### **2.3.4.2. Aquecimento com água quente**

O aquecimento através de água é o método mais económico para fazer aquecer a temperatura molde, a temperatura do molde pode ir ate 90°C, acima destas deve ser aplicada pressão na água, de modo a evitar que a água passe para um estado de vapor [1].

A grande desvantagem desta técnica é a limitação das temperaturas máximas que se pode obter. Como vantagem, é o facto de esta técnica ser das mais económicas.

#### **2.3.4.3. Aquecimento com óleo**

Quando se trata de aquecimento a óleo existe apenas a troca do fluido comparado com o aquecimento a vapor. E neste caso o aquecimento e arrefecimento são feitos através do mesmo fluido, o óleo.

O aquecimento a óleo tem como vantagens a maior gama de temperaturas para aquecer o molde (pode chegar aos 300°C). No entanto como desvantagens o facto da velocidade de arrefecimento ser mais lenta quando comparada com o processo por vapor, desencadeia uma menor eficiência de transferência de calor e também requer um maior consumo de energia [1].

#### **2.3.4.4. Aquecimento com gás quente**

Uma das possibilidades de promover o aquecimento do molde é a utilização de gás a altas temperaturas juntamente com água para o arrefecimento. O sistema é composto por um controlador de temperatura de água, um gerador de gás quente, um controlador de temperatura e fluxo do gás, um molde especialmente desenhado para este. Na figura 12 é possível observar um exemplo da constituição deste sistema [15].

S.-C. Chen et al. investigou o aquecimento do molde através de gás a altas temperaturas e concluiu que a temperatura do gás e fluxo aplicado ao gás têm influência sobre a temperatura do molde. O formato de entrada do gás tem influência na uniformização da temperatura, sendo que uma entrada em leque apresenta uma melhor distribuição da temperatura comparado com a uma entrada circular. Neste estudo do aquecimento por gás quente, aqueceu-se a cavidade (100mm x 20mm x 10mm) de 60°C para 120°C em 2 segundos. É de referir que o *design* do molde bem como a condutividade térmica do material e o recurso a isoladores térmicos, permitiu tal eficiência. Neste caso o gás estava a uma temperatura de 500°C e apresentava um fluxo de 400 l/min. O arrefecimento, por sua vez, foi 34 segundos, de 120 para 60°C [16].

Como vantagem, tem-se a velocidade de aquecimento e, assim, a redução do tempo de ciclo. Como desvantagem, existe o custo do sistema de aquecimento e da ferramenta, sendo que o desenho do molde torna-se difícil quando se trata de peças com geometria complexa.

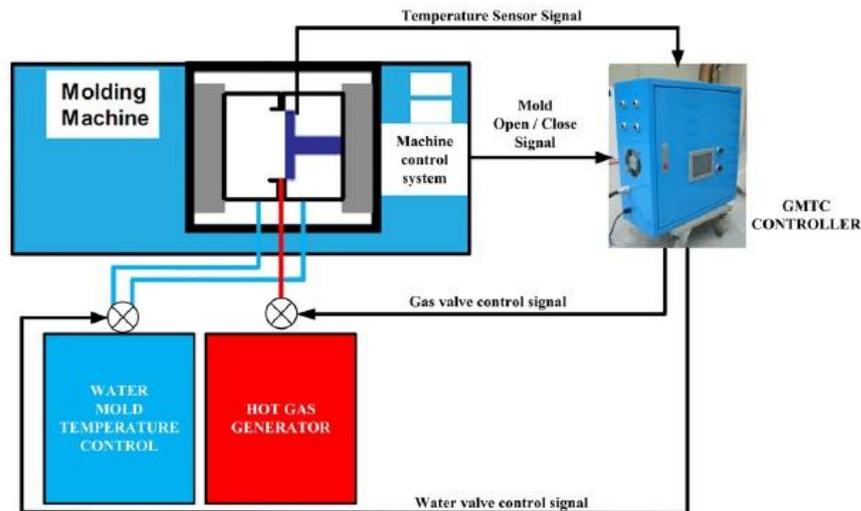
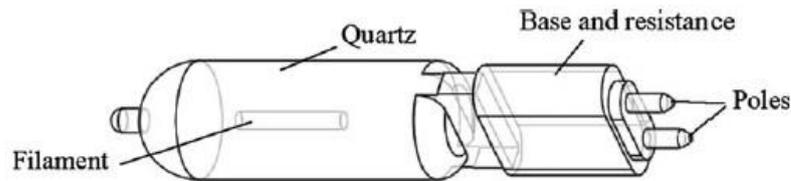


Figura 12 - Sistema para aquecimento a gás [16].

### 2.3.5. Aquecimento por radiação

A aplicação de aquecimento por radiação de modo a elevar a temperatura do molde foca-se em radiação por infravermelhos. Este sistema por infravermelhos é semelhante ao sistema de aquecimento por indução, em que a bobine projetada é substituída por lâmpadas halogéneas.

*M.-C. Yu et al.* estudou a aplicação de aquecimento por infravermelhos num molde de microinjeção e, no mesmo estudo, o sistema de aquecimento por infravermelho é colocado entre as duas partes (móvel e fixa) do molde, a cada ciclo, de modo a aquecer áreas específicas. Quando se atinge a temperatura desejada, o sistema de infravermelhos retirado e o molde fecha, prosseguindo para a fase de injeção. O arrefecimento do molde é feito através do método convencional, ou seja, pelo fluxo de água nos canais de arrefecimento. Os infravermelhos apenas aquecem as cavidades do molde, a partir do momento em que se remove o sistema de aquecimento ocorre a fase de arrefecimento. O sistema de aquecimento usado neste estudo era composto por duas unidades, uma unidade de aquecimento e uma unidade de controlo. A unidade de aquecimento composto quatro lâmpadas de infravermelhos, (figura 13) de 1 kW e dois refletores para as lâmpadas. Cada refletor cobre duas lâmpadas, sendo que cada um corresponde a um dos lados do molde. O refletor é feito de um material característico de modo a aumentar a eficácia do aquecimento (ou seja, aumenta a refletividade das lâmpadas) [17].

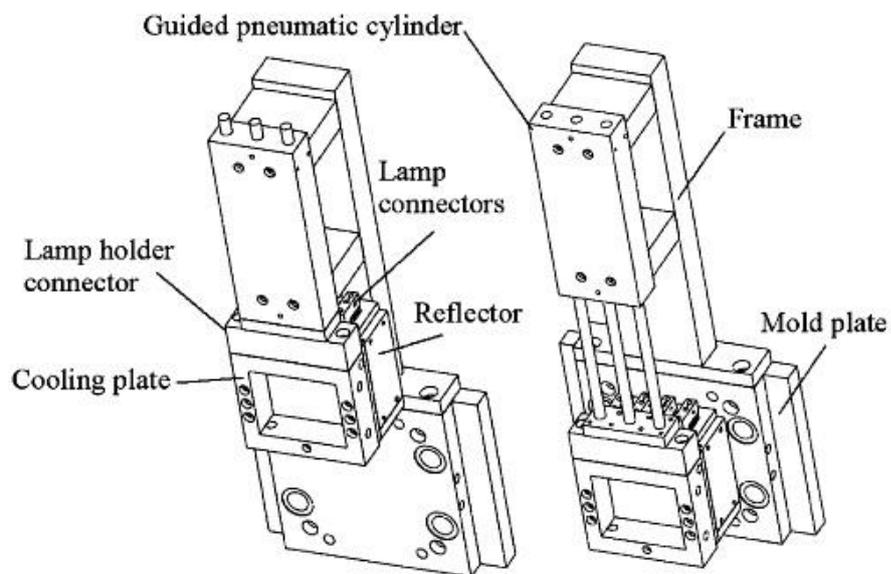


**Figura 13 - Lâmpada de halógeno usada no sistema IR [19].**

A unidade de controlo é feita através do tempo de exposição das lâmpadas sobre a superfície a aquecer, assim que determinado tempo é atingido o sistema é removido através de um cilindro pneumático (ver figura 14). No respetivo estudo os tempos para aquecimento do molde variaram entre os 10 e os 40 segundos [17].

Este método tem como vantagem não haver custos sobre o molde de injeção, devido ao aquecimento ser exterior ao molde. O investimento é menor comparado a outros métodos que requerem controladores, como nos casos de aquecimento por convecção. A nível de consumo de energia este sistema apresenta menores valores comparado a outras técnicas.

Como desvantagem, possui o difícil controlo da uniformização da temperatura, a baixa velocidade aquecimento (aumenta o tempo de ciclo) quando comparado com outros métodos como, por exemplo, o aquecimento por indução, a perda de calor durante o tempo de saída do sistema de infravermelhos.



**Figura 14 - Sistema de aplicação de aquecimento por infravermelhos [18].**

### **2.3.6. Aquecimento dielétrico (micro-ondas)**

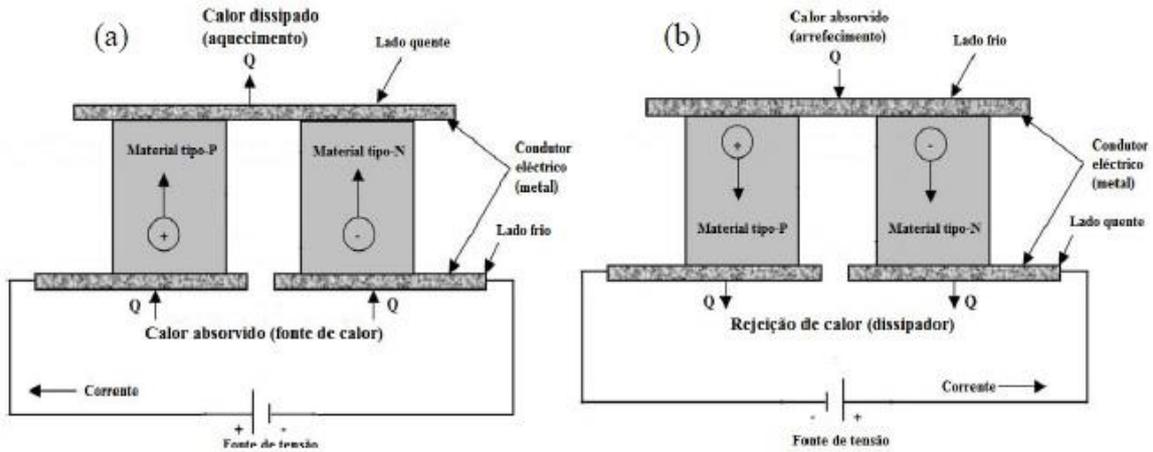
Um material dielétrico pode ser aquecido por radiação eletromagnética de alta frequência (incluindo micro-ondas), normalmente por rotação dipolar. A utilização de aquecimento dielétrico para promover o aquecimento do molde requer que o molde tenha um material dielétrico e isolamento elétrico. Devido às suas limitações no aquecimento do molde é, no entanto, usado para promover aquecimento do polímero. Por isso, este método pode ser usado como uma forma de aquecimento auxiliar, juntamente com outra fonte de calor que promova “diretamente” o aquecimento do molde. O calor gerado no polímero, por este método, não contribui para o aquecimento do molde.

O método de aquecimento dielétrico pode ser combinado com o aquecimento por indução e, assim, obtém uma melhor performance no aquecimento do molde. Neste caso, o molde é feito de um material dielétrico, o próprio molde e o polímero podem ser ativamente aquecidos através de energia de alta frequência. A maioria dos polímeros tem fraca absorção eletromagnética é uma referência. Assim, grandes fontes de energia e utilização de aditivos são requeridos para por em prática o uso deste método de aquecimento [8].

### **2.3.7. Aquecimento termoelétrico (Peltier Effect)**

O efeito Peltier (ou efeito termoelétrico) mostra que uma junção metálica de dois materiais diferentes pode produzir calor ou frio, dependendo da direção da corrente elétrica que nele circula.

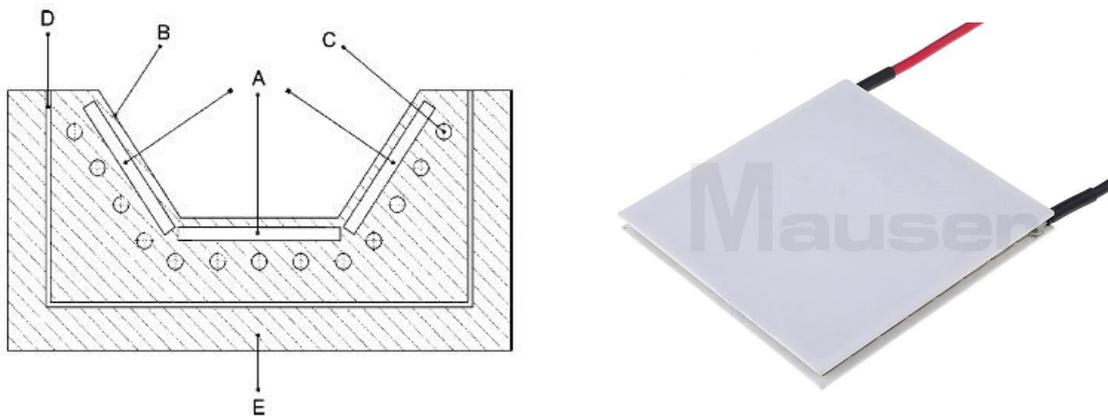
A absorção ou libertação de energia térmica, na junção de dois materiais diferentes, depende do sentido e da intensidade da corrente que a percorre. Assim, a energia térmica é proporcional à corrente, ou seja, quanto maior a corrente que circula na junção dos materiais, maior a absorção ou libertação de energia. A junção absorve ou liberta energia dependendo do sentido da corrente elétrica. Desde logo, quando a corrente circula em um sentido, a junção liberta energia térmica aquecendo o meio onde se encontra, figura 15 (a). Invertendo o sentido da corrente a junção absorve energia térmica, figura 15 (b), do meio onde se encontra, arrefecendo-o assim.



**Figura 15 - Aquecimento (a) ou arrefecimento (b) através do efeito Peltier [19].**

Os conversores termoeletrônicos são compostos por inúmeros pares termelétricos, ou seja, dois materiais diferentes (normalmente semicondutores) ligados numa extremidade, um do tipo P e outro do tipo N. Este ponto designa-se por junção termelétrica (ou junção P-N). Os conversores termelétricos, seguindo uma estrutura como a observada na figura anterior, possuem os seus pares termelétricos ligados eletricamente em série por junções metálicas, e termicamente em paralelo. Assim, quando o dispositivo é percorrido por uma corrente elétrica, que entra pelo terminal (+), percorre todos os elementos em série e sai pelo terminal (-), figura 15 (b). Há uma absorção do calor no lado de cima (arrefecendo o meio ambiente onde se encontra) e dissipa o calor pelo lado de baixo (para, por exemplo um dissipador) [19].

*B. Nardin et al.* investigou um método para aumentar a temperatura do molde, recorrendo a módulos termelétricos, estes quando inseridos no molde permitem alterar as condições térmicas do mesmo. A potência da transferência de calor pode ser controlada através da magnitude e polaridade da energia elétrica fornecida. O objetivo principal do uso de módulos termelétricos no molde é o seu uso para aquecimento do molde. O arrefecimento é feito através de canais no qual passa o líquido refrigerador (água). Na figura 16 temos um exemplo de um molde com módulos termelétricos incorporados [20].



**Figura 16 - Estrutura de um molde para aplicação de módulos termelétricos (A), posição do molde (B) canais de arrefecimento (C), camada isoladora (D) e placa do molde (E), à esquerda, e módulo termelétrico (disponível comercialmente), à direita [20].**

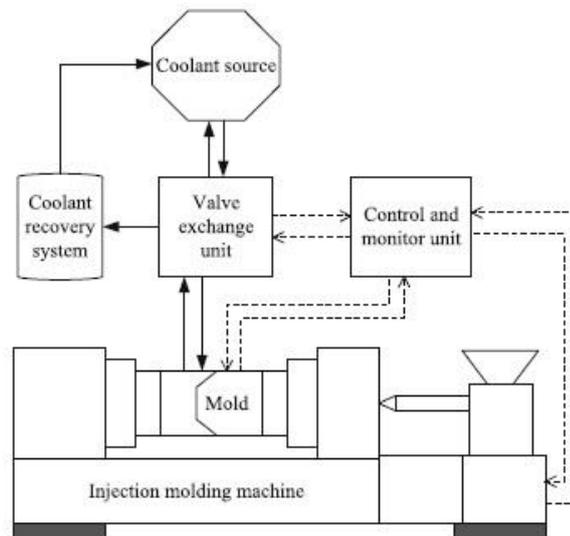
Este processo apresenta como desvantagens o controlo do arrefecimento (sendo difícil obter um arrefecimento uniforme da peça moldada), a aplicação deste sistema em peças com geometria complexa e os custos do molde.

Como vantagem temos o investimento em equipamento de aquecimento que (módulos termelétricos, sistema de controlo, etc) é menor comparado com outros processos como aquecimento por resistências, a vapor, gás, óleo, etc.

### **2.3.8. Aquecimento por resistências elétricas**

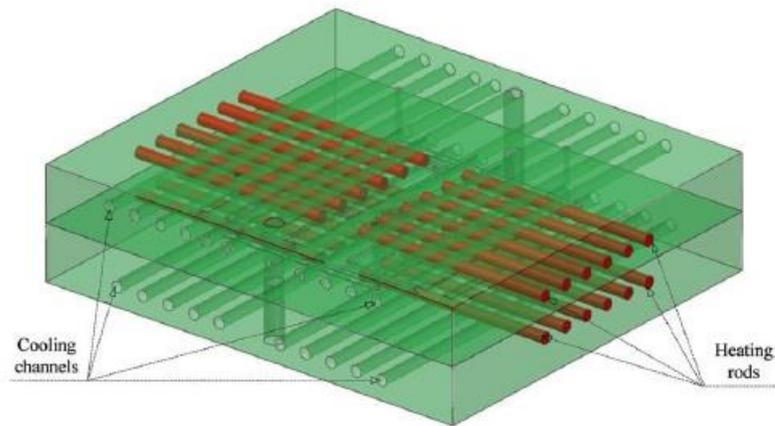
A tecnologia *RHCM* com aquecimento por resistências elétricas, consiste na utilização de resistências que são colocadas no interior do molde, ou seja mais concretamente no interior da cavidade de modo a elevar a superfície pretendida até temperaturas elevadas. O arrefecimento é feito através do método convencional, onde se coloca água a circular pelos canais de arrefecimento.

G. Wang et al. desenvolveu um sistema de aquecimento do molde através de resistências elétricas com canais de arrefecimento separados. Neste estudo foi usado um sistema de arrefecimento, um sistema de troca de válvulas um, molde com resistências elétricas, um controlador, um monitor e uma máquina de injeção. Na figura 17 pode-se observar a composição do sistema *RHCM* com resistências elétricas. A unidade de controlo das resistências tem como função o controlo da potência.



**Figura 17 - Sistema para aquecimento por resistências elétricas [21].**

O molde para aplicação deste tipo de tecnologia é diferente dos moldes usados para aplicação de tecnologias de aquecimento por convecção (água, vapor ou óleo). Os moldes para tecnologias de aquecimento por convecção são similares aos moldes convencionais, sendo que os canais para aquecimento são os mesmos canais para arrefecimento. No caso dos moldes para utilização de resistências elétricas devem ser criados canais separados, uns para a colocação de resistências e outros canais para arrefecimento. Com isto deve ser dada especial atenção ao layout de ambos os canais. Na figura 18 pode-se observar um exemplo do esquema dos canais de aquecimento e arrefecimento. É visível o facto dos canais de aquecimento (localização das resistências), estarem colocados entre a superfície do molde e os canais de arrefecimento. Esta disposição tem como vantagens a redução de perdas de calor para as partes traseiras do molde (ou seja para trás dos canais de arrefecimento). Os canais de aquecimento quando colocados em posição perpendicular aos canais de arrefecimento permite aumentarem a resistência da estrutura da cavidade [21].

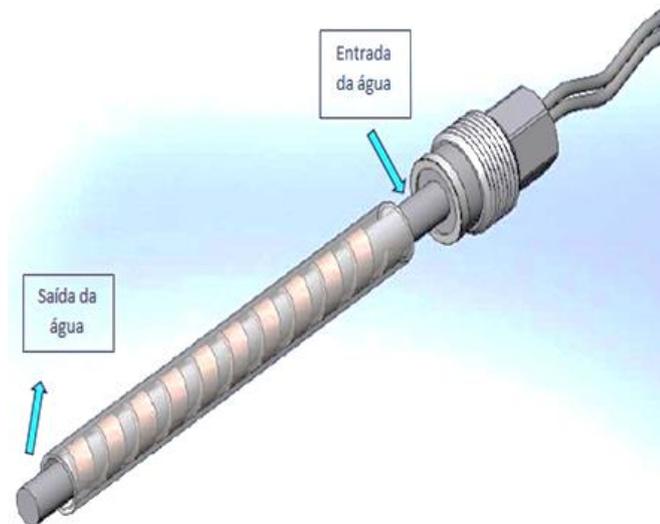


**Figura 18 - Posicionamento dos canais de aquecimento e arrefecimento na cavidade [21].**

A eficiência da transferência de calor e as temperaturas das superfícies requeridas dependem da potência das resistências. Contudo, uma maior potência requer maior consumo de energia. Com resistências de 300 W e sendo o material da cavidade o AISI P20 obteve-se uma velocidade de aquecimento de aproximadamente  $5^{\circ}\text{C} / \text{s}$ .

Existe atualmente no mercado um sistema de aquecimento do molde por resistências (Hotsys System), onde as resistências elétricas são especialmente projetadas de modo que a que seja permitida passagem de água através da resistência, e isso ajuda a arrefecer a resistência de forma rápida. Isto permite uma utilização de canais únicos no molde que desempenham a função de aquecimento e arrefecimento, para além de reduzir custos com o molde, pode ajudar a otimizar a eficiência do sistema. Na figura 19 pode-se observar um exemplo desse tipo de resistência, a sua estrutura helicoidal permite uma melhor transferência de calor. [22]

A utilização de uma placa isoladora térmica na estrutura do molde entre a cavidade do molde e as restantes placas, permite melhorar a eficiência do processo, reduzindo o tempo de ciclo e reduzindo o consumo de energia.



**Figura 19 - Resistência elétrica produzido pela Hotsys [22].**

A correta aplicação desta tecnologia permite tanto obter melhores uniformidades de temperatura ao longo da cavidade do molde como temperaturas mais elevadas (acima dos 250 °C), quando comparado com outras tecnologias como aquecimento por vapor de água. O facto de se conseguir obter temperaturas mais elevadas está relacionado com uso desta tecnologia para polímeros de engenharia e polímeros reforçados com fibras. No entanto tem como desvantagem a sua aplicação em peças de geometrias simples, como painéis de LCD, *covers* para computadores portáteis, etc. Caso se tratar de peças com geometria complexa, o desafio recai sobre o *layout* das resistências no molde, aliando alta eficiência na transferência de calor, uniformidade e redução do consumo de energia. O consumo de energia é também uma desvantagem deste sistema devido à elevada potência das resistências [21].

## 2.4. Comparação entre as várias técnicas de aquecimento

Para concluir, é feita uma comparação entre algumas das técnicas referidas anteriormente, através da informação retirada de cada técnica, referindo em cada uma delas o tipo de aquecimento, controlador de arrefecimento, tempo de ciclo e dimensão da superfície aquecida. A Tabela 1 mostra essa comparação [23].

**Tabela 1 - Características de algumas técnicas RHCM.**

Heating equipment	Cooling equipment	Cycle time	Tool surface (mm)
Gas flame	No	AT to 400 °C in 10 s	100 x 100 x 30
Rapid thermal response mould	No	AT to 250 °C to 50 °C in 11 s	72 x 25.4 x 12.7
Proximity heating	Air pockets	AT to 220 °C to 90 °C in 14 s	24.3 x 51
Electrical system	Water circulation	25 °C to 150 °C in 20 s AT to 205 °C to 32 °C in 30 s	n/a
Infrared halogen lamp	No	AT to 208 °C in 20 s	180 x 180
Water heating system	Cold water circulating system	30 °C to 160 °C in 40 s	n/a
Oil heating system	Cold oil circulating system	30 °C to 130 °C in 40 s	n/a
Special surface coating	Coolant circuit	n/a	n/a
Peltier device	Peltier device	Temperature control difficult due to power and response time	n/a

Na Tabela 2 pode-se observar uma comparação mais geral de cada uma das técnicas RHCM referidas anteriormente tendo em conta características de *performance*.

Tabela 2 - Comparação entre as técnicas RHCM, segundo critérios de performance [8].

	Heating Uniformity	Maximum Energy	Heating Efficiency	Capability for Heating Complex Mold Shape	Capability for Heating Large Surface Area	Ability of Using Single Metallic Mold	Thermal Stresses	Ability for Active Heating	Complexity in Mold Design and Fabrication	Difficulty for Thermal Measurement
Low-frequency resistive heating	M <sup>a</sup>	H	H	M	M	Nearly impossible	Extremely high	Possible	H	M
Induction heating	M	H	M	M	M	Possible	M/H	Difficult	M/H	H
Proximity heating	L	H	M	L	L	Possible	M/H	Possible	M	H
Infrared radiation heating	M	H	L/M	M	M	Possible	M	Need a transparent mold	M/H	M
Internal oil heating	H	L	M	H	H	Possible	L	Possible	L/M	L
Internal steam heating	H	L	M	H	H	Possible	L	Possible	L/M	L
External hot air heating	M/H	M/H	L/M	M	L/M	Possible	M	Not possible	M	M
Flame heating	M/H	H	L/M	M	M	Possible	M/H	Possible	M/H	M
Passive heating	H	L	H	H	H	Possible	L	Not possible	L	H
Contact conduction heating	L/M	M/H	H	L	M	Possible	L	Difficult	M	M
Thermoelectric heating	M	L	L/M	M	L	Nearly impossible	H	Possible	M	M
Dielectric heating	M	Dependent on molding polymer	Dependent on molding polymer	M	L/M	Possible	L	Possible	L/M	H

<sup>a</sup>H, high; M, medium; L, low.

## 2.5. Considerações no projeto do molde

Com o objetivo de melhorar a eficiência de custos e a qualidade das peças é necessário aumentar a eficiência na transferência de calor e na uniformização das temperaturas. Isto implica que o projeto do molde para aplicação deste método tenha alguns requisitos que devem ser estudados para melhor eficiência do processo [8].

Um molde nestes casos deve cumprir três requisitos importantes: ser rígido, robusto e ter uma baixa massa térmica (um molde com baixa massa térmica apresenta uma inercia térmica baixa, e assim, facilita a variação de temperatura); possuir componentes que permitam um aquecimento rápido da superfície da cavidade do molde; elementos que permitam o rápido arrefecimento do molde. Como o gradiente térmico desenvolvido durante o arrefecimento é menor do que na fase de aquecimento, e devido às exigências mecânicas as regras para o molde tem maior peso sobre os critérios para aquecimento do molde. No projeto do molde é normal dar-se mais importância a baixa massa térmica e ao aquecimento rápido. Na tabela 3 é possível observar os elementos constituintes para um molde de aquecimento e arrefecimento rápido [8].

**Tabela 3 - Elementos constituintes para moldes de RHCM [8].**

Low Thermal Mass	Rapid Heating	Rapid Cooling
a. <i>Low density</i>	a. <i>Electrical resistive heating</i>	a. <i>Convective cooling</i>
b. <i>Low specific heat</i>	With low-frequency current <sup>26-30</sup>	<i>with internal media</i>
c. <i>Small volume</i> <sup>66,67</sup>	With direct current	Water
d. <i>Combination of a, b, or c</i>	With alternating current	Cold gas including air
e. <i>Porous material</i>	With high-frequency current	b. <i>Cooling with heat pumps</i>
Scaffolded molds <sup>75-77</sup>	Induction heating <sup>9-12,22-25,36-38</sup>	Peltier effect
Porous metal from gas foaming	Proximity heating <sup>39,40</sup>	Vortex tubes
Porous metal from powder metallurgy	b. <i>Dielectric heating (microwave)</i> <sup>62,63</sup>	Condensers and evaporators
f. <i>Insulated mass</i>	c. <i>Heating with thermoelectric</i>	
Multilayer structure <sup>5,26-30,51-60</sup>	<i>or the Peltier effect</i> <sup>2,50</sup>	
Gradient materials	d. <i>Convective heating</i>	
Orthotropic materials <sup>89</sup>	With internal media	
	Hot oil <sup>32-34</sup>	
	Steam heating	
	Hot gas	
	With external media	
	Hot gas <sup>25</sup>	
	Condensing vapor <sup>35</sup>	
	Flame <sup>13-17</sup>	
	e. <i>Radiation heating</i>	
	Infrared radiation <sup>21,41-47</sup>	
	Focused beams	
	f. <i>Contact heating</i>	
	With a heated solid <sup>64,65</sup>	
	With the polymer melt-passive heating <sup>5,51-61</sup>	
	g. <i>Other methods, e.g., ultrasonic heating</i>	



## **Capítulo 3**

---

### **Desenvolvimento do sistema RHCM**

### **3.1. Desenvolvimento do sistema de aquecimento RHCM**

O sistema construído para este estudo foi um sistema de aquecimento através de calor gerado por lâmpadas de halogéneo e estas, por sua vez, emitem radiação infravermelha, sendo este tipo de sistema conhecido como sistema de aquecimento IR. Ao longo deste capítulo será descrito todos os passos efetuados, como o equipamento utilizado, os materiais selecionados, soluções construtivas e montagem do sistema. Apresentar-se-á o procedimento experimental relativo ao correto funcionamento do sistema de aquecimento.

O principal objetivo deste trabalho é a criação de um sistema não convencional de moldação, para o processo de moldação por injeção. O sistema escolhido permite o aquecimento da superfície da cavidade, e como tal, recorreu-se a lâmpadas de halogéneo que permitem atingir elevadas temperaturas por dissipação de calor. Este tipo de sistema traz vantagens ao método convencional de moldação por injeção, com o aquecimento da superfície.

Este sistema, já foi estudado por outros investigadores, quando aplicado à microinjeção, sendo que no presente caso foi aplicado à injeção convencional.

Numa primeira fase, depois de se ter decidido o sistema a aplicar, procedeu-se à escolha dos materiais e, ao mesmo tempo, pensou-se numa solução construtiva para o respetivo sistema, ou seja, uma estrutura que servisse de suporte para as lâmpadas.

Os materiais selecionados para construção do sistema de aquecimento foram:

- Lâmpadas
- Placas de alumínio
- Placa isoladora
- Barra de Teflon
- Parafusos
- Placa de inox
- Dobradiças em alumínio
- Cabo elétrico trifásico
- Ficha macho 16 A

## 3.2. Materiais e Equipamentos utilizados

Ao longo do trabalho utilizou-se alguns equipamentos para além do sistema desenvolvido que foram necessários para reproduzir toda a parte experimental. De seguida, tem-se uma descrição desses materiais e equipamentos.

### 3.2.1. Injetora e termorregulador

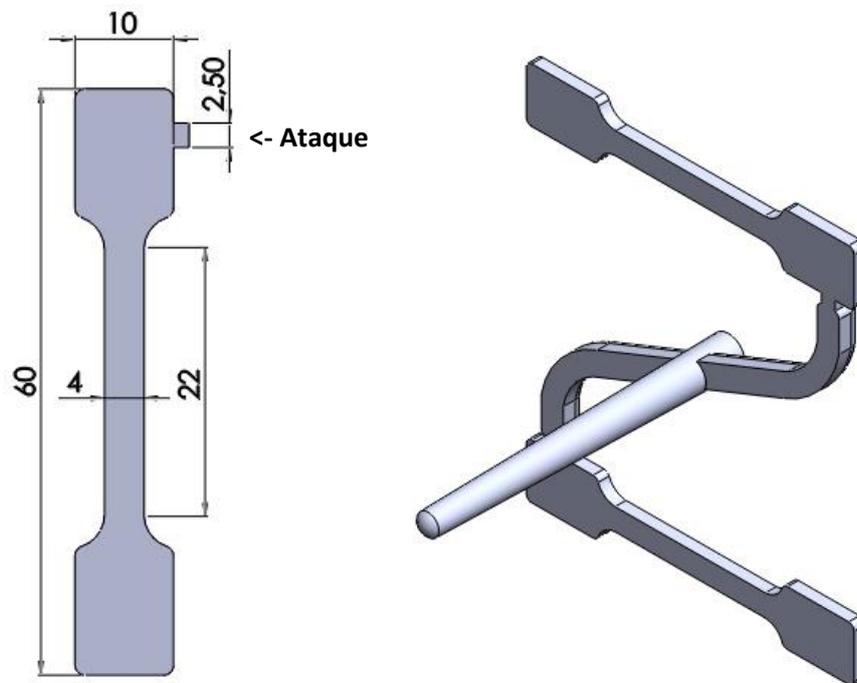
A máquina de injeção que se utilizou para o processamento dos provetes de tração foi um Dr. Boy de 22 toneladas (220 kN de força de fecho), figura 20, adquirida recentemente pelo Departamento de Engenharia de Polímeros, na Universidade do Minho. Esta máquina tem diâmetro do parafuso de 22 mm e permite atingir pressões de injeção de 160 bar. Para promover o arrefecimento do molde utilizou-se um termorregulador, da Piovan, que permite o fluxo de água nos canais de arrefecimento do molde.



**Figura 20 - Máquina de moldação por injeção Dr. Boy A22 e termorregulador Piovan.**

### 3.2.2. Peça em estudo

A peça que foi alvo de estudo ao longo desta dissertação é um provete de tração, com as dimensões na figura 21. A moldação é constituída por um sistema de alimentação, que dá origem a duas peças, ou seja, dois provetes de tração. O provete tem uma espessura de 2 mm.



**Figura 21 - Dimensões do provete, à esquerda, e moldação completa de dois provetes e um sistema de alimentação, à direita.**

### 3.2.3. Molde

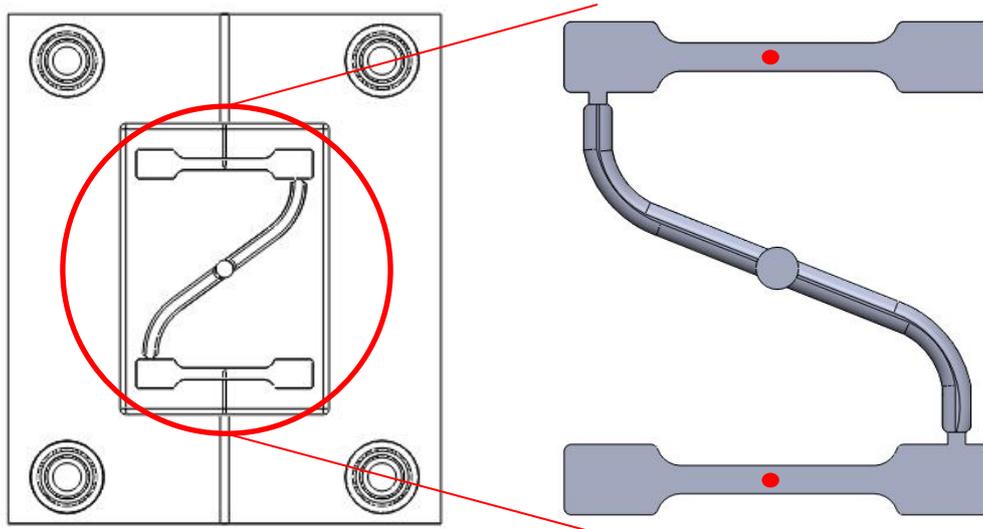
O molde que se usou foi um molde com as dimensões 190 x 185 x 175 mm<sup>3</sup>. Este molde tem a cavidade da moldação na parte móvel. Segundo o desenho do molde, optou-se por aquecer apenas a parte móvel, pois é onde se encontra o postigo que dá origem à moldação. Na figura 22 pode-se observar uma imagem do molde. Como este molde não tem altura suficiente para a máquina de injeção utilizada, foi necessário colocar uma chapa de 10 mm, pois a abertura mínima dos pratos máquina é de 200 mm, e o molde tem apenas 190mm.



**Figura 22 - Molde utilizado, parte fixa (à esquerda) e parte móvel (à direita).**

Para a aplicação do sistema de aquecimento RHCM, foi necessário efetuar algumas alterações ao molde de maneira a permitir 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 dois termopares o mais próximo possível da superfície. Os termopares selecionados para o molde foram termopares do tipo K, tc 002, fornecidos pela Resitec, estes vão permitir ter uma leitura da temperatura do molde até um máximo de 200°C durante o funcionamento do sistema de aquecimento.

Os locais selecionados para leitura de temperatura, correspondem à zona central de cada um dos provetes. Foram feitos dois furos com diâmetro e profundidade devidamente dimensionados em ambas as extremidades. Os furos efetuados permitiram colocar ambos os termopares a 1 mm da superfície. Na figura 23 pode-se ver o local onde foram feitos os orifícios, assim como os pontos onde se pretende obter a leitura da temperatura.



**Figura 23 - 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 tal uniformidade. Assim a leitura em dois pontos diferentes da superfície da cavidade permite observar a diferença de temperaturas entre ambos os locais.

### **3.2.4. Robot**

Na presente trabalho, recorreu-se à utilização de um manipulador cartesiano pneumático, PIKO, fabricado pela Asitech e disponível no Departamento de Engenharia de Polímeros, figura 24. Este tipo robot, é normalmente utilizado em produção 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 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 24 - Manipulador pneumático de 3 eixos PIKO, da Asitech.**

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 robot foi necessário ajustar os limitadores, que funcionam como batentes e limitam assim o curso dos movimentos. Na figura 25 pode-se observar os três batentes respetivos aos três eixos do robot.

Quando delimitado o curso que o robot 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.



**Figura 25 - Limitadores de movimento, eixo do X (à esquerda), eixo do Y (ao centro) e eixo do Z (à esquerda).**

### 3.3. Construção do sistema RHCM

A elaboração do sistema passou por três fases, o desenho 3D, a escolha dos materiais e a montagem. Recorreu-se ao simulador de desenho 3D, *Solidworks*, pois com este é possível a criação rápida de peças, montagens e desenhos 2D com um mínimo de tratamento. Como tal este *software* permitiu desenvolver o desenho protótipo do sistema de aquecimento.

Na fase inicial procurou-se criar um suporte seguro e consistente que possibilite o uso em segurança de todo o sistema. O sistema desenvolvido graficamente está apresentado na figura 26, e serviu como modelo para a sua criação real.

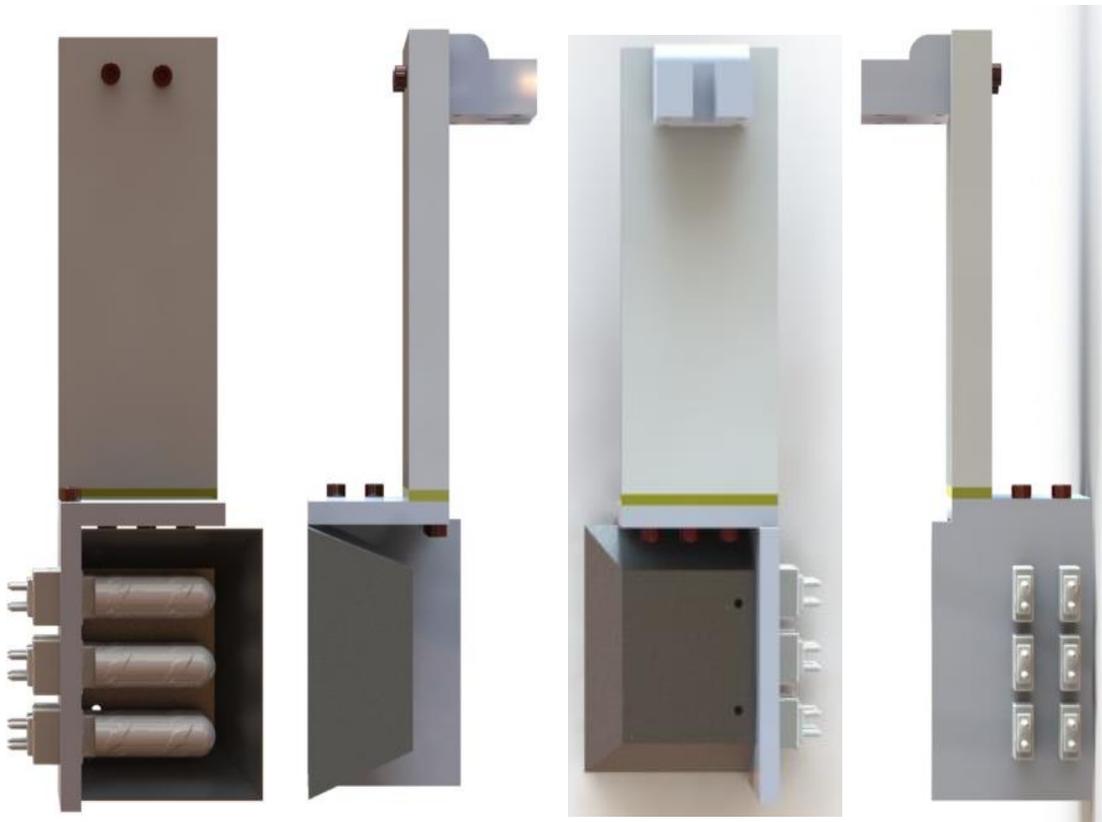
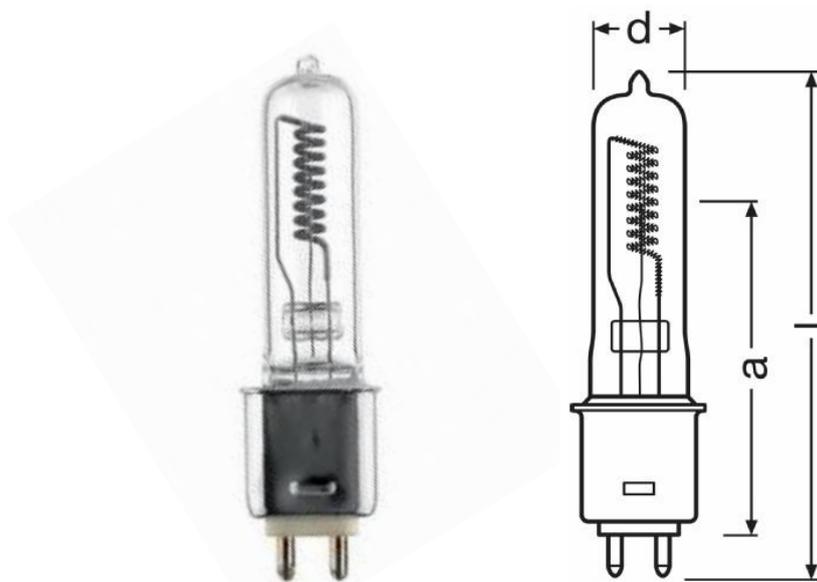


Figura 26 - Diferentes vistas do desenho 3D do sistema RHCM desenvolvido.

### 3.3.1. Lâmpada Halogéneo

As lâmpadas de halogéneo constituem o elemento fundamental deste sistema, pois é através delas que se irá promover calor para aquecer a superfície da cavidade. Estas lâmpadas emitem radiação infravermelha. As lâmpadas selecionadas para o estudo foram lâmpadas de 1000 W de 240V cada uma, fabricada pela Osram, e fornecida pela Luzeiro. Cada lâmpada tem 100 mm de comprimento, 18 mm de diâmetro e pode atingir temperaturas superiores a 500°C, figura 27.

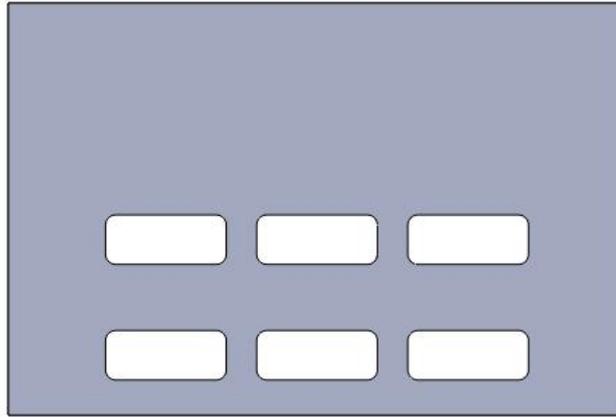
Estas lâmpadas contêm um filamento de tungsténio, que permite criar luz através de passagem de corrente pelo filamento. Neste processo, apenas uma pequena percentagem da energia é transformada em luz, sendo a maior percentagem convertida em calor. Grande parte desse calor é gerado por radiação infravermelha que neste caso, é aproveitada para aquecer a superfície da cavidade. No Anexo 1, é possível observar a respetiva ficha técnica.



**Figura 27 - Lâmpada e respetivas dimensões, 18 mm (d), 110 mm (l) e 75 mm (a).**

### 3.3.2. Suporte das lâmpadas

Depois de selecionadas as lâmpadas, o próximo passo foi idealizar um suporte de modo que pudesse suportar as lâmpadas e que fosse compatível, construtivamente, para que fosse acoplado ao robot. Assim utilizou-se uma placa de alumínio de 120 mm x 80 x 10 mm<sup>3</sup> e maquinou-se a placa de forma a haver possibilidade de colocação de um máximo de 6 lâmpadas em simultâneo.

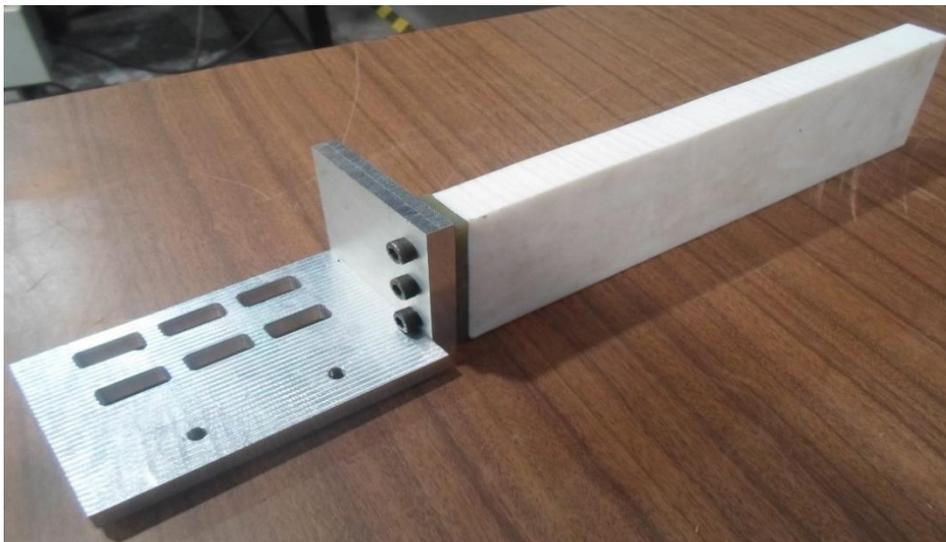


**Figura 28 - Placa de alumínio para colocação das lâmpadas**

Esta placa de alumínio servirá para a colocação das lâmpadas que estão presas (um bocado) por compressão devido aos buracos serem feitos à medida, do desenho do casquilho da própria lâmpada. Nesta placa será também colocado um refletor.

Depois de selecionada a placa principal, estudou-se uma configuração mais segura para fixar a placa principal ao braço vertical do robot (eixo do Y). Assim optou-se pela utilização de uma barra de Teflon, este material tem como característica suportar altas temperaturas, de modo a manter a segurança do robot, contra o calor gerado pelas lâmpadas. Para além desta, utilizou-se uma placa isoladora, Z 121, fornecida pela Hasco, que foi colocada entre a barra de Teflon e a segunda placa de alumínio, placa esta que se vai conectar à placa principal, de modo a reduzir uma possível transferência de calor por condução que possa afetar o robot.

Por fim obteve-se uma estrutura sólida e firme, que assenta no robot utilizado. Todas estas peças estão seguras por intermedio de parafusos, que garantem a sua fixação.



**Figura 29 - Suporte das lâmpadas final construído e montado.**

### 3.3.3. Refletor

O refletor é uma das peças mais importantes na construção de um sistema deste género, pois aqui o ideal seria obter refletividade da radiação por intermédio de um refletor esférico, mas como a sua aquisição se tornou complicada, escolheu-se outro tipo de geometria onde se pode aproveitar ao máximo a radiação. Na Figura 30 pode-se observar o desenho do refletor. Os materiais selecionados para o refletor foram, o alumínio e o aço inox, sendo que, estes foram posteriormente comparados, através da velocidade de aquecimento da superfície, determinando assim o material que mais favorece o aquecimento através da refletividade da radiação. Este refletor foi fixo à placa principal através de dobradiças, Figura 31, juntamente com parafusos.

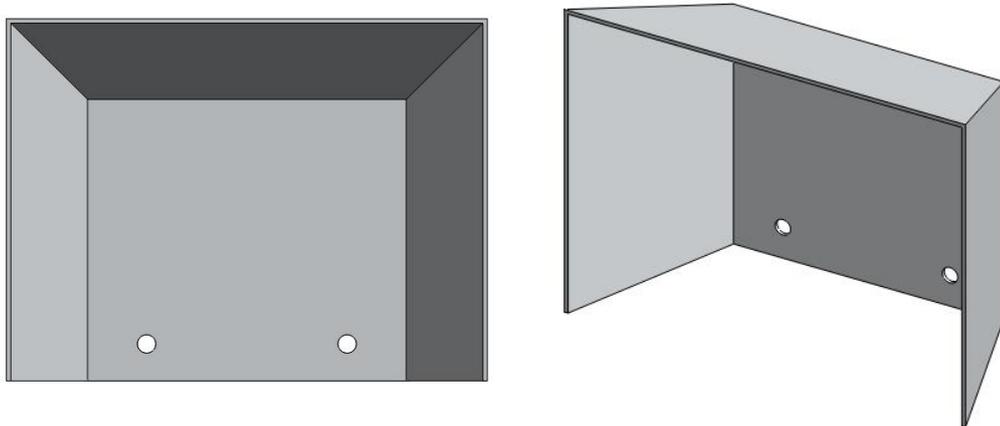


Figura 30 - Desenho 3D do refletor, em diferentes vistas.

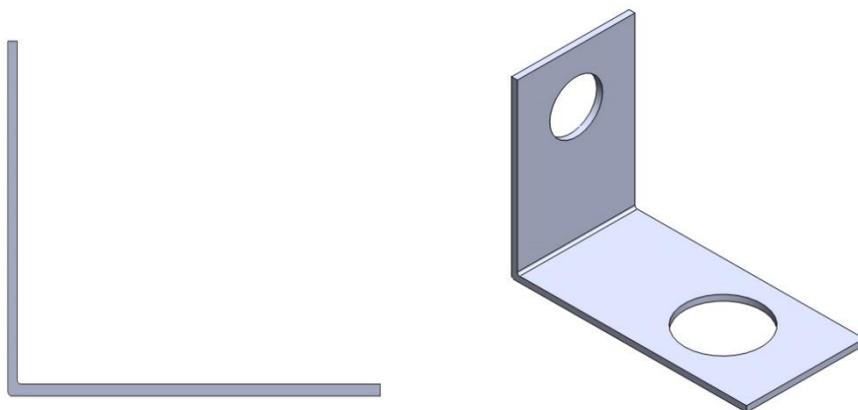
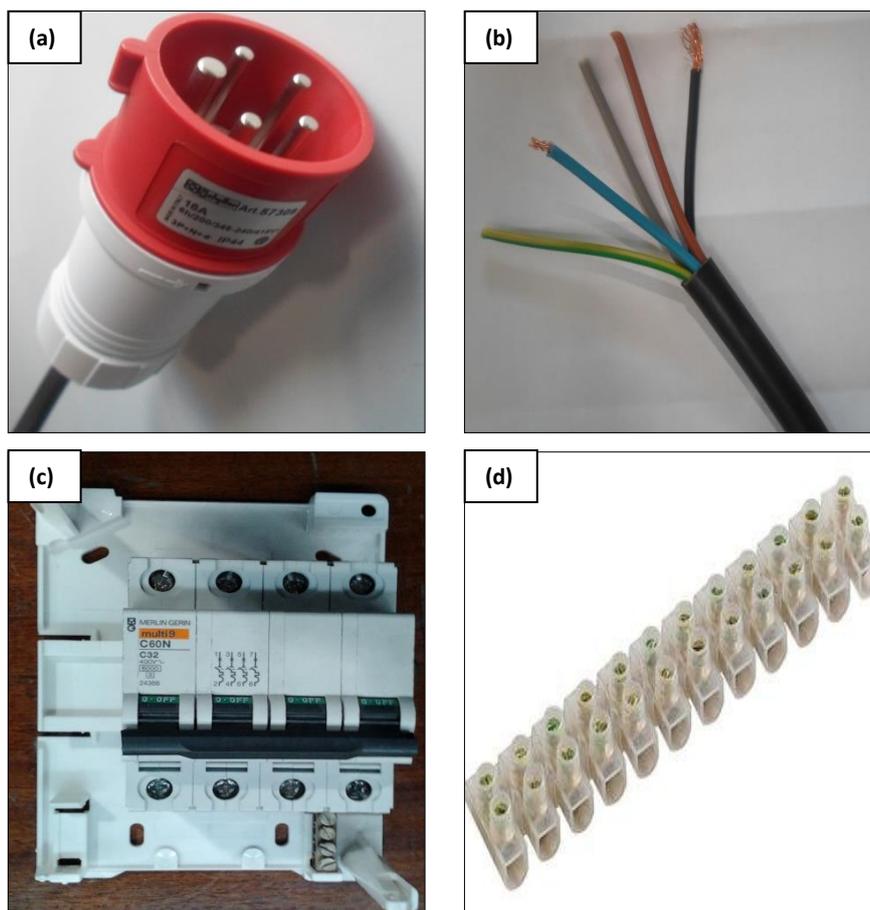


Figura 31 - Desenho 3D das dobradiças, em diferentes vistas

### 3.3.4. Sistema elétrico

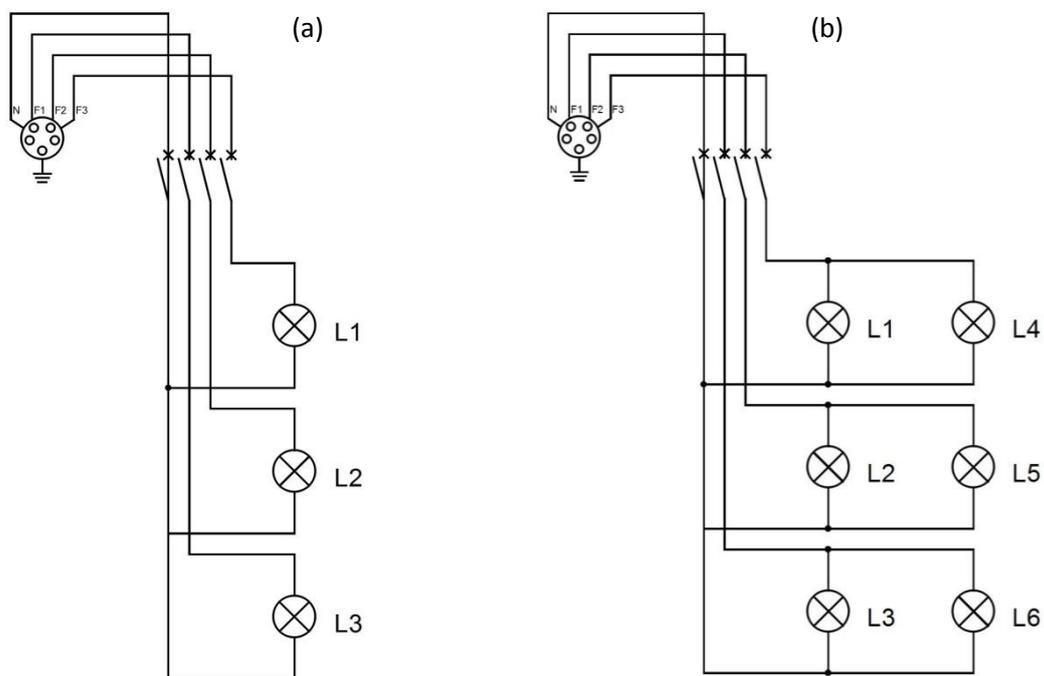
O sistema elétrico é um passo importante na construção do sistema de aquecimento devido à alta potência requerida pela totalidade das lâmpadas. Assim, optou-se pela seleção de um sistema trifásico, em vez de um sistema monofásico. Este apresenta-se como a opção mais segura, devido à potência utilizada, pois o sistema desenvolvido tem por opção a utilização até um máximo de lâmpadas em conjunto. O sistema elétrico foi determinado tendo em conta um número máximo de lâmpadas, 6 na totalidade, o que perfaz uma potência total de 6000 W (6 x 1000W).

Para a construção do sistema foi necessário, cabo multifilar com secção de 2,5 mm (pois esta secção permite uma maior intensidade de corrente e previne assim o aquecimento do cabo), uma ficha macho trifásico, um disjuntor e conectores, figura 32.



**Figura 32 - Material elétrico utilizado no sistema, ficha macho trifásico (a), cabo multifilar trifásico (b), disjuntor (c) e ligadores (d).**

Neste estudo utilizou-se o sistema de aquecimento com 3 lâmpadas e depois com 6 lâmpadas. No sistema com 3 lâmpadas ligou-se cada lâmpada a uma das fases e ao neutro (Figura 33 (a)), por outro lado quando se utilizou o sistema com 6 lâmpadas, ligaram 2 lâmpadas em paralelo a cada uma das fases tendo o neutro em comum entre todas (Figura 33 (b)). Através da figura 33 é possível observar os desenhos dos circuitos elétricos executados para o correto funcionamento do sistema.



**Figura 33 - Desenhos do sistema elétrico das ligações, com 3 lâmpadas (a) e com 6 lâmpadas (b).**

Foi utilizado um disjuntor de 4 fases que permitiu ligar e desligar as lâmpadas em simultâneo, sempre que necessário, isto pelo facto de as lâmpadas atingirem temperaturas elevadas. Assim, sempre que o sistema não estiver a aquecer a superfície, as lâmpadas mantêm-se desligadas e ligadas quando aproximadas ao molde. A sua instalação no circuito foi efetuada entre as lâmpadas e a fonte de corrente.

### 3.3.5. Sistema de monitorização da temperatura

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 34, onde se conectou os dois termopares. Os dois 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 2 locais seleccionados.



**Figura 34 - Sistema Priamus para leitura dos termopares.**

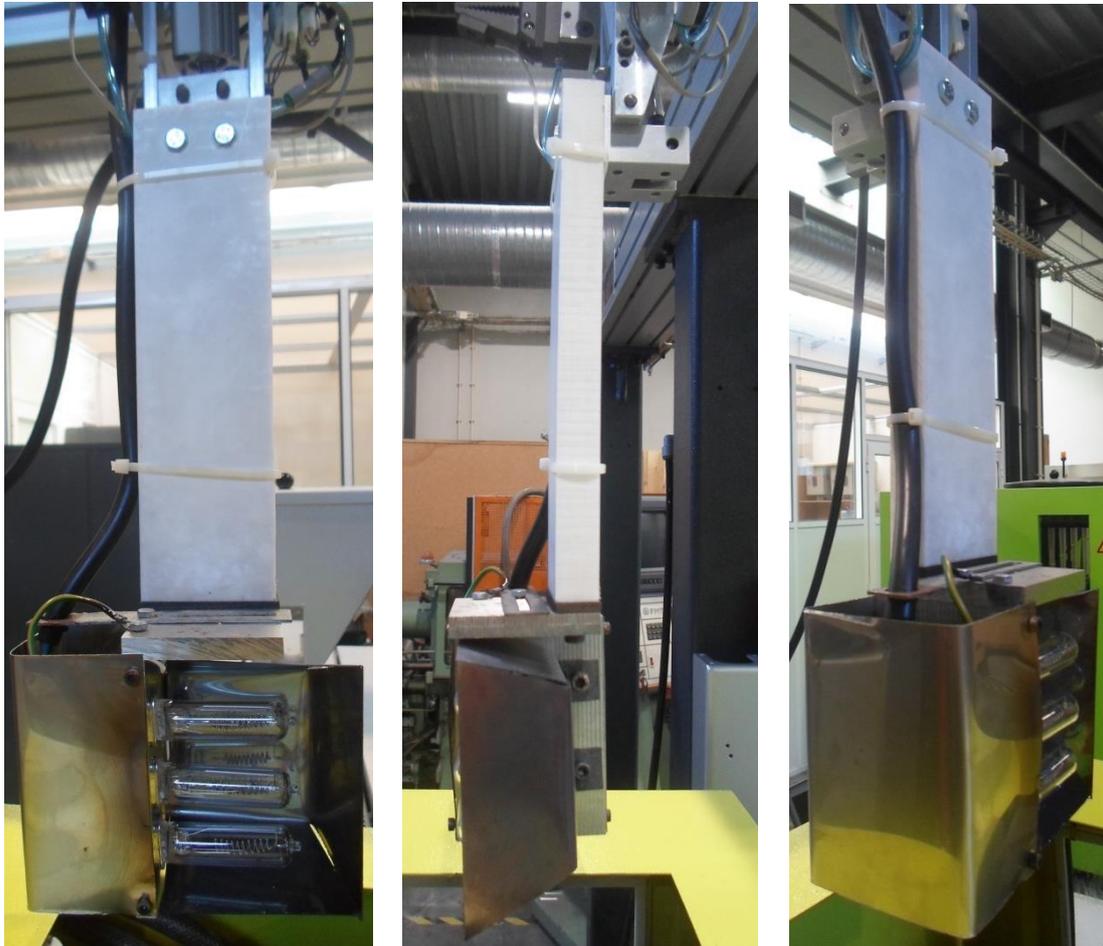
### 3.4. Montagem e funcionamento do sistema RHCM

Construído o sistema, procedeu-se à colocação do mesmo no robot. Nesta fixação, utilizou-se parafusos para prender a barra de teflon ao suporte do robot. Este suporte tem um pequeno cilindro pneumático, que quando ativado, mantém todo suporte das lâmpadas imóvel. Na figura 35 é possível observar o sistema montado e também a sua fixação em diferentes vistas.

Posteriormente ajustou-se os limitadores dos três eixos, delimitando o percurso que o robot deve efetuar, de modo a obter apenas um movimento de subida e descida do sistema RHCM. Neste caso, o limitador do eixo do Z, foi colocado ao máximo, impedindo assim o movimento nesse eixo. O limitador do eixo do X, foi colocado de modo a aproximar ao máximo as lâmpadas da superfície do molde. Por último o limitador do eixo do Y foi posicionado de

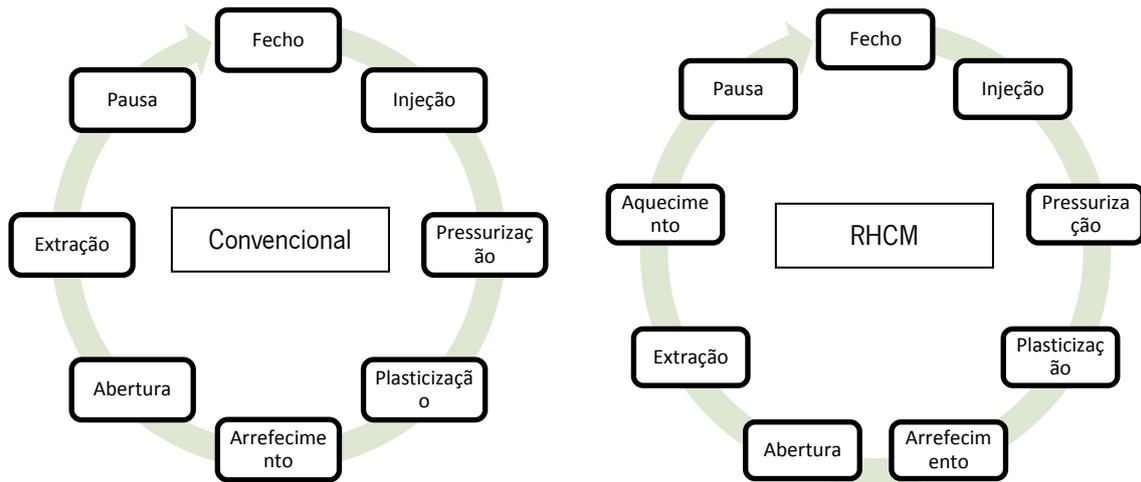
maneira a que o conjunto das lâmpadas ficasse bem centrado em relação à superfície do molde a aquecer.

No fim montou-se o sistema de leitura dos termopares para se ter um controlo da temperatura durante os ciclos de injeção.



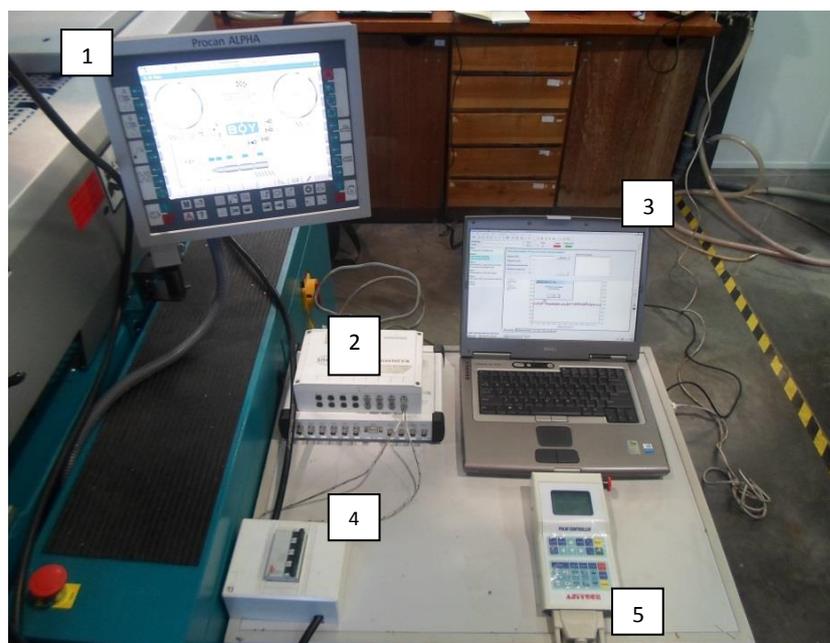
**Figura 35 - Imagens reais do sistema acoplado ao robot, em diferentes vistas.**

Com a aplicação deste de sistema é acrescentada uma nova fase ao ciclo de injeção convencional, a fase de aquecimento, que ocorre entre a fase de extração e de injeção, como é observado na figura 36. Durante esta fase ocorre a descida das lâmpadas, o aquecimento da superfície e a subida das lâmpadas. Esta fase de aquecimento, leva a um aumento do tempo do ciclo, algo que pode ser reduzido com a automatização do sistema ou até excluído com a utilização de outras técnicas de aquecimento.



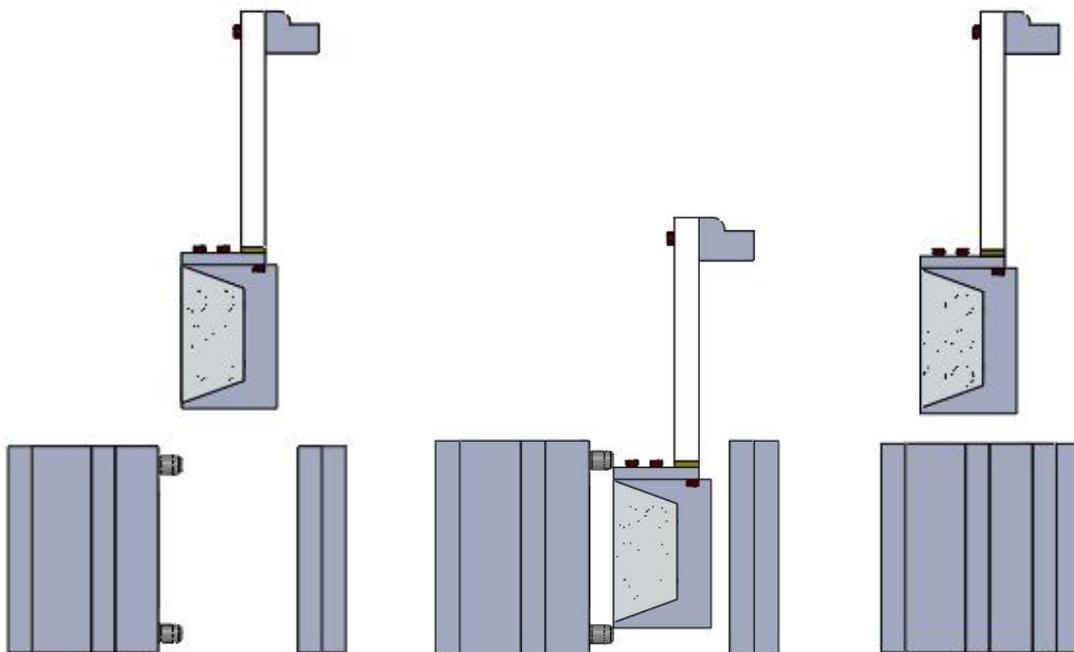
**Figura 36 - Ciclo de injeção convencional (à direita) e ciclo de injeção com sistema RHCM (à esquerda).**

Na figura 37, observa-se o equipamento necessário para controlar todo o processo. Com este equipamento, efetua-se uma sequência de acontecimentos de modo a fazer correr o ciclo de injeção RHCM. Esta sequência que deve ser controlada e monitorizada pelo executante, em cada ciclo.



**Figura 37 - Equipamento de controlo necessário para o funcionamento do sistema, ecrã da máquina de injeção (1), sistema Priamus (2), computador (3), disjuntor (4) e comando de controlo do robot (5).**

O método utilizado para fazer correr o processo, segue uma sequência de fases, primeiramente colocou-se a máquina de injeção em semiautomático (1), dando-se ordem de abertura do molde, de seguida, e através do comando do robot (5) ordena-se que o sistema desça com as lâmpadas ligadas (por intermédio de um disjuntor (4)). Depois espera-se até atingir a temperatura desejada (esta temperatura deve ter sempre um valor superior aquela que se pretende obter devido à rápida perda de calor por parte do molde para o ambiente, isto acontece a partir do momento que se retira o sistema, onde o calor é dissipado rapidamente). Esta temperatura é controlada através do computador (3) que recebe os sinais dos termopares por intermedio do sistema Priamus (2). Atingida a temperatura, faz-se a retirada do sistema (5) e desligam-se as lâmpadas (4). Finalizada a fase de aquecimento, dá-se ordem de injeção, seguindo-se o ciclo normal de injeção. Na figura 38, pode-se ver o movimento do sistema durante a fase de aquecimento.



**Figura 38 - 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)**

Durante o procedimento experimental, estudou-se a eficiência do sistema construído e, para tal, observou-se o perfil de temperatura que era gerado em cada ciclo de aquecimento. Nos ensaios realizados obteve-se sinal com ruído, ou seja, com pequenos picos de temperatura ao longo do perfil. Assim procedeu-se ao cálculo da média móvel, com períodos de quarenta valores, obtendo-se perfis de temperatura médios, de modo a “suavizar” o perfil, e diminuindo assim a oscilação que é provocada pela leitura dos termopares.

A primeira observação que se verificou foi a diferença de temperatura entre os dois pontos de leitura, que se representou por temperatura de cima (Tc) e temperatura de baixo (Tb). Esta diferença de temperaturas era previsível pois trata-se de uma desvantagem deste tipo de aquecimento.

Para analisar o sistema RHCM, elaborou-se um estudo onde se pudesse observar a eficiência do aquecimento, através dos diferentes perfis de temperatura. Em cada um dos gráficos foi possível retirar as velocidades de aquecimento e arrefecimento. Na preparação do estudo optou-se por estudar o sistema com três e seis lâmpadas. Em cada uma destas experiências testou-se o sistema sem o refletor (mas com arrefecimento), com o refletor e sem arrefecimento do molde e, por fim, com refletor e com arrefecimento no molde, ver Tabela 4. De realçar que em todas as experiências as lâmpadas encontravam-se a uma distância aproximada de 10 mm da superfície do molde e que nas experiências onde houve arrefecimento do molde, a temperatura do molde era de 30°C e foram realizadas com refletor.

**Tabela 4 – Plano de experiências do sistema aquecimento (RHCM)**

<b>Nº de lâmpadas</b>	<b>Condição</b>	<b>Nomenclatura</b>
<b>3</b>	Sem refletor	X1
	Sem arrefecimento (c/refletor)	X2
	Com arrefecimento (c/refletor)	X3
<b>6</b>	Sem refletor	Y1
	Sem arrefecimento (c/refletor)	Y2
	Com arrefecimento (c/refletor)	Y3

### 3.6. Material

Nesta tese de mestrado pretendeu-se estudar o efeito do sistema *RHCM* nas propriedades das peças injetadas, o material proposto foi o polipropileno com a incorporação de pigmentos metálicos.

#### 3.6.1. Polipropileno, PP

No presente estudo, utilizou-se a matriz polimérica, Polipropileno (PP), com o *grade* Capilen R50, fornecido pela Carmel Olefins, Ltd. Este *grade*, caracteriza-se por ser um polipropileno homopolímero, com boas propriedades de fluxo combinado com um bom equilíbrio de rigidez e impacto. Na Tabela 5 pode-se observar algumas das características do *grade* do material (mais detalhes na ficha técnica, Anexo 2).

**Tabela 5 – Características de material PP Capilen R50**

<b>Características</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Densidade	0,89 – 0,91	
MFI	12	g/10 min
Temperatura de processamento	230	°C
Tensão de cedência	32	Mpa
Resistência ao Impacto	2,3	kJ/m <sup>2</sup>
Aparência	Grânulos	

#### 3.6.2. Pigmento

Neste estudo optou-se por adicionar à matriz polimérica um pigmento, sendo que o escolhido foi o pigmento metálico, Sparkle Silvet 880 – 30 E1, fabricado pela Siberline e fornecido, neste caso pela Poliversal. Este tipo de pigmento, quando adicionado juntamente com os grânulos do polímero, permite obter uma peça com aspeto metalizado. Algumas das características deste pigmento podem ser visualizadas na Tabela 6, assim como na respetiva ficha técnica (Anexo 3).

**Tabela 6 – Características do pigmento metálico, Sparkle Silvet.**

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Densidade	1,72	
Tamanho das partículas	27	µm
Aparência	Pellets	
Composição	70 % Alumínio e 30% Poliolefina	

Para a preparação do material decidiu-se adicionar 2 % de pigmento em peso, percentagem esta suficiente que permite dar aparência de cor metálica. Esta percentagem apesar de ser reduzida, foi estudada anteriormente em outra dissertação por (Santos I. 2012), onde se verificou ser uma percentagem suficiente para dar à peça moldada a cor metálica [24].

Para preparação da mistura utilizou-se um tambor mecânico rotativo, no qual se juntou o material em grânulos e o respetivo pigmento, figura 39. Ao fim de algum tempo o material é retirado e adicionado à tremonha, tendo-se assim o material pronto a injetar.

**Figura 39 - Aparência dos pigmentos metálicos**

### **3.7. Injeção de peças plásticas**

Numa primeira fase do processo experimental injetou-se as moldações com polímero virgem e com pigmento, sem o sistema de aquecimento, para posterior comparação e caracterização. Depois de se ter montado e testado o sistema RHCM, procedeu-se à moldação por injeção das peças plásticas já com o sistema e, como tal, realizou-se previamente um plano

de experiências, que permita estudar a implementação do sistema quando comparado com o método convencional, e ao mesmo tempo estudou-se a influência da segunda pressão na distribuição dos pigmentos metálicos.

Assim elaborou-se um plano de experiências que permitisse estudar a distribuição e ao mesmo tempo as diferenças que o sistema RHCM traz às características das peças moldadas. Contudo injetou-se material com pigmento e sem pigmento, com três valores de segunda pressão e três valores de temperatura de superfície, no conjunto obtiveram-se 18 condições que foram sujeitas aos estudos de caracterização mencionados anteriormente. O plano de experiências pode ser observado na Tabela 7, em que cada condição está devidamente identificada pela respectiva nomenclatura

**Tabela 7 – Condições e variáveis estudadas durante o processamento**

<b>Material</b>	<b>2ª Pressão de injeção (bar)</b>	<b>Temperatura da superfície (°C)</b>	<b>Nomenclatura</b>
<b>PP com Pigmento</b>	40	S/ RHCM	A1
		70	B1
		90	C1
		110	D1
	60	S/ RHCM	A2
		70	B2
		90	C2
		110	D2
	80	S/ RHCM	A3
		70	B3
		90	C3
		110	D3
<b>PP sem Pigmento</b>	40	90	E1
	60	90	E2
	80	90	E3
	40	S/ RHCM	F1
	60	S/ RHCM	F2
	80	S/ RHCM	F3

Nas restantes condições de processamento, tentou-se que fossem o mais constante possível, alterando-se apenas as variáveis em estudo (2ª pressão e a temperatura de superfície). As condições de processamento podem ser observadas na Tabela 8.

**Tabela 8 – Condições de processamento utilizados**

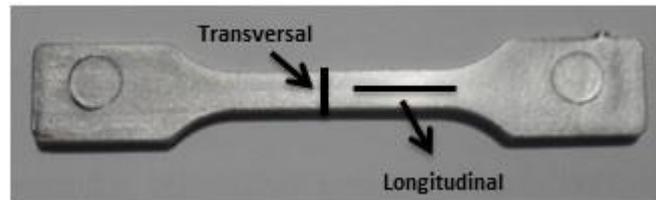
<b>Condição</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
<b>Temperatura de injeção</b>	<b>Zona 1</b>	200 °C
	<b>Zona 2</b>	210 °C
	<b>Zona 3</b>	215 °C
	<b>Zona 4</b>	220 °C
	<b>Zona 5</b>	230 °C
<b>Pressão de injeção</b>	100	bar
<b>Tempo 2ª Pressão</b>	2	s
<b>Velocidade de injeção</b>	30	mm/s
<b>Tempo de arrefecimento</b>	15	s
<b>Temperatura de arrefecimento</b>	30	°C

### **3.8. Caraterização das moldações**

No fim de se obter peças para cada uma das condições, procedeu-se à caracterização das mesmas, de modo a relacionar o processamento com as propriedades mecânicas e morfológicas. Os ensaios realizados foram ensaios de tração, na caracterização mecânica e, ensaios de microscopia de campo claro e luz polarizada, na caracterização morfológica. De um modo geral, caracterizaram-se peças injetadas com o método convencional, e com o sistema de aquecimento, RHCM. Dentro dessas condições estudou-se peças de PP com e sem pigmento, com variação da segunda pressão e temperatura da superfície. Na segunda pressão utilizou-se valores de 40, 60 e 80 bar, sendo que, na temperatura de superfície utilizou-se 70°C, 90°C e 110°C. Os restantes parâmetros do processo foram mantidos constantes. Nesta caracterização para além do estudo da influência do sistema RHCM, nas peças moldadas, estudou-se a variação da distribuição dos pigmentos metálicos com a segunda pressão.

### 3.8.1. Caracterização morfológica

Para a realização de ensaios de microscopia, começou-se por selecionar as seções do provete de tração injetado, ou seja, zonas onde se vai retirar as amostras para posterior análise. Assim, optou-se por retirar uma amostra numa zona transversal e outra numa zona longitudinal, ou seja, estas duas zonas vão ajudar ao estudo da microestrutura e da distribuição de pigmentos. Na figura 40, observa-se as zonas do provete de onde se retiraram as amostras.



**Figura 40 - Provete de tração e zonas onde se retiraram as amostras.**

Nesta caracterização recorreu-se à microscopia de luz polarizada e à microscopia de campo claro.

Na microscopia de luz polarizada o microscópio (Figura 41, à direita) apresenta dois prismas, ou filtros, chamados de polarizador e analisador. Esses filtros posicionam-se entre a fonte de luz e o condensador (filtro polarizador) e entre a objetiva e a ocular (filtro analisador). Os filtros polarizadores promovem a seleção de apenas um plano de direção de vibração de ondas luminosas, conhecido por plano da luz polarizada. Sob o efeito do plano da luz polarizada, os componentes macromoleculares birrefringentes (anisotrópicos) apresentam brilho colorido ou não, promovendo um realce destes materiais em detrimento a outros não birrefringentes (isotrópicos), que se distinguem em fundo escuro. Com esta técnica, possível identificar a estrutura cristalina de materiais semicristalinos (Taboga, 2001).

Na microscopia de campo claro, utiliza-se o mesmo microscópio de transmissão. Nesta técnica, o contraste é gerado por alterações na absorção ou na difusão da luz nas diferentes zonas da amostra. A absorção produz a redução da intensidade ou a eliminação completa de certos comprimentos de onda de luz. Através desta, é possível caracterizar o grau de dispersão e distribuição dos pigmentos (Taboga, 2001).

Para a realização deste tipo de ensaios, é necessário a preparação de amostras. As amostras foram cortadas recorrendo a um Micrótomo Leitz 1401, figura 41, onde foi possível

obter amostras com espessura de 15  $\mu\text{m}$ , posteriormente esta é colocada numa lâmina de vidro, com balsamo de Canadá. Depois é prensada de modo a eliminar bolhas.

Para a visualização das amostras utilizou-se um Microscópio de Transmissão Olympus e uma Máquina Digital Leica. A objetiva utilizada foi a 1,67, com diferentes lupas.



**Figura 41 - Micrótomo Leitz 1401 (à esquerda) e Microscópio de Transmissão Olympus (à direita).**

### **3.8.2. Caracterização mecânica**

A caracterização mecânica é aplicada apenas na caracterização do produto final uma vez que é importante verificar as propriedades mecânicas que o produto final irá adquirir para que se consiga garantir a viabilidade da aplicação do produto final. Esta componente é igualmente importante pelo facto de se poder estudar a influência das condições operatórias e concluir que condição confere melhores propriedades ao produto final. Esta caracterização permitiu prever o comportamento do material injetado com e sem aplicação do sistema RHCM.

No estudo das propriedades mecânicas realizaram-se ensaios de tração e, para tal utilizou-se uma máquina de tração Zwick/Roell Z005, figura 42. Neste ensaio, fizeram-se dez testes para cada uma das condições, a uma velocidade de 50 mm/s, e 25 mm de distância entre amarras. Este foi ainda realizado à temperatura ambiente.

Em cada condição obteve-se um gráfico de força vs. deslocamento e, posteriormente foi convertido num de tensão verdadeira vs. deformação verdadeira, e calcularam-se os valores

médios para o Módulo de elasticidade, Tensão de cedência, Deformação de cedência, Tensão de rotura e Deformação de rotura.

Considere-se uma curva de tensão deformação, obtida depois de exercer uma tensão numa direção, à medida que a amostra deforma a área de secção transversal varia, devido aos efeitos de contração de Poisson. A tensão verdadeira e a deformação verdadeira devem ser definidas em termos das dimensões atuais da amostra. No entanto, em vez disso, mede-se a tensão e deformação de engenharia ou tensão e deformação nominal. Resumindo, a curva tensão nominal – deformação nominal, não fornece uma indicação correta das características da deformação plástica do material, uma vez que é baseada nas dimensões originais. (Fernandes, I., 2006).



**Figura 42 - Máquina de tração Zwick Roell**



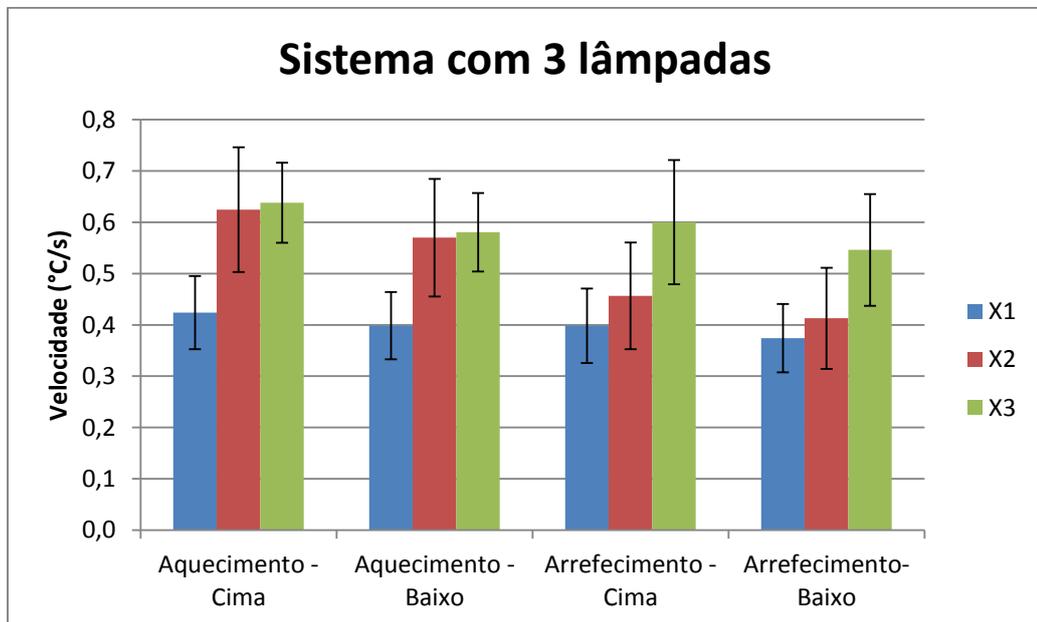
## **Capítulo 4**

---

### **Discussão dos resultados**

#### 4.1. Resultados dos ensaios do sistema RHCM

Numa primeira análise, utilizando o sistema com 3 lâmpadas, perfazendo uma potência de 3000 W, obteve-se um gráfico, figura 43, onde se compara a condição X1, X2 e X3. É de referir que a velocidade de arrefecimento e aquecimento variam com a temperatura que se pretende a obter e assim, para cada condição efetuou-se vários ciclos e calcularam-se as médias das velocidades de aquecimento/arrefecimento (tabelas dos valores em Anexo 4), para se proceder a uma discussão dos resultados.

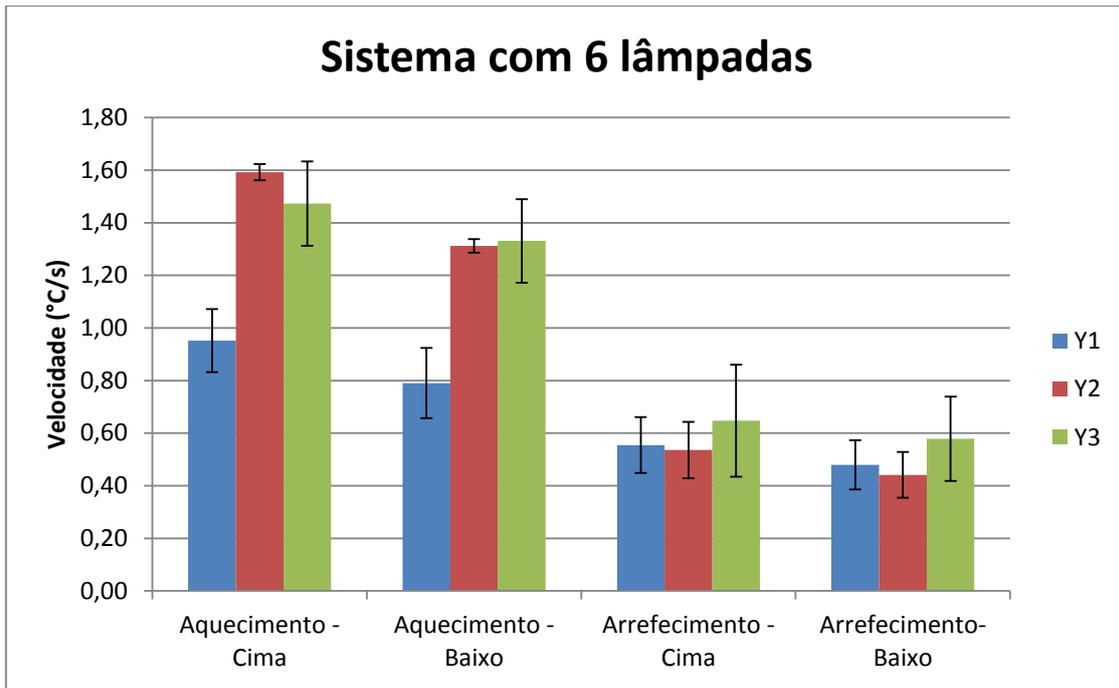


**Figura 43 - Gráfico das velocidades de aquecimento e arrefecimento, para o sistema de 3 lâmpadas.**

Segundo os resultados obtidos para o sistema com três lâmpadas, verificou-se que as velocidades de aquecimento são ligeiramente mais altas que a velocidade de arrefecimento, ou seja, neste tipo de sistema, é mais fácil aquecer a superfície do molde do que arrefecê-la. A maior velocidade de aquecimento obtida foi, em média, de 0,64 °C/s, e esta verificou-se quando se utilizou refletor e arrefecimento do molde, condição X3. A velocidade máxima, em média, para o arrefecimento foi de 0,60 °C/s, também na condição X3. Pode-se dizer que a utilização de um refletor, aumenta a eficiência do sistema, sendo que neste caso ajudou a aumentar a velocidade de aquecimento em aproximadamente 34% em relação à condição sem refletor. Comparando a condição X2 com a condição X3, verifica-se um pequeno aumento da velocidade

de aquecimento para X3, cerca de 1 a 1,3 %, em ambas as zonas de leitura, cima e baixo, conclui-se que neste caso que o facto de adicionar arrefecimento do molde não alterou a eficiência do sistema. Relativamente á velocidade de arrefecimento, tem-se maior eficiência quando se utiliza circulação constante de água pelos canais do molde, ajudando assim a obter temperaturas menores, rapidamente, como seria de esperar. Isto acontece porque na condição X2 tem-se apenas arrefecimento dependente da temperatura ambiente. Aqui apenas se compara a condição X2 e X3, pois o uso do refletor não contribui em nada para o arrefecimento da superfície. Na comparação de X2 e X3, vê-se que o arrefecimento a água, teve um aumento de aproximadamente 14 % em relação a X2. Esta percentagem é semelhante em ambas as zonas de leitura. Durante os ensaios, verificou-se que para temperaturas mais elevadas, maiores eram as velocidades de arrefecimento.

Outra evidência, que se pode ser retirada dos dados obtidos é a diferença de temperaturas de aquecimento entre as duas zonas de leitura dos termopares. Quando se está a aquecer a superfície, vemos uma ligeira diferença de temperaturas entre a temperatura em cima e em baixo e isto acontece porque as lâmpadas não se encontram bem centradas com a superfície a aquecer, sendo que um pequeno desvio na posição das lâmpadas, faz aquecer mais uma zona do que outra. Este desvio é provocado pelo facto de se usar um robot pneumático, em que os movimentos são controlados pelo ar, não sendo possível, muitas das vezes, fazer sempre o mesmo movimento com um percurso fixo, e isso provoca uma descentralização das lâmpadas que originam essas diferenças de temperatura. Esta diferença de temperaturas vem confirmar a desvantagem que está associada a este sistema RHCM, sendo que é necessário algum cuidado e conhecimento para se obter uma uniformização das temperaturas, com sistema de aquecimento IR. Se este aquecimento não for uniforme, ter-se á variação de temperaturas na cavidade, provocando conseqüentemente um arrefecimento não uniforme da peça, que posteriormente poderá dar origem a tensões residuais nas peças.



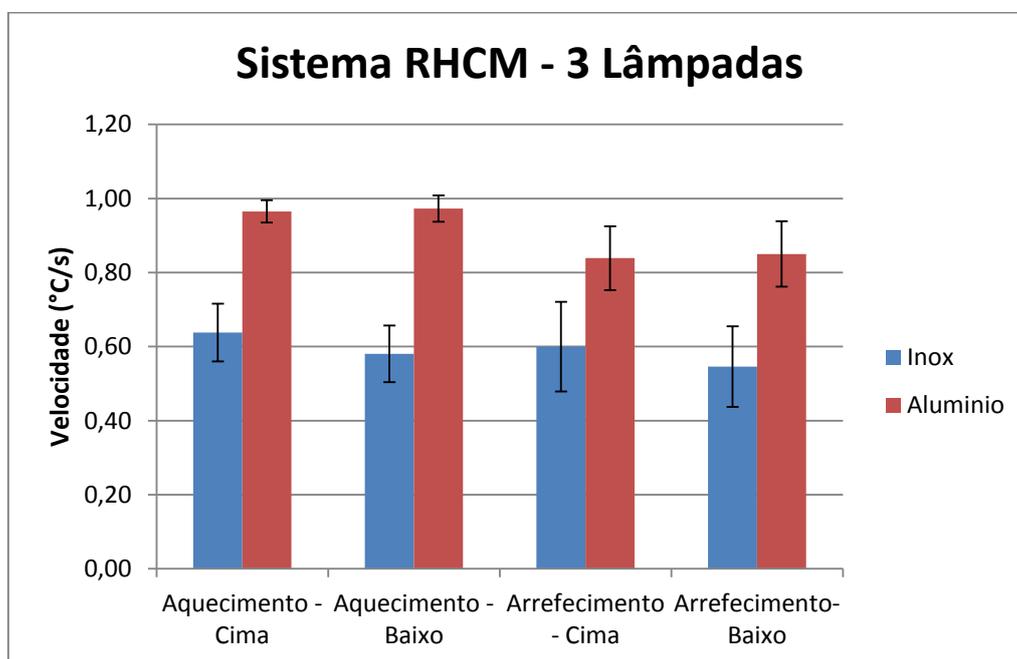
**Figura 44 - Gráfico das velocidades de aquecimento e arrefecimento, para o sistema de 6 lâmpadas.**

No estudo efetuado com 6 lâmpadas, aumentou-se a potência para o dobro, ou seja para 6000 W, sendo de esperar uma maior quantidade de calor gerada por parte das lâmpadas. Como se pode observar pela figura 44, tem-se uma velocidade de aquecimento máxima, em média, de 1,59 °C/s, mas quando não se utiliza arrefecimento do molde. Tem-se uma velocidade máxima de arrefecimento, em média, de 0,65 °C/s, quando se utiliza arrefecimento do molde. Este facto mostra que o ideal seria que durante a fase de aquecimento, a água não fosse utilizada a circular nos canais de arrefecimento de modo a que a sua circulação se desse apenas durante a fase de arrefecimento (Isto poderia ser feito, com a utilização de uma válvula on/off, que colocaria água em circulação apenas durante a fase de arrefecimento. Mas devido à pequena diferença da velocidade de aquecimento, com e sem aplicação de arrefecimento, torna-se irrelevante a sua utilização).

Neste sistema de 6 lâmpadas o facto de se colocar refletor aumentou a velocidade de aquecimento, de Y1 para Y2, em aproximadamente 35 %, muito próximo do verificado no sistema com 3 lâmpadas.

Verificou-se ainda uma variação da temperatura de aquecimento entre as zonas de leituras, sendo que o máximo registado foi de aproximadamente 15°C de diferença.

O facto de se colocar o dobro das lâmpadas, permitiu aumentar a eficiência na transferência de calor das lâmpadas para a superfície da cavidade. Neste caso, foi possível obter maiores temperaturas num menor tempo, provocando assim maiores velocidades em relação ao sistema com 3 lâmpadas. Quanto às velocidades de arrefecimento, não se registaram grandes alterações, sendo apenas de observar o facto de se obter maiores temperaturas com este último sistema, tem-se uma maior dificuldade em arrefecer o molde, no qual são necessários grandes períodos de tempo para uma diminuição da temperatura, até a temperatura de arrefecimento do molde.



**Figura 45 - Gráfico das velocidades de aquecimento e arrefecimento, para diferentes tipos de material para o refletor.**

Durante os ensaios efetuou-se outra análise relacionada com o material do refletor, figura 45. Nesse estudo testaram-se dois tipos de materiais diferentes, alumínio e inox, no qual se efetuou um teste (de vários ciclos) com o sistema de 3 lâmpadas, juntamente com o arrefecimento do molde. Através do gráfico pode-se concluir que o refletor em alumínio torna o sistema mais eficiente no aquecimento do que o refletor de inox, verificando-se um aumento de 33% com a utilização do alumínio. Isto acontece porque o refletor em inox absorve a radiação fazendo dissipar calor para a parte traseira do sistema, consequentemente a radiação não é

aproveitada ao máximo (ou seja transmitida para a superfície do molde). O mesmo não se verificou com o refletor em alumínio, em que o calor dissipado para a parte traseira era muito reduzido, irradiando a maior parte do calor para a parte da frente, ou seja para a superfície do molde. O problema que surgiu neste caso, foi que o alumínio não aguentou com elevadas temperaturas, comportando-se de maneira imprópria durante o funcionamento do sistema.

De um modo geral, os resultados relativos à eficiência do sistema comparados com valores obtidos em outros estudos (existentes na literatura), tem-se velocidades de aquecimento menor comparado com o mesmo ou outros tipos de sistemas RHCM. Consequentemente o facto de se ter um material do molde com boa condutividade térmica (que neste caso, é desconhecida) e um bom refletor de luz poderiam ajudar, a resolver as baixas velocidades obtidas.

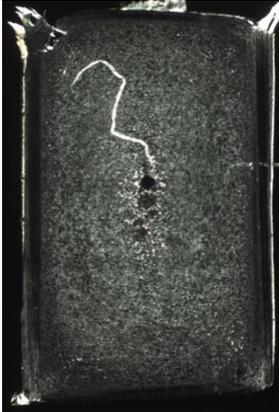
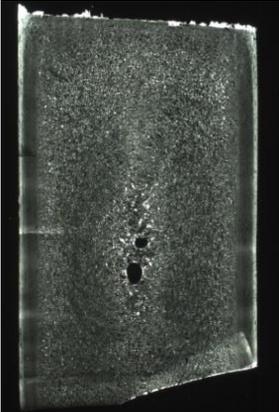
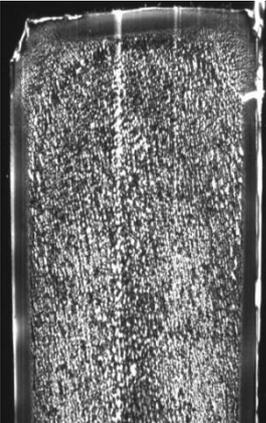
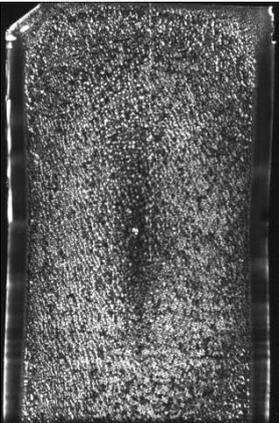
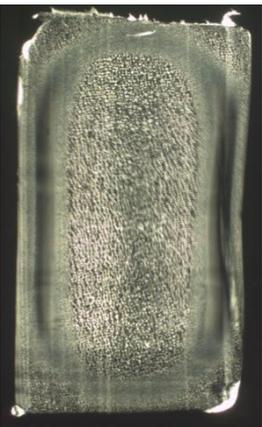
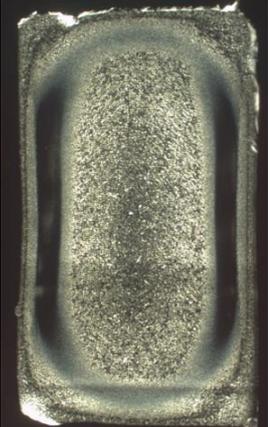
## **4.2. Propriedades morfológicas**

No estudo das propriedades morfológicas, procurou-se perceber a influência do sistema RHCM, ou seja, da temperatura de superfície juntamente com a segunda pressão no desenvolvimento da microestrutura da peça moldada. Os resultados aqui apresentados serão estudados em função da microestrutura desenvolvida para cada uma das condições.

### **4.2.1. Microcopia de luz polarizada**

Numa primeira abordagem analisaram-se as diferenças na morfologia tanto de peças moldadas com material virgem e material com pigmento (ambos sem RHCM), como de peças com material virgem com o sistema RHCM. Trata-se das condições A, F e E respetivamente. Nesta primeira análise falar-se-á da microestrutura que é influenciada pela adição do pigmento ao PP virgem e pela aplicação do sistema RHCM ao PP virgem.

Tabela 9 - Imagens de microscopia de luz polarizada da secção transversal das condições A, F e E

Condição		2ª Pressão (bar)		
		(1) 40	(2) 60	(3) 80
A	Sem RHCM			
				
				

Observando a Tabela 9, vê-se que na condição A e F, o aumento da 2ª pressão faz aumentar ligeiramente a orientação do material junto das paredes do molde e, é formada uma estrutura orientada mais uniforme, principalmente de A1 para A3, onde houve um aumento de

40 bar. É possível também observar pelas imagens obtidas para a condição A, a diferença de casca entre as zonas de superfície do provete e das zonas laterais, isto deve-se ao arrefecimento do molde não ser uniforme, provocando diferenças da microestrutura nas extremidades da amostra.

Na condição F, tem-se a estrutura típica do PP, onde é bem visível as várias camadas da microestrutura, casca, zona orientada, a sub-casca ou zona de transição, onde se encontra uma estrutura cristalina mal desenvolvida e por fim o núcleo, zona mais cristalina da peça, onde são bem observadas as esferulites.

Comparando a condição A e F, observa-se uma diminuição do desenvolvimento de esferulites de maior dimensão, que são substituídas por esferulites de menor dimensão, ou seja, dá origem à formação de estruturas transcristalinas (estrutura esferulítica mal desenvolvida). Isto está relacionado com o facto de se adicionar pigmentos metálicos à matriz polimérica, pois tratando-se de pigmentos de alumínio, estes conferem condutividade térmica ao material, aumentando a velocidade de arrefecimento, que conseqüentemente leva a uma menor taxa de cristalização. Sendo muito mais clara a observação de pequenas esferulites na condição F.

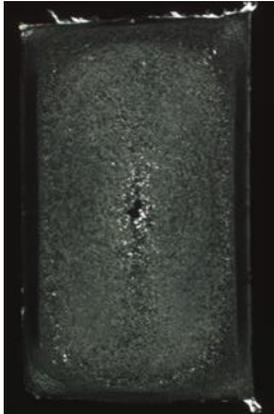
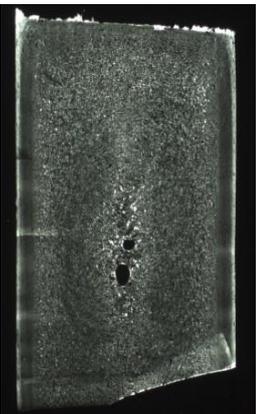
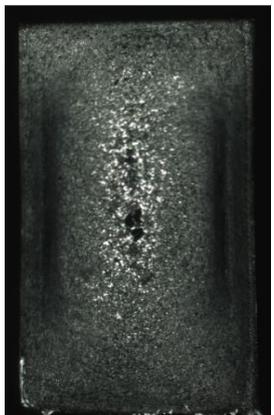
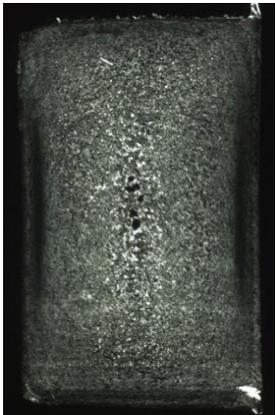
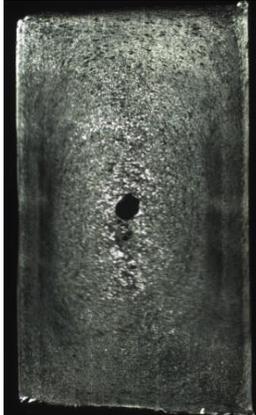
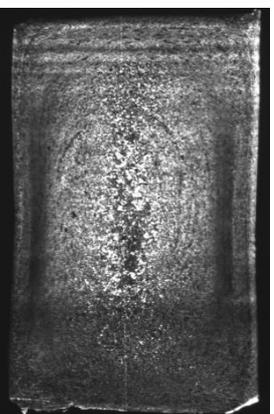
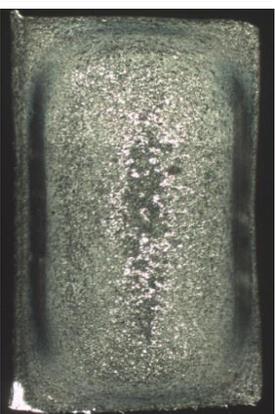
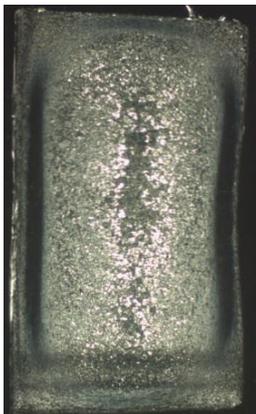
Comparando a condição E com a condição F, onde se aplicou o sistema RHCM, com uma  $T_s$  de 90°C (variando a 2ª pressão), tem-se uma estrutura pouco comum, pois ocorre o aparecimento de uma camada mais orientada, que não se encontra junto nas extremidades, como acontece em E1 e que aumenta a sua aparência, com o aumento da 2ª pressão. Tal acontecimento promove uma estrutura não orientada junto das paredes do molde, situação que não se verifica na ausência da  $T_s$  e pode estar relacionado com o facto da superfície do molde estar a uma temperatura elevada, o que elimina o arrefecimento prematuro do fundido quando este entra em contacto com as paredes do molde. As taxas de corte são reduzidas, reduzindo a orientação do material junto das paredes, transformando uma zona que sem o sistema RHCM, seria orientada (zona amorfa), em zona cristalina. Este facto é acentuado com o aumento da 2ª pressão, como se observa para E2 e E3.

Na Tabela 10, é possível observar as condições B, C e D, o que estas têm em comum é o facto de serem condições com pigmento e aplicação do sistema RHCM, para três valores de 2ª pressão e  $T_s$ .

Tabela 10 - Imagens de microscopia de luz polarizada da secção transversal das condições A, B, C e D.

Condição	2ª Pressão (bar)		
	(1) 40	(2) 60	(3) 80
A	Sem RHCM		
B	70		
C	90		
D	110		

Condição	Temperatura da Superfície (°C)	2ª Pressão (bar)		
		(1) 40	(2) 60	(3) 80
A	Sem RHCM			
B	70			
C	90			
D	110			

Através da tabela 10, verifica-se a alteração da microestrutura da peça, para diferentes  $T_s$  e 2ª pressão, em amostras com pigmento. A condição A vem repetida por uma questão de comparação entre o método convencional de injeção (sem RHCM) e o método com o sistema RHCM.

Analisando a condição B, tem-se uma microestrutura menos perceptível, pela utilização de pigmentos e do sistema RHCM e, por isso, fica ligeiramente mais difícil identificar o desenvolvimento das várias camadas. Nesta condição, para uma  $T_s$  de 70°C, verifica-se a eliminação parcial da camada orientada, ou seja, da casca. Isto acontece devido à presença da temperatura de superfície, a qual reduz o arrefecimento prematuro do fundido, quando este entra em contato com as paredes do molde, provocando a diminuição (ou eliminação) das taxas de corte, e conseqüentemente não favorece a sua orientação, como acontece no método convencional. Na realidade da condição de A para B, vê-se a alteração da zona orientada, a casca, para uma casca mais heterogênea com a presença de zonas orientadas e ao mesmo tempo de zonas transcristalinas (estrutura cristalina mal desenvolvida).

O efeito da 2ª pressão, na condição B, na presença do sistema RHCM, faz aumentar a zona transcristalina, sendo maior a presença de esferulites de menor dimensão, que favorecem a cristalinidade do material.

Na condição C, tem-se uma  $T_s$  de 90°C, no qual o aumento da 2ª pressão, de 40 (C1) para 60 bar (C2), faz aumentar a zona transcristalina da microestrutura e, ao mesmo tempo provoca o aparecimento de uma zona orientada, distanciada da extremidade, que se torna mais clara na condição C3, de 80 bar.

Este facto, visível na imagem C3, apresenta-se com uma casca muito pequena, uma subcasca ou zona de transição, com formação de pequenas esferulites, de seguida uma zona bastante orientada e, só depois, a zona de transição e núcleo. Comparando com o desenvolvimento morfológico comum neste tipo de material, observa-se a existência de uma camada orientada, que aparece no meio da zona de transição. A causa deste acontecimento não surge na literatura, muito por causa dos escassos estudos realizados à morfologia do PP com aplicação do sistema RHCM. Assim tentar-se-á explicar o aparecimento deste facto. Numa primeira observação vê-se que o seu aparecimento ocorre para temperaturas mais elevadas de superfície, mantendo a 2ª pressão constante, sendo que para uma temperatura de 90°C, o seu aparecimento ocorre com o aumento da 2ª pressão. Nas amostras verifica-se que a respetiva

zona orientada tem tendência a criar-se em forma de retângulo arredondado e a sua conceção não é uniforme talvez pelo facto do sistema de arrefecimento do molde, não ser uniforme, originando variações no desenvolvimento morfológico.

De modo a explicar, nesta situação tem-se, em primeiro lugar, o facto de esse acontecimento estar associado à aplicação do sistema RHCM. Este, por sua vez, origina a elevação da temperatura da superfície, fazendo com que o fundido, quando injetado no molde, flua com maior facilidade. Assim evita-se o arrefecimento prematuro do fundido quando este entra em contacto com as paredes do molde, situação que não como acontece no método convencional e que dá origem à primeira camada, a casca. Neste caso, o que acontece é que a “casca” obtida está dividida em duas zonas, uma amorfa (orientada) muito reduzida e outra zona cristalina. Tem-se assim uma casca mais cristalina, com a presença de esferulites pouco desenvolvidas. De seguida tem-se a zona orientada, incomum (relativamente às estruturas tipicamente desenvolvidas). Este desenvolvimento morfológico pode ter surgido devido a uma sobreposição de material das camadas inicialmente formadas. Estas ocorrem durante a fase de injeção e pressurização das diferentes camadas, ocorrendo uma distribuição na morfologia da fase amorfa e cristalina. Inicialmente, na fase de injeção, o polímero fundido (amorfo) quando injetado, entra em contacto com as paredes quentes do molde e tende a fluir melhor devido a diminuição das taxas de corte, formando uma pequena casca e num curto espaço de tempo (até se dar a fase de pressurização), ocorrendo o desenvolvimento típico da morfologia, casca, sub-casca e núcleo. De seguida, ocorre a fase de pressurização que faz com que o material fundido, ainda quente, da zona de transição ou do núcleo, escorregue sobre a camada inicialmente formada. Este escorregamento é então provocado pela aplicação pela da 2ª pressão e facilitado pela  $T_s$  ainda alta que se encontra durante a fase de pressurização. Prevê-se assim que haja uma sobreposição de camadas, onde a camada cristalina (esferulites) se sobrepõem á camada amorfa (orientada). Esta zona amorfa (zona orientada), necessita de um estudo aprofundado, de modo a perceber a sua formação.

A explicação apresentada anteriormente, baseia-se numa teoria estudada recentemente por Wang GL et al., onde é descrito um desenvolvimento morfológico que possui fases alternadas, onde existe uma sobreposição das camadas amorfas e cristalinas [25].

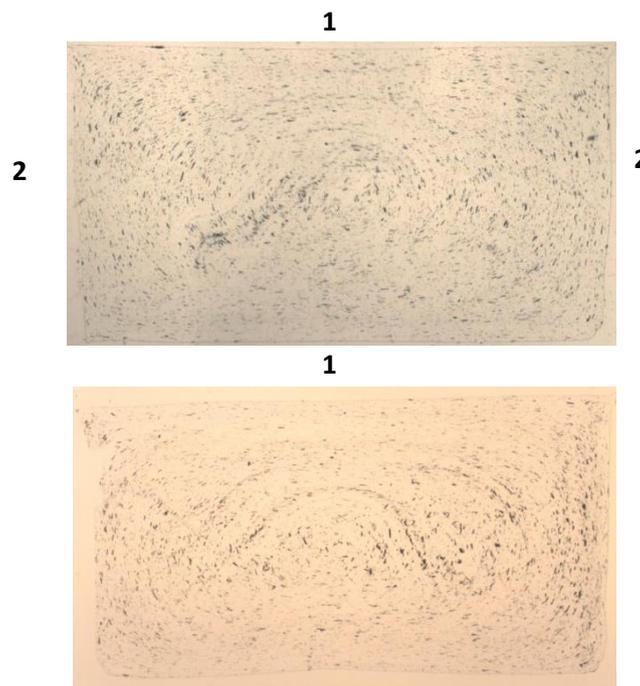
Em todas as condições A,B, C e D, para uma  $T_s$  constante a variação da 2ª pressão origina um ligeiro aumento da zona transcristalina, ou seja, ocorre aumento da zona cristalina

mal desenvolvida na direção casca núcleo, caracterizada por esferulites de tamanho pequeno e variável.

#### **4.2.2. Microscopia de campo claro**

Com a microscopia de campo claro, pretendeu-se observar a distribuição de pigmentos, para as condições A, B, C e D, que são as que contêm partículas metálicas na matriz. Pretende-se assim, avaliar a influência da 2ª pressão e da Ts na distribuição dos mesmos. Para se obter uma melhor observação da distribuição dos pigmentos, optou-se por analisar as amostras da secção longitudinal do provete.

Na figura 46, tem-se um exemplo de duas amostras analisadas na secção transversal, com e sem o sistema RHCM, condição A1 (cima) e B1 (baixo), respetivamente. No Anexo 5 é possível observar as amostras da secção transversal obtidas em microscopia em campo claro.



**Figura 46- Imagens de microscopia de campo claro, da condição A1 (cima) e B1 (baixo).**

Analisando a figura 46, para as amostras da secção transversal do provete, verifica-se que as partículas metálicas têm tendência a posicionar-se em volta do centro da amostra, em forma de espiral, relativamente bem distribuídas. Relativamente à orientação das partículas, vê-se que as partículas têm tendência a posicionar-se paralelamente à superfície 1 e 2 da amostra. A única diferença notada foi que, com o aumento da Ts, verificava-se uma ligeira alteração dessa orientação junto da superfície 2.

Tabela 11- Imagens em microscopia de campo claro das condições A e B

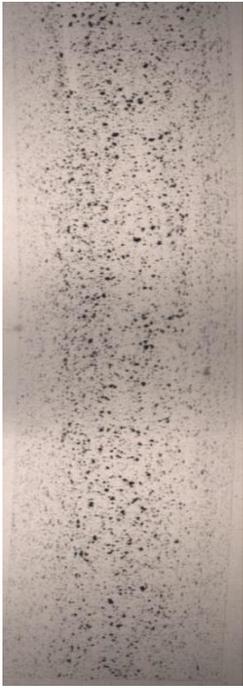
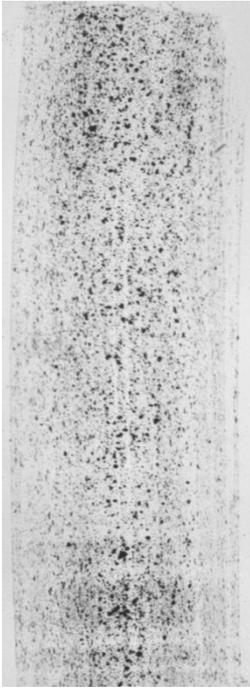
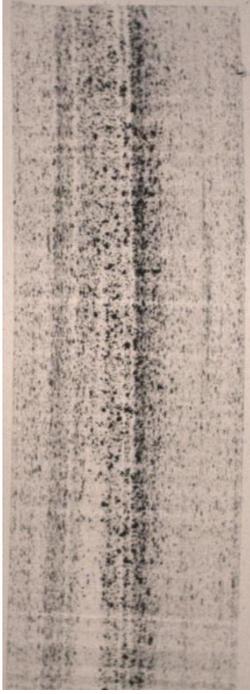
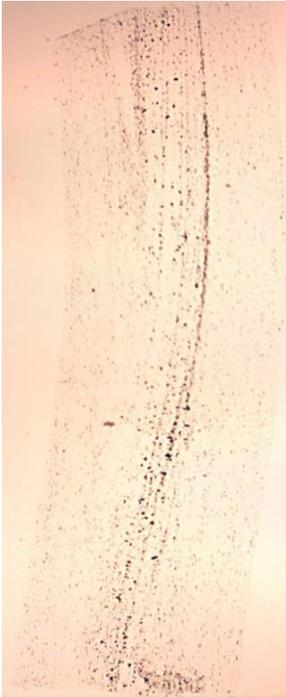
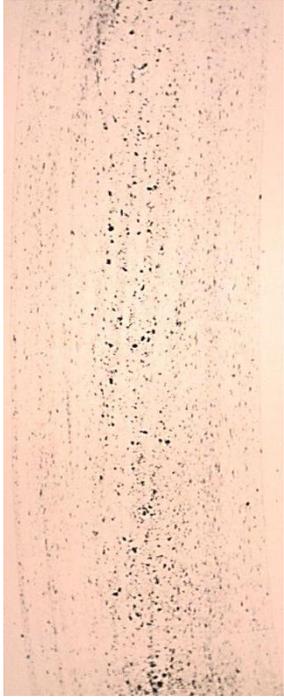
Condição		Segunda Pressão (bar)		
		(1) 40	(2) 60	(3) 80
A	Sem RHCM			
				
B	70			

Tabela 12 - Imagens em microscopia de campo claro das condições C e D.

Condição		Segunda Pressão (bar)		
		40	60	80
C	90			
				
D	110			

Na análise da distribuição dos pigmentos das amostras longitudinais observa-se, de um modo geral, a existência de uma boa distribuição dos pigmentos em todas as condições, sendo essa distribuição mais ou menos uniforme ao longo da secção estudada. Visto que a distribuição não é influenciada pela variáveis estudadas. Por outro lado, fez-se uma análise da orientação das partículas pois notava-se alterações dentro das condições estudadas.

Para a condição A, efetuada pelo método convencional (sem o sistema RHCM), o aumento da 2ª pressão provoca uma ligeira concentração dos pigmentos metálicos para o centro da amostra (da peça), e nessa concentração central tem-se uma orientação mais aleatória, relativamente às extremidades. A mesma situação é visível para a condição B, relativamente à concentração e orientação na zona central da amostra. Nestas duas condições verifica-se um aumento do número de partículas orientadas paralelamente ao plano de superfície, causado pelo aumento da segunda pressão. A influência da aplicação do sistema RHCM, entre a condição A e B, é irrelevante, sendo que não se observa grandes alterações.

Na condição C1 e D1 (ambas para a pressão de 40 bar), verifica-se que quando se mantém a 2ª pressão estável e se aumenta a  $T_s$ , tem-se um aumento do número de partículas metálicas orientadas ao plano de superfície, ou seja a espessura da camada com essas partículas orientadas é maior, o que faz com que a zona central, onde se verifica partículas com orientação aleatória, tenha menor dimensão. Este facto é bem visível e acontece de forma gradual com o aumento da  $T_s$ , sendo a grande diferença notada na alteração da  $T_s$  de 70°C para 90°C, sendo que de 90° para 110°C, não se visualiza grandes alterações. Para as pressões de 60 bar e 80 bar, verifica-se a mesma situação, descrita anteriormente.

Essa maior orientação das partículas na direção do fluxo, pode estar relacionado com o escoamento facilitado pela aplicação do sistema RHCM.

Outro facto que se pode mencionar, é a alteração do tamanho das partículas metálicas, que com o aumento da temperatura da superfície tendem ligeiramente a diminuir, principalmente nas zonas mais próximas da superfície.

### 4.3. Propriedades mecânicas

No estudo das propriedades mecânicas, procurou-se analisar o comportamento do material com e sem a aplicação do sistema RCHM e, assim, perceber qual a influência de se acrescentar pigmentos ao polímero puro juntamente com a variação da temperatura da superfície e 2ª pressão. Começou-se por analisar o comportamento mecânico entre o polímero puro, e o polímero com pigmentos metálicos.

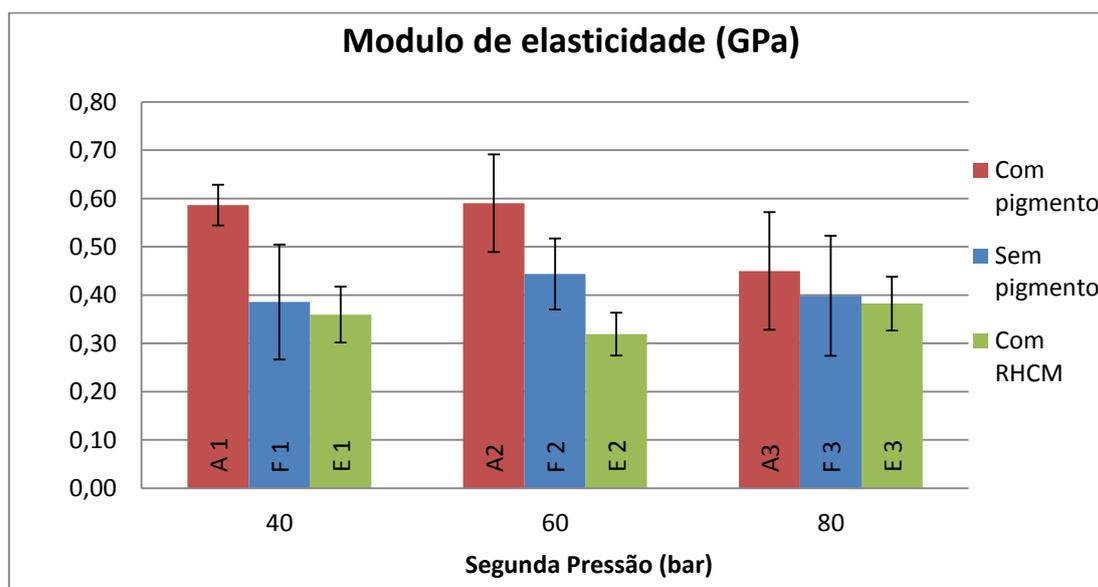


Figura 47 - Gráfico dos valores médios do módulo de elasticidade para as condições A, F e E

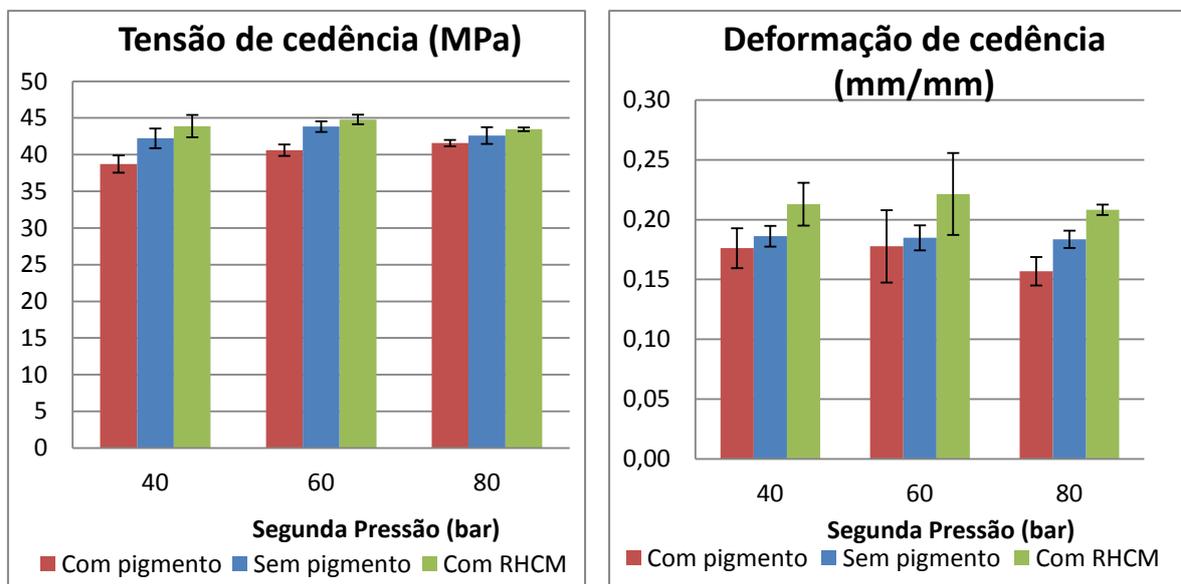
A figura 47, mostra os resultados obtidos do módulo de elasticidade. O facto de não se usar o extensómetro não foi possível obter valores mais realistas. Numa primeira observação tem-se que a condição A apresenta maiores valores do módulo de elasticidade comparado com a condição F, devido à presença de pigmentos metálicos na matriz polimérica, que conferem rigidez à mesma. Comparando a condição A com F, vê-se que os pigmentos metálicos favorecem o módulo de elasticidade, em média 25% (condição A1 e A2). Ao adicionar pigmentos, este funciona como agente nucleante, aumentando a cristalização, que por sua vez, origina mais zonas cristalinas que levam a melhores propriedades mecânicas.

Na condição A, ocorre um aumento da segunda pressão (de 40 até 80 bar). Verifica-se uma maior diferença do módulo na condição A3, onde a 2ª pressão é mais elevada. O aumento de 20 bar entre a condição A1 e A2, não tem influência no módulo, mas o mesmo aumento

provoca uma diminuição do módulo, verificando-se uma tendência à diminuição do módulo para maiores valores 2ª pressão.

Na comparação do módulo de elasticidade, em peças obtidas pelo método convencional e com o sistema RHCM, condição F e E respectivamente, verifica-se uma diminuição do módulo de elasticidade na presença da temperatura de superfície.

Na condição F o aumento da 2ª pressão provoca um ligeiro aumento do módulo de elasticidade, relacionado com a microestrutura obtida para cada uma delas vê-se um ligeiro aumento da casca e da sub-casca, que pode levar a esta ocorrência. Para a condição E verificou-se tendência para o aumento do módulo com a 2ª pressão, ocorrendo neste caso, uma ligeira variação de valores que podem estar relacionados com a estrutura anteriormente discutida.



**Figura 48 - Gráficos relativos à tensão de cedência (à esquerda) e deformação de cedência (à direita), para as condições A, F e E**

Na figura 48, tem-se os resultados obtidos para a tensão e deformação de cedência.

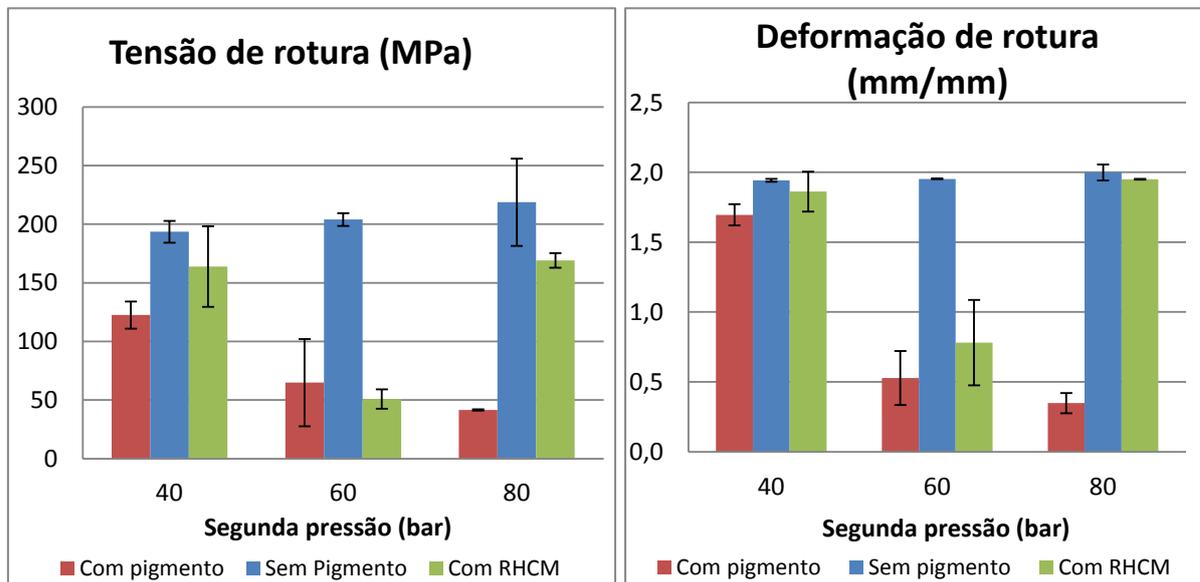
Numa análise aos dados da figura 48, vê-se que existe uma diminuição da tensão de cedência quando se adiciona pigmentos ao polímero virgem (F para A), por outro lado, a utilização do sistema RHCM provoca um aumento da tensão de cedência (F para E), com PP virgem. Quando se aplica o sistema RHCM, observa-se uma maior cristalinidade do material e,

isto leva a um maior constrangimento das cadeias (torna o material mais tenaz), e consequentemente a um aumento da tensão de cedência.

Relativamente à 2ª pressão, observa-se que existe um ligeiro aumento da tensão de cedência (condição A), por outro lado na condição F e E, a variação da tensão de cedência com o aumento da 2ª pressão é muito baixa.

Na deformação de cedência, para a condição A verifica-se uma diminuição valores de deformação à cedência, em média entre 10 a 20 % (dependendo da 2ª pressão aplicada), isto acontece porque os pigmentos metálicos contribuem para a diminuição das deformações. Já a aplicação do sistema RHCM (condição E), promoveu o aumento da deformação a cedência em média entre 9 e 18 %, comparado com o processo convencional. Este aumento da deformação à cedência pode ser efeito da formação de zonas orientadas, que foram observadas nas amostras desta condição.

Observando o efeito da variação da 2ª pressão, pode dizer-se que o mesmo é insignificante para as três condições pois não se notam grandes diferenças.



**Figura 49 - Gráficos relativos à tensão de rotura (à esquerda) e deformação de rotura (à direita), para as condições A, F e E**

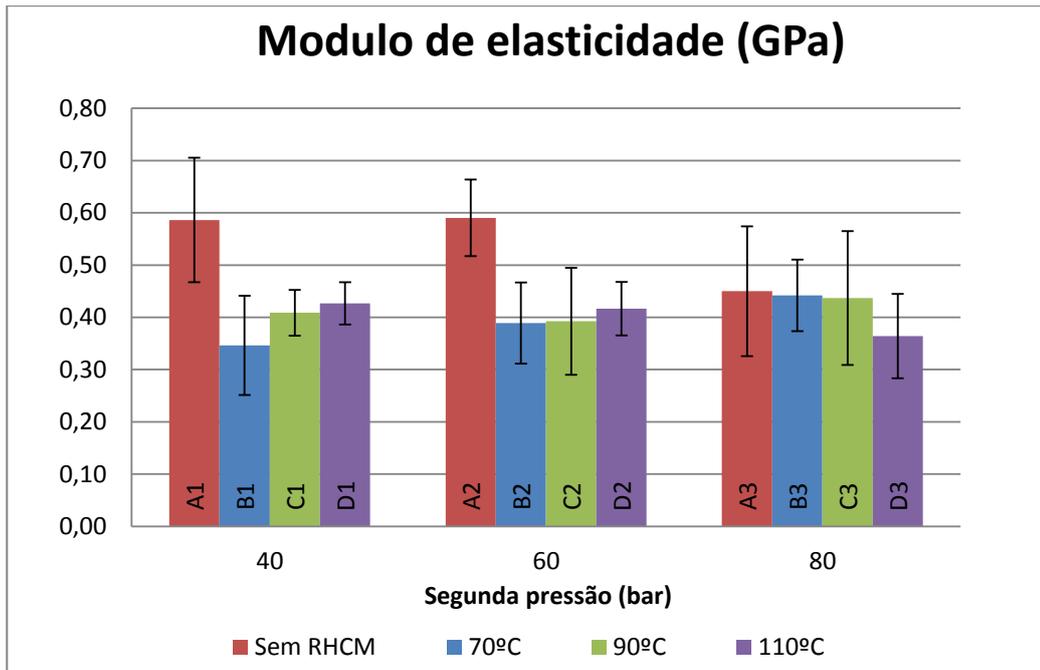
Na figura 49, tem-se uma diminuição da tensão de rotura quando se adiciona pigmentos metálico à matriz polimérica virgem e também quando se aplica o sistema RHCM ao método convencional, quando se injeta polímero virgem. É possível observar que para os valores de 2ª pressão de 60 e 80 bar, ocorre uma diminuição da tensão de rotura em média de 72% com a aplicação de pigmentos à matriz, que se traduz numa elevada perda de propriedades à rotura com este feito. O mesmo se verifica para a deformação de rotura.

O aumento da 2ª pressão faz diminuir a tensão de rotura, na condição A e contrariamente, faz aumentá-la para o PP virgem. Com a aplicação do sistema RHCM, os valores obtidos não são satisfatórios, uma vez que existe uma grande variação dos valores da tensão de rotura, com o aumento da 2ª pressão, mas, no entanto, verifica-se uma diminuição da mesma, comparada com o método convencional.

No gráfico da deformação à rotura, verifica-se que a utilização do sistema RHCM, tem-se uma diminuição da deformação à rotura, mas os valores obtidos apresentam uma variação com o aumento da 2ª pressão, não sendo possível prever a sua influência.

Em ambas as propriedades de rotura (tensão e deformação), a obtenção de variação de valores, pode estar relacionada com microestrutura incomum que se obteve nos ensaios de microscopia de luz polariza. A alternância de camadas, amorfa e cristalina, pode ter contribuído para esta variação, sendo necessário fazer um estudo aprofundado para perceber tal perturbação.

Nos próximos dados, discutir-se-á os resultados obtidos para as condições nas quais se usaram PP com pigmentos metálicos, com a moldação por injeção convencional e o sistema RHCM (para temperaturas de 70°C, 90°C e 110°C). As condições observadas foram a A,B,C, e D.



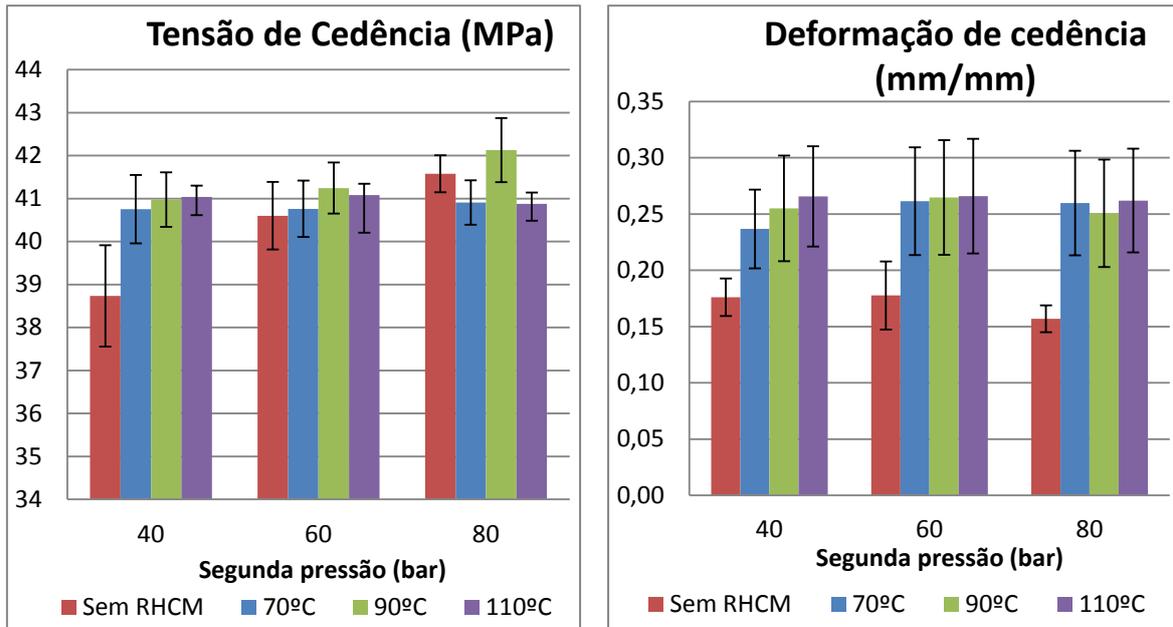
**Figura 50 - Gráfico dos valores médios do módulo de elasticidade para as condições A, B, C e D.**

Na figura 50, vê-se a variação do módulo de elasticidade para as diferentes condições. Numa primeira observação, vê-se que para a condição A (método convencional) obteve-se módulos de elasticidade mais elevado do que aqueles obtidos para o sistema RHCM, onde existe aproximadamente uma redução de 37% da condição A para as restantes, para valores de 40 e 60 bar, sendo que para a condição de 80 bar, a redução foi muito pequena.

Comparando as condições com o sistema RHCM, observou-se que quando se manteve constante a 2ª pressão e se variou a  $T_s$  em 70°C, 90°C e 110°C, ocorreu um aumento do módulo de elasticidade. Este facto só não se verificou para a condição de 80 bar, onde aconteceu o oposto, uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura.

Dentro das condições onde se utilizou RHCM, para a mesma  $T_s$ , houve variação do valores do módulo de elasticidade, apresentando tendências de evolução diferente, sendo assim difícil prever o efeito da 2ª pressão com o sistema, nesta propriedade mecânica.

Analisando os resultados obtidos para a cedência, figura 51, vê-se de um modo geral que o sistema RHCM, quando aplicado, ajuda a obter maiores valores de tensão e deformação de cedência comparando com o método convencional.



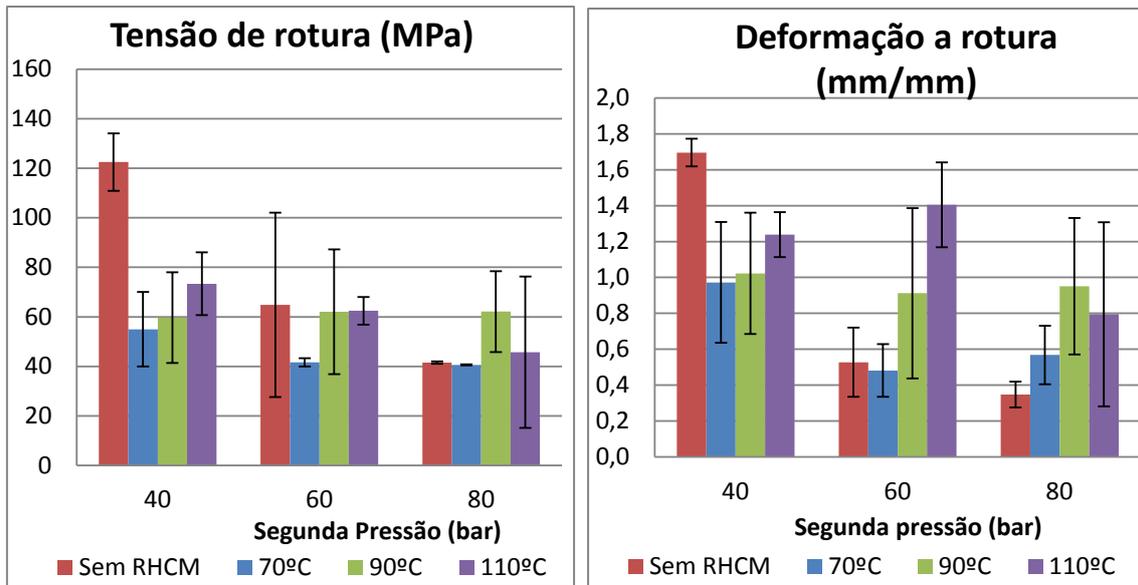
**Figura 51 - Gráficos relativos à tensão de cedência (à direita) e deformação de cedência (à esquerda), para as condições A, B, C e D.**

Para a tensão de cedência, tem-se que numa 2ª pressão constante, no caso de 40 e 60 bar, ocorre um aumento da tensão de cedência com o aumento da  $T_s$ . Para a pressão de 80 bar, ocorre uma ligeira discordância de valores, o que faz com que não se possa compreender o efeito da aplicação do sistema RHCM para uma pressão constante de 80 bar.

Por outro lado, de modo a perceber o efeito da 2ª pressão, manteve-se contante a  $T_s$  e alterou-se apenas a 2ª pressão. No geral verifica-se um aumento da tensão de cedência do material com um aumento da 2ª pressão para a condição sem o sistema RHCM, sendo que para as  $T_s$  de 70°C e 90°C, esse aumento não é tao acentuado. Para a condição de 110°C não se verifica influência da 2ª pressão na tensão de cedência.

Relativamente à deformação da cedência, vê-se que existe um aumento da deformação de cedência com a aplicação do sistema RHCM. Para uma 2ª pressão constante ocorre um aumento da deformação com o aumento da  $T_s$ , este acontecimento é bem visível para a condição de 40 bar, sendo que para 60 e 80 bar, a alteração mais significativa notou-se apenas com a aplicação do sistema RHCM (comparado ao método convencional) por outro lado, a alteração da  $T_s$  com o sistema RHCM, manteve constante os valores obtido na deformação de cedência.

A alteração da 2ª pressão tem apenas um ligeiro efeito nos resultados obtidos para a deformação de cedência. Para uma  $T_s$  de 70°C, o aumento da 2ª pressão, traduz-se faz um pouco na deformação de cedência. Para 90°C e 110°C o efeito da alteração da 2ª pressão é irrelevante.



**Figura 52 - Gráficos relativos à tensão de rotura (à esquerda) e deformação de rotura (à direita), para as condições A, B, C e D.**

Nos gráficos de tensão de rotura e deformação de rotura, figura 52, obteve-se resultados com maior variação de valores dentro da cada condição (A, B, C e D), daí a obtenção de maiores desvios padrão. Numa primeira observação, vê-se que a aplicação do sistema RHCM faz diminuir consideravelmente a tensão de rotura, para uma pressão de 40 bar. Contrariamente para uma pressão de 60 e 80 bar, a tensão de rotura tem tendência a aumentar com a aplicação sistema. Verifica-se através do gráfico que a tendência é o aumento da tensão de rotura com o aumento da  $T_s$  (B, C e D), como se pode verificar nas condições 1, 2 e 3.

Comparando as condições onde se aplicou o sistema RHCM (B, C e D), verifica-se um aumento da tensão de rotura com o aumento da  $T_s$  (para cada uma das 2ª pressão). Contrariamente, em B, C e D, quando se mantem a  $T_s$ , e se altera a 2ª pressão, ocorre uma diminuição da tensão de rotura com o aumento da segunda pressão.

Na deformação de rotura, a aplicação a do sistema RHCM para uma pressão de 40 bar, desfavorece a deformação de rotura, por outro lado, para 60 e 80 bar favorece deformação de rotura. Para as condições B,C e D (todas com o sistema RHCM), o aumento da Ts provoca um aumento da deformação de rotura. Para uma 2ª pressão de 60 bar nota-se mais este acontecimento, sendo que na condição de 80 bar ocorre uma ligeira diminuição da deformação para a condição D3. Esta anormalidade dos valores obtidos pode estar relacionada com a microestrutura desenvolvida na fase de injeção, e que influencia o comportamento mecânico do material, sendo mais significativo nesta propriedade de deformação a rotura.

O efeito do aumento 2ª pressão para as condições B, C e D, não é muito afirmativo pois ocorre uma ligeira variação de valores da deformação de rotura, sendo que os valores têm tendência a diminuir, com o respetivo aumento.



## **Capítulo 5**

---

### **Conclusão e Trabalhos futuros**

## 5.1. Conclusão

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, verificou-se periodicamente a sua eficiência no aquecimento e, de seguida, caracterizaram-se as peças injetadas a nível mecânico e morfológico. Esta caracterização permitiu estudar as diferenças entre o método convencional e o método com o sistema RHCM, nas respetivas propriedades mecânicas e morfológicas.

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 3 lâmpadas, a velocidade máxima de aquecimento obtida, foi de 0,64 °C/s e, para o sistema com 6 lâmpadas, foi de 1,59 °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 escolha do refletor e da condutividade térmica do molde (que são fatores cruciais na eficiência deste tipo de sistema RHCM). O refletor confirmou-se como uma peça de extrema importância neste sistema ao provocar grandes diferenças na velocidade de aquecimento. A verdade é que a sua utilização e o material selecionado para o mesmo, tornam o processo mais eficiente aumentando a velocidade de aquecimento.

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 o PP com pigmento tem tendência a desenvolver zonas transcristalinas, com a presença de esferulites mal desenvolvidas. A aplicação do sistema RHCM ao PP virgem e ao PP com pigmento permitiu obter uma estrutura morfológica, diferente daquela que se obtém no método convencional. Essa estrutura apresentou uma variação alternada das camadas cristalinas e amorfas. Este acontecimento foi originado pela aplicação de altas  $T_s$  juntamente com diferentes 2º pressões e a sua explicação está ligada a uma possível sobreposição de camadas em série durante a fase de enchimento e pressurização. Verificou-se que tal estrutura era formada para temperaturas de superfície de 90°C ou 110°C e, tornava-se mais visível, em valores superiores de segunda pressão, 60 e 80 bar.

No que toca ao estudo da distribuição dos pigmentos metálicos, não se registaram alterações, em função da temperatura de superfície e segunda pressão. Conclui-se, no geral, que nas amostras analisadas foi verificada uma boa distribuição dos pigmentos, apresentando, por vezes, uma certa homogeneidade, ao longo de cada amostra. Foi observado ainda que o aumento da segunda pressão (mantendo constante a temperatura de superfície), provoca uma ligeira tendência para a concentração das partículas de pigmento no centro das amostras que se encontram com uma orientação aleatória. Por outro lado, analisou-se a orientação das partículas ao longo da amostra, captando uma maior orientação preferencial das partículas na direção do fluxo (paralelamente ao plano de superfície), isto tudo com a aplicação do sistema RHCM comparado com o método convencional, onde uma pequena percentagem das partículas fica orientada na direção do fluxo.

A nível do comportamento mecânico, efetuaram-se ensaios de tração, de modo a estudar as propriedades mecânicas do PP virgem e do PP com pigmentos no método convencional e, obviamente, no método RHCM. No método convencional o facto de se ter PP com pigmento origina um maior módulo de elasticidade mas, por outro lado, tem-se piores propriedades à cedência e à rotura (ambas na tensão e deformação). Quando se compara o RHCM com o método convencional, tem-se uma ligeira diminuição do módulo de elasticidade e das propriedades à rotura (tensão e deformação) e, por fim, um aumento ligeiro das propriedades à cedência, quando se está a injetar o PP virgem.

Para as peças injetadas com PP e pigmento, com o sistema RHCM, observou-se o mesmo comportamento que o PP virgem, na medida em que ocorre uma diminuição do módulo de elasticidade (comparado com o método convencional) e das propriedades à rotura. Por outro lado, melhora o comportamento à cedência.

De um modo geral, o processo RHCM, a nível de comportamento mecânico, torna as peças menos rígidas, tornando inviável a sua utilização em peças que tenham como requisitos estar sujeitas a esforços.

## 5.2. 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, com um novo refletor que tenha seja feita de um material mais indicado em que se possa aumentar a relatividade da radiação infravermelha, para que se possa aumentar a eficiência do aquecimento do molde. Testar também novos materiais para o molde de modo estudar a influência da condutividade térmica do material na eficiência deste tipo de sistema. Por fim, automatizar o sistema criado, ou seja, colocar o processo em produzir em automático.
- Realizar um estudo sobre aprofundado da influência do sistema RHCM na microestrutura de polímeros amorfos e semicristalinas, em moldação por injeção.
- Realizar estudos de aplicação do sistema RHCM para eliminação das linhas de soldadura, com pigmentos metálicos, ou com qualquer outro tipo de material.
- Estudar a aplicação do sistema RHCM para produção de peças de alto brilho e também na produção de peças translúcidas (Lentes, por exemplo).
- Realizar estudos de com diferentes materiais de difícil processabilidade (Polímeros com aditivos, por exemplo).
- Estudar a implementação do sistema RHCM para produção de microestruturas, com o método convencional de moldação por injeção.
- Estudar a implementação do sistema RHCM na produção de em peças com paredes finas.
- Realizar estudos da influência do sistema RHCM na cristalinidade dos polímeros (PLA, por exemplo)

## **Bibliografia**

- [1]- W. Guilong, Z. Guoqun, L. Huiping and G. Yanjin, “**Analysis of thermal cycling efficiency and optimal design of heating/cooling systems for rapid heat cycle injection molding process**”, *Materials and Design*, 31, 2010, 3426–344.
- [2]- W. Guilong, Z. Guoqun, L. Huiping and G. Yanjin, “**Research on optimization design of the heating/cooling channels for rapid heat cycle molding based on response surface methodology and constrained particle swarm optimization**”, *Expert Systems with Applications*, 38, 2011, 6705–6719.
- [3]- L. Xiping, Z. Guoqun, G. Yanjin and M. Mingxing, “**Multi-objective optimization of heating channels for rapid heating cycle injection mold using Pareto-based genetic algorithm**”, *Polymers for Advanced Technologies*, 21, 2010, 669–678.
- [4]- O. Sangyo, “RCHM Overview”, <http://www.onosg.co.jp/en/RHCM/index.html>, (23 Out. 2012).
- [5]- G. Wang, G. Zhao, H. Li, Y. Guan, “**Multi-objective optimization design of the heating/cooling channels of the steam-heating rapid thermal response mold using particle swarm optimization**”, *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 2011, 790-802.
- [6]- W. Guilong, Z. Guoqun and G. Yanjin, “**Thermal response of an electric heating rapid heat cycle molding mold and its effect on surface appearance and tensile strength of the molded part**”, *Journal of Applied Polymer Science*, 2012.
- [7]- Guilong Wang, Guoqun Zhao, Yanjin Guan, “**Research on optimum heating system design for rapid thermal response mold with electric heating based on response surface methodology and particle swarm optimization**”, *Journal of Applied Polymer Science*, 2010
- [8]- D. Yao, S. Chen and B. H. Kim, “**Rapid Thermal Cycling of Injection Molds: An Overview on Technical Approaches and Applications**”, *Advanced polymer Technologies*, 27, 2008, 233-255.

- [9]- O.Sangyo, "Advanced *RHCM*", <http://www.onosg.co.jp/en/RHCM/advance.html> , ( 15 Out. 2013)
- [10]-O.Sangyo, "Advanced *RHCM*", [http://www.onosg.co.jp/en/RHCM/img/Biomass\\_Plastics.pdf](http://www.onosg.co.jp/en/RHCM/img/Biomass_Plastics.pdf) , ( 15 Out. 2013)
- [11]- H. L. Lin, S. C. Chen, M. C. Jeng, P. S. Minh, J. A. Chang, J. R. Hwang, "**Induction heating with the ring effect for injection molding plates**", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, 2012, 514–522
- [12]- S. C. Chen, W. R. Jong, Y. J. Chang, J. A. Chang, J. C. Cin, "**Rapid mold temperature variation for assisting the micro injection of high aspect ratio micro-feature parts using induction heating technology**", *Journal of micromechanics and microengineering*, 16, 2006, 1783–1791.
- [13]- S. C. Chen, P. S. Minh, J. A. Chang, S. W. Huang, C. H. Huang; "**Mold temperature control using high-frequency proximity effect induced heating**", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, 2012, 216–226.
- [14]- M. Jeng, S. Chen, P. S. Minh, J. Chang, C. Chung, "**Rapid mold temperature control in injection molding by using steam heating**", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, 2010, 1295–1304..
- [15]- S. C. Chen, P. S. Minh, J. A. Chang , "**Gas-assisted mold temperature control for improving the quality of injection molded parts with fiber additives**", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38, 2011, 304–312.
- [16]- S. C. Chen, R.D. Chien, S. H. Lin, M. C. Lin, J. A. Chang, "**Feasibility evaluation of gas-assisted heating for mold surface temperature control during injection molding process**", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36, 2009, 806–812.
- [17]- M. C. Yu, W. B. Young, P. M. Hsu, "**Micro-injection molding with the infrared assisted mold heating system**", *Materials Science and Engineering A*, 460–461, 2007, 288–295.
- [18]- P. C. Chang, S. J. Hwang, "**Simulation of infrared rapid surface heating for injection molding**", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 2006, 3846–3854.

- [19]- Rocha, Romeu Filipe Pereira da, **“Aproveitamento do Calor dos Gases de Escape para Geração de Energia Eléctrica – EconomicUM”**, Braga: Universidade do Minho, 2011, Dissertação de Mestrado.
- [20]- B. Nardin, B. Zagar, A. Glojek, D. Krizaj, **“Adaptive system for electrically driven thermoregulation of moulds for injection moulding”**, Journal of Materials Processing Technology ,187–188, 2007, 690–693.
- [21]- G. Wang, G. Zhao, H. Li, Y. Guan, **“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, 31, 2010, 382–395.
- [22]- H&C Hotsys, <http://www.hotsys.co.kr>, (15 Out. 2012).
- [23]- Lopes, Miguel Venâncio, **“Comparison of micro injection mouldings using and infrared variotherm system and a conventional mould setup”**, Braga: Universidade do Minho, 2011, Dissertação de Mestrado.
- [24]- Santos, Isabel Oliveira, **“Estudo de compósitos em polipropileno com pigmentos metálicos para aplicações moldadas por injeção”** Braga: Universidade do Minho, 2012, Dissertação de Mestrado.
- [25]- Wang G., Zhao G. and Wang.X. **“Experimental research on the effects of cavity surfasse temperature on surface appearance properties of the moulded part in rapid heat cycle moulding process”**, Adv Manuf Technol (2013) ,68:1293–1310

## Anexos

### Anexo 1 – Ficha técnica da Lâmpada Osram

#### Product datasheet

#### Technical data

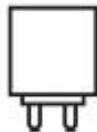
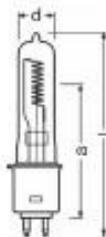
##### Electrical data

Nominal wattage	1000 W
Nominal voltage	240 V

##### Light technical data

Luminous flux	23000 lm
Color temperature	5200 K

##### Dimensions & weight



Product line drawing

Base

Diameter	20.0 mm
Length	102.0 mm
Filament diameter	27.0 mm

##### Lifespan

Lifespan	300 h
----------	-------

##### Additional product data

Base (standard designation)	2 pins
Picto Studio	Yes

##### Certificates & standards

EEL – Energy Label	B
--------------------	---

##### Country specific categorizations

## Anexo 2 – Ficha técnica do material PP Capilene



Technical Data Sheet  
**CAPILENE<sup>®</sup> R 50**  
 Polypropylene Homopolymer

**Description**

**CAPILENE<sup>®</sup> R 50** is a polypropylene homopolymer intended for injection molding, characterized by good flow properties combined with good balance of stiffness and impact.

**Applications**

**CAPILENE<sup>®</sup> R 50** is a general purpose homopolymer. Typical applications are household articles and garden furniture.

**Quality, Environment and Safety Regulations**

Material Safety Data Sheet and Product Safety declarations are available on our web site <http://www.caol.co.il>

Properties		Method	Typical Value*	Unit
<b>Physical</b>				
Melt Flow Rate	(230°C/2.16Kg)	ISO 1133	12	g/10min
<b>Mechanical</b>				
	(50mm/min)			
Tensile Stress at Yield	(50mm/min)	ISO 527-2	32	MPa
Tensile Strain at Yield	(50mm/min)	ISO 527-2	11	%
Flexural Modulus	(5mm/min)	ISO 178	1400	MPa
Izod Impact Strength, notched	(+23°C)	ISO 180	2.3	KJ/m <sup>2</sup>
<b>Thermal</b>				
Vicat Softening Temperature	(10N)	ISO 306	155	°C
Heat Deflection Temperature	(0.45MPa)	ISO 75-2	85	°C

\*Typical values; not to be construed as specifications.

Fax: 972-4-8466958  
 Email: [techserv@caol.co.il](mailto:techserv@caol.co.il) Web: <http://www.caol.co.il>  
 Carmel Olefins Ltd. P.O.B 1468 Haifa 31014 Israel

Last updated: Feb-2008

The information contained herein is to our knowledge accurate and reliable as of the date of publication. Carmel Olefins extends no warranties and makes no representations as to the accuracy or completeness of the information contained herein and assumes no responsibility regarding the consequences of its use or for any printing errors. Our products are intended for sale to industrial and commercial customers. It is the customer's responsibility to inspect and test our products in order to satisfy himself as to the suitability of the products for the customer's particular purpose. The customer is also responsible for the appropriate, safe and legal use, processing and handling of our products.

## Anexo 3 – Ficha técnica do pigmento metálico



**PRODUCT DATA SHEET**
**SPARKLE SILVET® 880-30-E1 (SLL) Aluminum Pigment****PRODUCT DESCRIPTION**

Sparkle Silvet® 880-30-E1 is a medium particle size, bright Sparkle Silver® aluminum pigment produced in pellet form to reduce the potential for generating airborne particles and to improve ease of handling. The pellets are composed of 70% aluminum pigment carried in 30% polyolefin and are produced by a low shear process for easy dispersion. The pigment flake has a cornflake geometry. The particle size distribution range is controlled to produce clean chromatic effects when used with transparent pigments and dyes. This grade will produce bright metallic effects with small grain aesthetics when used alone or with other pigments.

- Medium Sparkle Silvet® Flake Grade
- Aluminum Pigment Granules
- Non-Leaking

**PRODUCT APPLICATION**

Sparkle Silvet® E1 grades are easy to disperse and are compatible with a variety of polymers, particularly polyolefins. They are typically used to make concentrates or compounds for use in final processing by injection molding, extrusion, blow molding or blown film processes. In some cases Sparkle Silvet® E1 can be used directly in end use processing but care must be taken to assure complete dispersion is achieved. Their pellet or granular form make them easy to handle and incorporate. Additionally, Sparkle Silvet® E1 grades can be employed in co-extruded powder coating applications.

**TECHNICAL DATA**

Non-Volatile:	98.5 minimum by weight
Particle Size (microns):	27
Specific Gravity:	ca 1.72
Composition:	70.0% (±2.00) Al flake, 30.0% (±2.00) carrier
Carrier:	Polyolefin
Carrier Percentage:	30%

**INCORPORATION GUIDELINES**

It is normally sufficient to tumble blend the pellets with the base resin and any additional colourants or additives before processing. Incorporation techniques should not subject the flakes to high shear forces.

**SAFETY AND HANDLING**

Aluminum pigment should be stored in the original shipping container and kept tightly sealed. Store containers in a dry room at a temperature below the flash point of the solvent. Avoid any conditions that will suspend or float the particles in the air, creating a dust cloud. For additional information, please refer to MSDS 100 for this product, or the Aluminum Association's "TR-2" brochure, both of which are available by calling the Silberline phone number at the bottom of the page.

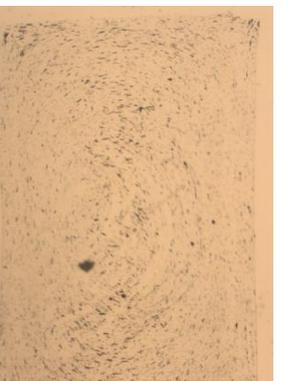
All statements, information and data presented herein are believed to be accurate and reliable but are not to be taken as a guarantee, express warranty or implied warranty of merchantability or fitness for a particular purpose, or representation, express or implied, for which seller assumes legal responsibility, and they are offered solely for your consideration, investigation and verification. Statements or suggestions concerning possible use of this product are made without representation or warranty that any such use is free of patent infringement and are not recommendations to infringe on any patent. © 2006 Silberline Manufacturing Co., Inc. All Rights Reserved.

Anexo 4 – Tabelas com as velocidades médias (aquecimento e arrefecimento) para os sistemas de 3 e 6 lâmpadas.

Condição	X1		X2		X3	
	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão
Velocidade de aquecimento - Cima	0,42	0,07	0,62	0,12	0,64	0,08
Velocidade de aquecimento - Baixo	0,40	0,07	0,57	0,11	0,58	0,08
Velocidade de arrefecimento - Cima	0,40	0,07	0,46	0,10	0,60	0,12
Velocidade de arrefecimento- Baixo	0,37	0,07	0,41	0,10	0,55	0,11

Condição	Y1		Y2		Y3		Alumínio	
	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão
Velocidade de aquecimento - Cima	0,95	0,12	1,59	0,03	1,47	0,16	0,67	0,06
Velocidade de aquecimento - Baixo	0,79	0,13	1,31	0,03	1,33	0,16	0,61	0,06
Velocidade de arrefecimento - Cima	0,55	0,11	0,54	0,11	0,65	0,21	0,69	0,27
Velocidade de arrefecimento- Baixo	0,48	0,09	0,44	0,09	0,58	0,16	0,63	0,25

Anexo 5 – Imagens de microscopia de campo claro, da secção transversal.

Condição		Segunda Pressão (bar)			
		40	60	80	
A	Temperatura de Superfície (°C)	Sem RHCM			
		70°C			
		90°C			
		110°C			
B					
C					
D					

Anexo 6 – Tabela com dados relativos aos ensaios de tração

<b>Condição</b>	<b>Módulo de Young</b>		<b>Tensão de Rotura</b>		<b>Deformação de Rotura</b>		<b>Tensão de Cedência</b>		<b>Deformação de cedência</b>	
	Modulo	D. Padrão	Modulo	D. padrão	Modulo	D. padrão	Modulo	D. padrão	Modulo	D. padrão
<b>A1</b>	0,59	0,12	122,51	11,60	1,70	0,08	38,73	1,18	0,18	0,02
<b>A2</b>	0,59	0,07	64,85	37,19	0,53	0,19	40,60	0,79	0,18	0,03
<b>A3</b>	0,45	0,12	41,55	0,47	0,35	0,07	41,58	0,43	0,16	0,01
<b>B1</b>	0,35	0,10	55,00	15,03	0,97	0,34	40,75	0,80	0,24	0,03
<b>B2</b>	0,39	0,08	41,66	1,64	0,48	0,15	40,76	0,66	0,26	0,05
<b>B3</b>	0,44	0,07	40,61	0,23	0,57	0,16	40,91	0,52	0,26	0,05
<b>C1</b>	0,41	0,04	59,70	18,35	1,02	0,34	40,98	0,63	0,25	0,05
<b>C2</b>	0,39	0,10	62,04	25,20	0,91	0,47	41,24	0,60	0,26	0,05
<b>C3</b>	0,44	0,13	62,15	16,34	0,95	0,38	42,12	0,75	0,25	0,05
<b>D1</b>	0,43	0,04	73,39	12,68	1,24	0,13	41,04	0,42	0,27	0,04
<b>D2</b>	0,42	0,05	62,45	5,55	1,40	0,24	41,08	0,87	0,27	0,05
<b>D3</b>	0,36	0,08	45,72	30,55	0,79	0,51	40,88	0,40	0,26	0,05
<b>E1</b>	0,36	0,06	163,87	34,44	1,86	0,14	43,89	1,51	0,21	0,02
<b>E2</b>	0,32	0,04	50,91	8,29	0,78	0,31	44,80	0,65	0,22	0,03
<b>E3</b>	0,38	0,06	169,17	6,29	1,95	0,00	43,46	0,25	0,21	0,00
<b>F1</b>	0,39	0,04	193,50	9,31	1,94	0,01	42,23	1,34	0,19	0,01
<b>F2</b>	0,44	0,10	203,95	5,42	1,95	0,00	43,82	0,72	0,18	0,01
<b>F3</b>	0,40	0,12	218,78	37,24	2,00	0,06	42,61	1,15	0,18	0,01